

Primljen / Received: 6.2.2018.

Ispravljen / Corrected: 14.6.2018.

Prihvaćen / Accepted: 16.6.2018.

Dostupno online / Available online: 10.2.2019.

Mortovi s dodatkom lokalnih industrijskih nusproizvoda

Autori:



Mr.sc. **Marko Čečez**, dipl.ing.građ.
Sveučilište "Džemal Bijedić" Mostar
Građevinski fakultet
marko.ceceez@unmo.ba



Izv.prof.dr.sc. **Merima Šahinagić - Isović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište "Džemal Bijedić" Mostar
Građevinski fakultet
merima.sahinagic@unmo.ba

Prethodno priopćenje

Marko Čečez, Merima Šahinagić - Isović

Mortovi s dodatkom lokalnih industrijskih nusproizvoda

U radu su predstavljene rezultati istraživanja mogućnosti pripreme morta zamjenom cementa s lokalnim industrijskim nusproizvodima silicijskom prašinom i crvenim muljem. Prikazani su rezultati istraživanja svojstava svježeg i očvrstlog morta na pet mješavina u dvije serije. Cement je zamijenjen silicijskom prašinom u udjelu od 10 posto, a crveni mulj je dodavan u udjelima od 0 %, 5 %, 10 %, 15 % i 20 % s obzirom na masu cementa. Prva serija uzoraka je ispitana nakon 28 dana njegoovanja, a druga serija ispitana je nakon propisanog njegoovanja uzoraka izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Rezultati upućuju na zadovoljavajuće ponašanje mješavina s niskim postotkom crvenog mulja.

Ključne riječi:

mort, industrijski nusproizvodi, silicijska prašina, crveni mulj

Preliminary note

Marko Čečez, Merima Šahinagić - Isović

Mortars with addition of local industrial by-products

Results obtained by studying the possibility of replacing cement in mortars with local industrial by-products, i.e. with silica fume and red mud, are provided in the paper. The results of fresh and hardened mortar properties tests conducted on five mixtures in two series are presented. 10% of cement was replaced with silica fume, and 0%, 5%, 10%, 15% and 20% of cement weight was replaced with red mud. The first series was tested after 28 days of curing, and the second series was subjected to freezing and thawing cycles after proper curing, and then submitted to testing. The results point to satisfactory behaviour of mixtures with a low red mud content.

Key words:

mortar, industrial by-products, silica fume, red mud

Vorherige Mitteilung

Marko Čečez, Merima Šahinagić - Isović

Mörtel mit dem Zusatz lokaler industrieller Nebenprodukte

In der Abhandlung werden die Untersuchungsergebnisse der möglichen Mörtelzubereitung vorgestellt, indem man den Zement durch die lokalen industriellen Nebenprodukte Siliziumstaub und Rotschlamm ersetzt. Dargelegt werden die Untersuchungsergebnisse der Eigenschaften frischen und gehärteten Mörtels an fünf Mischungen in zwei Serien. Der Zement wurde durch Siliziumstaub in einem Verhältnis von 10 Prozent ersetzt, und der Rotschlamm wurde in Anteilen von 0%, 5%, 10%, 15% und 20% unter Berücksichtigung der Zementmasse hinzugefügt. Die erste Serie der Proben wurde nach 28 Tagen Pflege getestet, und die zweite Serie wurde nach der vorgeschriebenen Pflege der Proben, die Gefrier- und Auftauzyklen ausgesetzt waren, getestet. Die Ergebnisse zeigen ein zufriedenstellendes Verhalten bei Mischungen mit einem niedrigen Anteil an Rotschlamm auf.

