

Primljen / Received: 21.5.2012.  
 Ispravljen / Corrected: 20.11.2012.  
 Prihvaćen / Accepted: 29.11.2012.

Dostupno online / Available online: 15.12.2012.

# Samozbijajući ekološki prihvatljivi betoni

## Autori:



Prof.dr.sc. **Marijan Skazlić**, dipl. ing. građ.  
 Sveučilište u Zagrebu  
 Građevinski fakultet  
[skazle@grad.hr](mailto:skazle@grad.hr)



student **Mario Vujica**, univ.bacc.ing.aedif.  
 Sveučilište u Zagrebu  
 Građevinski fakultet  
[mvujica.gradevina@gmail.com](mailto:mvujica.gradevina@gmail.com)

Izvorni znanstveni rad

**Marijan Skazlić, Mario Vujica**

## Samozbijajući ekološki prihvatljivi betoni

U radu su eksperimentalno analizirana svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. Betonske mješavine su se razlikovale prema vrsti i količini mineralnih dodataka (metakaolin, leteći pepeo). Utvrđeno je da dodatak letećeg pepela i metakaolina utječe na bitno poboljšanje trajnosnih i mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona, te ekološki pozitivno djeluje na smanjenje emisije CO<sub>2</sub>. Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja dane su preporuke za praktičnu primjenu.

### Ključne riječi:

emisija CO<sub>2</sub>, leteći pepeo, metakaolin, mineralni dodaci, održivost, samozbijajući beton, trajnost

Original scientific paper

**Marijan Skazlić, Mario Vujica**

## Environmentally-friendly self-compacting concrete

An experimental analysis of properties of self-compacting concrete, for both fresh and hardened states of concrete, is presented in the paper. Concrete mixes differed according to the type and quantity of mineral admixtures (metakaolin, fly ash). It was established that the addition of fly ash and metakaolin greatly improves mechanical properties and durability of self-compacting concrete, and is favourable to environment due to reduction in CO<sub>2</sub> emissions. Based on test results obtained, appropriate recommendations for practical application are given.

### Key words:

CO<sub>2</sub> emission, fly ash, metakaolin, mineral admixtures, sustainability, self-compacting concrete, durability

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Marijan Skazlić, Mario Vujica**

## Selbstverdichtende umweltverträgliche Betone

In der Arbeit werden die durch experimentelle Versuche erforschten Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton in frischem und in erhärtetem Zustand beschrieben. Verschiedene Betonmischungen im Bezug auf die Art und die Menge der zugegebenen Mineralstoffe (Metakaolin, Flugasche) wurden betrachtet. Es wurde festgestellt, dass die Zugabe von Flugasche und Metakaolin wesentlich die Haltbarkeit und die mechanischen Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton verbessert und eine ökologisch positive Auswirkung auf die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission hat. Die erhaltenen Versuchsergebnisse werden als Grundlage der gegebenen Richtlinien für praktische Anwendungen angenommen.

### Schlüsselwörter:

CO<sub>2</sub>-Emission, Flugasche, Metakaolin, Mineralstoffe, Nachhaltigkeit, selbstverdichtender Beton, Haltbarkeit

## 1. Uvod

Samozbijajući beton predstavlja novu vrstu betona koja je razvijena i počela se primjenjivati krajem prošlog stoljeća. Osnovna je značajka ove tehnologije betoniranja ta da prilikom ugradnje betona ne treba koristiti opremu za zbijanje betona. Glavne prednosti koje se na taj način dobivaju jesu: smanjenje broja radnika na gradilištu, brže izvođenje betonskih radova, bitno lakša ugradnja betona na mjestima guste armature i/ili složenog presjeka, prikladan izgled vanjske, vidljive površine betona, te smanjenje buke na gradilištu. U građevinskoj praksi ta je vrsta betona vrlo brzo prepoznata po svojim prednostima u odnosu na obični beton. Zbog svega toga pojedini stručnjaci iz područja materijala i tehnologije ističu da je samozbijajući beton jedno od najrevolucionarnijih otkrića u tehnologiji betona u zadnjih nekoliko desetljeća [1-11].

