

Primljen / Received: 7.10.2022.

Ispravljen / Corrected: 29.3.2023.

Prihvaćen / Accepted: 16.4.2023.

Dostupno online / Available online: 10.6.2023.

Svojstva svježeg i očvrsnulog betona s dodatkom crvenog mulja i silicijske prašine

Autori:



Doc.dr.sc. **Marko Čeček**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Džemal Bijedić u Mostaru, BiH
Građevinski fakultet
marko.cececz@unmo.ba



Prof.dr.sc. **Merima Šahinagić-Isović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Džemal Bijedić u Mostaru, BiH
Građevinski fakultet
merima.sahinagic@unmo.ba
Autor za korespondenciju

Izvorni znanstveni rad

Marko Čeček, Merima Šahinagić-Isović

Svojstva svježeg i očvrsnulog betona s dodatkom crvenog mulja i silicijske prašine

U posljednjih nekoliko godina proveden je održani broj istraživanja o korištenju ostataka boksita iz proizvodnje aluminijske (poznatog kao crveni mulj) u građevinskoj industriji. Zbog svojih povoljnih kemijskih svojstava, ovaj materijal posebno je zanimljiv kao djelomična zamjena cementa u betonu. U ovom su istraživanju proučavani crveni mulj i silicijska prašina kao djelomične zamjene cementa u betonu. Ispitano je pet mješavina u kojima je cement zamijenjen s 0, 5, 10, 15 i 20 % crvenog mulja. Osim toga, u svim mješavinama cement je zamijenjen s 10 % silicijske prašine u odnosu na masu cementa. Da bi se odredila svojstva svježeg betona, ispitani su obradivost, gustoća i udio zraka. U očvrnulom stanju ispitani su gustoća, upijanje vode, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem, prodor vode i otpornost na smrzavanje i odmrzavanje. Rezultati su pokazali da se kod betona s manjom količinom crvenog mulja dobivaju zadovoljavajuća svojstva u svježem i očvrnulom stanju.

Ključne riječi:

beton, crveni mulj, silicijska prašina, svojstva očvrsnulog betona, trajnost

Original research paper

Marko Čeček, Merima Šahinagić-Isović

Fresh and hardened concrete properties containing red mud and silica fume

In recent years, various studies have been conducted on the utilisation of bauxite residue from alumina production (known as red mud) in the construction industry. It is particularly noteworthy as a partial replacement for cement in concrete because of its favourable chemical composition. In this study, red mud and silica fume were investigated as partial replacements for cement in concrete. Five mixtures were tested. Herein, cement was replaced with red mud at 0, 5, 10, 15 and 20 % by cement mass. Furthermore, cement was replaced by silica fume at 10 % by cement mass in all the mixtures. The workability, bulk density, and air content were tested to evaluate the properties of the fresh concrete. The bulk density, water absorption, compressive strength, splitting tensile strength, water penetration, and freeze–thaw resistance were tested to evaluate the properties of the hardened concrete. The results indicated that for a low red mud content, reasonable fresh and hardened concrete properties were achieved.

Key words:

concrete, red mud, silica fume, hardened properties, durability

1. Uvod

Beton je godinama jedan od najčešće korištenih građevnih materijala diljem svijeta, s godišnjom proizvodnjom koja premašuje 10 milijardi tona [1]. U procesu proizvodnje betona i njegovih komponenti koristi se velika količina prirodnih neobnovljivih sirovina, a također dolazi do značajnih emisija štetnih plinova, uglavnom CO₂. Industrijska proizvodnja cementa je na prvom mjestu i odgovorna je za otprilike 8 % ukupnih emisija CO₂ u atmosferu [2], dok je građevinski sektor odgovoran za oko 38 % [3]. U 2019. godini proizvedeno je 4,1 milijardi tona cementa, a vodeće zemlje bile su Kina (56,2 %), Indija (7,8 %) i Sjedinjene Američke Države (2,2 %) [4]. Prema [5], tako velik porast proizvodnje cementa nije se očekivao prije 2050. Utjecaj betona na okoliš je značajan pa se poduzimaju napore za smanjenje potrošnje prirodnih resursa i emisija štetnih plinova. Proizvodnja i potrošnja cementa su u središtu, jer čine 96 % ugljičnog otiska betona i 85 % instalirane energije [6]. Stoga je strategija građevinske industrije smanjiti uporabu cementa ili ga zamijeniti drugim materijalima (sporednim cementnim materijalima) [7].

Jedan od načina da se to postigne jest korištenje nusproizvoda iz drugih industrija kao sirovina za proizvodnju cementa ili zamjene za cement u kompozitima [8, 9]. Ti se materijali smatraju otpadom i ne koriste se dalje u industriji. Prikladnost njihove primjene u proizvodnji cementa ili kao zamjene za cement ovisi o njihovom kemijskom sastavu i veličini čestica [10]. Određeni nusproizvodi poput silicijske prašine, letećeg pepela i zgure koriste se u cementnoj industriji ili kao dodaci u betonu. U posljednjih nekoliko godina proučavaju se novi materijali koji se mogu upotrijebiti kao djelomične zamjene za cement, poput crvenog mulja [11, 12].

Crveni mulj je nusproizvod industrijske proizvodnje aluminija iz boksitne rude [13]. Tijekom proizvodnje jedne tone aluminija proizvede se otprilike 0,3 - 2,5 tona crvenog mulja [12]. U 2019. godini proizvedeno je 63,7 milijuna tona aluminija [14]. To znači da godišnje nastane više od 120 milijuna tona crvenog mulja [15]. Prepoznatljiva crvena boja nastaje zbog visokog udjela željeza. U kemijskom sastavu zastupljeni su oksidi aluminija, natrija, titana, kalcija i silicija. Kemijski sastav znatno varira ovisno o podrijetlu boksitne rude i procesu proizvodnje aluminija. Prosječni udio glavnih oksida je sljedeći [16]: oksid aluminija 6 - 28 %, oksid željeza 12 - 56 %, oksid silicija 2 - 25 %, oksid titana 2 - 28 % i oksid kalcija 0,20 - 4 %.

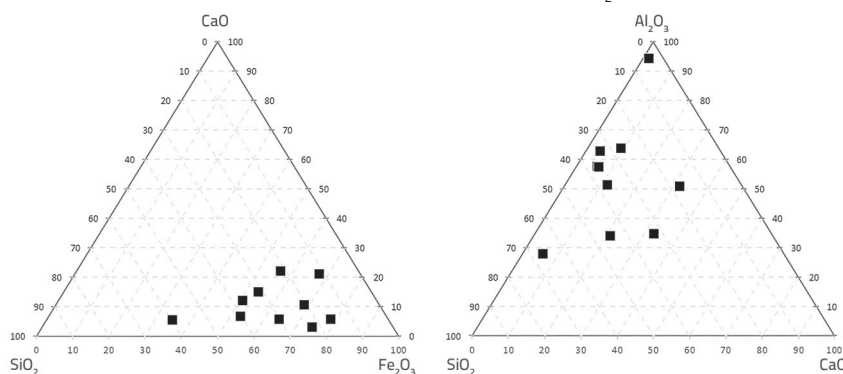
Prosječna pH vrijednost crvenog mulja iznosi 10 - 12,5, a veličina njegovih čestica manja je od 10 μm [11]. Crveni mulj je privukao pozornost istraživača zbog svojeg kemijskog sastava i veličine čestica. Iako se ne može u potpunosti smatrati umjetnim pucolanom, njegov indeks pucolanske aktivnosti je dobar i

može se povećati kalcinacijom [17-19]. Njegov alkalni karakter kompatibilan je s cementnom matricom. Za aktivnu formaciju C-S-H gela, pH vrijednost trebala bi biti veća od 11,5 [18, 20]. Ako je pH manji od 9,5, neće doći do hidratacije.