Schlüsselwörter:

Mörtel, industrielle Nebenprodukte, Siliziumstaub, Rotschlamm

1. Uvod

U današnje vrijeme raste potražnja za zamjenskim materijalima koji mogu zamijeniti prirodne sirovine za dobivanje cementnih kompozita. Proizvodnja morta i betona, najrasprostranjenijih materijala na bazi cementa, dostigla je brojne rekorde u posljednjih nekoliko godina. Upotreba prirodnih sirovina prilikom proizvodnje tih kompozita značajno je povećana. Negativan utjecaj na okoliš vidljiv je i po gubitku prirodnih resursa, ali i zagađenju okoliša emisijom štetnih CO₂ plinova prilikom proizvodnje. Ta je proizvodnja izravno odgovorna za približno 8 posto ukupne emisije CO₂ u atmosferu [1], pri čemu prednjači proizvodnja cementa. Cementna industrija ubraja se u jednu od najvećih zagađivača okoline. Prema podacima IMARC grupe, ukupna svjetska proizvodnja cementa u 2010. godini iznosila je približno 3,3 milijarde tona, a u 2017. godini proizvodnja je premašila iznos od 5 milijardi tona, što je na godišnjoj razini povećanje od približno 7 posto [2]. Zanimljiv je podatak da se, prema nekim predviđanjima, proizvodnja cementa u takvim količinama očekivala tek 2050. godine [3].

Jedna od ideja bila je primjena industrijskih nusproizvoda kao sirovine za proizvodnju cementa ili zamjene cementa u kompozitu [4, 5]. Uglavnom su to otpadni materijali koji se ne primjenjuju dalje u industriji. Opravdanost primjene industrijskih nusproizvoda nalazi se u njihovom kemijskom sastavu i veličini čestica [6]. Kao dodatak pri proizvodnji cementa već se do sada uspješno koriste leteći pepeo, silicijska prašina i vapnenac. U ovom radu prikazana su ispitivanja cementnog morta u kojem je u različitim udjelima cement zamijenjen silicijskom prašinom i crvenim muljem.

Crveni mulj je nusproizvod industrijske proizvodnje aluminija Bayerovim postupkom iz boksitne rude. Procjenjuje se da se na jednu tonu proizvedenog aluminija deponira između 0,3 i 2,5 tona crvenog mulja [5]. Eksploatacija boksita u svijetu dosegla je oko 270 milijuna tona u 2016. godini, a ukupno je proizvedeno približno 58 milijuna tona aluminija [7]. To znači da se godišnje prosječno generira više od 120 milijuna tona crvenog mulja [8]. U kemijski sastav crvenog mulja ulaze oksidi željeza, aluminija, natrija, kalcija i silicija što predstavlja dobru osnovu za istraživanje. Kemijski sastav dosta varira u zavisnosti od nalazišta boksita i načina proizvodnje aluminija, a prosječne vrijednosti prikazane su u tablici 1. Prosječna pH-vrijednost crvenog mulja je 10 - 12,5, a veličina čestica je <10 μm [4].

Tablica 2. Granulometrijski sastav pijeska

Otvori sita [mm]	0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8
Prolazi [%]	4,46	9,08	13,13	20,62	30,39	44,52	69,26	99,67	100

Tablica 3. Kemijski sastav crvenog mulja iz odlagališta Dobro Selo

Sastav	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	SiO ₂	MnO	TiO ₂	Ostatak
Udio [%]	16,46	37,85	2,39	10,41	6,79	0,59	1,64	0,516

Tablica 1. Kemijski sastav crvenog mulja [4]

Sastav	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O
Udio [%]	2 - 20	6 - 28	12 - 56	2 - 28	1 - 10

Crveni mulj ne može se u potpunosti smatrati umjetnim pucolanom jer ne zadovoljava sve zahtjeve. Međutim, njegov indeks pucolanske aktivnosti ima povoljne vrijednosti, te predstavlja osnovu za daljnja istraživanja [9]. Crveni mulj se sastoji od aluminijevog i silicijevog oksida pa se može koristiti kao sirovina. Njegov lužnati karakter je kompatibilan s cementnom matricom, a za aktivno formiranje CSH gela trebao bi pH biti veći od 11,5 [10, 11], jer ako je pH manji od 9,5 neće doći do hidratacije. U istraživanju [12] ispitana je hidratacija portland cementa uz dodatak crvenog mulja i zaključak je da se vrijeme hidratacije cementa smanjilo kada je uzorku dodan crveni mulj. Zabilježena su također i istraživanja uporabe crvenog mulja direktno kao klinkera [13, 14]. Osim toga, aktualna su istraživanja dodatka crvenog mulja kao sirovine mortovima i betonima [5, 6, 15]. Postotnim smanjenjem udjela cementa i zamjene crvenim muljem utječe se povoljno na svojstva trajnosti cementnih kompozita [15], ali na štetu reoloških svojstava svježije mase što je potrebno korigirati količinom vode [12, 16]. Tlačna čvrstoća kompozita obično opada dodatkom crvenog mulja [9, 16], ali postoje istraživanja koja upućuju na povećanje tlačne čvrstoće kompozita pri dodatku crvenog mulja [17, 18], na što utječe porijeklo boksita i kemijski sastav [19].