Jedan od osnovnih pravaca istraživanja samozbijajućeg betona jest poboljšanje svojstava uz istodobno poboljšanje ekološke prihvatljivosti i održivosti materijala. To se uglavnom postiže upotrebom različitih vrsta mineralnih dodataka. Dosad provedena istraživanja samozbijajućeg betona uglavnom obuhvaćaju mineralne dodatke tipa II (silikatna prašina, leteći pepeo, zgura), a koji su istodobno i obuhvaćeni postojećim normama i propisima [12-18].

Leteći pepeose dobivakao otpadni proizvod utermoelektranama. Jedna od glavnih prednosti betona s letećim pepelom jest ekološka prihvatljivost radi smanjenja emisije CO<sub>2</sub>. Prethodnim istraživanjima utvrđeno je da je moguće dobiti samozbijajući beton uporabom veće količine letećeg pepela. Pritom dolazi do

smanjivanja tlačne čvrstoće, a svojstva trajnosti i obradivost se uglavnom poboljšavaju [16].

Metakaolin je mineralni dodatak s pucolanskom aktivnošću koji se dobiva proizvodnjom iz kaolinske gline. Uobičajeno se koristi u količini od 10 do 25 % u odnosu na masu cementa. Ekološka prihvatljivost toga dodatka očituje se u činjenici da pri proizvodnji metakaolina dolazi do znatno manje emisije CO<sub>2</sub> nego pri proizvodnji cementa. Ovaj podatak posebno dobiva na važnosti ako se zna da 5 do 7 % ukupne svjetske emisije CO<sub>2</sub> dolazi uslijed proizvodnje cementa. Rezultati ispitivanja pokazuju da dodatak metakaolina u beton poboljšava mehanička i trajnosna svojstva običnog betona. Provedena istraživanja potvrdila su da metakaolin u samozbijajućem betonu poboljšava rane tlačne čvrstoće te određena svojstva trajnosti (otpornost na mraz i sol, vodoupojnost). Pokusna proizvodnja potvrdila je prikladnost samozbijajućeg betona s dodatkom 17.5 % metakaolina na masu cementa za izradu predgotovljenih betonskih elemenata. U dosad provedenim istraživanjima nisu ispitivana sva trajnosna svojstva samozbijajućeg betona, a niti promjena svojstava tijekom vremena [19-22].

U ovom radu projektirani su sastojci samozbijajućeg betona s različitim mineralnim dodacima (leteći pepeo, metakaolin). Upotrijebljena su i fibrilirana polipropilenska vlakna jer povoljno utječu na smanjenje širine i međusobni razmak pukotina u mladom betonu te na taj način i na poboljšanje trajnosti betona. Prilikom provođenja eksperimentalnog laboratorijskog rada upotrijebljeni su sastojci mješavina dostupni na hrvatskom tržištu.

Tablica 1. Sastojci betonskih mješavina

Sastojci mješavine (kg/m <sup>3</sup> )	Oznaka betona				
	SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Cement	450	250	405	205	205
Leteći pepeo	-	200	-	200	200
Metakaolin	-	-	45	45	45
Polipropilenska vlakna	-	-	-	-	1
Voda	198	198	198	198	198
Vodovezivni omjer	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Superplastifikator	2,40	1,32	3,90	3,60	4,50
Stabilizator mješavine	0,77	0,77	0,77	0,95	0,88
Filer	150	150	150	150	150
Agregat 0-4 mm	816	818	814	814	813
Agregat 4-8 mm	328	329	328	328	327
Agregat 8-16 mm	468	469	467	467	467

Analiziran je utjecaj različitih dodataka na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja utvrđene su prednosti pojedinih sastojaka betona s obzirom na svojstva u očvrslom stanju.

Uspoređena su mehanička i trajnosna svojstva između samozbijajućeg betona s dodacima i bez dodataka, ako je isti vodovezivni omjer. Dobiveni rezultati pokazuju opravdanost upotrebe letećeg pepela i metakaolina u samozbijajućem betonu. Na temelju dobivenih rezultata dane su preporuke za praktičnu primjenu pojedinih mješavina samozbijajućih betona.

