

Primljen / Received: 10.2.2016.

Ispravljen / Corrected: 14.10.2016.

Prihvaćen / Accepted: 6.2.2017.

Dostupno online / Available online: 10.6.2018.

# Mogućnosti upotrebe pepela s dna peći u betonskim predgotovljenim proizvodima

## Autori:



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Ksenija Janković**, dipl.ing.građ.  
[ksenija.jankovic@institutims.rs](mailto:ksenija.jankovic@institutims.rs)



<sup>1</sup>Dr.sc. **Dragan Bojović**, dipl.ing.građ.  
[dragan.bojovic@institutims.rs](mailto:dragan.bojovic@institutims.rs)



<sup>1</sup>**Ljiljana Lončar**, dipl.ing.građ.  
[ljiljana.loncar@institutims.rs](mailto:ljiljana.loncar@institutims.rs)



<sup>1</sup>Mr.sc. **Marko Stojanović**, dipl.ing.građ.  
[marko.stojanovic@institutims.rs](mailto:marko.stojanovic@institutims.rs)



<sup>1</sup>Mr.sc. **Lana Antić**, dipl.ing.građ.  
[ana.antic@institutims.rs](mailto:ana.antic@institutims.rs)

<sup>1</sup>Institut za ispitivanje materijala - IMS  
Srbija

Stručni rad

## **Ksenija Janković, Dragan Bojović, Ljiljana Lončar, Marko Stojanović, Lana Antić** Mogućnosti upotrebe pepela s dna peći u betonskim predgotovljenim proizvodima

Kako bi se ocijenila kvaliteta pepela s dna peći i utvrdila mogućnost njegove upotrebe u kompozitnim materijalima, provedeno je ispitivanje njegovih kemijskih, fizikalnih i mehaničkih svojstava iz dvije termoelektre. Utvrđeno je da uzorci pepela s dna peći iz obje elektrane pokazuju dobra svojstva koja upućuju na mogućnost njihove praktične primjene te da ispunjavaju većinu kriterija propisanih za leteći pepeo. Ispitani su uzorci s 4 %, 8 %, 12 % i 16 % zamjene sitnog agregata pepelom. Rezultati su zadovoljili kriterije propisa za beton, što opravdava upotrebom pepela s dna peći u građevinskoj industriji.

### Ključne riječi:

pepeo s dna peći, termoelektre, beton, trajnost, održivi razvoj

Professional paper

## **Ksenija Janković, Dragan Bojović, Ljiljana Lončar, Marko Stojanović, Lana Antić** Possibility of using bottom ash in precast concrete products

Chemical, physical and mechanical properties of bottom ash from two thermal power plants were analysed in order to evaluate the quality of bottom ash and to determine the possibility of its use in composite materials. It was found that the bottom ash samples from both power plants show good properties enabling their practical use, and that they also meet most of the criteria specified for fly ash. Samples in which 4, 8, 12 and 16% of fine aggregate was replaced with bottom ash were tested. The results meet criteria of applicable regulations for concrete, which justifies the use of bottom ash in construction industry.

### Key words:

bottom ash, thermal power plant, concrete, durability, sustainable development

Fachbericht

## **Ksenija Janković, Dragan Bojović, Ljiljana Lončar, Marko Stojanović, Lana Antić** Möglichkeit der Verwendung von Asche vom Ofenboden in vorgefertigten Betonprodukten

Um die Qualität der Asche vom Ofenboden zu bewerten sowie die Möglichkeit ihrer Verwendung in Verbundwerkstoffen festzustellen, wurde eine Untersuchung ihrer chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften aus zwei Wärmekraftwerken durchgeführt. Festgestellt wurde, dass die Ascheproben vom Ofenboden aus beiden Kraftwerken gute Eigenschaften aufzeigen, die auf die Möglichkeit ihrer praktischen Verwendung hindeuten, und dass sie die meisten der für Flugasche vorgeschriebenen Kriterien erfüllen. Untersucht wurden Proben mit 4%, 8%, 12% und 16% Ersatz des kleinen Aggregats durch Asche. Die Ergebnisse erfüllten die für Beton vorgeschriebenen Kriterien, was die Verwendung von Asche vom Ofenboden in der Bauindustrie rechtfertigt.

