

UTJECAJ RAZLIČITIH TIPOVA ELEKTROFILTERSKOG PEPELA NA SVOJSTVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

THE EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF FLY ASH ON SELF- COMPACTING CONCRETE PROPERTIES

Doc. dr. sc. Adnan Mujkanović, prof. dr. sc. Ilhan Bušatlić, prof. dr. sc. Marina
Jovanović, Dženana Bećirhodžić, dipl. ing.
Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i materijale
Zenica, BiH

Ključne riječi: samozbijajući beton, svojstva, elektrofilterski pepeo

REZIME

U ovom radu istraživana je utjecaj dvije različite vrste elektrofilterskog pepela na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju: pepela Termoelektrane „Kakanj“ i pepela Termoelektrane „Tuzla“. Rezultati ispitivanja svojstava svježeg samozbijajućeg betona pokazuju da dodatak elektrofilterskog pepela iz TE Kakanj vodi poboljšanju reoloških svojstava svježe mješavine samozbijajućeg betona, dok sa upotrebom elektrofilterskog pepela iz TE Tuzla povećava kohezivnost mješavine i njena potreba za vodom. U pogledu čvrstoće na pritisak i na savijanje, te brzine prirasta čvrstoće nisu zabilježene značajnije razlike između betona sa različitim vrstama pepela.

Key words: self-compacting concrete, properties, fly ash

ABSTRACT

In this paper the effect of two different fly ash types on the properties of self-compacting concrete in fresh state and hardened state was investigated: fly ash from Thermal power plant “Kakanj” and fly ash from Thermal power plant “Tuzla”. The results of testing fresh self-compacting concrete properties show that addition of fly ash from TPP “Kakanj” leads to improvement of fresh self-compacting concrete mixture rheology, while using fly ash from TPP “Tuzla” increase cohesivity of mixture and its water demand. Testing of compressive strength, flexural strength and rate of strength development showed that there were not significant differences between two concretes in hardened state.

1. UVOD

Samozbijajući beton (eng. Self-Compacting Concrete, Self-Consolidating Concrete, SCC) je savremeni cementni kompozit koji se svrstava u betone visoke kvalitete. Samozbijajući beton ima sposobnost tečenja pod utjecajem vlastite težine i u potpunosti popunjava oplatu zaobilazeći armaturu, te zadržava horizontalnu površinu bez potrebe za zbijanjem upotrebom vibracijskih uređaja [1]. Osnovna svojstva ovog betona su odlična obradljivost, kao i otpornost na segregaciju, a zadržava i stabilan sastav tokom transporta i ugradnje, kao i nakon ugradnje [1,2,3,4]. Samozbijajući beton je pogodan za teške konstrukcije i složene kalupe, te sve druge primjene koje zahtijevaju visoku kvalitetu i završnu obradu [1,5,6,7]. Od konvencionalnog betona razlikuje po specifičnom svojstvu koje se naziva samozbijanje. Ovaj beton zahtijeva kombinaciju tri različita ključna svojstva: sposobnosti popunjavanja, sposobnosti prolaženja, i otpornosti na segregaciju. Sposobnost popunjavanja je sposobnost svježeg betona da teče pod utjecajem vlastite težine i u potpunosti popunjava oplatu. Sposobnost prolaženja je sposobnost prolaska kroz zatvorene ili sužene prostore, uske otvore i između armature. Otpornost na segregaciju je sposobnost svježeg betona da zadrži uniformnu raspodjelu sastavnih materijala tokom transporta, ugradnje i zbijanja [1,2,5,6]. Elektrofilterski pepeo se dobiva elektrostatskim ili mehaničkim izdvajanjem praškastih čestica iz dimnih plinova peći loženih samljevenim ugljem. Kao mineralni dodatak, elektrofilterski pepeo doprinosi svojstvima samozbijajućeg betona kroz svoje fizičke i hemijske utjecaje. Naime, kada se u beton dodaje elektrofilterski pepeo, on djeluje dvojako: kao fina frakcija agregata u mješavini svježeg betona i kao vezivna komponenta u procesu očvršćavanja [2,8].

2. EKSPERIMENTALNI RAD

U cilju utvrđivanja utjecaja različitih vrsta elektrofilterskog pepela izvršeno je projektovanje sastava samozbijajućeg betona, a zatim su pripremljene i ispitane svježe betonske mješavine. Nakon pripreme uzoraka očvrstlog betona i njihovog njegovanja izvršeno je ispitivanje svojstava betona u očvrstlom stanju.