Ovaj rad predstavlja istraživanje svojstava cementnog morta za pet mješavina u kojima se udio cementa zamjenjuje crvenim muljem u udjelima 0 %, 5 %, 10 %, 15 % i 20 % od mase cementa i konstantnim dodatkom silicijske prašine od 10 % mase cementa.

2. Materijali

Cement korišten za pripremanje cementnog morta jest portland cement oznake CEM II/A-M (S-V) 42,5N, s 20 % dodatka zgre i letećeg pepela. Kao sitni agregat primijenjen je usitnjeni separirani vapnenac. Granulometrijski sastav agregata (pijeska) prikazan je u tablici 2.

Crveni mulj dopremljen je s odlagališta Dobro Selo kod Mostara, u Bosni i Hercegovini. Procjenjuje se da je na tom mjestu deponirano približno 10 milijuna tona crvenog mulja. Odlagalište se sastoji od dva armiranobetonska bazena u kojima je crveni mulj prekriven

Tablica 4. Sastav mješavina morta

Oznaka mješavine	Cement [kg/m ³]	Silicijska prašina		Crveni mulj		Ukupno veziva [kg/m ³]	Pijesak [kg/m ³]	v/c omjer	v/v omjer
		[%]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]				
CM1	405	10	45	0	0	450	1350	0,711	0,640
CM2	382,5	10	45	5	22,5	450	1350	0,753	0,640
CM3	360	10	45	10	45	450	1350	0,800	0,640
CM4	337,5	10	45	15	67,5	450	1350	0,853	0,640
CM5	315	10	45	20	90	450	1350	0,914	0,640

slojem vode. Prerada boksita je zaustavljena 1991. godine i od tada odlagalište nije aktivno [20]. Kemijska analiza crvenog mulja provedena je 2016. godine, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 3. Crveni mulj je zbog prisutnosti natrija u svom sastavu potencijalno opasan za okoliš, a posebno ako dođe u direktni kontakt s biljkama [21]. Međutim, mjerenja radioaktivnosti su pokazala da ne postoji povećana radioaktivnost crvenog mulja [22], što znači da se bez opasnosti može upotrebljavati u građevinarstvu. Sastav crvenog mulja pokazuje da postoji određeni zaostatak aluminijevog, silicijevog i kalcijevog oksida. Visok udio željeza daje materijalu prepoznatljivu crvenu boju. Specifična masa crvenog mulja određena je metodom piknometra i iznosi 3,15 g/cm³, a zapreminska masa u zbijenom stanju 1,35 g/cm³. Specifična površina ispitana je prema EN 196-6 metodom propuštanja zraka (Blaine) i iznosi 8300 cm²/g.

Korištena silicijska prašina je porijeklom iz Jajca, Bosna i Hercegovina, i otpadni je materijal u proizvodnji silicijevih legura. Godišnje se generira oko 9.000 - 10.000 tona silicijske prašine u proizvodnji. Veličina čestica je 0,1 do 0,2 μm, što je oko sto puta sitnije od čestica cementa. Silicijska prašina je dodana mješavini u tekućem obliku s 44 % čvrste tvari.

3. Eksperimentalni program

Istraživanje je obuhvatilo analize ponašanja svježeg i očvrslag cementnog morta pri zamjeni udjela cementa crvenim muljem i silicijskom prašinom. Ukupno je pripremljeno pet mješavina u dvije serije i njihov sastav je prikazan u tablici 4. Udio silicijske prašine u svim mješavinama je isti i iznosi 10 % od mase cementa. Udio crvenog mulja je povećavan od 0 do 20 % u inkrementima po 5 % od mase cementa. Mješavina bez crvenog mulja je kontrolna mješavina. Vodovezivni omjer (v/v) iznosio je 0,64 za sve mješavine, a vodocementni omjer (v/c) bio je različit za pojedinu mješavinu (tablica 4). Svi uzorci pripremljeni su prema normi BAS EN 1015-2:2004.