### Schlüsselwörter:

Asche vom Ofenboden, Wärmekraftwerk, Beton, Dauerhaftigkeit, nachhaltige Entwicklung

## 1. Uvod

U radu se opisuje kako se može pepeo dobiven spaljivanjem ugljena u dnu peći upotrebljavati u betonu te kako takav pepeo utječe na svojstva betona kao što su obradivost, tlačna čvrstoća, izdvajanje vode na površini, vrijeme vezivanja, vlačna čvrstoća cijepanjem, čvrstoća savijanjem, skupljanje i trajnost. Pepeo s dna peći pokazao se kao potencijalno održivi materijal za proizvodnju trajnog betona ako se koristi kao sitni agregat. Njegova upotreba može biti korisna za zaštitu okoliša oko termoelektrana [1].

Istraživanja su pokazala da tradicionalna proizvodnja portland cementa nije održiva zbog vrlo velike potrošnje prirodnih izvora i energije te značajne emisije CO<sub>2</sub>. Značajno povećanje volumena industrijskog otpada dovelo je do niza ekonomskih i ekoloških problema. Ugradnja industrijskog otpada u cementne materijale moguća je primjenom različitih tradicionalnih metoda [2].

Zhang i dr. istraživali su svojstva cementnih kompozita s letećim pepelom. Zaključili su da se smanjenjem udjela letećeg pepela tlačna čvrstoća i širina pukotina povećavaju [3].

Mogućnost upotrebe crvenog mulja i nusproizvoda iz industrije ugljena kao sirovina za proizvodnju cementnih materijala istražili su Yao i dr. Navedeni autori ustanovili su da pri starosti od 6 do 12 mjeseci projektirani cementni kompozit ima veću čvrstoću od referentnog kompozita [4].

Cementni mort koji sadrži 8 % ultrasitnog letećeg pepela (eng. *ultrafine fly ash* - UFFA) kao djelomične zamjene cementa postigao je poboljšanje tlačne čvrstoće za 27 % kroz 7 dana u odnosu na referentni cementni mort [5]. Ovakvo povećanje tlačne čvrstoće može se objasniti ubrzanom hidratacijom zbog velike specifične površine i pucolanske aktivnosti UFFA-a.

Siddique je istražio svojstva samozbijajućeg betona (SCC) izrađenog s različitim udjelima pepela ugljena s dna peći. Smanjenjem postotka zamjene sitnog agregata pepelom s dna peći dolazi do smanjenja upijanja vode i sorptivnosti SCC-a, dok suprotno tome dolazi do povećanja otpornosti na habanje [6].

Kompatibilnost cementa i dodataka, kao i njihove količine utječu na svojstva cementnih materijala. Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje cementnih mortova s dodatkom aeranta i različitim vrstama superplastifikatora istražili su Ozturk i Erdem [7].

Singh i Siddique proučavali su upotrebu pepela ugljena s dna peći (eng. *coal bottom ash* - CBA) kao sitnog agregata u betonu. Riječni pijesak zamijenjen je CBA-om u različitim postotcima, što se nije značajno odrazilo na tlačnu čvrstoću betona pri starosti od 28 dana u određenim uvjetima njegovanja. Pucolanska aktivnost pepela ugljena s dna peći utjecala je na tlačnu čvrstoću nakon 28 dana, te je beton s pepelom postigao veću tlačnu čvrstoću od referentnog betona [8].

Utjecaj vrste drobilice na svojstva agregata i betona istraživali su Ozturk i dr. Navedeni autori otkrili su da beton proizveden s agregatom dobivenim udarnim drobilicama ima bolju tlačnu čvrstoću u odnosu na beton s agregatom dobivenim drobilicama s vertikalnom osovinom [9].