2.1. Projektovanje sastava samozbijajućeg betona

U ovom istraživanju, projektovanje sastava mješavina samozbijajućeg betona izvršeno je prema UCL metodi [9]. UCL metoda uključuje procjenjivanje proporcija mješavine za dati skup potrebnih svojstava, a nakon toga ispitivanje svojstava mješavine, i ukoliko je potrebno, prilagođavanje i poboljšavanje sastava mješavine samozbijajućeg betona [9].

2.1.1. Sastav mješavina samozbijajućeg betona

Mješavine samozbijajućeg betona pripremljene su iz lokalno dostupnih sirovina. Kao vezivna komponenta korišten je Portland-cement CEM I 52,5 N iz Tvornice cementa Kakanj. Kao agregat u betonskoj mješavini korišten je trofrakcijski drobljeni krečnjak, sa frakcijama 0-4, 4-8 i 8-16 mm. Kao mineralni dodaci korišteni su elektrofilterski pepeli iz Termoelektrane „Kakanj“ i Termoelektrane „Tuzla“. Kao hemijski aditivi korišteni su superplastifikator (SP) na bazi polikarboksilat etera Dynamon PC 30 ES i modifikator viskoziteta (VMA) Stabilizer strong ES proizvođača Mapei Betontechnik GmbH. Kao punilo je korišteno krečnjačko kameno brašno. U tabelama 1. i 2. date su bitne karakteristike krečnjačkog agregata, a u tabeli 3. hemijski sastav i fizičke karakteristike elektrofilterskog pepela TE Kakanj i TE Tuzla.

Tabela 1. Granulometrijski sastav agregata

Sito [mm]	Kumulativna masa [%]		
	0 – 4 mm	4 – 8 mm	8 – 16 mm
22,4	100	100	100
16	100	100	93,6
12,5	100	100	35,3
8	100	98,5	4,03
6,3	99,1	63,2	3,8
4	97,71	3,85	3,2
2	65,38	2,54	2,4
1	46,99	2,1	2,0
0,7	34,53	2,05	1,56
0,5	28,96	1,96	1,24
0,25	21,38	1,84	1,1
0,125	16,52	1,26	0,95
0,063	13,09	0,41	0,77
0	0,01	0,02	0,03

Tabela 2. Gustoća i upijanje vode agregata

Svojstvo	Frakcija agregata		
	0 – 4 mm	4 – 8 mm	8 – 16 mm
Gustoća u suhom stanju (ρ_{rd}), Mg/m ³	2,65	2,69	2,69
Prividna gustoća agregata (ρ_a), Mg/m ³	2,74	2,74	2,72
Gustoća u zasićenom površinski suhom stanju (ρ_{ssd}), Mg/m ³	2,68	2,70	2,70
Upijanje vode (WA ₂₄), Mg/m ³	0,23	0,21	0,21

Tabela 3. Hemijski sastav i fizičke karakteristike punila i elektrofilterskog pepela TE Kakanj i TE Tuzla

Komponenta	EFP TE Kakanj	EFP TE Tuzla	Punilo
G.Ž. [%]	0,14	2,60	41,62
SiO ₂ [%]	44,85	53,03	0,20
Al ₂ O ₃ [%]	20,20	19,73	0,15
Fe ₂ O ₃ [%]	8,58	10,50	0,30
CaO [%]	16,83	9,32	47,34
MgO [%]	2,62	1,89	8,47
Ostalo [%]	6,77	2,92	1,92
Specifična površina po Blaine-u [cm ² /g]	2530	2980	2260
Gustoća [g/cm ³]	2,65	1,98	2,71
Čestice <45µm [%]	62,2	92,5	53,9

U tabeli 4. dati su sastavi mješavina samozbijajućeg betona sa dvije vrste pepela: SCC I sa pepelom iz TE Kakanj i SCC II sa pepelom iz TE Tuzla.

