

Primljen / Received: 29.7.2014.

Ispravljen / Corrected: 4.12.2014.

Prihvaćen / Accepted: 30.12.2014.

Dostupno online / Available online: 10.2.2015.

Pepeo od šećerne trske i rižinih ljuski kao zamjena za cement u samozbijajućem betonu

Autori:



Thirumalai Raja Krishnasamy, mag.ing.aedif.
EBET Group of Institutions
Odjel za građevinarstvo
Kangayam, Tamilnadu, Indija
kthirumalairaja@gmail.com



Prof.dr.sc. **Murthi Palanisamy**, dipl.ing.građ.
Sveučilište inženjerstva Vivekanandha
Odjel za građevinarstvo
drpmurthi@gmail.com

Pregledni rad

Thirumalai Raja Krishnasamy, Murthi Palanisamy

Pepeo od šećerne trske i rižinih ljuski kao zamjena za cement u samozbijajućem betonu

Provedena su istraživanja kako bi se odredila svojstva obradljivosti betona u kojem su pepeo šećerne trske i rižinih ljuski korišteni kao djelomična zamjena za cement. Pripremljene su i ispitane probne mješavine s različitim vodocementnim omjerom, različitim udjelom zamjenskih materijala, različitom količinom superplastifikatora i stabilizatora mješavine. Na temelju dobivenih rezultata određeni su omjeri za tri optimalne betonske mješavine koje zadovoljavaju zahtjeve za samozbijajući beton koji se može koristiti za različite konstrukcijske namjene.

Ključne riječi:

samozbijajući beton, pepeo šećerne trske, pepeo rižinih ljuski, obradljivost

Subject review

Thirumalai Raja Krishnasamy, Murthi Palanisamy

Bagasse ash and rice husk ash as cement replacement in self-compacting concrete

In studies conducted to determine the workability of concrete, the bagasse ash and rice husk ash were added as a partial replacement for cement. Trial mixes with the varying water cement ratio, replacement percentage, quantity of super plasticizer and viscosity modifying agent, were prepared and tested. The results were used as the basis for defining three optimum cement replacement mix proportions, which comply with the self-compacting concrete requirements for several structural applications.

Key words:

self-compacting concrete, bagasse ash, rice husk ash, workability

Übersichtsarbeit

Thirumalai Raja Krishnasamy, Murthi Palanisamy

Zuckerrohr- und Reisschalenasche als Ersatz für Zement in selbstverdichtendem Beton

Untersuchungen sind durchgeführt worden, um mit der Verarbeitbarkeit verbundene Eigenschaften von Beton, in dem Zuckerrohr- und Reisschalenasche als teilweiser Ersatz für Zement verwendet wird, zu bestimmen. Probemischungen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten, Ersatzmaterialanteilen, Fließ- und Stabilisierungsmittelmengen wurden vorbereitet und getestet. Aufgrund der erhaltenen Ergebnisse sind die Anteile für drei optimale Betonmischungen, die den Anforderungen für selbstverdichtenden Beton zur Anwendung für verschiedene Konstruktionszwecke entsprechen, ermittelt worden.

Schlüsselwörter:

selbstverdichtender Beton, Zuckerrohrasche, Reisschalenasche, Verarbeitbarkeit

1. Uvod

Samozbijajući beton (eng. *Self Compacting Concrete* - SCC) prvi je put pripremljen 1980. godine u Japanu. Zbog svoje homogene prirode i dobrih svojstava obradljivosti, takav beton je relativno nepropustan. Danas se samozbijajući beton primjenjuje na konstrukcijama za koje se postavljaju zahtjevi za beton visokih uporabnih svojstava (eng. *High performace concrete* - HPC) i beton visoke čvrstoće (eng. *High strength concrete* - HSC).

Betonske konstrukcije visine od 12 do 15 metara nazivaju se srednje visokim konstrukcijama. U takvim se građevinama najčešće upotrebljavaju betoni razreda M25 i M30 [20, 21]. Ovaj rad se temelji na dobivanju svojstava samozbijanja u betonskoj mješavini normalne čvrstoće s mogućim dodatkom pepela od poljoprivrednog otpada, poput pepela šećerne trske (eng. *Bagasse Ash* - BA) i pepela rižinih ljuski (eng. *Rice Husk Ash* - RHA). Indija je, uz Brazil, najveći proizvođač šećerne trske na svijetu. Godišnje se u Indiji proizvede oko 380 milijuna tona šećerne trske što znači da se proizvede i velika količina otpada, odnosno pepela. Dosadašnja istraživanja su pokazala da je moguća primjena pepela šećerne trske u proizvodnji samozbijajućeg betona čime se postiže sigurno skladištenje pepela te sprječava zagađenje okoliša [1]. Zbog svojih pucolanskih svojstava, stupanj hidratacije takvog betona je niži u usporedbi s običnim betonom [2-4]. Visoku ranu čvrstoću bez ikakvih negativnih utjecaja na ostala svojstva betona moguće je postići ako se do 20 % cementa zamijeni pepelom koji nastaje izgaranjem šećerne trske [5]. Leteći pepeo (eng. *Fly ash* - FA) koji sadrži prosijani pepeo šećerne trske ima pozitivan utjecaj na granicu tečenja i viskoznost, što rezultira manjim potrebnim udjelom superplastifikatora (eng. *Superplasticizer* - SP) nego u običnom mortu [6]. Finoća pepela šećerne trske doprinosi stvaranju finije strukture pora u betonu, što za posljedicu ima smanjenje propusnosti i difuzije klorida [5]. Inače se za povećanje otpornosti samozbijajućeg betona prodoru klorida dodaju leteći pepeo ili silicijska prašina (eng. *Silica Fume* - SF) [29].