Aggarwal i Siddique istraživali su učinak jednakih količina otpadnog pijeska iz ljevaonica i pepela s dna peći kao zamjene sitnog agregata na svojstva betona. Rezultati su pokazali da beton sa 30 % zamjene prirodnog sitnog agregata s industrijskim nusproizvodima ima veći porast tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće savijanjem u odnosu na obični beton [10]. Rezultati ispitivanja prikazani u [11] pokazuju da, u usporedbi s običnim betonom, beton s pepelom s dna peći je postigao bolju dimenzijsku stabilnost i ponešto bolju otpornost na djelovanje sumporne kiseline te bolju otpornost na prodor iona klorida.

Kim je zaključio da je obradivost mješavina s praškom pepela s dna peći značajno veća u odnosu na mješavine koje su uključivale samo cement i leteći pepeo, ali su imale slične tlačne čvrstoće pri starosti od 3 i 28 dana [12].

Beton s 80 % pepela ugljena s dna peći može se upotrebljavati za proizvodnju barijera za zaštitu od buke na autocestama [13]. U istraživanju koje su proveli Singh i Siddique, pepeo ugljena s dna peći korišten je kao zamjena za riječni pijesak u iznosu od 0, 30, 50, 75 i 100 % zamjene po masi betona. Ustanovili su da upotreba pepela ugljena s dna peći u betonu nije utjecala na tlačnu čvrstoću i brzinu impulsa kroz beton pri starosti 28 dana. Upijanje vode i početna brzina kapilanog upijanja vode se povećala [14].

Wan Ibrahim i dr. proučavali su učinak pepela ugljena s dna peći kao djelomične zamjene sitnog agregata u SCC-u, i to prije svega učinak na vlačnu čvrstoću cijepanjem. Istraživanje je obuhvaćalo različite razine zamjene s pepelom ugljena s dna peći (CBA), tj. 0 %, 10 %, 20 % i 30 %, s varijacijama omjera vode i cementa od 0,35, 0,40 i 0,45. Vlačna čvrstoća cijepanjem i gustoća SCC-a smanjuju se s povećanjem razine zamjene CBA-a. Dodatno, povećanje omjera vode i cementa dovelo je do smanjenja vlačne čvrstoće cijepanjem SCC-a [15].

Kako bi se ocijenila kvaliteta pepela s dna peći i procijenile mogućnosti njegove upotrebe u kompozitnim materijalima, provedeno je detaljno ispitivanje kemijskih, fizikalnih i mehaničkih svojstava uzoraka koji potječu iz silosa TENT B i TEKO B. Budući da još ne postoje norme za pepeo s dna peći, za potrebe ispitivanja primijenjene su norme za suhi leteći pepeo (SRPS EN 450-1: 2014 i SRPS.B.C1.018).

## 2. Eksperimentalni rad

### 2.1. Pepeo s dna peći

U skladu s normom SRPS EN 450-1, na temelju kemijskog sastava (tablica 1.), ispitani pepeo s dna peći iz termoelektrane "Nikola Tesla" B, Obrenovac (TENT B) i termoelektrane Kostolac B (TEKO B) ispunjava kriterije za: gubitak žarenjem ≤ 5 % (odgovara pepelu A kategorije); udio ukupnih oksida SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 70 %, udio MgO ≤ 4 %, udio SO<sub>3</sub> ≤ 3 %, ukupni udio alkalija ≤ 5 %. Udio reaktivnog CaO ispunjava propisane kriterije, dok udio reaktivnog SiO<sub>2</sub> u pepelu s dna peći iz TENT B nije zadovoljio kriterije. U slučaju pepela s dna peći iz TEKO B, zadovoljeni su kriteriji postavljeni za leteći pepeo.

Tablica 1. Kemijski sastav pepela s dna peći iz silosa TENT B i TEKO B

Termoelektrana Kemijski sastav pepela [%]	TENT B	TEKO B
Gubitak žarenjem pri 1000 °C	2,90	3,13
SiO <sub>2</sub>	63,42	50,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,16	22,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,34	12,10
CaO	3,33	8,94
MgO	1,32	1,94
SO <sub>3</sub>	0,36	0,29
S	0,00	0,00
Na <sub>2</sub> O	0,30	0,33
K <sub>2</sub> O	0,96	0,66
MnO	0,00	0,00
Vlaga na 105 °C	0,50	1,08
CO <sub>2</sub>	0,55	0,52
Netopljivi ostatak HCl/Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	73,33	69,09
Netopljivi ostatak HCl/KOH	50,38	13,72
Udio reaktivnog SiO <sub>2</sub>	19,12	43,60
Udio reaktivnog CaO	2,38	8,14