Prije je crveni mulj istraživao kao sirovina za proizvodnju cementa [11, 21-24]. U posljednjih nekoliko godina, intenzivno se proučava kao djelomična zamjena za cement u kompozitnim materijalima. Ocijenjeni su učinci dodavanja crvenog mulja na obradivost, svojstva u očvrstulom stanju i trajnost betona i morta. Većina dostupnih radova izvještava o smanjenoj obradivosti mješavina zbog male veličine čestica crvenog mulja u usporedbi s cementom, što povećava potrebu za vodom [17, 25]. Istraživanje [26] je pokazalo da zamjena cementa s malim postotkom crvenog mulja (do 15 %) uzrokuje zanemariv porast tlačne čvrstoće betona. S druge strane, istraživanje [27] pokazalo je da beton s 10 % crvenog mulja ima 12 % veću tlačnu čvrstoću i 19 % veću vlačnu čvrstoću. Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje betona određeni su u [28]. Rezultati su pokazali da beton s manjom količinom crvenog mulja (do 10 %) ima 3 % manju tlačnu čvrstoću. Međutim, ako je količina crvenog mulja u betonu 20 %, tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje značajno su smanjene (za otprilike 40 %). Međutim, navodi se da dodatak crvenog mulja može pozitivno utjecati na trajnost betona. Dodatak crvenog mulja utječe na smanjenje difuzije klorida [29] i smanjenje potencijala korozije armature [30]. Drugim riječima, trajnost betona vjerojatno se povećava s dodatkom crvenog mulja. Svojstva trajnosti betona s crvenim muljem prikazana su u [31]. Rezultati su pokazali povećano autogeno skupljanje, ali smanjeno skupljanje od sušenja betona. Također je uočen mali koeficijent migracije klorida i veliki električni otpor.

Kao što je navedeno, kemijski sastav crvenog mulja varira. Na slici 1 prikazana je raspodjela glavnih oksida (SiO₂-Fe₂O₃-CaO i SiO₂-Al₂O₃-CaO) u crvenom mulju, određena prethodnim istraživanjima, a prikazana je kao trojni dijagram [17-37]. U većini slučajeva uočava se relativno mali udio CaO, s velikim udjelom Fe₂O₃. Udjeli Al₂O₃ i SiO₂ značajno variraju. Mnogi istraživači preporučuju primjenu drugih materijala zajedno s crvenim muljem kao zamjenu za cement kako bi se maksimizirao njegov učinak na svojstva betona [28, 31-37].

Silicijska prašina priznata je u građevinskoj industriji kao visokoreaktivni pucolan [38]. Sastoji se uglavnom od SiO₂ (≥ 85 %) i ima specifičnu



Slika 1. Trojni dijagram SiO₂-Fe₂O₃-CaO i SiO₂-Al₂O₃-CaO crvenog mulja

Tablica 1. Granulometrijski sastav agregata

Promjer sita [mm]	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
Postotak prolaska kroz sito [%]	2,52	4,57	12,22	22,51	34,41	48,68	67,52	100

Tablica 2. Kemijski sastav crvenog mulja iz Dobrog Sela

Oksid	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	SiO ₂	MgO	K ₂ O	MnO	TiO ₂	SO ₃
Udio [%]	16,46	37,85	2,39	10,41	21,79	0,60	0,20	0,59	1,64	0,20

površinu približno 150000 cm²/g. Kada se doda u beton, povećava njegovu čvrstoću (općenito mehanička svojstva), otpornost na abraziju, na kemijske tvari i koroziju, te smanjuje prodor vode [2]. Pucolanska reakcija u betonu javlja se između silicijske prašine i kalcijevog hidroksida (CH). Time se proizvodi dodatni C-S-H u porama oko hidratiziranog cementa. Zbog velike specifične površine silicijske prašine, pri izradi betona potrebna je dodatna količina vode [2].

Stoga su u ovom istraživanju ispitivana svojstva svježeg i očvrnulog betona nakon djelomične zamjene cementa crvenim muljem i silicijskom prašinom. Ispitano je pet mješavina. Cement je zamijenjen crvenim muljem u udjelima 0 %, 5 %, 10 %, 15 % i 20 % u odnosu na masu cementa, a u svim mješavinama cement je zamijenjen s 10 % silicijske prašine po masi cementa. Svojstva su prikazana na osnovi postotka dodanog crvenog mulja. Posebna pažnja posvećena je svojstvima trajnosti betona, jer u tom području nema mnogo postojećih istraživanja.

2. Materijali

2.1. Cement i agregat

U ovom istraživanju korišten je cement razreda čvrstoće 42,5 MPa (označen kao portlandski cement CEM II/A-M (S-V) 42,5N) u kojem je 20 % zgure i letećeg pepela. Cement je pripremljen prema normi EN 197-1, s gustoćom od 3,05 g/cm³ i specifičnom površinom od 2900 cm²/g. Krupni agregat bio je drobljeni vapnenac. Agregat se sastojao od tri nominalne frakcije: 0–4 mm (45 %), 4–8 mm (20 %), i 8–16 mm (35 %). Prosječna gustoća bila je 2,7 g/cm³. Granulometrijski sastav prikazan je u tablici 1. Modul finoće iznosio je 5,08.

2.2. Crveni mulj

Crveni mulj dobiven je s odlagališta Dobro Selo u blizini Mostara, u Bosni i Hercegovini. Materijal je nusproizvod proizvodnje aluminija iz boksitne rude s područja Hercegovine i nastao je u razdoblju od 1979. do 1991. godine. Procjenjuje se da je na odlagalištu Dobro Selo odloženo gotovo 10 milijuna tona crvenog mulja nastalog tijekom proizvodnje aluminija. Odlagalište se sastoji od dva armiranobetonska bazena u kojima je crveni mulj pokriven slojem vode. Odlaganje je završeno 1991. godine, a odlagališta su postala neaktivna [13]. Rezultati kemijske analize crvenog mulja prikazani su u tablici 2. On ima veliki udio

pucolanskih oksida (aluminijevi, željezovi i silicijevi oksidi) i mali udio natrijevih i magnezijevih oksida. Oba se oksida smatraju opasnim kada se koriste u cementnim matricama. Ekvivalent natrijevog oksida (Na₂O_{eq}) trebao bi biti manji od 5 % prema EN 450:1, a ekvivalent magnezijevog oksida trebao bi biti manji od 4 % [1]. Na₂O_{eq} izračunan je na sljedeći način:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O} = 2,52 \% \quad (1)$$

Mjerenja radioaktivnosti nisu otkrila značajnu razinu radioaktivnosti [13]. Suma pucolanskih oksida bila je veća od 70 %, a SO₃ manji od 3 % (prema EN 450:1). Prema ASTM C618, crveni mulj zadovoljava kriterije za razred F letećeg pepela s udjelom CaO manjim od 18 %. Osim toga, prisutnost TiO₂ može utjecati na svojstva betona [39].