Indija je druga na svijetu i po proizvodnji riže, odmah nakon Kine, sa 104 milijuna tona proizvedene riže godišnje. Godišnje se proizvede gotovo 3,7 milijuna tona rižinih ljuski. Dodavanjem pepela rižinih ljuski poboljšava se viskoznost betona što utječe na poboljšanje svojstva samozbijanja [7]. Pepeo rižinih ljuski s visokim udjelom nanočestica sicilijevog oksida, SiO_2 , uvelike pridonosi smanjenju skupljanja samozbijajućeg betona uslijed sušenja [8]. Međutim, djelomična zamjena cementa s nanočesticama Fe_2O_3 i TiO_2 , poboljšava tlačnu čvrstoću betona, ali smanjuje njegovu obradljivost [9, 10]. Zamjena za cement s količinom od 12 do 15 % pepela rižinih ljuski može biti dovoljna za smanjenje štetnog širenja agregata uzrokovanog alkalno-silikatnom reakcijom u betonu, ovisno o prirodi agregata [30]. Obradljivost mješavine običnog betona normalne čvrstoće je proporcionalna količini upotrijebljenih kemijskih dodataka u mješavini kao što su superplastifikatori i stabilizatori mješavine (eng. *Viscosity Modifying Agent* - VMA). Iz dostupne literature se može vidjeti da ne postoji zapis o istraživanju samozbijajućeg

betona normalne čvrstoće u kojem se kao dodatak primjenjuje poljoprivredni otpad poput pepela šećerne trske i pepela rižinih ljuski. Akram i suradnici [1] su zaključili da pepeo šećerne trske i pepeo rižinih ljuski u određenoj mjeri mogu imati djelovanje stabilizatora mješavine u samozbijajućem betonu. Budući da su stabilizatori mješavine relativno skupi te njihova uporaba dovodi do povećanja troškova proizvodnje samozbijajućeg betona, pepeo šećerne trske i rižinih ljuski prikladniji su kao djelomična zamjena stabilizatora u pripremi samozbijajućeg betona. S obzirom na navedeno, ovaj rad je usmjeren na istraživanje svojstava obradljivosti samozbijajućeg betona u kojem je cement djelomično zamijenjen pepelom šećerne trske i rižinih ljuski kako bi se utvrdili optimalni udjeli zamjene.

2. Eksperimentalni program

2.1. Materijali

Kao vezivni materijal korišten je portland pucolanski cement (PPC) koji sadrži 22,5 % letećeg pepela (FA) prema indijskoj normi IS: 1489-1991. Fizikalna svojstva cementa, pepela šećerne trske (BA) i pepela rižinih ljuski (RHA), koji su korišteni u ovom istraživanju, prikazani su u tablici 1. Ispitana je konzistencija i vrijeme vezivanja za cementne paste s različitim udjelima zamjenskih materijala prema indijskim normama IS: 4031 (IV. dio) – 1988 [22] i IS: 4031 (V. dio) – 1988 [23], a rezultati su prikazani u tablici 2.

Tablica 1. Fizikalna svojstva cementa te pepela šećerne trske i rižinih ljuski

Materijali	Cement (PPC)	Pepeo šećerne trske (BA)	Pepeo rižinih ljuski (RHA)	IS norma
Svojstva				
Nasipna gustoća [kg/m ³]	1480	565	280	IS: 4031 (XI. dio) - 1988.
Specifična težina	3,11	1,82	2,08	IS: 1727 - 1967
Postotak prolazaka kroz sito 45 μm	30	100	100	---
Specifična površina [m ² /kg]	335	440	550	IS: 4031 (II. dio) - 1988. IS: 3812 - 1981

Za sitni i krupni agregat koji je korišten za dobivanje betonskih mješavina određeni su specifična težina, nasipna gustoća, apsorpcija vode i udio vlage. Određena su i ostala svojstva za krupni agregat kao što su indeks plosnatosti, faktor izduženosti i otpornost na udarno opterećenje, a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3. Sva navedena ispitivanja provedena su prema indijskoj normi IS: 2386-1963 [19].

Tablica 2. Standardna konzistencija cementnih pasta pripremljenih bez dodataka i s dodatkom pepela šećerne trske i/ili rižinih ljuski

Udio cementa [%]	Udio pepela [%]			Standardna konzistencija			IST [min]			FST [min]		
	BA	RHA	BA+RHA	BA	RHA	BA+RHA	BA	RHA	BA+RHA	BA	RHA	BA+RHA
100	0	0	0+0=0	0,33	0,34	0,33	75	72	70	242	223	220
96	4	4	2+2=4	0,39	0,40	0,40	102	90	93	260	240	245
92	8	8	4+4=8	0,39	0,41	0,39	110	100	102	428	412	415
88	12	12	6+6=12	0,38	0,40	0,38	275	251	255	760	732	735
84	16	16	8+8=16	0,40	0,41	0,40	345	329	335	1010	932	965
80	20	20	10+10=20	0,43	0,44	0,43	402	391	390	1210	992	1130

IST – vrijeme početka vezivanja (eng. *Initial Setting Time*), FST – vrijeme kraja vezivanja (eng. *Final Setting Time*)

Tablica 3. Fizikalna svojstva sitnog i krupnog agregata

Fizikalna svojstva	Sitni agregat (riječni pijesak)	Krupni agregat	IS norme
Specifična težina	2,497	2,79	IS: 2386 (III. dio) – 1963.
Nasipna gustoća	1928 kg/m ³	1,604 kg/l	
Apsorpcija vode	23 %	4,75 %	
Udio vlage	0,45 %	0 %	
Indeks plosnatosti	-	1,76 %	IS: 2386 (I. dio) – 1963.
Indeks izduženosti	-	43,63 %	
Vrijednost utjecaja	-	16,85 %	IS: 2386 (V. dio) – 1963.