## 2. Eksperimentalni rad

### 2.1. Sastojci betonskih mješavina

Eksperimentalni istraživački rad proveden je na pet betonskih mješavina. Sastojci betonskih mješavina prikazani su u tablici 1. Sve su mješavine imale isti vodovezivni omjer (0,44) i istu količinu veziva, a korišten je trofrakcijski drobljeni agregat. Projektiranje sastava betona obavljeno je s ciljem da se zadovolje razredi izloženosti djelovanju okoliša XC4, XS3 i XD3, razred tlačne čvrstoće C50/60 te mjera slijeganja SF3 s vremenom  $t_{500} < 2,0$  sec (VS1).

Upotrijebljene su sljedeće oznake pojedinih mješavina:

- SCC: samozbijajući beton bez dodataka
- SCC-F: samozbijajući beton s dodatkom letećeg pepela
- SCC-M: samozbijajući beton s dodatkom metakaolina
- SCC-FM: samozbijajući beton s dodatkom letećeg pepela i metakaolina
- SCC-FMP: samozbijajući beton s dodatkom letećeg pepela, metakaolina i polipropilenskih vlakana.

### 2.2. Cilj i program istraživanja

Ciljevi su istraživanja sljedeći:

- projektirati sastav samozbijajućeg betona koristeći metakaolin i leteći pepeo
- eksperimentalno dobiti samozbijajući beton s različitim mineralnim dodacima (leteći pepeo, metakaolin) koristeći se sastojcima dostupnima na hrvatskom tržištu
- utvrditi utjecaj letećeg pepela na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju
- utvrditi utjecaj metakaolina na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju
- utvrditi utjecaj polipropilenskih vlakana na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju
- utvrditi utjecaj kombinacije letećeg pepela, metakaolina i polipropilenskih vlakana na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju
- odrediti optimalnu mješavinu samozbijajućeg betona s mineralnim dodacima

- usporediti svojstva između običnog samozbijajućeg betona i samozbijajućeg betona s mineralnim dodacima i polipropilenskim vlaknima
- odrediti utjecaj starosti uzoraka (28 i 90 dana) na mehanička i trajnosna svojstva samozbijajućeg betona s mineralnim dodacima i bez njih.

Na betonskim mješavinama ispitana su sljedeća svojstva u svježem stanju:

- gustoća (HRN EN 12350-6)
- udio pora (HRN EN 12350-7)
- temperatura (HRN U.M1.032)
- konzistencija rasprostiranjem (HRN EN 12350-8)
- metoda V-lijevkom (HRN EN 12350-9)
- metoda L-posudom (HRN EN 12350-10)

Metodom rasprostiranja se primarno ocjenjuje svojstvo punjenja samozbijajućeg betona. Mjeri se ukupni promjer koji beton zauzme rasprostiranjem i vrijeme potrebno da beton dostigne horizontalni promjer od 50 cm. Metoda L-posude služi za definiranje svojstva prolaznosti samozbijajućeg betona. Metodom V-lijevka određuje se viskoznost i sposobnost punjenja na način da se mjeri vrijeme potrebno da samozbijajući beton istječe iz V-lijevka.

Za ispitivanje svojstva u očvrslom stanju upotrijebljene su sljedeće metode ispitivanja:

- tlačna čvrstoća (HRN EN 12390-3)
- savojna čvrstoća (HRN EN 12390-5)
- brzina ultrazvučnog impulsa (HRN EN 12504-4)
- kapilarno upijanje (HRN U.M8.300)
- difuzija klorida (NT BUILD 492).