Iako teški metali čine relativno mali udio u pepelu s dna peći, oni su predmet istraživanja zbog svoje sklonosti taloženju, zbog dugog trajanja, sposobnosti migracije i vrlo visoke toksičnosti za okoliš. Rezultati ispitivanja udjela teških metala pokazuju da su koncentracije u uzorcima pepela s dna peći iz oba TE unutar granica ili znatno ispod propisanih vrijednosti za EFA-u (eng. European fly ash - europski leteći pepeo).

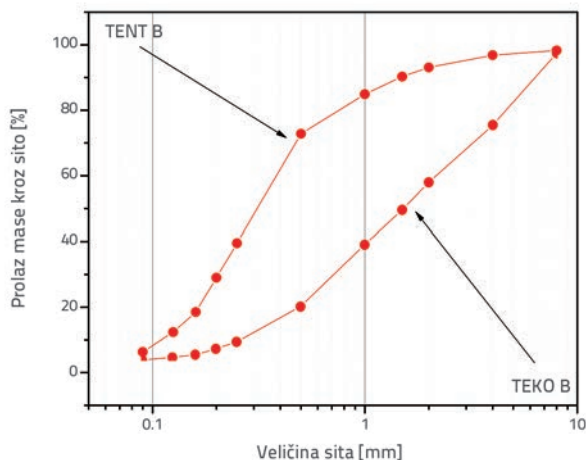
Udio teških metala u eluatu iz oba uzorka pepela s dna peći unutar je granica koje su propisane u *Uredbi o kategorijama, ispitivanju i razvrstavanju otpada*, Službeni glasnik RS 56/2010 za inertni otpad. Dobivene niske razine udjela teških metala u eluatima pepela s dna peći omogućuju njegovu upotrebu u kompozitima različitih tipova, pa čak i kad se pepeo s dna peći primjenjuje u visokom postotku (npr. kompoziti za izradnju prometnica imaju postotak pepela s dna peći veći od 90 %).

Kako bi se provjerila razina radioaktivnosti pepela s dna peći, provedeno je gama spektrometrijsko ispitivanje obje vrste pepela iz TENT B i TEKO B (*Uredba o kontroli robe pri uvozu, izvozu i u tranzitu*, Službeni glasnik RS broj 44/11). Rezultati ispitivanja za obje vrste pepela s dna peći daleko su ispod granica onečišćenja, te je količina udjela radionuklida mala, pa se obje vrste pepela s dna peći mogu slobodno koristiti u gradnji zgrada, kako za unutarnje tako i za vanjske primjene, te u građevinarstvu općenito.

Primjenom mineraloške analize u uzorku pepela s dna peći iz TENT B otkriveno je da u sastavu prevladavaju uglavnom kvarc (86,4 %) i hematit (11,8 %), a u uzorku pepela s dna peći iz TEKO B prevladavaju albit (71,6 %), kvarc (13,5 %), vapno (6,8 %) i kristobalit (6,7 %). Udio minerala u postotku prikazan je u odnosu

na ukupnu kristalnu fazu prisutnu u pepelu s dna peći. Uzorak iz TEKO B imao je veću količinu amorfne faze koja vjerojatno potječe iz faze degradacije gline što je karakteristika silikatnih pepela.

Na temelju analize veličine čestica utvrđeno je da su uzorci pepela s dna peći znatno veći od letećeg pepela iz istih termoelektrana. Veličina čestica bila je u rasponu od 0,09 mm do 8,0 mm. Najveći udio frakcija zrna iz pepela s dna peći iz TENT B bio je do veličine 1,0 mm (80 % svih zrna), a u slučaju pepela s dna peći iz TEKO B raspodjela je bila ravnomjernija (40 % zrna je bilo manje od 1 mm a 60 % veće od 1 mm). Raspodjela veličine čestica pepela s dna peći prikazana je na slici 1.