3.1. Ispitivanje svježeg morta

U okviru ispitivanja svježeg morta ispitana su njegova reološka svojstva, zapreminska masa i udio pora. Radi određivanja

reoloških svojstava svježeg morta, ispitana je konzistencija metodom rasprostiranja prema normi BAS EN 1015-3:2004. Za određivanje konzistencije upotrijebljen je automatski potresni stol prema istoj normi. Zapreminska masa u svježem stanju određena je prema normi BAS EN 1015-6:2004 u litrenoj posudi. Udio pora svježeg morta određen je prema BAS EN 1015-7:2004. Ta normi nudi mogućnost ispitivanja primjenom dviju metoda: metodom A "metodom pritiska" i metodom B "metodom alkohola". Za ovo istraživanje odabrana je metoda A.

3.2. Ispitivanje očvrslag morta

Tijekom ispitivanja očvrslag morta ispitane su zapreminska masa u očvrslom stanju, savojna čvrstoća, tlačna čvrstoća te otpornost na smrzavanje. Ispitivanja savojne i tlačne čvrstoće provedena su prema normi BAS EN 1015-11:2002. Svježi mort se ugrađivao u trodijelne čelične kalupe, tako da su od svake mješavine dobivena po tri uzorka za ispitivanje očvrslag morta. Ugradnja u čelične kalupe je provedena na vibrostolu, i uzorci su njegovani minimalno 24 sata, odnosno do dosezanja čvrstoće da se bez oštećenja mogu ukloniti iz kalupa. Uzorci su potom njegovani u vodi 28 dana. Pet mješavina prve serije ispitano je nakon 28 dana njegovanja, a pet mješavina druge serije je nakon njegovanja stavljeno u komoru za zamrzavanje, gdje su bile izložene smrzavanju i odmrzavanju u 25 ciklusa. Temperatura smrzavanja je iznosila -20°C, a temperatura odmrzavanja +20°C. Otpornost na smrzavanje je dobivena uspoređivanjem rezultata tlačne čvrstoće dviju serija.

4. Rezultati ispitivanja

4.1. Rezultati ispitivanja svježeg morta

Da bi mort imao zadovoljavajuću tečnost, rasprostiranje na potresnom stolu trebalo bi biti veće od 140 mm [19, 23]. U tablici 5. prikazana je ostvarena konzistencija morta, odnosno prosječno izmjereno rasprostiranje na potresnom stolu. Prosječno rasprostiranje mješavina opada sa 179 mm za mješavinu CM1, do 160 mm za mješavinu CM5. Dodatak crvenog mulja značajno utječe na konzistenciju morta, jer su čestice



Slika 1. Uzorci morta pilikom ispitivanja konzistencije (s lijeva na desno - mješavine CM1, CM2, CM3, CM4 i CM5)

mulja znatno manje od čestica cementa i zahtijevaju više vode za močenje. Također, treba imati na umu i prisutnost silicijske prašine, koja samo pospješuje taj efekt. Bitno je naglasiti da je vodovezivni omjer jednak za sve mješavine, odnosno količina vode je nepromijenjena. Na slici 1. prikazane su mješavine morta prilikom ispitivanja konzistencije.

Prosječne vrijednosti rezultata ispitivanja udjela pora u svježem mortu prikazane su u tablici 5. Veličina čestica također utječe na udio pora u mortu. Sitnije čestice popunjavaju šupljine i udio sadržaj pora. Prosječne vrijednosti udjela pora za mješavine opadaju sa 1,85 % za CM1 do 1,60 % za CM5.