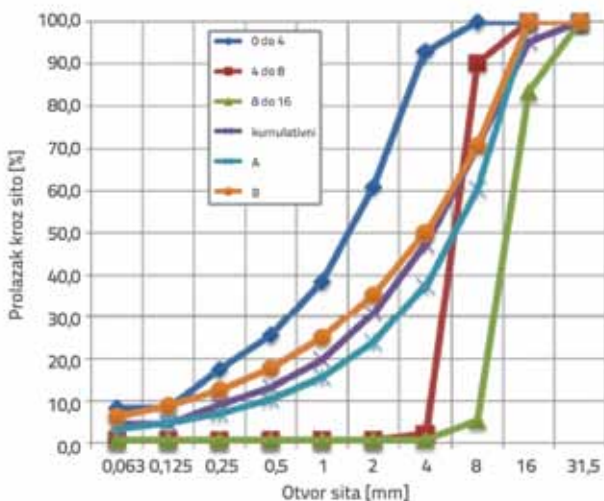
Eksperimentalni rad je proveden u laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

### 2.4. Tehnologija spravljanja i njega uzoraka

Sve mješavine napravljene su u laboratorijskoj miješalici zapremnine 100 litara. Nakon ugradnje uzorci su raskalupljeni pri starosti od jednog dana, te su obavljena ispitivanja koja su bila predviđena pri starosti od jednog dana (tlačna čvrstoća). Ostali uzorci njegovani su u vlažnoj komori do starosti 28 i 90 dana, kada su provedena ostala ispitivanja mehaničkih i trajnosnih svojstava.

### 2.5. Sastojci mješavina

U svim mješavinama upotrijebljen je portland cement CEM I 42,5 R. Agregat je trofrakcijski od drobljenog dolomita. Upotrebljavan je i filer dolomitnog podrijetla kod kojeg većina čestica prolazi kroz sito otvora 0,125 mm. Granulometrijski sastavi agregata i filera prikazani su na slici 1. i tablici 2. U tablici 3. dane su gustoće i kemijski sastojci sastavnih mješavina.



Slika 1. Granulometrijski sastav frakcija agregata

Tablica 2. Granulometrijski sastav filera

Sito (mm)	0.063	0.09	0.125	0.25	0.5
Prolaz (%)	64	81	91	99	100

Tablica 3. Svojstva sastavnih sastojaka

Svojstvo	Sastavni sastojak			
	CEM I 42,5 R	Leteći pepeo	Metakaolin	Filer
Gubitak žarenjem	4,47 %	3,52 %	1,36 %	47,58 %
SO <sub>3</sub>	3,07 %	1,04 %	0,080 %	0,050 %
SiO <sub>2</sub>	19,90 %	46,84 %	52,95 %	0,23 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,71 %	4,94 %	1,14 %	0,18 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,38 %	27,67 %	41,17 %	0,31 %
CaO	60,23 %	9,65 %	-	30,38 %
MgO	2,87 %	2,79 %	-	21,84 %
Cl	0,030 %	0,008 %	0,008 %	0,013 %
Gustoća	3,07 kg/dm <sup>3</sup>	2,41 kg/dm <sup>3</sup>	2,68 kg/dm <sup>3</sup>	2,87 kg/dm <sup>3</sup>

Tablica 4. Granične vrijednosti za metode ispitivanja u svježem stanju

Metoda ispitivanja	Granične vrijednosti	Razred
Rasprostiranje [mm]	550-650	SF1
	660-750	SF2
	760-850	SF3
Rasprostiranje t <sub>500</sub> [s]	<2	VS1
	≥2	VS2
L-kutija	≥0,80	PL1(2 rebra), PL2 (3 rebra)
V-lijevak [s]	<9,0	VF1
	9,0-25,0	VF2

Korištena su fibrilirana polipropilenska vlakna duljine 12 mm i promjera 0.016 mm. Od kemijskih dodataka betonu upotrijebljeni su superplastifikator na polikarboksilatnoj bazi i stabilizator mješavine.

### 3. Rezultati ispitivanja

#### 3.1. Rezultati ispitivanja u svježem stanju

Samozbijajući beton u svježem stanju treba posjedovati svojstvo punjenja, svojstvo prolaza i otpornost na segregaciju. U tablici 4. prikazane su granične vrijednosti za metode ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju, a tablica 5. prikazuje postignute rezultate. Na slici 2. je prikazana provedba pojedinih ispitivanja.