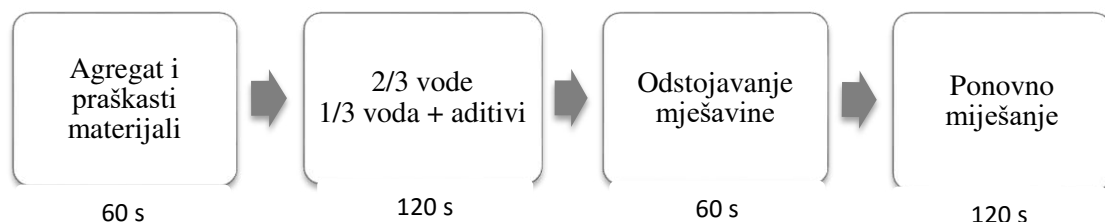
Tabela 4. Sastav mješavina samozbijajućeg betona

Komponente	Sastav SCC I (1 m ³)	Sastav SCC II (1 m ³)
Cement (kg)	290,00	290,00
Elektrofilterski pepeo (kg)	110,00	110,00
Punilo (kg)	74,00	45,00
Voda (dm ³)	176,20	189,0
Agregat 0-4 mm (kg)	941,58	941,58
Agregat 4-8 mm (kg)	316,58	316,58
Agregat 8-16 mm (kg)	475,25	475,25
SP (dm ³)	4,39	5,67
VMA (dm ³)	1,73	1,64

Iz tabele 4. uočava se da mješavina SCC II sadrži veću količinu vode i superplastifikatora, a manju količinu punila u odnosu na mješavinu SCC I. Iako je prvobitna zamisao bila da se pripreme dvije mješavine identičnog sastava, pokazalo se da je, zbog znatno manje gustoće i veće specifične površine pepela iz TE Tuzla, bilo nemoguće postići konzistenciju mješavine koja je u rangu bilo koje kategorije samozbijajućeg betona. Iz tog razloga mješavini SCC II dodata je veća količina vode i superplastifikatora. Značajne razlike u gustoći i specifičnoj površini razlog su i smanjenom udjelu punila u mješavini SCC II. Naime, prema UCL metodi projektovanja sastava samozbijajućeg betona fiksira se udio krupnog agregata, sitnog agregata i paste (smjesa cementa, pepela, punila i vode). Kako je maseni udio cementa i pepela isti kod dvije mješavine, jedino se promjenom količine punila mogao postići zadati udio paste u mješavini.

2.2. Priprema betonskih mješavina

Obje mješavine samozbijajućeg betona pripremljene su u laboratorijskoj mješalici, a procedura miješanja prikazana je na slici 1.



Slika 1. Procedura miješanja mješavine samozbijajućeg betona

2.3. Ispitivanje svojstava svježih mješavina samozbijajućeg betona

Na svježim mješavinama samozbijajućeg betona izvršena su sljedeća ispitivanja:

- rasprostiranje slijeganjem (BAS EN 12350-8),
- V-lijevak (BAS EN 12350-9),
- L-kutija (BAS EN 12350-10),
- Otpornost na segregaciju (BAS EN 12350-11),
- J-prsten (BAS EN 12350-12).

Metoda rasprostiranja slijeganjem (slump-flow) koristi se za procjenu sposobnosti popunjavanja samozbijajućeg betona, kao i tečenja samozbijajućeg betona [1,10]. Ispitivanje se vrši prema standardu BAS EN 12350-8, a prikazano je na slici 2. Vrijeme tečenja kroz V-lijevak je vrijeme za koje određeni volumen svježe mješavine samozbijajućeg betona prođe kroz otvor lijevka i pokazuje sposobnost popunjavanja samozbijajućeg betona [1,11]. Ispitivanje se vrši prema standardu BAS EN 12350-9 i prikazano je na slici 4. Ispitivanje L – kutijom koristi se za procjenu sposobnosti samozbijajućeg betona kroz uske otvore između armaturnih šipki i drugih prepreka bez segregacije ili blokiranja [1,12]. Ispitivanje se vrši prema standardu BAS EN 12350-10 i prikazano je na slici 5. Ispitivanje otpornosti na segregaciju se koristi za procjenu otpornosti samozbijajućeg betona na segregaciju [1,13]. Ispitivanje se vrši prema standardu BAS EN 12350-11 i prikazano je na slici 6. Ispitivanje J-prstenom pokazuje ponašanje samozbijajućeg betona pri blokiranju [1,14]. Ispitivanje se vrši prema standardu BAS EN 12350-12 i prikazano je na slici 3.