Tablica 5. Prosječni rezultati ispitivanja svježeg morta (dvije serije)

R.br.	Mješavina	Rasprostriranje mješavina [mm]	Udio pora mješavina [%]	Zapreminska masa [kg/m ³]
1	CM1	179	1,85	2202,0
2	CM2	174	1,75	2199,5
3	CM3	168	1,70	2202,5
4	CM4	167	1,68	2207,5
5	CM5	160	1,60	2211,7

U tablici 5. prikazani su prosječni rezultati ispitivanja zapreminske mase svježeg morta. Za mješavinu CM2

prosječna vrijednost zapreminske mase je nešto niža u odnosu na mješavinu CM1. Preostale mješavine CM3, CM4 i CM5 pokazuju blago povećanje zapreminske mase u odnosu na mješavinu CM1, pri čemu je najveća vrijednost dobivena za mješavinu CM5 od 2211,7 kg/m³.

4.2. Rezultati ispitivanja očvrstlog morta

Nakon 28 dana negovanja u vodi, uzorci su izvagani, a dimenzije su im ponovo izmjerene. Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrstlog morta prikazani su u tablici 6. Radi usporedbe rezultata, prosječne vrijednosti zapreminske mase svih šest mjerenja za obje serije pojedinačnih mješavina s crvenim muljem uspoređene su s mješavinom CM1, koja nema crveni mulj u svom sastavu. Zabilježeno je povećanje zapreminske mase za sve mješavine s crvenim muljem, s tim da je blagi pad zabilježen u vrijednostima mješavine CM3. Mješavina CM5 ima za 1,30 % veću prosječnu zapreminsku masu od kontrolne mješavine.

Savojna i tlačna čvrstoća mješavina morta u prvoj seriji ispitana je odmah nakon završetka propisane njege uzoraka. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće prikazani su u tablici 7, a srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće (po dva rezultata za svaki uzorak) u tablici 8. U odnosu na kontrolnu mješavinu CM1, sve mješavine morta pokazuju niže vrijednosti savojne čvrstoće do 16,54 % za mješavinu CM5.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja zapreminske mase očvrstlog morta

Mješavina	Zapreminska masa očvrstlog morta [kg/m ³]				
	CM1	CM2	CM3	CM4	CM5
Prva serija	2237,9	2247,7	2243,0	2268,4	2276,2
	2230,9	2244,1	2238,3	2243,4	2259,8
	2233,6	2263,7	2234,4	2268,8	2282,8
Druga serija	2262,0	2246,1	2253,1	2263,7	2274,2
	2241,0	2247,7	2251,2	2250,0	2258,2
	2237,1	2271,9	2255,5	2252,0	2265,6
Prosječno [kg/m ³]	2240,4	2253,5	2245,9	2257,7	2269,5
Povećanje / Smanjenje [%]	-	0,58	0,24	0,77	1,30

Tablica 7. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće prve serije

R.br.	Mješavina	Savojna čvrstoća [MPa]			Prosječno [MPa]	Standardna devijacija	Smanjenje/Povećanje [%]
1	CM1	10,08	10,31	10,78	10,39	0,357	-
2	CM2	10,08	9,38	9,61	9,69	0,357	-6,77
3	CM3	9,38	8,91	9,14	9,14	0,235	-12,03
4	CM4	9,61	7,73	8,91	8,75	0,950	-15,79
5	CM5	9,38	7,97	8,67	8,67	0,705	-16,54

Tablica 8. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće prve serije

R.br.	Mješavina	Tlačna čvrstoća [MPa]			Prosječno [MPa]	Standardna devijacija	Smanjenje/Povećanje [%]
1	CM1	44,28	44,88	44,56	44,57	0,806	-
2	CM2	42,66	42,34	42,25	42,42	0,303	-4,84
3	CM3	40,00	38,22	39,78	39,33	1,194	-11,76
4	CM4	37,91	37,22	37,31	37,48	0,560	-15,91
5	CM5	37,03	35,75	37,28	36,69	0,891	-17,69

Tablica 9. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće u drugoj seriji

R.br.	Mješavina	Savojna čvrstoća [MPa]			Prosječno [MPa]	Standardna devijacija	Smanjenje/Povećanje [%]
1	CM1	4,69	4,45	4,69	4,61	0,139	-
2	CM2	4,92	5,16	4,92	5,00	0,139	8,46
3	CM3	4,45	4,45	4,22	4,37	0,133	-5,13
4	CM4	4,45	4,92	3,52	4,30	0,712	-6,80
5	CM5	3,75	3,52	3,75	3,67	0,133	-20,32