Rezultati ispitivanja samozbijajućih betona u svježem stanju pokazuju da sve mješavine posjeduju svojstva karakteristična za samozbijajući beton. U pogledu svojstava punjenja i prolaza sve mješavine imaju razrede SF3, VS1, PL2 i VF1. Otpornost na segregaciju karakterizirana je vizualnim pregledom svih mješavina, te je utvrđeno da je i to svojstvo u svježem stanju zadovoljeno kod svih mješavina. Uočava se smanjenje gustoće kod mješavina samozbijajućeg betona

Tablica 5. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju

Metoda ispitivanja	Jedinica mjere	Oznaka sastava betona				
		SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Rasprostiranje	mm	760	790	760	785	775
Rasprostiranje $t_{500}$	s	1,2	1,4	1,3	1,5	1,2
L-kutija	-	0,80	0,86	0,82	0,90	0,83
V-lijevak	s	5,5	7,4	6,4	8,5	8,2
udo zraka	%	0,80	1,60	1,20	1,60	1,20
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	2490	2430	2480	2420	2410
Temperatura	°C	22	23	21,8	23,5	23,6



Slika 2. Ispitivanje samozbijajućeg betona pomoću L-kutije (lijevo) i konzistencija rasprostiranjem (desno)

s dodatkom letećeg pepela, što je posljedica manje gustoće letećeg pepela u odnosu na cement. Mješavina s dodatkom metakaolina ima podjednaku gustoću kao i referentna mješavina samozbijajućeg betona.

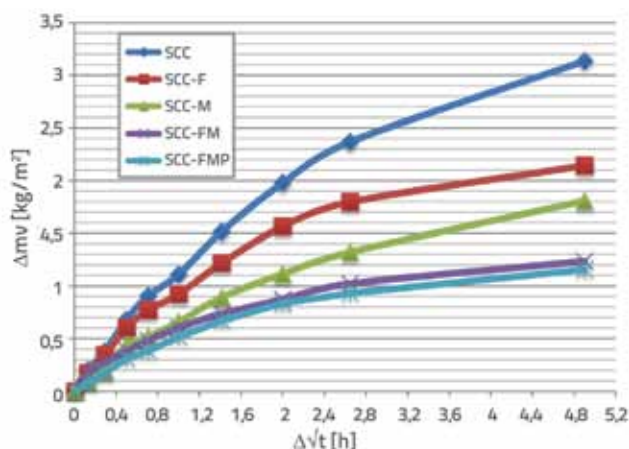
### 3.2. Rezultati ispitivanja u očvrslom stanju

U tablici 6. prikazani su rezultati ispitivanja mehaničkih i trajnosnih svojstava samozbijajućih betona.

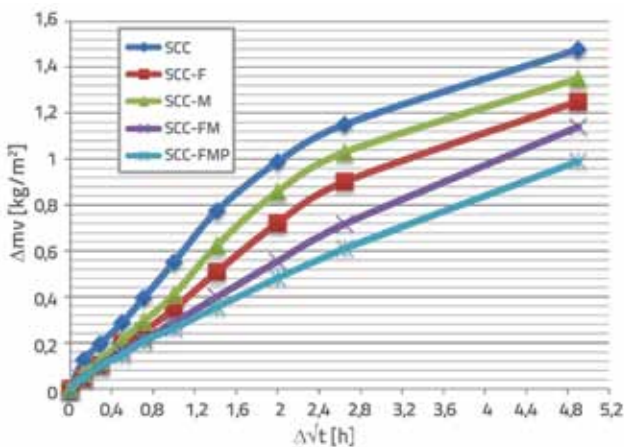
Tablica 6. Rezultati ispitivanja u očvrslom stanju