Tablica 4. Kemijski sastav cementa te pepela šećerne trske i rižinih ljuski

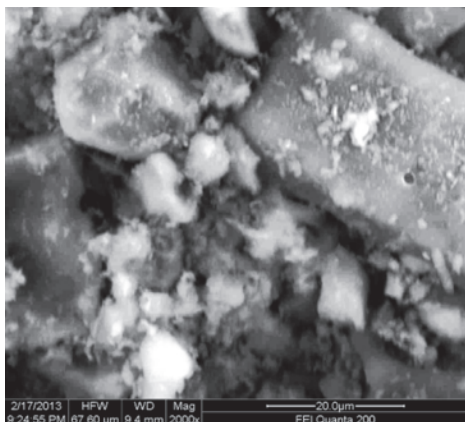
Materijali	Cement (PPC)	Pepeo šećerne trske (BA)	Pepeo rižinih ljuski (RHA)
SiO ₂ – silicijev dioksid	36,4	51,47	87,76
Al ₂ O ₃ – aluminijev oksid	4,29	9,33	1,11
Fe ₂ O ₃ – željezni oksid	2,53	-	-
CaO – kalcijev oksid	52,15	1,01	0,57
MgO – magnezijev oksid	1,42	24,04	7,44
SO ₃ – sumpor trioksid	2,16	6,70	0,51
Na ₂ O – natrijev oksid	-	4,14	2,10
K ₂ O – kalijev oksid	-	3,18	0,48
TiO ₂ – titanijev oksid	-	0,13	0,03
Gubitak žarenjem	1,05	-	-

U ovom je istraživanju pepeo rižinih ljuski prikupljen iz modernih mlinova za rižu smještenih u Kangayamu (Tamilnadu, Južna Indija), populano nazivan središte riže u Tamilnaduu. Prikupljeni pepeo je tri sata bio izložen temperaturi od 800°C kako bi se postiglo amorfnost stanje čestica. Pepeo je, nakon toga, ohlađen na zraku te prosijan kroz sito promjera otvora 45 μm.

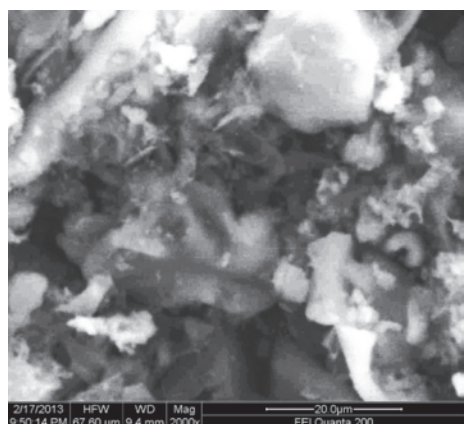
Pepeo šećerne trske je prikupljen iz obližnje tvornice šećera gdje se ostaci šećerne trske koriste za ogrjev. Uzorak pepela od šećerne trske bio je izložen temperaturi od 800°C osam sati. Uzorak je nakon toga ohlađen, prosijan u situ promjera 45 μm. Nakon sisanja pepela su korišteni za pripremu betonskih mješavina. Kao superplastifikator primijenjen je visokokvalitetni polikarboksilni eter, *Master Glenium SKY 8760*. Svjetlosmeđe je boje, a relativna gustoća mu je 1.09±0.01 kg/l pri 25°C i pH ≥ 6. Kao stabilizator mješavine upotrijebljen je *BASF Glenium stream 2*. Bezbojan je i fluidan, s relativnom gustoćom 1.01 ± 0.01 pri 25°C i pH ≥ 6.

2.2. Fizikalna i kemijska analiza pepela

Kako bi se odredila veličina i oblik čestica pepela u suhom stanju, provedeno je ispitivanje pretražnim elektronskim mikroskopom (eng. *Scanning Electron Microscopy - SEM*) na česticama pepela koje su manje od 45 μm. Slike 1. i 2. prikazuju nepravilan oblik čestica obiju vrsta pepela. Prosijavanjem na situ promjera 45 μm smanjuje se veličina čestica pepela i spaljenih čestica ugljika vidljive crne boje te se povećava kvaliteta pepela [7]. Fizikalna svojstva cementa i upotrijebljenih vrsta pepela prema IS normama prikazana su u tablici 1., kako je već i navedeno u točki 2.1. Kemijski sastav cementa i upotrijebljenih vrsta pepela, prikazan u tablici 4., u skladu je sa svojstvima cementnih materijala koja su propisana indijskom normom za cement IS: 4032-1985 [24].



Slika 1. SEM snimka čestica pepela od šećerne trske nakon prosijavanja (sito promjera 45 µm)



Slika 2. SEM snimka čestica pepela rižinih ljuski nakon prosijavanja (sito promjera 45 µm)

2.3. Sastav betonskih mješavina

Sastav ispitivanih betona je određen s ciljem dobivanja običnog betona razreda M25. Za dobivanje mješavina samozbijajućeg betona usvojene su vrijednosti standardne konzistencije prikazane u tablici 2. Nakon spravljanja određenog broja probnih mješavina dobivena je mješavina samozbijajućeg betona bez segregacije i izdvajanja vode sa 1 % SP i 0,3 % VMA (superplastifikatori i stabilizatori mješavine). Udio pepela od šećerne trske i rižinih ljuski u odnosu na cement je variran i iznosio je 4, 8, 12, 16 i 20 % na težinu cementa.