Tablica 10. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće u drugoj seriji

R.br.	Mješavina	Tlačna čvrstoća [MPa]			Prosječno [MPa]	Standardna devijacija	Smanjenje/Povećanje [%]
1	CM1	42,16	35,94	42,72	40,27	3,377	-
2	CM2	40,13	41,16	42,50	41,26	1,622	2,46
3	CM3	37,63	36,16	38,38	37,39	1,467	-7,16
4	CM4	36,25	36,16	36,75	36,39	0,954	-9,65
5	CM5	29,31	30,66	31,50	30,49	1,086	-24,29

Baš kao i za savojnu čvrstoću, tlačna čvrstoća opada za sve mješavine u odnosu na kontrolnu mješavinu CM1 (tablica 8.). Najveće smanjenje je registrirano kod mješavine CM5 i iznosi 17,69 %. Ovakav pad čvrstoće je očekivan, jer crveni mulj u ovakvom stanju pokazuje manju pucolansku aktivnost [10, 16]. Kao i u prvoj seriji, u drugoj je seriji, osim tlačne čvrstoće ispitana i savojna čvrstoća i rezultati su prikazani u tablici 9. Uzorci druge serije su, nakon njegovanja u vodi tijekom 28 dana, bili podvrgnuti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Provedeno je 25 ciklusa. Temperatura smrzavanja iznosila je -20°C , a temperatura odmrzavanja bila je $+20^{\circ}\text{C}$. Vrijednosti rezultata savojne čvrstoće za sve mješavine bile su znatno niže u drugoj seriji u odnosu na prvu seriju. Za drugu seriju mješavina CM2 pokazala je povećanje od 8,46 % u odnosu na kontrolnu mješavinu CM1, a

mješavine CM3 i CM4 pokazale su blagi pad savojne čvrstoće u odnosu na mješavinu CM1. Mješavina CM5 je pokazala značajan pad čvrstoće u odnosu na kontrolnu mješavinu. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće druge serije prikazane su u tablici 10. Iz rezultata je vidljivo da je prosječna vrijednost tlačne čvrstoće mješavine CM2 veća od kontrolne mješavine CM1 za 2,46 %. Ostale mješavine pokazuju pad čvrstoće, CM3 i CM4 do 10 %, a najznačajniji pad izražen je u mješavini CM5. Iz rezultata druge serije vidljivo je slično ponašanje mješavina pri ispitivanju savojne i tlačne čvrstoće. U oba slučaja (savojna i tlačna čvrstoća) mješavina CM2 pokazala je bolja svojstva od usporedne mješavine CM1. Tijekom ispitivanja tlačne čvrstoće, drugi uzorak blago odstupa od ostalih rezultata, što treba potvrditi dodatnim ispitivanjima. Uz to, intenzitet

opadanja vrijednosti savojne i tlačne čvrstoće mješavina CM3 i CM4 je sličan. To se može objasniti prisutnošću sitnijih čestica crvenog mulja koje zatvaraju pore i smanjuju poroznost (što je vidljivo tijekom ispitivanja udjela pora), odnosno smanjuju udio vode koji se smrzava u uzorku, a količina cementa je još uvijek dovoljno velika za odvijanje hidratacije.

Ispitivanje otpornosti na smrzavanje provedeno je prema preporukama u literaturi [23]. Otpornost na smrzavanje je ocijenjena usporedbom tlačne čvrstoće prve i druge serije, a prikazana je u tablici 11. Smanjenje čvrstoće nije bilo jednoznačno za sve mješavine. Mješavine CM1 i CM5 pokazuju znatno veći pad čvrstoće u odnosu na mješavine CM2, CM3 i CM4.

Tablica 11. Usporedba rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće prve i druge serije uzoraka

Mješavina	Prosječna tlačna čvrstoća prve serije [MPa]	Prosječna tlačna čvrstoća druge serije [MPa]	Smanjenje [%]
CM1	44,57	40,27	-10,68
CM2	42,42	41,26	-2,80
CM3	39,33	37,39	-5,21
CM4	37,48	36,39	-3,01
CM5	36,69	30,49	-20,33

U literaturi [23] se navodi podatak: da bi se mort smatrao otpornim na smrzavanje, pad tlačne čvrstoće treba biti manji od 20 %. Ovaj uvjet je zadovoljen za sve mješavine osim za mješavinu CM5. Treba naglasiti da je pad čvrstoće najniži za mješavinu CM2 i iznosi samo 2,80 %. Osim usporedbi vrijednosti čvrstoće, uspoređene su i mase, ali ni za jednu mješavinu nije zabilježen gubitak mase.