Ispitivano svojstvo	Mjerna jedinica	Starost uzoraka	SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Tlačna čvrstoća	MPa	1 dan	40,1	16,9	38,6	11,9	12,8
		28 dana	62,5	54,8	80,8	61,8	64,0
		90 dana	67,4	69,4	83,0	64,8	69,7
Savojna čvrstoća	MPa	28 dana	5,4	4,8	6,9	7,0	4,8
Gustoća	kg/dm <sup>3</sup>	28 dana	2,46	2,41	2,47	2,39	2,39
Brzina uzdužnog vala	m/s	28 dana	5077	4850	5056	4713	4751
Dinamički modul elastičnosti	GPa	28 dana	67,8	60,4	67,7	56,6	57,5
Koeficijent difuzije klorida	10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	28 dana	9,83	6,40	1,73	2,17	1,51
		90 dana	9,17	1,11	1,31	0,44	0,22
Koeficijent kapilarnog upijanja nakon jednog sata	kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup>	28 dana	1,09	0,90	0,65	0,60	0,44
		90 dana	0,55	0,40	0,42	0,28	0,26
Koeficijent kapilarnog upijanja nakon 24 sata	kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup>	28 dana	0,63	0,43	0,37	0,25	0,23
		90 dana	0,31	0,26	0,28	0,23	0,20

Na slikama 3. i 4. prikazani su dijagrami ispitivanja kapilarnog upijanja dobiveni ispitivanjem uzoraka pri starosti od 28 i 90 dana.



Slika 3. Grafički prikaz kapilarnog upijanja pri starosti 28 dana



Slika 4. Grafički prikaz kapilarnog upijanja pri starosti 90 dana

## 4. Analiza rezultata ispitivanja

### 4.1. Utjecaj letećeg pepela na svojstva samozbijajućeg betona

Dodatak 45 % letećeg pepela na masu cementa u samozbijajućem betonu utječe na smanjivanje tlačne čvrstoće betona pri starosti betona od 1 i 28 dana te na povećanje tlačne čvrstoće nakon 90 dana. Samozbijajućem betonu s 45 % letećeg pepela na masu cementa ima nakon jednog dana za 57 % te nakon 28 dana za 12 % manju tlačnu čvrstoću, dok nakon 90 dana ima veću tlačnu čvrstoću za 3% u odnosu na samozbijajućem betonu bez letećeg pepela. Ovakvi rezultati posljedica su pucolanske reakcije letećeg pepela koja se odvija nakon hidratacije cementa. Nakon dužeg perioda betoni s letećim pepelom mogu, uz pravilno njegovanje, dosegnuti mehanička svojstva kao i betoni bez letećeg pepela.

Rezultati ispitivanja u očvrslom stanju pokazali su da dodatak letećeg pepela u samozbijajućem betonu djeluje na smanjivanje gustoće u očvrslom stanju. Dodatak letećeg pepela znatno poboljšava svojstva trajnosti u pogledu koeficijenta difuzije klorida i vodoupojnosti. Leteći pepeo kod samozbijajućih betona znatnije poboljšava trajnosna svojstva nakon 90 dana u odnosu na ista nakon 28 dana.

### 4.2. Utjecaj metakaolina na svojstva samozbijajućeg betona

Samozbijajućem betonu s 10 % metakaolina ima nakon jednog dana manju tlačnu čvrstoću za 4%, nakon 28 dana veću tlačnu čvrstoću za 29 % i nakon 90 dana veću tlačnu čvrstoću za 23 % u odnosu na samozbijajućem betonu bez metakaolina. Savojna čvrstoća betona s dodatkom metakaolina se povećava za 28%. Iz navedenog se može zaključiti da je to posljedica povećanja homogenosti cementne matrice uslijed dodatka metakaolina, ali rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti to ne pokazuju.

Dodatak metakaolina u samozbijajućem betonu poboljšava koeficijent difuzije klorida za 5,7 puta nakon 28 dana i 7 puta nakon 90 dana. Koeficijent kapilarnog upijanja s dodatkom metakaolina se znatno poboljšava. Dobiveni rezultati pokazuju da dodatak metakaolina utječe na znatno poboljšanje trajnosnih svojstava i čvrstoće samozbijajućeg betona.