2.4. Ispitivanje uzoraka

Kako bi se procijenila svojstva betona u svježem stanju, ispitano je rasprostiranjem 18 različitih mješavina samozbijajućeg betona razreda M25 slijeganjem te pomoću ispitivanja J-prstenom, V-lijevkom, L-kutijom i U-kutijom [11-13] prema EFNARC specifikacijama i smjericama za SCC [16].

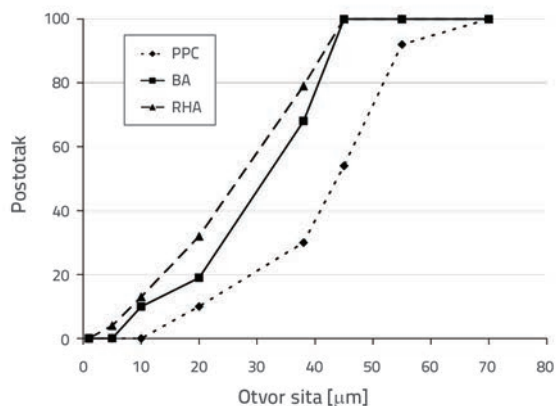
Betonske mješavine su u rezultatima navedenih ispitivanja (poglavlje 3.) označene s obzirom na vrstu zamjenskog materijala i njihovih udjela u odnosu na cement. Primjerice, B4 se odnosi na mješavinu sa 4 %-tnim udjelom pepela šećerne trske u cementu,

dok se B8 odnosi na mješavinu sa 8 %-tnim udjelom pepela rižinih ljuski, a B8R8 označava mješavinu sa zamjenom cementa sa 8 % pepela šećerne trske i 8 % pepela rižinih ljuski [1, 7].

3. Rezultati i diskusija

3.1. Fizikalna i kemijska analiza materijala

Kako je i prethodno spomenuto, fizikalna svojstva cementa i zamjenskih materijala uspoređena su u tablici 1. Gustoća pepela je dva do četiri puta manja od gustoće cementa. Svojstva poput specifične težine, postotka prolaska kroz sito 45 µm (slika 3.) i specifične površine čestica, relativno su bolja kod pepela nego kod cementa. Ta svojstva odgovaraju rezultatima koje su dobili Ganesan i suradnici [5]. Zbog toga je jasno da se povećanjem količine pepela od šećerne trske i rižinih ljuski povećava i količina vode potrebne da bi se dobila cementna pasta standardne konzistencije, o čemu su već pisali Memon i suradnici [7].



Slika 3. Krivulje raspodjele veličine čestica cementa s dodatkom pucolana, pepela šećerne trske i pepela rižinih ljuski

Kemijska svojstva cementa i obje vrste pepela prikazani su u tablici 4. Budući da cement sadrži 22,5 % letećeg pepela, udio SiO_2 u cementu je 36,4 %. Postotak SiO_2 je tri puta veći u pepelu rižinih ljuski, a 1,5 puta veći u pepelu šećerne trske nego u cementu što bi moglo utjecati na veće kasnije čvrstoće samozbijajućeg betona. Znatna količina Al_2O_3 prisutna je u pepelu šećerne trske, a ona povećava tlačnu čvrstoću betona tijekom formiranja C-S-H gela [14]. Kako je postotak MgO visok, a on povećava poroznost i količinu srednjih pora u cementnoj pasti a smanjuje količinu velikih pora, rezultat je općenito gusta struktura. Brzina širenja je također veća tijekom ranog njegovanja betona, a postaje stabilna nakon 150 dana [27]. Visoki postotak MgO usporava početnu hidrataciju cementa i povećava vrijeme vezivanja cementa. Konstanta produkta topljivosti $\text{Mg}(\text{OH})_2$ znatno je manja nego kod $\text{Ca}(\text{OH})_2$ te se $\text{Mg}(\text{OH})_2$ taloži prije $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Formiranjem $\text{Mg}(\text{OH})_2$ smanjuje se koeficijent zasićenja $\text{Ca}(\text{OH})_2$, čime se odgađa postizanje maksimalnog koeficijenta zasićenja $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Kad MgO hidratizira u visokolužnatom mediju kao što je tekuća faza hidratacije cementa, $Mg(OH)_2$ se u sitnim kristalima taloži oko cementnih zrna i tvori zaštitni sloj, a time usporava daljnju hidrataciju čestica cementa [25]. N_2O i K_2O su dva kemijska spoja koja se nazivaju lužnati oksidi. Ispitivanja skupljanja uslijed sušenja pokazala su da se niskoalkalni beton skuplja malo više od visokoalkalnog betona, iako su obje vrste betona izgubile istu količinu vode [28].

Vrijednosti standardne konzistencije cementnih pasta s dodatkom pepela su veće nego za pastu spravljenju samo portland-pucolanskim cementom (tablica 2.), zbog toga što je specifična površina pepela veća nego kod korištenog cementa. Početno (IST) i konačno vrijeme vezivanja (FST) za sve paste je

duže nego kod paste spravljene samo cementom, što upućuje na činjenicu da pepeli šećerne trske i rižinih ljuski usporavaju proces vezivanja betona. Međutim, vrijeme konačnog vezivanja je u prihvatljivim granicama (do 600 min) u slučaju kada se cement zamijeni sa 8 % pepela [26].

3.2. Svojstva svježeg samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton u svježem stanju mora biti homogen i imati odgovarajuću obradljivost. Rezultati provedenih ispitivanja: rasprostiranje slijeganjem, V-lijevkom, L-kutijom, J-prstenom i U-kutijom prikazani su u tablicama 5., 6. i 7.