Slika 1. Analiza raspodjele veličine čestica uzorka pepela s dna peći iz TENT B i TEKO B

Fizikalna i mehanička ispitivanja pepela s dna peći provedena su primjenom metode definirane normom SRPS B.C1.018. Nasipna gustoća uzoraka pepela s dna peći bila je 2,24 g/cm<sup>3</sup> za TENT B i 2,42 g/cm<sup>3</sup> za TEKO B. Pucolanska aktivnost određena na mljevenim uzorcima pokazala je relativno niske vrijednosti od 6,1 i 4,6 MPa. Pucolanska aktivnost pokazuje sposobnost silicijeva dioksida i aluminijeva oksida sadržanog u pepelu s dna peći da reagiraju s raspoloživim kalcijem i/ili magnezijem iz proizvoda hidratacije portland cementa, tj. vapna (tablica 2.).

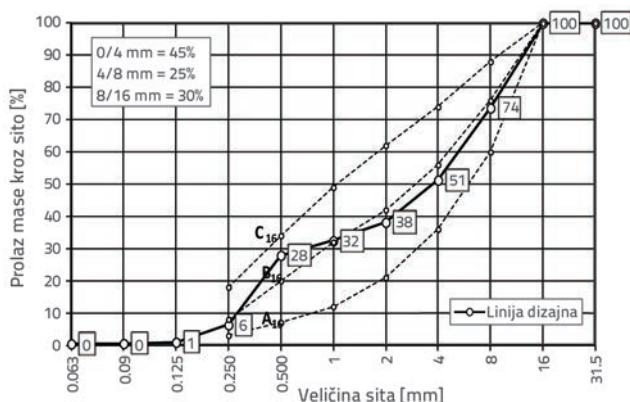
Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva pepela s dna peći iz silosa TENT B i TEKO B

	TENT B	TEKO B
<b>Finoća mliva - ostatak u situ (samljeveni uzorak) [%]</b>		
0,2 mm	0,0	0,0
0,09 mm	1,0	0,0
0,063 mm	3,0	3,2
0,043 mm	9,0	11,5
Nasipna gustoća [g7 cm <sup>3</sup> ]	2,24	2,42
Specifična površina [cm <sup>2</sup> /g]	4130	5110
Pucolanska aktivnost [MPa]		
- čvrstoća savijanjem	2,2	2,0
- tlačna čvrstoća	6,1	4,6

Nakon što su provedena ispitivanja propisana normama, ustanovljeno je da pepeli s dna peći iz TENT B i TEKO B pokazuju dobra svojstva s obzirom na njihovu namjeravanu primjenu te ujedno zadovoljavaju i većinu kriterija postavljenih za leteći pepeo.

## 2.2. Mješavine betona

Kako bi se istražile mogućnosti primjene pepela s dna peći u predgotovljenim betonskim proizvodima, provedeno je ispitivanje betona s pepelom s dna peći iz dvije termoelektre TENT B i TEKO B. U oba slučaja sitnija frakcija agregata 0/4 mm zamijenjena je sa 4 %, 8 %, 12 % i 16 % pepela s dna peći. Količina cementa iznosila je 340 kg/m<sup>3</sup>, najveća veličina zrna agregata D<sub>max</sub> = 16 mm, razred konzistencije slijeganjem S3 (mjereno 5 minuta od trenutka dodavanja vode). Mješavina agregata, odnosno njegov granulometrijski sastav određen je prema normi SRPS U.M1.057 i prikazan na slici 2.



Slika 2. Granulometrijski sastav agregata

Za potrebe ispitivanja korišteni su sljedeći materijali:

- cement: CEM I 42,5 R BFC Lafarge (tablica 3.)
- agregat: riječne, oprane, odvojene frakcije 0/4, 4/8, 8/16, iz Dunava

Tablica 4. Sastavi betonskih mješavina

Serija betona	Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	Pepeo s dna peći [kg/m <sup>3</sup> ]	Frakcija agregata 0/4 mm	Dodatak [%]	
				superplastifikator	aerant
Referentni beton	330	0	808,0	0,65	0,45
Pepeo s dna peći TENT B	4 %	32,3	775,7	0,65	0,45
	8 %	64,6	743,4	0,65	0,45
	12 %	97,0	711,0	0,65	0,45
	16 %	129,3	678,7	0,65	0,45
Pepeo s dna peći TEKO B	4 %	32,3	775,7	0,65	0,45
	8 %	64,6	743,4	0,65	0,45
	12 %	97,0	711,0	0,65	0,45
	16 %	129,3	678,7	0,65	0,45