### 4.3. Utjecaj polipropilenskih vlakana na svojstva samozbijajućeg betona

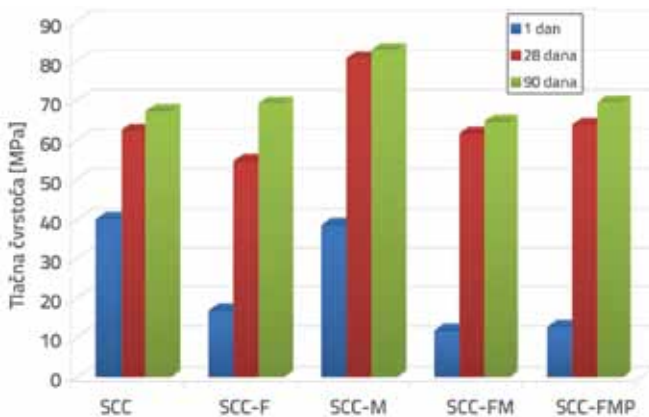
Analizom dobivenih rezultata koji su prikazani u tablici 5. vidljiv je utjecaj polipropilenskih vlakana na svojstva samozbijajućeg betona. Mješavina SCC-FMP u odnosu na mješavinu SCC-FM ima veće tlačne čvrstoće za 8 % nakon jednog dana, 4 % nakon 28 dana i 8 % nakon 90 dana. Za razliku od vrijednosti tlačnih čvrstoća gdje polipropilenska vlakna ne utječu bitnije na svojstva, dodatak vlakana je utjecao na znatnije poboljšanje koeficijenta difuzije klorida.

### 4.4. Odabir optimalne mješavine samozbijajućeg betona s mineralnim dodacima

Iz prikazanih rezultata brzine ultrazvučnog impulsa (>4500 m/s) može se zaključiti da se svi samozbijajućem betoni ubrajaju u vrlo kvalitetne betone. Najveću brzinu postigla je mješavina SCC-M s najvećom tlačnom čvrstoćom, pa se može reći da navedena mješavina posjeduje i najhomogeniju strukturu. Na osnovi svih rezultata ispitivanja u očvrslom stanju može se reći da je optimalna mješavina SCC-FMP. Kod te mješavine postignute su visoke vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 28 i 90 dana (slika 5). Mješavina oznake SCC-FMP postiže najbolje vrijednosti koeficijenta difuzije klorida (slika 6.) i koeficijenta kapilarnog upijanja nakon 28 i 90 dana. S



obzirom na to da se mineralni dodaci u beton uglavnom i dodaju radi poboljšanja trajnosti, mogu se kriteriji svojstava trajnosti u očvrslom stanju uzeti kao mjerodavni za odabir optimalne mješavine.



Slika 5. Tlačne čvrstoće nakon 1, 28 i 90 dana

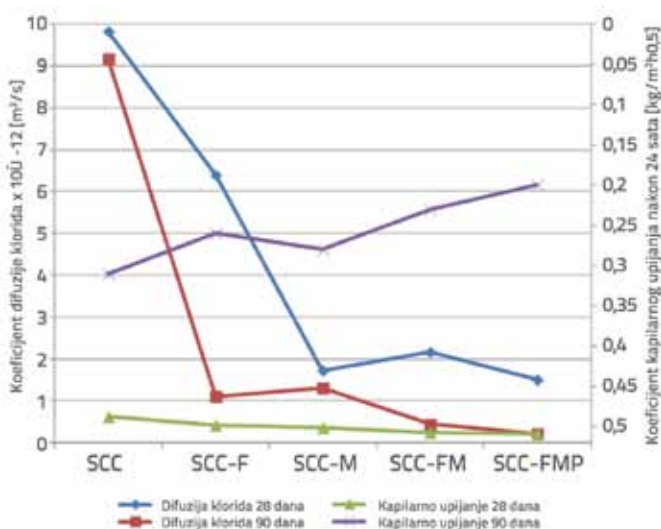


Slika 6. Dubina prodiranja klorida kod mješavine SCC (lijevo) i mješavine SCC-FMP (desno)

#### 4.5. Utjecaj starosti uzoraka na mehanička i trajnosna svojstva samozbijajućeg betona

Najveći porast tlačne čvrstoće nakon 90 dana u odnosu na 28 dana (27 %) ima mješavina SCC-F.