Tablica 5. Svojstva samozbijajućeg betona (M25) u svježem stanju s dodatkom pepela šećerne trske

Mješavina	Portland pucolanski cement (cement + leteći pepeo)		Pepeo šećerne trske		Krupni agregat [kg/m ³]	Sitni agregat [kg/m ³]	Standardna konzistencija	Prosječno rasprostiranje slijeganjem [mm]			J - prsten [mm]			V - lijevak [s]		L - kutija [mm]			U - kutija [mm]		
	[%]	Wt [kg/m ³]	[%]	Wt [kg/m ³]				0 min	30 min	T ₅₀₀ [s]	h ₁	h ₂	h ₁ - h ₂	T ₀	T ₅	h ₁	h ₂	h ₂ / h ₁	h ₁	h ₂	h ₂ - h ₁
B0	100	443,8	0	0	683,78	978,66	0,33	679	609	3,69	17	14	3	7,56	10,59	62	58	0,94	279	306	27
B4	96	426,04	4	17,75	683,78	978,66	0,39	691	611	3,62	20	18	2	9,12	11,11	61	58	0,88	279	303	24
B8	92	408,29	8	35,5	683,78	978,66	0,39	639,8	576	4,43	22	17	5	9,54	12,44	68	57	0,84	281	304	23
B12	88	390,54	12	53,25	683,78	978,66	0,38	610	539	5,11	25	19	6	8,89	12,31	71	58	0,82	273	306	33
B16	84	372,79	16	71,08	683,78	978,66	0,40	560,8	506,8	5,92	29	16	13	10,99	13,78	72	52	0,72	269	311	42
B20	80	355,04	20	88,76	683,78	978,66	0,43	541	485	6,4	32	16	16	11,66	15,02	75	50	0,67	263	314	51

Tablica 6. Svojstva samozbijajućeg betona (M25) u svježem stanju s dodatkom pepela rižinih ljuski

Mješavina	Portland pucolanski cement (cement + leteći pepeo)		Pepeo šećerne trske		Krupni agregat [kg/m ³]	Sitni agregat [kg/m ³]	Standardna konzistencija	Prosječno rasprostiranje slijeganjem [mm]			J - prsten [mm]			V - lijevak [s]		L - kutija [mm]			U - kutija [mm]		
	[%]	Wt [kg/m ³]	[%]	Wt [kg/m ³]				0 min	30 min	T ₅₀₀ [s]	h ₁	h ₂	h ₁ - h ₂	T ₀	T ₅	h ₁	h ₂	h ₂ / h ₁	h ₁	h ₂	h ₂ - h ₁
R0	100	443,8	0	0,0	683,8	978,7	0,34	679	609,0	3,69	17	14	3	7,56	10,59	62	58	0,94	279	306	27
R4	96	426,0	4	17,8	683,8	978,7	0,40	711	625,0	3,56	19	17	2	8,66	10,62	63	58	0,92	278	304	26
R8	92	408,3	8	35,5	683,8	978,7	0,41	688	600,5	3,96	20	16	4	9,08	11,95	64	57	0,89	280	305	25
R12	88	390,5	12	53,3	683,8	978,7	0,40	654	561,5	4,53	23	17	6	8,43	11,82	66	57	0,86	277	307	38
R16	84	372,8	16	71,1	683,8	978,7	0,41	603	533,5	5,03	28	19	9	10,53	13,29	67	54	0,81	279	308	39
R20	80	355,0	20	88,8	683,8	978,7	0,44	579	510,5	6,12	30	16	14	11,20	14,12	69	52	0,75	266	308	42

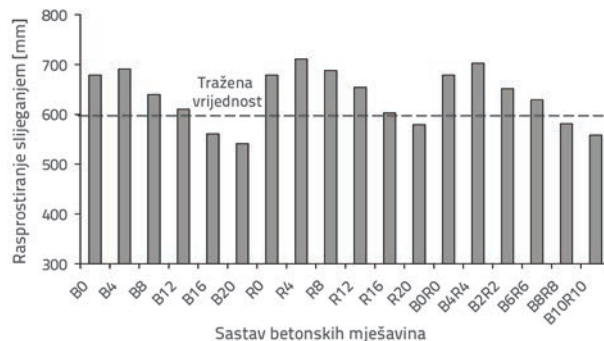
Tablica 7. Svojstva svježeg samozbijajućeg betona (M25) s dodatkom pepela šećerne trske i rižinih ljuski

Mješavina	Portland pucolanski cement (cement + leteći pepeo)		Pepeo šećerne trske		Pepeo rižinih ljuski		Krupni agregat [kg/m ³]	Sitni agregat [kg/m ³]	Standardna konzistencija	Prosječno rasprostiranje slijeganjem [mm]			J - prsten [mm]			V - lijevak [s]			L - kutija [mm]			U - kutija [mm]		
	[%]	Wt [kg/m ³]	[%]	Wt [kg/m ³]	[%]	Wt [kg/m ³]				0 min	30 min	T ₅₀₀ [s]	h ₁	h ₂	h ₁ - h ₂	T ₀	T ₅	h ₁	h ₂	h ₂ / h ₁	h ₁	h ₂	h ₂ - h ₁	
B0R0	100	443,80	0	0,00	0	0,00	683,78	978,66	0,33	679,0	609,0	3,69	17	14	3	7,56	10,59	62	58	0,94	279	306	27	
B2R2	96	426,04	2	8,88	2	8,88	683,78	978,66	0,40	702,5	615,0	3,60	20	17	3	9,02	10,96	62	59	0,95	278	302	24	
B4R4	92	408,29	4	17,75	4	17,75	683,78	978,66	0,39	651,5	592,0	4,22	22	18	4	9,46	11,98	66	56	0,85	280	303	23	
B6R6	88	390,54	6	26,63	6	26,63	683,78	978,66	0,38	629,1	542,0	5,03	26	18	8	8,62	12,20	68	54	0,79	270	307	37	
B8R8	84	372,79	8	35,54	8	35,54	683,78	978,66	0,40	581,0	520,0	5,66	28	16	12	10,80	12,98	72	52	0,72	266	310	44	
B10R10	80	355,04	10	44,38	10	44,38	683,78	978,66	0,43	558,0	495,0	6,20	31	17	14	11,36	14,36	77	49	0,64	265	314	49	