Dostavljeni uzorci crvenog mulja sadržavali su velik udio vode. Crveni mulj najprije je osušen, samljeven u sitni prah, a potom dodan u mješavine betona. Gustoća crvenog mulja ispitana je pomoću piknometra, a iznosila je 3,15 g/cm². Nasipna gustoća iznosila je 1,35 g/cm³. Specifična površina ispitana je prema EN 196-6 Blaineovom metodom, a iznosi 8300 cm²/g. To pokazuje da su čestice crvenog mulja otprilike tri puta manje od čestica cementa. U [40] su prikazani podaci o udjelu rijetkih elemenata u crvenom mulju s odlagališta Dobro Selo. Primijećeno je da su prisutni svi lantanoidi, kao i Sc i Y, a Ce je najzastupljeniji element. Kemijska analiza pokazala je približne udjele Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO i SiO₂, koji su redom iznosili 15 %, 50 %, 3 % i ≥ 15 %. Osim toga, analiza je otkrila prisutnost Cr, Hg, Ni, V i Zn.

2.3. Silicijska prašina

Silicijska prašina dobiven je iz Jajca u Bosni i Hercegovini. Taj otpadni materijal koristi se za proizvodnju Si legura. Tijekom proizvodnog procesa godišnje nastaje otprilike 10.000 tona silicijske prašine. Veličina čestica silicijske prašine je 0,1 - 0,2 μm, odnosno čestice silicijske prašine otprilike su 100 puta sitnije od čestica cementa. Silicijska prašina korištena je u tekućem obliku s 56 % udjela vode.

3. Eksperimentalni plan

Tablica 3 prikazuje sastav betona. Pripremljeno je pet mješavina uz djelomičnu zamjenu cementa s crvenim muljem i silicijskom prašinom. Udjeli crvenog mulja iznosili su 0 %, 5 %, 10 %, 15 % i 20 % po masi

Tablica 3. Sastavi betonskih mješavina

Mješavina	Cement [kg/m ³]	Silicijska prašina		Crveni mulj		Ukupno vezivo [kg/m ³]	Agregat [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	v/c omjer	v/v omjer
		[%]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]					
B1	324	10	36	0	0	360	1750	244,8	0,756	0,68
B2	306	10	36	5	18	360	1750	244,8	0,800	0,68
B3	288	10	36	10	36	360	1750	244,8	0,850	0,68
B4	270	10	36	15	54	360	1750	244,8	0,907	0,68
B5	252	10	36	20	72	360	1750	244,8	0,971	0,68

v/c – vodocementni omjer; v/v – vodovezivni omjer

Table 4. Metode ispitivanja i broj uzoraka

Metoda testiranja	Broj uzoraka po ispitivanju	Oblik/Dimenzije	Ukupan broj uzoraka
28-dnevna tlačna čvrstoća	3	kocka, 15 cm	15
56-dnevna tlačna čvrstoća	3	kocka, 15 cm	15
90-dnevna tlačna čvrstoća	3	kocka, 15 cm	15
Vlačna čvrstoća cijepanjem / Prodor vode	3	valjak Ø15/15 cm	15
Otpornost na smrzavanje-odmrzavanje	2	kocka, 15 cm	10

cementa, a u svim mješavinama korištena je silicijska prašina kao zamjena za 10 % cementa. Stoga se cement, crveni mulj i silicijska prašina smatraju vezivom. Mješavina bez crvenog mulja bila je referentna mješavina. Kako bi se procijenila svojstva svježeg betona, ispitani su obradivost, gustoća i udio zraka. U očvrslom stanju ispitani su gustoća, upijanje vode, tlačna čvrstoća nakon 28, 56 i 90 dana, vlačna čvrstoća cijepanjem, prodor vode i otpornost na smrzavanje - odmrzavanje.

Vodovezivni omjer (v/v) bio je konstantan i iznosio je 0,68, a vodocementni se omjer (v/c) razlikovao. Mješavina B1 je referentna mješavina. Sve usporedbe napravljene su u odnosu na tu mješavinu.

Treba također napomenuti da je korišten miješani cement a 20 % zgure i letećeg pepela. Referentna mješavina sastojala se od 72 % klinkera, 18 % zgure i letećeg pepela te 10 % silicijske prašine. Udio klinkera u ostalim mješavinama smanjen je zbog dodavanja crvenog mulja. Mješavine B2, B3 i B4 sadržavale su redom 68 %, 64 % i 60 % klinkera. U mješavini B5, udio klinkera, zgure i letećeg pepela, silicijske prašine i crvenog mulja iznosio je redom 56 %, 14 %, 10 % i 20 %.

Ukupno je pripremljeno 70 uzoraka za ispitivanje svojstava očvrslulog betona: 55 betonskih kocki dimenzija 15 × 15 × 15 cm i 15 betonskih valjaka promjera 15 cm i visine 15 cm. Svi su uzorci bili u kalupima najmanje 24 sata, zatim izvađeni iz kalupa i njegovani u posudi napunjenoj vodom do ispitivanja. U tablici 4 navedene su metode ispitivanja i broj uzoraka za svako ispitivanje.

3.1. Ispitivanje svojstava svježeg betona

U svježem stanju ispitani su obradivost, gustoća i udio zraka u betonu. Ispitivanje obradivosti svježeg betona provedeno je određivanjem konzistencije slijeganjem (*Slump test*) prema

normi EN 12350-2. Udio zraka u svježem betonu određen je metodom pritiska prema normi EN 1992-1-1:2017.

3.2. Ispitivanja svojstava očvrslulog betona

U očvrslom stanju provedena su ispitivanja gustoće, upijanja vode, tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem, prodora vode i otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje s otopinom natrijeva klorida.

Upijanje vode određeno je izlaganjem uzoraka potpunom zasićenju nakon čega su osušeni do stalne mase. U ovom istraživanju ispitano je dvanaest uzoraka.

Tlačna čvrstoća ispitivana je na uzorcima starosti 28, 56 i 90 dana, i to na uzorcima betonskih kocki (15 × 15 × 15 cm) prema normi EN 12390-3: 2010. Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitana je na uzorcima oblika valjka promjera 15 cm i visine 15 cm prema EN 12390-6: 2010. Prodor vode određen je prema EN 12390-8: 2010 na tri uzorka oblika valjka promjera 15 cm i visine 15 cm. Uzorci su zatim uronjeni u vodu i njegovani pod tlakom od 5 bara tijekom 72 sata. Nakon toga su uzorci podijeljeni popola, a potom je izmjerena dubina prodiranja vode. Nakon toga, koeficijent prodiranja vode izračunan je prema izrazu (2) [2]:

$$K_w = \frac{\omega_0}{2 \cdot P \cdot t} dm^2 \quad (2)$$

ω_0 – gustoća vode [N/mm³]

P – tlak vode [MPa]

t – vrijeme pod tlakom [h]

dm – dubina prodora vode [mm].

Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje s otopinom natrijevog klorida ispitana je prema CEN/TS 12390-9:2007. Otpornost na

Tablica 5. Rezultati ispitivanja svježeg betona

Mješavina	Konzistencija slijeganjem [cm]	Povećanje/Smanjenje [%]	Udio zraka [%]	Povećanje/Smanjenje [%]	Gustoća [kg/m ³]	Povećanje/Smanjenje [%]
B1	18,0	-	1,10	-	2343,75	-
B2	17,5	-2.78	0,70	-36,36	2350,00	+0,27
B3	14,0	-22.22	1,30	+18,18	2307,50	-1,55
B4	8,0	-55.56	1,40	+27,27	2336,25	-0,32
B5	4,0	-77,78	2,00	+81,82	2318,75	-1,07



Slika 2. Ispitivanje obradivosti betonskih mješavina B1-B5 (slijeva nadesno)

smrzavanje i odmrzavanje ispitivana je na uzorcima oblika kocke koji su bili presječeni popola. Unutarnje strane su zapečaćene čeličnim prstenovima na rubovima, a dodana je otopina natrijevog klorida u koncentraciji od 3 %. Zatim su uzorci izloženi ukupno 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja s minimalnom temperaturom od -20 °C i maksimalnom temperaturom od 20 °C. Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje s otopinom natrijevog klorida jedno je od najrigoroznijih ispitivanja trajnosti betona. Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje najkritičnije je svojstvo trajnosti betona, posebno u hladnim područjima. Ovo ispitivanje je odabrano zato jer je smrzavanje i odmrzavanje s otopinom natrijevog klorida zahtjevnije. Kumulativni ostatci pojedinačnih uzoraka prikupljeni su od materijala koji se odvojio tijekom postupka ispitivanja i izvagani su. Gubitak mase, S_n , izračunan je pomoću izraza (3):

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \quad (3)$$

$m_{s,n}$ - kumulativni ostatak nakon n ciklusa [kg]

A - ukupna ispitna površina [m²].

4. Rezultati i rasprava

4.1. Svojstva svježeg betona

Tablica 5. prikazuje rezultate ispitivanja obradivosti, udjela zraka i gustoće svježeg betona. Rezultati su uspoređeni s rezultatima mješavine betona B1.

Dodavanje crvenog mulja značajno je utjecalo na svojstva svježeg betona. Izmjerene vrijednosti konzistencije slijeganjem za sve betonske mješavine s crvenim muljem bile su manje od

referentne mješavine. Obradivost se smanjila s povećanjem udjela crvenog mulja, što je zabilježeno kod male količine crvenog mulja od 5 %. Razlog tomu su sitne čestice crvenog mulja, koje su manje od čestica cementa i zadržavaju dio vode te time smanjuju fluidnost betona zbog apsorpcije vode [25, 31]. Mješavina B2 imala je najmanji udio zraka od 0,70 %, što je 36,36 % manje od referentne mješavine. Sve druge mješavine imale su udio zraka veći od mješavine B1. Mala količina crvenog mulja (do 5 %) doprinijela je smanjenju udjela zraka u svježem betonu. Međutim, kada se udio crvenog mulja povećavao, povećavao se i udio zraka. Gustoća u svježem stanju bila je uglavnom jednolika, a mješavina B2 imala je neznatno veću gustoću od 2350,00 kg/m³, što je 0,27 % veće od gustoće referentne mješavine B1. Manje i teže čestice crvenog mulja povećale su gustoću, a smanjile udio zraka u mješavini. Međutim, zbog smanjene obradivosti, kvaliteta ugradnje betona bila je niska. Stoga, za veliki udio crvenog mulja, betonske mješavine pokazale su povećani udio zraka i smanjenu gustoću. Slično ponašanje opaženo je u [41]. Ispitivanja obradivosti svih betonskih mješavina prikazana su na slici 2.

4.2. Svojstva očvrnulog betona

4.2.1. Gustoća, upijanje i prodor vode

Uzorci su njegovani u vodi 28 dana. Zatim su izmjereni i izvagani. Tablica 6 prikazuje rezultate ispitivanja gustoće, upijanja i prodora vode očvrnulog betona. Ti su rezultati uspoređeni s rezultatima ispitivanja referentne mješavine B1.

Mješavine B2, B3 i B4 imaju neznatni porast gustoće u očvrnulom stanju, dok mješavina B5 ima 0,13 % manju čvrstoću u odnosu na referentnu mješavinu. Dodavanje

Tablica 6. Rezultati ispitivanja gustoće, upijanja i prodiranja vode

Mješavina	B1	B2	B3	B4	B5
Gustoća [kg/m ³]	2333,80	2340,40	2335,10	2337,30	2330,80
Povećanje/Smanjenje [%]	-	+0,28	+0,06	+0,15	-0,13
Upijanje vode [%]	1,29	1,20	1,27	1,34	1,74
Povećanje/Smanjenje [%]	-	-7,15	-1,23	+4,11	+35,04
Koeficijent prodiranja vode [mm/h]	$2,08 \times 10^{-5}$	$4,74 \times 10^{-5}$	$6,44 \times 10^{-5}$	$3,49 \times 10^{-5}$	$1,79 \times 10^{-3}$



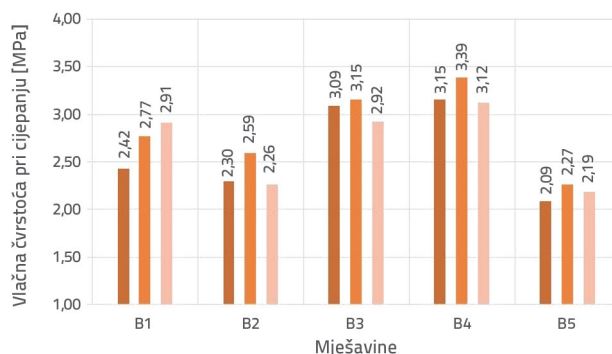
Slika 3. Postupak ispitivanja prodora vode (mješavine B2 i B3)

crvenog mulja u udjelu od 5 % utjecalo je povećanje gustoće betona zbog sitne veličine čestica i gustoće. Međutim, veliki udio crvenog mulja smanjio je gustoću zbog male obradivosti. Mješavina B2 imala je najmanje upijanje vode od 1,20 %, odnosno smanjenje od 7,15 % u odnosu na referentnu mješavinu. Mješavina B3 je imala slično upijanje kao referentna mješavina, a B4 i B5 imali su najveće upijanje od 1,34 % i 1,74 %. Crveni mulj u malim postotcima utjecao je na smanjenje pora u betonu i time smanjio upijanje. Međutim, kako se povećavao udio crvenog mulja, otežavana je pravilna ugradnja betona. To je rezultiralo povećanjem poroznosti [34]. Rezultati ispitivanja prodora vode prikazani su pomoću koeficijenta prodiranja vode (engl. *Water Penetration Coefficient - WPC*). Postupak ispitivanja prikazan je na slici 3. Mješavina B1 imala je najmanji koeficijent prodiranja vode, stoga i najmanji prodor vode u uzorku. Mješavine B2 i B4 imale su prihvatljive koeficijente prodiranja vode, a mješavina B5 pokazala je najveći prodor vode od 120,3 mm. Rezultati pokazuju da se beton s malim udjelom crvenog mulja ponaša prihvatljivo. Međutim, povećanje udjela crvenog mulja u udjelu većem od 15 % rezultira krutom mješavinom s visokim potencijalom upijanja i zadržavanja vode.