5. Zaključak

U radu su prikazana istraživanja svojstava svježeg i očvrstlog morta s dodatkom lokalnih industrijskih nusproizvoda silicijske prašine i crvenog mulja. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti:

- Konzistencija morta kao i udio pora u svježem mortu smanjuju se povećavajući udio crvenog mulja u mješavini.

- Zapreminska masa je povećana u mješavinama s dodatkom crvenog mulja, ali to povećanje nije značajno i iznosi najviše 1,30 % za mješavinu s 20 % crvenog mulja u odnosu na mješavinu bez crvenog mulja.
- Savojna i tlačna čvrstoća uzoraka ispitanih odmah nakon 28 dana njegovanja (prva serija) opadaju kako se povećava udio crvenog mulja u mješavini. Najveće smanjenje je zabilježeno za najveći udio mulja od 20 % (CM5) i iznosi 16,54 % za savojnu i 17,69 % za tlačnu čvrstoću
- Uzorci ispitani nakon 25 ciklusa izlaganja smrzavanju i odmrzavanju (druga serija) pokazuju drugačije ponašanje. Savojna i tlačna čvrstoća uzorka s 5 % crvenog mulja (CM2) pokazuje povećanje obji čvrstoća, savojne za 8,46 % i tlačne za 2,46 % u odnosu na mješavinu bez mulja. Ostale mješavine pokazuju smanjenje čvrstoća u odnosu na usporednu mješavinu.
- Otpornost na smrzavanje, na temelju usporedbe tlačne čvrstoće prve i druge serije, zadovoljavajuća je za sve mješavine osim za mješavinu CM5, s tim da su bolja svojstva pokazale mješavine s dodatkom crvenog mulja od kontrolne mješavine bez mulja.

Ovo istraživanje je pokazalo da je moguće pripremiti mort tako da se udio cementa zamijeni s lokalnim industrijskim nusproizvodima silicijskom prašinom i crvenim muljem. Uzorci s većim udjelom crvenog mulja (većim od 15 %) pokazuju značajno lošija mehanička svojstva, a mješavine s niskim udjelom crvenog mulja (5 %) imaju zadovoljavajuća svojstva. Osim toga, treba napomenuti da je vodovezivni omjer za sve mješavine u istraživanju isti. Ponašanje morta s prikazanim dodacima trebalo bi dodatno ispitati uz zadržavanje istog vodocementnog omjera, a promjenjivog vodovezivnog omjera, te po mogućnosti uz primjenu aditiva. Zbog sitnijih čestica crvenog mulja, uzorci nakon izlaganja smrzavanju i odmrzavanju pokazali su se trajnijima, pri čemu se posebno ističe mješavina s dodatkom 5 % crvenog mulja, što bi trebalo potvrditi dodatnim ispitivanjima.

Zahvala

Autori zahvaljuju kolegi Mirhadu Greboviću, dipl.ing.građ. za donaciju uzoraka silicijske prašine, te kolegi Muameru Đuloviću, dipl.ing.građ. za konzultacije i pomoć tijekom laboratorijskih ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.: Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Third edition, McGraw-Hill, New York, 2006.
- [2] IMARC Group Report: Cement Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2018-2023, www.imarcgroup.com/cement-manufacturing-plant
- [3] Sakai, K., Noguci, T.: The Sustainable Use of Concrete, 1st Edition, CRC Press, Taylor and Francis group, pp. 26-30, 2012.
- [4] Paramguru, R.K., Rath, P.C., Misra, V.N.: Trends in Red Mud Utilization - A Review, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal, 26 (2004) 1, pp.1-29. <https://doi.org/10.1080/08827500490477603>