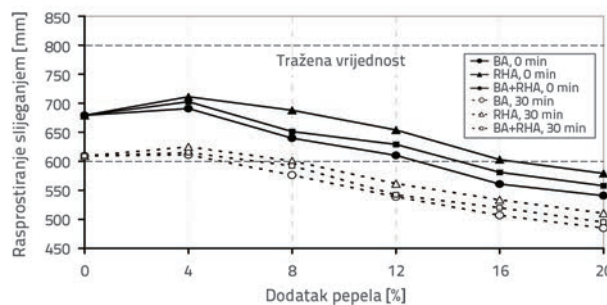
3.2.1. Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem

Ispitivanjem rasprostiranja slijeganjem određuje se sposobnost tečenja betona pod utjecajem njegove vlastite težine bez ikakvih vanjskih utjecaja [15]. Vrijednost slijeganja trebala bi biti između 650 mm i 800 mm neposredno nakon miješanja, što je kod prikaza rezultata ispitivanja (tablice 5., 6. i 7.) označeno kao nulta minuta [16]. Međutim, nekoliko je prethodnih istraživanja [15, 17] pokazalo da slijeganje već od 600 mm daje prihvatljivu obradljivost betona. Da bi se ocijenila promjena sposobnosti tečenja samozbijajućeg betona u vremenu, ispitano je rasprostiranje slijeganjem mješavine u promjeru od 500 mm i 30 min nakon miješanja [18]. Prihvatljivo vrijeme rasprostiranja slijeganjem od 500 mm neposredno nakon miješanja iznosi od 2 do 5 sekundi [16].

Vrijednosti rasprostiranja slijeganjem ispitanih mješavina koje su prikazane u tablicama 5., 6. i 7. mogu se vidjeti i na grafovima prikazanim na slikama 4. i 5. Na grafovima je također prikazana i ciljna vrijednost (600 mm). Slika 4. prikazuje vrijednost rasprostiranja slijeganjem neposredno nakon miješanja, a slika 5. prikazuje rasprostiranje slijeganjem neposredno nakon miješanja te nakon 30 minuta od miješanja SCC-a. Rezultati na slici 4. pokazuju da mješavine s dodatkom pepela do B12, R16 i B6R6 zadovoljavaju tražene vrijednosti. Međutim, ispitivanja provedena nakon 30 minuta pokazuju da samo mješavine do B4, R8 i B4R4 zadovoljavaju tražene kriterije. Vrijednosti T₅₀₀ prikazane u tablicama 5., 6. i 7. pokazuju da mješavine s dodatkom pepela do B8, R12 i B4R4 zadovoljavaju EFNARC smjernice (tj. 2 do 5 sekundi) [16].



Slika 4. Rasprostiranje slijeganjem ispitanih mješavina samozbijajućeg betona

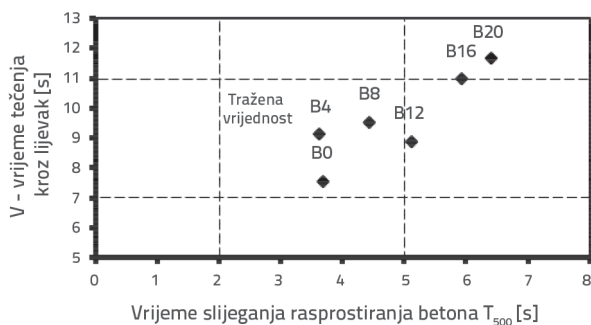


Slika 5. Rasprostiranje slijeganjem u nultoj i u tridesetj minuti nakon miješanja

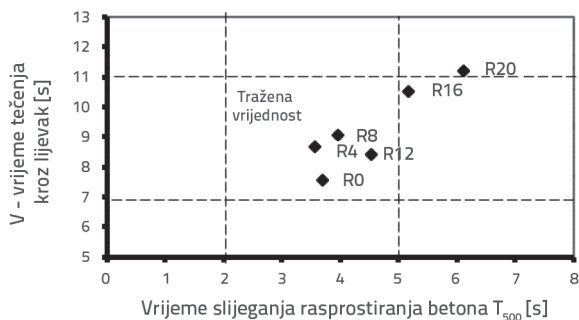
3.2.2. Ispitivanje V-lijevkom

Ispitivanjem V-lijevkom određuje se sposobnost punjenja i otpornost na segregaciju samozbijajućeg betona bez vanjskog utjecaja. Prema EFNARC smjernici [16], prihvatljivo vrijeme tečenja betona iznosi od 6 do 12 sekundi (V-vrijeme). Ako se ispitivanje provodi 5 minuta nakon miješanja, tada V-vrijeme betona može biti 15 sekundi. U fizikalnom smislu, betonska mješavina sa V-vremenom od 10 sekundi pokazuje određeni stupanj kohezivnosti. Stoga se pretpostavlja da će mješavina s vremenom tečenja dužim od 13 sekundi biti vrlo kohezivna i teško obradljiva [15]. Vrijeme tečenja betona kroz lijevak između 10 i 12 sekundi smatra se prihvatljivim za samozbijajući beton [17].