4.2.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem prikazani su na slici 4. Kao što je prikazano na slici 4., vlačne čvrstoće cijepanjem mješavina B3 i B4 povećale su se za 13,16 % odnosno 19,25 % u usporedbi s referentnom mješavinom. Kod mješavina B2 i B5 zabilježeno je smanjenje vlačne čvrstoće cijepanjem za 11,72 %, odnosno 19,27 %. Vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem rastu s povećanjem količine crvenog mulja u mješavini [34, 42]. Alkalno svojstvo crvenog mulja moglo bi biti uzrok povećanja

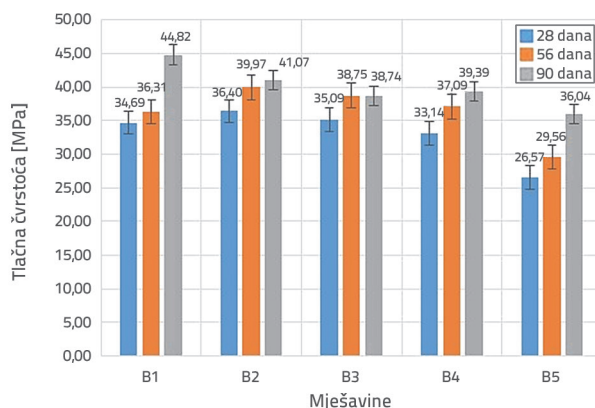
vlačne čvrstoće cijepanjem mješavina B3 i B4, što poboljšava formiranje C-S-H gelova [32]. Međutim, veliki udio crvenog mulja u mješavini uzrokuje smanjenje vlačne čvrstoće cijepanjem. S druge strane, mali udio crvenog mulja utječe na smanjenje mikropukotina i tako uzrokuje povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem [43].



Slika 4. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

4.2.3. Tlačna čvrstoća

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavina B1-B5 nakon 28, 56 i 90 dana njege prikazani su na slici 5. Stupanj povećanja / smanjenja tlačne čvrstoće u odnosu na mješavinu B1 prikazan je u tablici 7.



Slika 5. Prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka starih 28, 56 i 90 dana

Tablica 7. Stupanj povećanja /smanjenja tlačne čvrstoće u odnosu na mješavinu B1

Starost uzoraka pri ispitivanju	B2	B3	B4	B5
28 dana	4,94	1,15	-4,47	-23,41
56 dana	10,07	6,71	2,14	-18,16
90 dana	-4,85	-10,24	-8,74	-16,50

Tablica 8. Rezultati ispitivanja otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje s otopinom natrijeva klorida

Mješavina	Ostatak nakon 7 dana	Ostatak nakon 14 dana	Ostatak nakon 28 dana	Kumulativni ostatak [kg]	Gubitak mase S_n [kg/cm ²]	Prosječni gubitak mase S_n [kg/cm ²]	Broj ciklusa
B1	0,0028	0,0046	0,0039	0,0113	0,58	0,35	28
	0,00069	0,00077	0,00094	0,0024	0,12		28
B2	0,0016	0,0013	0,0021	0,0050	0,26	0,47	28
	0,0036	0,0043	0,0056	0,0135	0,69		28
B3	0,0031	0,0047	-	0,0078	0,40	0,86	14
	0,0037	0,0087	0,0135	0,0259	1,32		28
B4	0,0054	0,0042	-	0,0096	0,49	0,69	14
	0,0084	0,0092	-	0,0176	0,90		14
B5	0,0035	0,0045	-	0,0080	0,41	0,54	14
	0,0068	0,0062	-	0,0130	0,66		14

Učinak dodavanja crvenog mulja na razvoj tlačne čvrstoće uzet je u obzir u rezultatima ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka starosti 28, 56 i 90 dana. Sve su mješavine pokazale povećanje tlačne čvrstoće s povećanjem starosti uzoraka, što je bilo očekivano. Nakon 28 dana, mješavine B2 i B3 pokazale su povećanje tlačne čvrstoće za 4,94 %, odnosno 1,15 % u usporedbi s referentnom mješavinom. Međutim, mješavine B4 i B5 pokazale su smanjenje od 4,47 %, odnosno 23,41 %. Dodavanje crvenog mulja u malim postocima od 5 % i 10 % utjecalo je na neznatno povećanje tlačne čvrstoće uzoraka starosti 28 dana. To je u skladu s [27]. Povećanje tlačne čvrstoće može se pripisati alkalnoj karakteristici crvenog mulja, koja doprinosi pucolanskoj reakciji koja ubrzava formiranje C-S-H gela [34]. U uzorcima starosti 56 dana primijećeno je povećanje tlačne čvrstoće mješavina B2, B3 i B4. U usporedbi s referentnom mješavinom, mješavine B2, B3 i B4 pokazale su povećanje od 10,07 %, 6,71 %, odnosno 2,14 %. Mješavina B5 je pokazala smanjenje tlačne čvrstoće od 18,60 %. U ovoj fazi, crveni mulj još uvijek je pridonio povećanju tlačne čvrstoće, slično kao u uzorcima starima 28 dana. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 90 dana pokazali su različite obrasce. Mješavine s crvenim muljem (B2, B3, B4 i B5) pokazale su smanjenje tlačne čvrstoće u usporedbi s referentnom mješavinom. Mješavina B2 pokazala je najbolje rezultate među četiri mješavine, sa smanjenjem od 4,85 %. Mješavine B3, B4 i B5 pokazale su smanjenje tlačne čvrstoće od 10,24 %, 8,74 % i 16,50 %. Uz veliki udio crvenog mulja, nije se ostvarila dovoljna pucolanska reakcija s drugim mineralima. To je utjecalo na smanjenje formiranja C-S-H gela [34], a time i smanjenje tlačne čvrstoće.

Rezultati ispitivanja pokazali su da je za razvoj tlačne čvrstoće optimalan udio crvenog mulja do 10 %. Za takvu mješavinu, tlačna čvrstoća bila je prihvatljiva za tri ispitne starosti. Potrebno je razmotriti dodavanje silicijske prašine betonskoj mješavini. Ona je imala ključnu ulogu u razvoju tlačne čvrstoće mješavine B1 u reakciji sa slobodnim vapnom, stvarajući dodatni C-S-H gel [2]. Reakcija se također dogodila u ostalim uzorcima (B2, B3, B4 i B5). Međutim, budući da je količina cementa smanjena, može se pretpostaviti da je u toj reakciji bilo manje $Ca(OH)_2$. Osim toga, veliki udio crvenog mulja uzrokovao je povećanje poroznosti i slabljenje mikromehaničkih svojstava. To je konačno rezultiralo smanjenjem tlačne čvrstoće [44]. Varijacije tlačnih čvrstoća svih uzoraka prikazane su na slici 5. Slični rezultati već su prikazani u drugim istraživanjima [34, 45-47].