Agregat = 1795 kg/m<sup>3</sup>, vodovezivni omjer = 0,448

- dodaci: superplastifikator 0,65 % "Dinamon LZF 35" i aerant 0,45 % "Mapeair LP 400", "MAPEI-Betontechnik GmbH", Austrija
- voda: pitka voda iz gradske vodoopskrbe
- pepeo s dna peći: iz TE "Nikola Tesla" B, Obrenovac (TENT B) i iz termoelektre Kostolac B (TEKO B).

Sastavi betonskih mješavina navedeni su u tablici 4., a ispitana svojstva u tablici 5..

Tablica 3. Svojstva cementa

Kemijski sastav [%]	
SiO <sub>2</sub>	21,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,20
CaO	63,45
MgO	3,00
SO <sub>3</sub>	3,20
S <sup>2-</sup>	0,05
Na <sub>2</sub> O	0,27
K <sub>2</sub> O	0,52
MnO	0,075
L.O.I.	1,15
I.R.	0,62
F.C.aO	0,67
Fizikalna svojstva cementa	
Specifična težina [kg/m <sup>3</sup> ]	3130
Početno vrijeme vezivanja [min]	160
Završno vrijeme vezivanja [min]	210
Specifična površina (Blain) [cm <sup>2</sup> /g]	4010
Tlačna čvrstoća cementa [MPa]	
2 dana	33,8
7 dana	44,8
28 dana	54,4

Tablica 5. Ispitana svojstva

Ispitana svojstva	Norma	Broj uzoraka
<b>Svježi beton</b>		
Konzistencija	SRPS ISO 4109	1 uzorak u seriji
Gustoća	SRPS ISO 6276	1 uzorak u seriji
Količina uvučenog zraka	SRPS ISO 4848	1 uzorak u seriji
<b>Očvrsnuli beton</b>		
Gustoća	SRPS ISO 6275	3 uzorka svake starosti
Tlačna čvrstoća	SRPS ISO 4012	3 uzorka svake starosti
Prodor vode pod tlakom	SRPS U.M1.015	3 uzorka u 1 seriji
Otpornost na smrzavanje	SRPS U.M1.016	15 uzoraka u 1 seriji
Otpornost površine betona na smrzavanje i soli za odmrzavanje	SRPS U.M1.055	3 uzorka u 1 seriji

Tablica 6. Rezultati ispitivanja svojstava svježeg betona

Serija betona		Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Konzistencija Δh [mm]	Udio zraka [%]
Referentni beton		2280	160	4,5
Pepeo s dna peći TENT B	4 %	2279	140	4,9
	8 %	2280	135	4,7
	12 %	2284	150	5,0
	16 %	2268	150	5,8
Pepeo s dna peći TEKO B	4 %	2310	105	4,0
	8 %	2315	100	4,1
	12 %	2302	115	4,5
	16 %	2300	110	4,6

Tablica 7. Rezultati ispitivanja svojstava očvrstlog betona

Serija betona	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Tlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Dubina prodiranja vode [mm]	Otpornost na smrzavanje	Otpornost na djelovanje mraza i soli za odmrzavanje (stupanj oštećenja)	
	28 dana					
Referentni beton	2280	49,9	15	M-200	0	
Pepeo s dna peći TENT B	4 %	2280	46,9	25	M-200	0
	8 %	2280	46,8	25	M-200	0
	12 %	2280	42,8	25	M-200	0
	16 %	2270	41,8	25	M-200	0
Pepeo s dna peći TEKO B	4 %	2310	48,6	15	M-200	0
	8 %	2320	48,4	10	M-200	0
	12 %	2300	47,7	20	M-200	0
	16 %	2300	47,0	20	M-200	0

### 3. Rezultati i rasprava

Rezultati ispitivanja svojstava svježeg betona prikazani su u tablici 6., a rezultati očvrstnalog betona u tablici 7.