Slika 2. Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem



Slika 3. Ispitivanje J-prstenom



Slika 4. Ispitivanje vremena tečenja kroz V-lijevak



Slika 5. Ispitivanje L-kutijom



Slika 6. Ispitivanje otpornosti na segregaciju

Od pripremljenih mješavina samozbijajućeg betona napravljene su po tri kocke dimenzije 150×150×150 mm za određivanje čvrstoće na pritisak, kao i po tri prizme dimenzija 100×100×400 mm za ispitivanje čvrstoće na savijanje. Nakon 24 sata od ugradnje, uzorci su izvađeni iz kalupa i njegovani u termostatanom bazenu do ispitivanja.

2.4. Ispitivanje svojstava očvrstlog samozbijajućeg betona

Na uzorcima očvrstlog samozbijajućeg betona izvršena su sljedeća ispitivanja:

- čvrstoća na pritisak (BAS EN 12390-3),
- čvrstoća na savijanje (BAS EN 12390-5),

Ispitivanje čvrstoće na pritisak uzoraka samozbijajućeg betona izvršeno je prema standardu BAS EN 12390-3. Ispitani su uzorci starosti: 1, 2, 7, 14, 28 i 56 dana. Ispitivanje čvrstoće na savijanje provedeno je na uzorcima starosti 56 dana, prema standardu BAS EN 12390-5.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Rezultati ispitivanja svježih betonskih mješavina

Rezultati ispitivanja svježih betonskih mješavina prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5. Rezultati ispitivanja svježih betonskih mješavina

Ispitivanje		SCC I	SCC II
Rasprostiranje slijeganjem	Prosječni dijametar (mm)	745	720
	T ₅₀₀ (s)	1,74	2,77
V-lijevak (s)		7,42	7,84
L-kutija (H ₂ /H ₁)		0,84	0,80
Omjer segregacije (%)		4,82	4,77
J-prsten	Prosječni dijametar (mm)	740	710
	T ₅₀₀ (s)	1,95	3,18
	Razlika visina (mm)	12	16

Iz rezultata prikazanih u tabeli 2. uočava se da mješavina SCC I ima veća vrijednost rasprostiranja slijeganjem, rasprostiranja u J-prstenu, kao i kraće vrijeme T₅₀₀, te vrijeme prolaska kroz V-lijevak. Nadalje, odnos visina (H₂/H₁) kod ispitivanja L-kutijom je veći kod mješavine SCC I, dok omjer segregacije ima slične vrijednosti.

3.2. Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

U tabeli 6. prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak i savijanja uzoraka samozbijajućeg betona.

Tabela 6. Rezultati ispitivanja očvrslih uzoraka samozbijajućeg betona

Ispitivanje	Period	SCC I	SCC II
Čvrstoća na pritisak (MPa)	1 dan	16,2	16,6
	2 dana	25,0	24,2
	7 dana	43,9	41,5
	14 dana	51,3	51,6
	28 dana	57,4	61,8
	56 dana	59,6	65,4
Čvrstoća na savijanje (MPa)	56 dana	9,76	9,76

Kada je u pitanju čvrstoća na pritisak, uočava se da nema značajnijih razlika između uzoraka sa pepelom iz TE Kakanj (SCC I) i uzoraka sa pepelom iz TE Tuzla (SCC II) tokom cijelog perioda ispitivanja, od 1 do 56 dana. Čvrstoća na savijanje izmjerena nakon 56 dana ima identične vrijednosti.

4. ZAKLJUČCI

U cilju utvrđivanja prirode utjecaja različitih tipova elektrofilterskog pepela na svojstva samozbijajućeg betona, pripremljene su mješavine u kojima je 27,5 mas. % cementa CEM I zamijenjeno sa elektrofilterskim pepelom iz TE Kakanj, odnosno elektrofilterskim pepelom TE Tuzla. Korišteni pepeli se značajno razlikuju i po hemijskom sastavu i po fizičkim karakteristikama.