4.2.4. Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje

Rezultati ispitivanja otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje s otopinom natrijeva klorida prikazani su u tablici 8. Postupak ispitivanja prikazan je na slici 6. U tablici su navedene kumulativne vrijednosti ostataka za pojedinačne mješavine. Ti su ostatci dobiveni vaganjem materijala koji se odlomio tijekom postupka ispitivanja. Gubitak mase S_n izračunat je na osnovi tih rezultata.

Tablica 8. pokazuje da su uzorci B1 i B2 izdržali svih 28 ciklusa, s prosječnim vrijednostima S_n od 0,35 odnosno 0,47 kg/cm². Iako je jedan uzorak B3 izdržao 28 ciklusa, na drugim su uzorcima zabilježena značajna oštećenja nakon 14 ciklusa. Stoga nisu dalje ispitivani. Nakon 14 ciklusa ispitivanja, zabilježeno je uništenje uzoraka B4 i B5. Oni nisu dalje ispitivani. Rezultati pokazuju

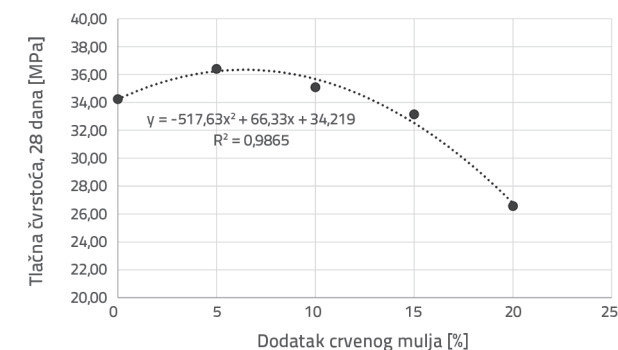


Slika 6. Postupak ispitivanja otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje s otopinom natrijeva klorida

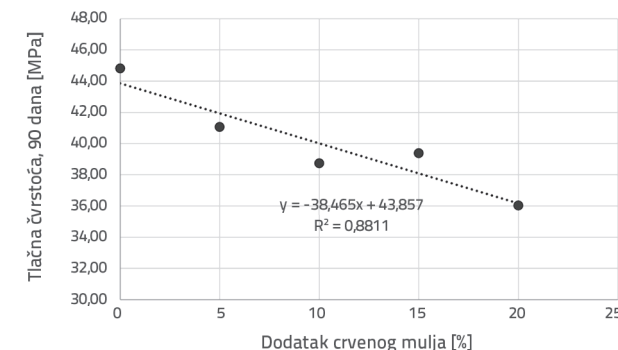
da je beton s velikim količinama crvenog mulja vrlo osjetljiv na cikluse smrzavanja i odmrzavanja s otopinom natrijeva klorida. Međutim, u betonu s malim udjelom crvenog mulja, rezultati su prihvatljivi. Slična ispitivanja nisu prikazana u raspoloživoj literaturi. Otpornost na smrzavanje-odmrzavanje prikazana je u [13, 48, 49]. Rezultati su pokazali da prisutnost crvenog mulja pridonosi otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje.

4.3. Utjecaj crvenog mulja na svojstva očvrstnalog betona

Provedena je regresijska analiza kako bi se utvrdili odnosi između svojstava očvrstnalog betona i dodatka crvenog mulja.



Slika 7. Odnos tlačne čvrstoće nakon 28 dana i količine crvenog mulja



Slika 9. Odnos tlačne čvrstoće nakon 90 dana i količine crvenog mulja



Slike 7. do 9. prikazuju odnos između tlačne čvrstoće za različite starosti uzoraka i različite količine crvenog mulja. Tlačne čvrstoće uzoraka starosti 28 i 56 dana mogu se prikazati polinomnim funkcijama drugog reda. Tlačna čvrstoća uzorka starosti 28 dana prikazana je kao:

$$CS = -517,63RM^2 + 66,332RM + 34,219, \quad R^2 = 0,9865 \quad (4)$$

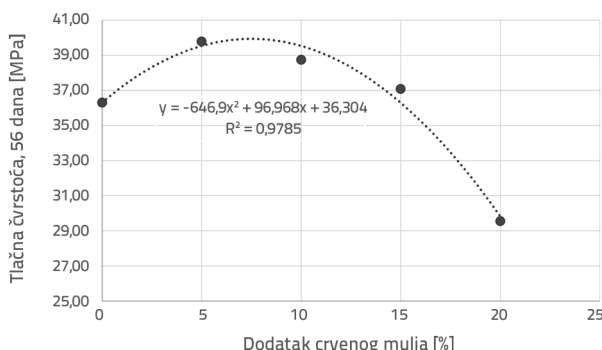
Tlačna čvrstoća uzorka starosti 56 dana prikazana je kao:

$$CS = -646,9RM^2 + 96,968RM + 36,304, \quad R^2 = 0,9785 \quad (5)$$

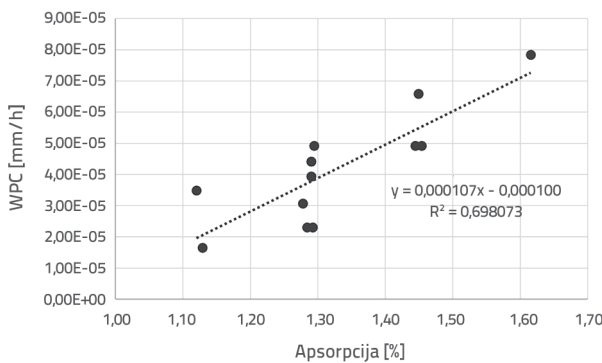
Tlačna čvrstoća uzorka starosti 90 dana može se prikazati linearnom funkcijom:

$$CS = -38,465RM + 43,857, \quad R^2 = 0,8811 \quad (6)$$

Upijanje (A) može se povezati s prodorom vode, jer su oba svojstva ovisna o poroznosti betona. Voda prodire kroz kapilarne pore u betonu i kroz porozni sučeljak između cementa i krupnog agregata [2]. Odnos između koeficijenta prodiranja vode i upijanja vode prikazan je na slici 10. pomoću linearne regresijske analize. Izraz (7) prikazuje odnos između koeficijenta prodiranja vode i upijanja vode:



Slika 8. Odnos tlačne čvrstoće nakon 56 dana i količine crvenog mulja

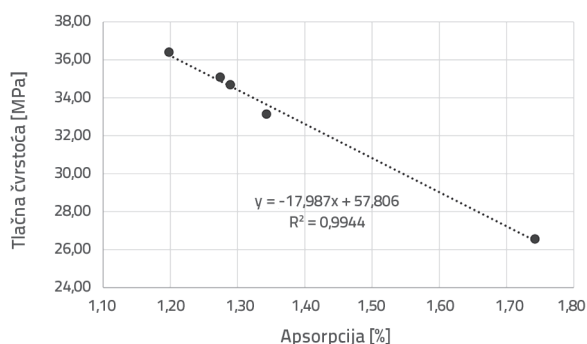


Slika 10. Korelacija koeficijenta prodiranja vode i upijanja vode

$$WPC = 0,000107A + 0,0001, R^2 = 0,698 \quad (7)$$

Treba spomenuti i analizu odnosa između tlačne čvrstoće i upijanja vode betona s dodatkom crvenog mulja. Ta je analiza provedena u [50]. U tom istraživanju uočen je snažan linearni odnos između tlačne čvrstoće (starosti 28 dana) i upijanja (slika 11.). Taj se odnos može izraziti na sljedeći način:

$$CS = -17,987A + 57,806, R^2 = 0,9944 \quad (8)$$



Slika 11. Odnos tlačne čvrstoće i upijanja vode

5. Zaključak

U ovom istraživanju ispitivan je beton s dodatkom crvenog mulja i silicijske prašine kao djelomične zamjene za cement u betonu. U prethodnim istraživanjima, crveni mulj uglavnom je smatran inertnim materijalom, s malim doprinosom čvrstoći betona. Stoga se koncept ovog istraživanja odnosio na kombiniranje crvenog mulja sa silicijskom prašinom, koja predstavlja uobičajeni sporedni cementni materijal. Ispitivana su svojstva svježeg betona s djelomičnom zamjenom cementa s crvenim muljem i silicijskom prašinom; njegova mehanička svojstva i trajnost. Budući da je u istraživanju korišten miješani cement s 80 % klinkera, istraživanje se može smatrati sinergijom između cementa, letećeg pepela, zgure, crvenog mulja i silicijske prašine. Na osnovi dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Obradivost mješavina smanjivala se s povećanjem količine crvenog mulja u mješavini. Mješavina s 0 % crvenog mulja

imala je konzistenciju slijeganjem 18 cm, a mješavina s 20 % crvenog mulja imala je konzistenciju 4 cm.

- Mješavina s 5 % crvenog mulja imala je najmanji udio zraka (0,70 %). Referentna mješavina imala je udio zraka od 1,1 %. Nadalje, udio zraka u mješavini povećavao se s povećanjem količine crvenog mulja.
- Gustoće mješavina u svježem stanju bile su uglavnom jednolike, pri čemu je mješavina B2 imala neznatno povećanje od 0,27 % u odnosu na referentnu mješavinu.
- Mješavina s 5 % crvenog mulja imala je najmanji stupanj upijanja vode, koji se povećavao s povećanjem količine crvenog mulja. Finije čestice crvenog mulja zadržavale su vodu i time povećavale upijanje uzoraka s velikim udjelom crvenog mulja.
- Uzorci s crvenim muljem u udjelu od 10 % i 15 % imali su najveću vlačnu čvrstoću cijepanjem. To se može pripisati sitnim česticama crvenog mulja.
- Mali udio crvenog mulja u mješavini utjecao je na povećanje tlačne čvrstoće betonskih uzoraka starosti 28 i 56 dana u usporedbi s referentnom mješavinom. Međutim, u uzorcima koji sadrže više od 15 % crvenog mulja, tlačna čvrstoća značajno se smanjivala. U uzorcima starosti 90 dana, referentna mješavina imala je najveću tlačnu čvrstoću.
- Što se tiče trajnosti, mješavine s crvenim muljem u udjelu od 5 % i 10 % pokazale su zadovoljavajuće vrijednosti koeficijenta prodora vode. Međutim, u uzorcima s većim postotcima crvenog mulja, prodor vode bio je značajan. Rezultati ispitivanja otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje s otopinom natrijevog klorida pokazali su da su uzorci s više od 10 % crvenog mulja pretrpjeli značajna oštećenja. Rezultati su bili prihvatljivi u uzorcima s malim količinama crvenog mulja.

Beton s malim udjelom crvenog mulja i silicijske prašine kao uobičajeni sporedni cementni materijal pokazao je zadovoljavajuća svojstva u svježem i očvrnulom stanju. Treba naglasiti da je vodovezivni omjer (v/v) bio konstantan. Obradivost je značajno smanjena u mješavinama s većom količinom crvenog mulja. Svojstva betona trebala bi se dalje istražiti variranjem vodovezivnog omjera i korištenjem dodataka.

LITERATURA

- [1] Flegar, M., Serdar, M., Londono-Zuluaga, D., Scrivener, K.: Regional Waste Streams as Potential Raw Materials for Immediate Implementation in Cement Production, *Materials*, 13 (2020) 23, doi: 10.3390/ma13235456
- [2] Cakir, F., Karimi, A., Ulu, A., Gündoğdu, M.: Effects of resins on mechanical performance of polymer concrete, *Građevinar*, 73 (2021) 10, pp. 995-1006, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3187.2021>
- [3] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.: *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, Fourth edition, McGraw-Hill Education, 2014.
- [4] CEMBUREAU: Activity Report 2020, <https://cembureau.eu/library/reports/>
- [5] Sakai, K., Noguci, T.: *The Sustainable Use of Concrete*, First Edition, CRC Press, Taylor and Francis group, 2012.
- [6] Serdar, M., Bjegović, D., Štirmer, N., Banjad Pečur, I.: Research challenges for broader application of alternative binders in concrete, *Građevinar*, 71 (2019) 10, pp. 877-888, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2729.2019>