Napomena: Prema normi SRPS EN 206-1: 2011 za razrede izloženosti XF1 do XF4 (utjecaj na smrzavanje/odmrzavanje), preporučena je vrijednost za minimalni udio zraka 4 %.

Vodocementni omjer za sve betone bio je  $v/c = 0,448$ , a udio zraka veći od 4,0 %. Uzimajući u obzir specifična svojstva koja utječu na trajnost betona, minimalni udio cementa, vodocementni omjer i udio zraka za razred izloženosti XF4 (smrzavanje i odmrzavanje) zadovoljena su u skladu s normom SRPS EN 206-1: 2011 (okolišni uvjeti koji uključuju veliku zasićenost vode solima za odmrzavanje, na primjer, ploče prometnica i mostova). Prema

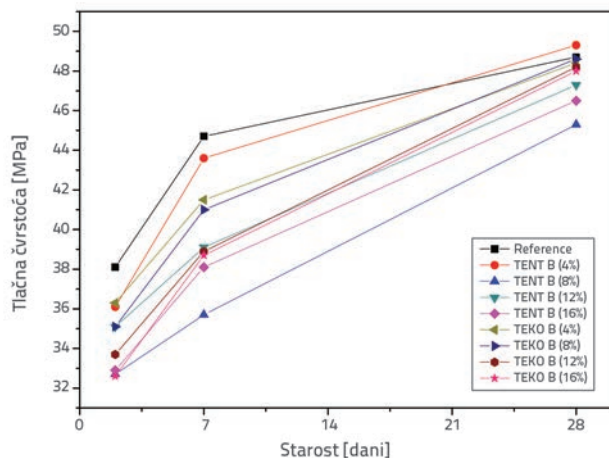


prethodno navedenoj normi, razred tlačne čvrstoće C 30/37 također mora biti zadovoljen. Dobiveni rezultati potvrđuju ispunjenje tog zahtjeva.

Svi ispitani uzorci postigli su otpornost na smrzavanje M-200. Nije bilo značajnih promjena na površini uzoraka koji su ispitani na djelovanje mraza i soli za odmrzavanje nakon 30 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

Promjene tlačne čvrstoće betona starosti 3, 7 i 28 dana prikazane su na slici 3.

Slika 3. Tlačna čvrstoća betona starosti 3, 7 i 28 dana



Rezultati pokazuju da s povećanjem postotka zamjene dijela sitne frakcije agregata pepelom s dna peći dolazi do smanjenja tlačne čvrstoće, i to za obje vrste pepela.

Norma prema kojoj je provedeno ispitivanje dubine prodiranja vode pod tlakom nema definirane kriterije ocjene. Dubina prodiranja vode za pepeo s dna peći TENT B iznosila je 25 mm, a u slučaju pepela s dna peći TEKO B ta je dubina bila od 10 mm do 20 mm.

Svi uzorci ispitani na djelovanje mraza ispunili su kriterije prema normi SRPS U.M1.015 za uvjetovanu otpornost na djelovanje mraza M-200.

Svi uzorci ispitani na djelovanje mraza i soli za odmrzavanje ispunili su kriterije prema normi SRPS U.M1.055 sa stupnjem oštećenja 0 (nula) - bez ljuštenja.

## LITERATURA

- [1] Singha, M., Siddique, R.: Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete, Resources, Conservation and Recycling, 72 (2013), pp. 20-32, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.006>
- [2] Zhang, T., Gao, Pe., Pinhai Gao, Pi., Wei, J., Yu, Q.: Effectiveness of novel and traditional methods to incorporate industrial wastes in cementitious materials - An overview, Resources, Conservation and Recycling, 74 (2013), pp. 134-143, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.003>
- [3] Zhang, Z., Qian, S., Ma, H.: Investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ECC with different volume of fly ash, Construction and Building Materials, 52 (2014), pp. 17-23, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.001>
- [4] Yao, Y., Li, Y., Liu, X., Jiang, S., Feng, C., Rafanan, E.: Characterization on a cementitious material composed of red mud and coal industry byproducts, Construction and Building Materials, 47 (2013), pp. 496-501