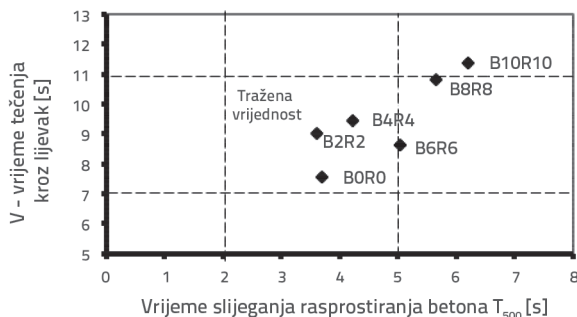
Vremena tečenja betona kroz lijevak u nultoj minuti i pet minuta nakon miješanja prikazana su u tablicama 5., 6. i 7. Vrijeme potrebno za rasprostiranje slijeganjem betona od 500 mm (T_{500}) i vremena tečenja betona kroz lijevak T_0 i T_{5min} prikazana su na slikama 6., 7. i 8. Prikazani rezultati pokazuju da će se, ako se cement zamijeni pepelom šećerne trske ili rižinih ljuski do 8 %, ili 4 % pepelom šećerne trske i 4 % pepelom rižinih ljuski, dobiti mješavina samozbijajućeg betona koja zadovoljava zahtijevane vrijednosti rasprostiranja slijeganjem i tečenja kroz V-lijevak.



Slika 6. Vrijeme tečenja betona kroz lijevak i vrijeme slijeganja rasprostiranjem SCC-a, T_{500} za samozbijajući beton s dodatkom pepela šećerne trske



Slika 7. Vrijeme tečenja betona kroz lijevak i vrijeme slijeganja rasprostiranjem SCC-a, T_{500} za samozbijajući beton s dodatkom pepela rižinih ljuski



Slika 8. Vrijeme tečenja betona kroz lijevak i vrijeme slijeganja rasprostiranjem SCC-a, T_{500} za samozbijajući beton s dodatkom pepela šećerne trske i rižinih ljuski

3.2.3. Rezultati ispitivanja J-prstenom, L-kutijom i U-kutijom

Ispitivanjem J-prstenom određuje se sposobnost zaobilaženja prepreka samozbijajućeg betona. Prihvatljiva razlika u visini između unutarnjeg i vanjskog prstena je između 0 i 10 mm. Razlika vrijednosti visina za ispitane mješavine prikazana je u tablicama 5., 6. i 7. Ispitivanjem L-kutijom ocjenjuje se sposobnost punjenja te sposobnost zaobilaženja prepreka u slučaju mogućeg blokiranja mješavine zbog rasporeda armature u betonskom elementu. Tim istraživača iz Europske unije se složilo da bi koeficijent blokiranja tečenja (h_2/h_1) trebao iznositi minimalno 0,8, a maksimalno 1. Ispitivanje U-kutijom je druga metoda za ocjenjivanje sposobnosti zaobilaženja prepreka i sposobnosti punjenja samozbijajućeg betona. Prema EFNARC smjernici [16], kada je razlika visine betona ($h_2 - h_1$) manja od 30 mm u U-kutiji, tada samozbijajući beton ima dobra svojstva punjenja i zaobilaženja prepreka [18]. Rezultati svih ovih ispitivanja prikazani u tablicama 5., 6. i 7. potvrđuju da se zamjenom cementa pepelom do 8 % dobiju mješavine samozbijajućeg betona zadovoljavajućih svojstava.

Prema rezultatima prikazanim u tablici 5., mješavina s pepelom šećerne trske kao djelomične zamjene za portland-pucolanski cement s dodatkom 1 % superplastifikatora i 0,3 % stabilizatora mješavine pokazala je dobra svojstva samozbijanja, kao što su pokazali Jimenez V. i suradnici [6]. Vidimo da je zamjena cementa pepelom šećerne trske 8 % i pepelom rižinih ljuski 12 % pokazala zadovoljavajuće svojstvo viskoznosti, kao što su spomenuli Akram, T. i suradnici u svom radu [1]. Specifična površina čestica pepela šećerne trske i rižinih ljuski mnogo je finija nego čestica u portland-pucolanskom cementu te su njihova pucolanska svojstva produljila vrijeme vezivanja svih probnih mješavina cementnih pasta, što su napomenuli i Singh N. i suradnici [2] te Cordeiro G.C. i suradnici [3].

4. Zaključak

Na temelju prikazanih rezultata ispitivanja može se zaključiti da je fizikalni i kemijski sastav pepela šećerne trske i pepela rižinih

ljuski odgovoran za kasniji proces hidratacije. Finoća i specifična površina njihovih čestica pridonose boljoj obradljivosti betona. Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem pokazalo je dobre rezultate i nakon 30 minuta za mješavine sa 8 % pepela rižinih ljuski i s kombinacijom pepela šećerne trske i rižinih ljuski. Slično tomu, mješavine sa 8 % zamjenskog materijala za sva tri načina zamjene (pepeo šećerne trske, pepeo rižinih ljuski ili njihova kombinacija) pokazale su dobru sposobnost punjenja pri ispitivanju V-lijevkom. Rezultati ispitivanja J-prstenom, L-kutijom i U-kutijom su zadovoljavajući kod mješavina s dodatkom pepela u iznosu od 8 % za sva tri načina zamjene. Temeljem navedenoga, može se zaključiti da se samozbijajući

beton razreda M25 može proizvesti uz djelomičnu zamjenu portland cementa s dodatkom pucolana, pepelom šećerne trske, pepelom rižinih ljuski ili do 8 % njihovom kombinacijom bez utjecaja na zahtjeve obradljivosti. Očekuje se da će rezultati dobiveni u okviru ovog istraživanja potaknuti primjenu samozbijajućeg betona s djelomičnom zamjenom cementa pepelom, u zgradama visine do 15 metara u kojima se može koristiti beton M25. Dodatno, djelomična zamjena portland-pucolanskog cementa s ostacima poljoprivrednog otpada, kao što su pepeo šećerne trske i pepeo rižinih ljuski, pridonosi korisnom postupanju s tim otpadnim materijalima i smanjuje potrošnju cementa, čime se smanjuju negativni učinci na okoliš.