- [7] Janković, K., Bojović, D., Lončar, L., Stojanović, M., Antić, L.: Possibility of using bottom ash in precast concrete products, *Građevinar*, 70 (2018) 5, pp. 413-419, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1589.2016>
- [8] Siddique, R.: Utilization of industrial by-products in concrete, *Procedia Engineering*, 95 (2014), pp. 335-347, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.192>
- [9] Chandra, S.: *Waste materials used in concrete manufacturing*, Noyes Publications, 1997.
- [10] Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D.: Supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 41 (2011), pp. 1244-1256, doi: [10.1016/j.cemconres.2010.12.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001)
- [11] 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, [dx.doi.org/10.1080/08827500490477603](https://doi.org/10.1080/08827500490477603)
- [12] 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.
- [13] Čeček, M., Šahinagić-Isović, M.: Mortars with addition of local industrial by-products, *Građevinar*, 71 (2019) 1, pp. 1-7, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2358.2018>
- [14] Primary Aluminium Production: Statistical data, 2020. <http://www.world-aluminium.org/>
- [15] 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, doi: [10.1016/j.cemconres.2011.09.002](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.002)
- [16] Kammer, C.: *Aluminium Handbook: Fundamentals and materials*, First edition, Aluminium-Zentrale e.V., 1999.
- [17] 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, doi: [10.1590/S1516-14392011005000001](https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000001)
- [18] 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, [dx.doi.org/10.1139/cjce-2012-0230](https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0230)
- [19] Liu, X., Zhang, N., Sun, H., Zhang, J., Li, L.: Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue—Red mud, *Cement and Concrete Research*, 41 (2011), pp. 847-853, doi: [10.1016/j.cemconres.2011.04.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.004)
- [20] Song, S., Sohn, D., Jennings, H.M., Mason, T.O.: Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag, *Journal of Materials Science*, 35 (2000) 1, pp. 249-257, doi: [10.1023/A:1004742027117](https://doi.org/10.1023/A:1004742027117).
- [21] 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, doi: [10.1016/j.resconrec.2013.01.005](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.005)
- [22] 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, doi: [10.1016/j.jhazmat.2004.08.002](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.002)
- [23] Senff, L., Castela, A., Hajjaji, W., Hotza, D., Labrincha, J.A.: Formulations of sulfobelite cement through design of experiments, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 8, pp. 3410-3416, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2011.03.032](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.032)
- [24] Pan, Z., Cheng, L., Lu, Y., Yang, N.: Hydration products of alkali-activated slag–red mud cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 32 (2002), pp. 357-362, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00683-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00683-4)
- [25] Choe, G., Kang, S., Kang, H.: Mechanical Properties of Concrete Containing Liquefied Red Mud Subjected to Uniaxial Compression Loads, *Materials*, 13 (2020) 4, p. 845, <https://doi.org/10.3390/ma13040854>
- [26] Sawant, A.B., Kumthekar, M.B., Diwan, V.V., Hiraskar, K.G.: Experimental study on Partial Replacement of Cement by Neutralized Red Mud in Concrete, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2 (2012) 1, pp. 282-286.
- [27] Venkatesh, C., Ruben, N., Madduru, S.R.C.: Red mud as an additive in concrete: comprehensive characterization, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57 (2020) 3, pp. 281-289, doi: doi.org/10.1007/s43207-020-00030-3
- [28] Rathod, R.R., Kulkarni, P.M., Shingade, V.S., Deshmukh, S.S.: Suitability of red mud as an admixture in concrete, *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 2 (2015) 7, pp. 880-884.
- [29] Ribeiro, D.V., Labrincha, J.A., Morelli, M.R.: Analysis of chloride diffusivity in concrete containing red mud, *IBRACON Structures and Materials Journal*, 5 (2012) 2, pp. 137-152.
- [30] Venkatesh, C., Mohiddin, S.K., Ruben, N.: Corrosion Inhibitors Behaviour on Reinforced Concrete—A Review, In: Das, B., Neithalath, N. (eds.) *Sustainable Construction and Building Materials*, Lecture Notes in Civil Engineering, 25, Springer, Singapore, 2019, https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0_11
- [31] Serdar, M., Biljecki, I., Bjegović, D.: High performance concrete incorporating locally available industrial by-products, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (2017) 3, doi: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001773](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001773)
- [32] Tang, L.: Study of the possibilities of using Red Mud as an additive in concrete and grout mortar. Report R-14-04 for Svensk Kärnbränslehantering AB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.), 2014.
- [33] 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.
- [34] Venkatesh, C., Nerella, R., Madduru, S.R.C.: Experimental investigation of strength, durability, and microstructure of red-mud concrete, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57 (2019) 2, pp. 167-174, <https://doi.org/10.1007/s43207-019-00014-y>
- [35] Vladić Kancir, I., Serdar, M.: Synergy of red mud, fly ash and limestone in cementitious binders, *Common Foundations 2021 Conference*, pp. 103-108, 2021, <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.17>
- [36] Vladić Kancir, I., Serdar, M.: Contribution to Understanding of Synergy between Red Mud and Common Supplementary Cementitious Materials, *Materials*, 15 (2022) 5, p. 1968, <https://doi.org/10.3390/ma15051968>
- [37] Li W.-Y., Zhang Z.-Y., Zhou J.-B.: Preparation of building materials from Bayer red mud with magnesium cement, *Construction and Building Materials*, 323 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126507>
- [38] Natarajan, S., Murugesan, A., Dhanapal, J., Narayanan, A.: Glass fiber reinforced ultra-high strength concrete with silica fume, *Građevinar*, 74 (2022) 10, pp. 849-856, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3431.2021>

- [39] Rawat, G., Gandhi, S., Murthy, Y.I.: A critical assessment on the effect of nano-titanium dioxide on the properties of concrete, *Građevinar*, 74 (2022) 7, pp. 553-560, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3291.2021>
- [40] Čatović, F.: Rijetki elementi u boksitima [Rare elements in bauxite], Dzemal Bijedic University of Mostar, 1999.
- [41] Ribeiro, D.V., Labrincha, J.A., Morelli, M.R.: Use of Red Mud as Addition for Portland Cement Mortars, *Journal of Materials Science and Engineering*, 8 (2010) 4, Serial No. 33, pp. 1-8.
- [42] Kumar, K., Bansal, M., Garg, Ri., Garg, Ra.: Mechanical strength analysis of fly-ash based concrete in presence of red mud, *Materials today: Proceedings*, 52 (2022), pp. 472-476, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.233>
- [43] Tang, W.C., Wang, Z., Liu, Y., Cui, H.Z.: Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 178 (2018), pp. 288-300, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.171>
- [44] Liu, Y., Zhuge, Y., Chen, X., Duan, W., Fan, R., Outhred, L., Wang, L.: Micro-chemomechanical properties of red mud binder and its effect on concrete, *Composites Part B: Engineering*, 110688 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110688>
- [45] Venkatesh, C., Ruben, N., Madduru, S.R.C.: Role of red mud as a cementing material in concrete: a comprehensive study on durability behavior, *Innovative Infrastructure Solutions*, 6 (2021) 13, <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00371-2>
- [46] Pujar, S.M., Prakash, K.B.: Effect of replacement of cement by red mud on the properties of concrete, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5 (2014) 9, pp. 805-816.
- [47] Sethy, K., Sitha, R.K., Barpanda, S., Bhoi, B.R.: Experimental investigation of strength properties of red mud concrete, *AIP Conference Proceedings* 2158, 020015, 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5127139>
- [48] Sabzi, J., Asadi Shamsabadi, E., Ghalehnovi, M., Hadigheh, S.A., Khodabakhshian, A., Brito, Jd.: Mechanical and Durability Properties of Mortars Incorporating Red Mud, Ground Granulated Blast Furnace Slag, and Electric Arc Furnace Dust, *Applied Sciences*, 11 (2021) 9, p. 4110, <https://doi.org/10.3390/app11094110>
- [49] Zhao, M., Zhang, G., Htet, K.W., Kwon, M., Liu, C., Xu, Y., Tao, M.: Freeze-thaw durability of red mud slurry-class F fly ash-based geopolymer: Effect of curing conditions, *Construction and Building Materials*, 215 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.235>
- [50] Dodoo-Arhin, D., Nuamah, R.A., Agyei-Tuffour, B., Obada, D.O., Yaya, A.: Awaso Bauxite Red Mud-Cement Based Composites: Characterisation for Pavement Applications, *Case Studies in Construction Materials*, 7 (2017), pp. 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.003>