- [5] Patel, S., Pal, B.K.: Current Status of an Industrial Waste: Red Mud an Overview, *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science*, 4 (2015) 8, pp. 1-16.
- [6] Serdar, M., Biljecki, I., Bjegović, D.: High performance concrete incorporating locally available industrial by-products, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (2017) 3, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001773](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001773)
- [7] U.S. Geological Survey: Mineral commodity summaries, pp. 32, 2017, doi.org/10.3133/70180197MineralCommoditySummaries2017
- [8] Ribeiro, D.V., Labrincha, J.A., Morelli, M.R.: Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 42 (2012), pp. 124-133 <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.002>
- [9] Ribeiro, D.V., Labrincha, J.A., Morelli, M.R.: Potential Use of Natural Red Mud as Pozzolan for Portland Cement, *Materials Research*, 14 (2011) 1, pp. 60-66. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000001>
- [10] Ribeiro, D.V., Silva, A.S., Labrincha, J.A., Morelli, M.R.: Rheological properties and hydration behavior of portland cement mortars containing calcined red mud, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40 (2013), pp. 557-566. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0230>
- [11] Song, S., Sohn, D., Jennings, H.M., Mason, T.O.: Hydration of alkaliactivated ground granulated blast furnace slag, *Journal of Materials Science*, 35 (2000) 1, pp. 249-257. <https://doi.org/10.1023/A:1004742027117>
- [12] Ribeiro, D.V., Labrincha, J.A., Morelli, M.R.: Effect of Calcined Red Mud Addition on the Hydration of Portland Cement, *Materials Science Forum*, 727-728 (2012), pp. 1408-1411. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.1408>
- [13] Singh, M., Upadhyay, S.N., Prasad, P.M.: Preparation of Iron Rich Cements Using Red Mud, *Cement and Concrete Research*, 27 (1997), pp. 1037-1046. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00101-4)
- [14] Tsakiridis, P.E., Agatzini-Leonardou, S., Oustadakis P.: Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker, *Journal of Hazardous Materials*, 116 (2004) 1-2, pp. 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.002>
- [15] Pontikes, Y., Angelopoulos, G.N.: Bauxite residue in cement and cementitious applications: Current status and a possible way forward, *Resources, Conservation and Recycling*, 73 (2013), pp. 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.005>
- [16] Senff, L., Modolo, R.C.E., Silva, S.A., Ferreira, V.M., Hotza, D., Labrincha, J.A.: Influence of red mud addition on rheological behavior and hardened properties of mortars, *Construction and Building Materials*, 65 (2014), pp. 84 - 91. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.104>
- [17] Kumar, K.M.S., Naik, R.: Experimental Study on Utilization of Industrial Wastes (Red mud and Copper slag) in Mortar and Concrete, *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 3 (2015) 1, pp. 228-233.
- [18] Sutar, H., Murmu, R., Roy, D., Mishra, S.C., Mishra, A.: Effect of Red Mud (RM) Reinforcement on Physio-Chemical Characteristics of Ordinary Portland Slag Cement (OPSC) Mortar, *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 6 (2016), pp. 231-238 <https://doi.org/10.4236/amc.2016.68023>
- [19] Ribeiro, D.V., Morelli, M.R.: Use of red mud as addition for Portland cement mortars, 55 *Congresso Brasileiro de Ceramica*, Porto de Galinhas, Brasil, pp. 1333-1345, 2011.
- [20] Šahinagić - Isović, M., Čeček, M., Popovac, M., Logo, A.Š.: Materijali iz industrijskog otpada kao dodaci betonu, XXVII. međunarodni simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, Vršac, Srbija, pp. 47-57, 2017.
- [21] Šahinagić - Isović, M., Čeček, M., Ivanković, D.: Utjecaj crvenog mulja iz deponija Dobro Selo na okoliš, 30. međunarodno savjetovanje o novim tehnologijama - SONT2015, Zagreb, Hrvatska, pp. 61-65, 2015.
- [22] Studija o procjeni utjecaja na okoliš za deponij crvenog mulja Dobro Selo, Zagrebinspekt d.o.o. Mostar, April, 2012, <http://www.citluk.net>
- [23] Muravljev, M.: Građevinski materijali, Građevinska knjiga, Beograd, 2010.