LITERATURA

- [1] Akram, T., Memon, S., Obaid, H.: Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash, *Construction and Building Materials*, 23 (2009), pp. 703-712, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.012>
- [2] Singh, N., Singh, V., Rai, S.: Hydration of bagasse ash-blended portland cement, *Cement and Concrete Research*, 30 (2000), pp. 1485-1488, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00324-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00324-0)
- [3] Cordeiro, G., Toledo, R., Tavares, L., Fairbairn, E.: Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars, *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008), pp. 410-418, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>
- [4] Cordeiro, G., Toledo, R., Tavares, L., Fairbairn, E.: Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete, *Cement and Concrete Research*, 39 (2009), pp. 110-115, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>
- [5] Ganesan, K., Rajagopal, K., Thangavel, K.: Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material, *Cement and concrete composites*, 29 (2007), pp. 515-524, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>
- [6] Jiménez, V., León-Martínez, F., Montes-García, P., Gaona-Tiburcio, C., Chacon-Nava, J.: Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars, *Construction and Building Materials*, 40 (2013), pp. 691-701, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.023>
- [7] Memon, S., Shaikh, M., Akbar, H.: Utilization of rice husk ash as viscosity modifying agent in self compacting concrete, *Construction and building materials*, 25 (2011), pp. 1044-1048, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.074>
- [8] Sadrmohtazi, A., Barzegar, A.: Assessment of the effect of Nano-SiO₂ on physical and mechanical properties of self-compacting concrete containing rice husk ash, *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Università Politecnica delle Marche, Ancona, 2010.
- [9] Nazari, A., Sh, R., Sh, R., Shamekhi, S., Khademno, A.: Benefits of Fe₂O₃ nanoparticles in concrete mixing matrix, *Journal of American Science*, 6 (2010), pp. 102-106.
- [10] Nazari, A., Sh, R., Sh, R., Shamekhi, S., Khademno, A.: Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO₂ nanoparticles, *Journal of American Science*, 6 (2010), pp. 43-46.
- [11] Ramanathan, P., Baskar, I., Muthupriya, P., Venkatasubramani, R.: Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17 (2013), pp. 465-472, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-1882-8>
- [12] Uysal, M., Sumer, M.: Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures, *Construction and Building materials*, 25 (2011), pp. 4112-4120, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.032>
- [13] Felekoğlu, B., Türkel, S., Baradan, B.: Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Building and Environment*, 42 (2007), pp. 1795-1802, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.01.012>
- [14] Nazari, A., Riahi, S.: The effect of aluminium oxide nanoparticles on the compressive strength and structure of self-compacting concrete, *Magazine of concrete research*, 64 (2012), pp. 71-82, doi: <http://dx.doi.org/10.1680/macr.10.00106>
- [15] Topcu, I., Bilir, T., Uygunoğlu, T.: Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2009), pp. 1947-1953, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.007>
- [16] ENARC Specifications and guidelines for self-compacting concrete, UK, 2002., p. 32.
- [17] Safawi, M., Iwaki, I., Miura, T.: A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete, *Cement and concrete research*, 35 (2005), pp. 1834-1845, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.031>
- [18] Wu, Z., Zhang, Y., Zheng, J., Ding, Y.: An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2009), pp. 2087-2092, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.023>
- [19] IS: 2386-1963 Part I. to VIII. Indian Standard Methods of Test for Aggregate for concrete, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi.
- [20] IS: 10262-1982 and SP 23:1982., Recommended Guidelines for concrete Mix., *Bureau of Indian Standards*, New Delhi.

- [21] IS: 516-1959., Indian Standard Methods of Test for Strength of concrete, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi.
- [22] IS: 4031(Part IV) - 1988., Indian Standard Methods of Physical Tests for Hydraulic Cement, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi.
- [23] IS: 4031(Part V) - 1988., Indian Standard Methods of Physical Tests for Hydraulic Cement, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi.
- [24] IS: 4032 - 1985., Indian Standard Method of Chemical Analysis of Hydraulic Cement, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi.
- [25] Zheng, L., Xuehua, C., Mingshu, T.: Hydration and setting time of MgO-type expansive cement, *Cement and concrete research*, 22 (1992), pp. 1-5, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(92\)90129-J](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(92)90129-J)
- [26] IS: 1489 (Part I) - 1991., Indian Standard Portland - Pozzolana cement specification, *Bureau of Indian Standards*, New Delhi.
- [27] Li, F., Chen, Y., Long, S.: Influence of MGO Expansive Agent on Behavior of Cement Pastes and Concrete, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 35 (2010), pp. 125-140.
- [28] Smaoui, N., Bérubé, M., Fournier, B., Bissonnette, B., Durand, B.: Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 203-212, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.007>
- [29] Yazıcı, H.: The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete, *Construction and building Materials*, 22 (2008), pp. 456-462, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002>
- [30] Givi, A., Rashid, S., Aziz, F., Salleh, M.: Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete: a review, *Journal of American science*, 6 (2010), pp. 157-165.