## 4. Zaključak

Na temelju provednih ispitivanja zaključeno je da se pepeo s dna peći iz termoelektrana TENT B i TEKO B može koristiti kao djelomična zamjena sitne frakcije agregata u betonu. Navode se karakteristični zaključci:

- Rezultati tlačne čvrstoće pokazali su tendenciju smanjenja s povećanjem postotka zamjene dijela sitne frakcije agregata s pepelom s dna peći u oba slučaja, a pojedinačni rezultati ispunjavaju zahtjeve razreda tlačne čvrstoće MB 40 (C 30/37).
- Norma prema kojoj je provedeno ispitivanje dubine prodiranja vode pod tlakom ne definira kriterije za ocjenu; ali prema iskustvu može se zaključiti da su rezultati ispitivanja zadovoljavajući.
- Svi uzorci ispitani na djelovanje mraza ispunili su kriterije dane u SRPS U.M1.015 za uvjetovanu otpornost na djelovanje mraza M-200.
- Svi uzorci ispitani na otpornost na djelovanje mraza i soli za odmrzavanje ispunili su kriterije prema normi SRPS U.M1.055 (30 ciklusa), stupanj oštećenja 0 (nula) - bez ljuštenja.

Budući da prikazani rezultati ispunjavaju kriterije propisa primjenjivih za beton, upotreba pepela s dna peći u građevinskoj industriji smatra se opravdanom. Takvom upotrebom pepeo s dna peći termoelektrane prestaje biti nusproizvod i dobiva dodanu vrijednost. S ekološkog stajališta to znači smanjenje odlagališta, čime se smanjuje rizik onečišćenja i zagađenja okoliša, a ujedno i ograničava potrošnja neobnovljivih prirodnih mineralnih sirovina.

Očuvanje prirodnih izvora bitan je čimbenik kako u pogledu gospodarstva tako i u pogledu doprinosa održivom razvoju.

## Zahvala

Ovaj rad, kao dio istraživačkog projekta TR 36017 "Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji", podržalo je Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

- [5] Supit, S.W.M., Shaikh, F.U.A., Sarker, P.K.: Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 51 (2014), pp. 278-286, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.002>
- [6] Siddique, R.: Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash, *Construction and Building Materials*, 47 (2013), pp. 1444-1450, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.081>
- [7] Öztürk, A.U., Erdem, R.T.: Influence Of The Air Entraining Admixture With Different Superplasticizers On The Freeze Thaw Resistance Of Cement Mortars, *Romanian Journal of Materials*, 46 (2016) 1, pp. 75-81
- [8] Singh, M., Siddique, R.: Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 50 (2014), pp. 246-256, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.026>
- [9] Öztürk, A.U., Erdem, R.T., Kozanoglu, C.: Investigation of Crushing Type of Concrete Aggregates on Mechanical Properties of Concrete, *International Journal of Materials Engineering*, 2 (2012) 2, pp. 6-9
- [10] Aggarwal, Y., Siddique, R.: Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates, *Construction and Building Materials*, 54 (2014), pp. 210-223, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051>
- [11] Singh, M., Siddique, R.: Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand, *Construction and Building Materials*, 68 (2014), pp. 39-48, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.034>
- [12] Kim, H.K.: Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength mortar to improve workability, *Construction and Building Materials*, 91 (2015), pp. 57-64, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.017>
- [13] Arenas, C., Leiva, C., Vilches, L.F., Cifuentes, H., Rodríguez-Galán, M.: Technical specifications for highway noise barriers made of coal bottom ash-based sound absorbing concrete, *Construction and Building Materials*, 95 (2015), pp. 585-591, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.107>
- [14] Singh, M., Siddique, R.: Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate, *Journal of Cleaner Production*, 91 (2015), pp. 269-278, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.026>
- [15] Wan Ibrahim, M.H., Hamzah, A.F., Jamaluddin, N., Ramadhansyah, P.J., Fadzil, A.M.: Split Tensile Strength on Self-Compacting Concrete Containing Coal Bottom Ash, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195 (2015), pp. 2280-2289, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.317>