Na temelju rezultata ispitivanja mogu se donijeti slijedeći zaključci:

- Upotrebom elektrofilterskog pepela iz TE Kakanj dobivena je mješavina samozbijajućeg betona dobrih reoloških svojstava. Mješavina sastavljena sa proračunatim udjelima komponenata postigla je očekivane vrijednosti rasprostiranja tečenjem, tečenja u V-lijevku, L-kutiji i J-prstenu, uz dozvoljeni omjer segregacije.
- Mješavina sa elektrofilterskim pepelom iz TE Tuzla, izrađena u skladu sa proračunatim udjelima komponenata, je suviše viskozna i ne odlikuje se svojstvima samozbijanja. Iz toga razloga, neophodno je povećanje vodocementnog faktora sa 0,44 na 0,47 i udjela superplastifikatora sa 1,1 na 1,4 % u odnosu na masu veziva.
- U pogledu čvrstoće na pritisak i na savijanje, te brzine prirasta čvrstoće nisu zabilježene značajnije razlike između betona sa različitim vrstama pepela.

Zahvalnica

Autori zahvaljuju Ministarstvu obrazovanja i nauke FBiH na finansijskoj podršci. Rezultati istraživanja prikazani u radu dio su projekta „Primjena elektrofilterskog pepela u proizvodnji samozbijajućeg betona“.

5. REFERENCE

- [1] De Schutter G., J. M. Bartos P., Domone P., Gibbs J.: Self-Compacting Concrete, Whittles Publishing, Dunbeath, 2008.,
- [2] Liu, M.: Wider Application of Additions in Self-compacting Concrete, Doctoral thesis, University College London, London, 2009.,
- [3] Skazlić M., Vujica M.: Environmentally-friendly Self-Compacting Concrete, Građevinar 64, Pages 905-913, 2012.,
- [4] Alagušić M., Lavriv F.: Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona, Građevinski fakultet, Zagreb, 2010.,
- [5] Živković, S.: Samozbijajući beton – svojstva i tehnologija, Pregledni rad, Materijali i konstrukcije 46 (2003) 3-4, pp. 14-23.,
- [6] Vujica, M.: Samozbijajući ekološki održivi betoni, Građevinski fakultet, Zagreb, 2011.,
- [7] The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, EFNARC, Farnham, 2005.,
- [8] Standard BAS EN 197-1:2013, Cement - Dio 1: Sastav, specifikacije i kriteriji usklađenosti cemenata za opću upotrebu.,
- [9] Domone, P.: Proportioning of self-compacting concrete – The UCL method, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London, London, 2009.,
- [10] Standard BAS EN 12350-8:2011, Ispitivanje svježeg betona – Dio 8: Samougrađujući beton – Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem.,
- [11] Standard BAS EN 12350-9:2011, Ispitivanje svježeg betona – Dio 9: Samougrađujući beton – Ispitivanje V-lijevkom.,
- [12] Standard BAS EN 12350-10:2011, Ispitivanje svježeg betona – Dio 10: Samougrađujući beton – Ispitivanje L-posudom.,
- [13] Standard BAS EN 12350-11:2011, Ispitivanje svježeg betona – Dio 11: Samougrađujući beton – Ispitivanje segregacije prosijavanjem.,
- [14] Standard BAS EN 12350-12:2011, Ispitivanje svježeg betona – Dio 12: Samougrađujući beton – Ispitivanje J-prstenom.,
- [15] <http://www.theconcreteportal.com>, februar 2016.,
- [16] Sivakumar A., Elumalai G., Srinivasan V.: A conceptual approach of the mixture proportioning technique for producing self compacting concrete, Journal of Civil Engineering and Construction Technology, ISSN 2141-2634, Vol. 2(3), pp. 65-71, March 2011.,
- [17] Okrajnov-Bajić R., Vasović, D.: Self-compacting Concrete And Its Applications In Contemporary Architectural Practise, SPATIUM International Review, No. 20, p. 28-34, September 2009.,
- [18] Bušatlić, I.: Ispitivanje kvaliteta elektrofilterskog pepela TE Kakanj u funkciji njegove upotrebe u industriji cementa, 6. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem „Kvalitet 2009“, Neum, B&H, 04.-7. juni 2009.,
- [19] Bouzoubaa N., Lachemi M.: Self Compacting Concrete Incorporating High-Volumes of Class F Fly Ash: Preliminary Results, Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 3, Mar. 2001, pp. 413-420.,
- [20] Afiniwala S., Patel I., Patel N.: Effect of High Volume of Fly Ash on Rheological Properties of Self Compacting Concrete, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, ISSN 2250-2459, Vol. 3, Issue 7, 2013, Pages 559 -565.