Usporedbom koeficijenta difuzije klorida kod mješavina s dodacima vidljivo je da se kod mješavine SCC-F koeficijent



Slika 7. Usporedba koeficijenta difuzije klorida i koeficijenata kapilarnog upijanja nakon 28 i 90 dana

difuzije klorida pri starosti od 90 dana smanjio za 5,8 puta u odnosu na 28 dana, kod mješavine SCC-M za 1,3 puta, kod mješavine SCC za 1,1 puta, kod mješavine SCC-FM za 4,9 puta i kod mješavine SCC-FMP za 6,9 puta. Također, mješavine s dodacima su postigle bolje vrijednosti koeficijenata kapilarnog upijanja pri starosti od 90 dana u odnosu na 28 dana (slika 7.). Najmanje koeficijente postigla je mješavina SCC-FMP. Mješavina SCC-M postigla je bolje koeficijente kapilarnog upijanja pri starosti od 28 dana u odnosu na mješavinu SCC-F, dok pri starosti od 90 dana mješavina SCC-F imala je bolje koeficijente od mješavine SCC-M. Iz analize koeficijenata difuzije klorida i koeficijenata kapilarnog upijanja može se reći da metakaolin ima veći utjecaj na poboljšanje trajnosnih svojstava pri starosti od 28 dana u odnosu na leteći pepeo (iako se dodaje u znatno manjim količinama od letećeg pepela), dok veći utjecaj na poboljšanje trajnosnih svojstava nakon 90 dana ima leteći pepeo.

#### 4.6. Preporučena praktična primjena dobivenih rezultata

S obzirom na to da tlačna čvrstoća predstavlja jedino osnovno svojstvo betona, nameće se i potreba da se utvrdi optimalna količina mineralnih dodataka letećeg pepela i metakaolina. Pritom treba uzeti u obzir i namjenu samozbijajućeg betona. Primjerice ako se samozbijajući beton koristi za predgotovljene prednapete betonske elemente ili za saniranje dotrajalih armiranobetonskih konstrukcija, tada se ne preporučuje samozbijajući beton s većim udjelom letećeg pepela. Za navedene slučajeve preporučuje se samozbijajući beton s metakaolinom ili bez dodataka.

S druge strane, poželjna je veća količina letećeg pepela radi smanjenja topline hidratacije pri betoniranju masivnih betonskih elemenata. Samozbijajućim betonima koji će se nalaziti u agresivnom okolišu preporučuje se dodatak metakaolina, ali i kombinacija dodataka letećeg pepela i metakaolina.

Samozbijajući betoni sa letećim pepelom, metakaolinom i polipropilenskim vlaknima preporučuju se primjenjivati u agresivnim uvjetima okoliša, a posebno pri nepovoljnim termohigrometrijskim uvjetima zbog svojstva polipropilenskih vlakana da smanjuju raspucavanje mladog betona.

Osim svega navedenog, dodatak letećeg pepela i metakaolina utječe i na smanjivanje količine cementa u betonu te na taj način izravno i na smanjenje emisije CO<sub>2</sub>. Zbog toga se može reći da su dobiveni samozbijajući betoni i ekološki prihvatljivi za primjenu u građevinarstvu.

Za sve navedene primjene treba uzeti u obzir i sve prednosti koje se postižu primjenom tehnologije samozbijajućeg betona u odnosu na obični beton.

Jedna od zapreka koja se pojavljuje za veću upotrebu metakaolina jest nepostojanje norme koja specificira svojstva, kontrolu sukladnosti i druge parametre tog materijala.

Istraživanje provedeno u ovom radu pokazuje da dodatak metakaolina bitno poboljšava pojedina svojstva betona, a to je bitan razlog da se ubrza proces donošenja norme za metakaolin.

## 5. Zaključak

Analizom rezultata istraživanja svojstava samozbijajućih betona s različitim mineralnim dodacima (leteći pepeo, metakaolin) projektiranih za razrede izloženosti djelovanju okoliša XC4, XS3, XD3 može se zaključiti:

- Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja mješavina u svježem stanju vidljiv je utjecaj mineralnih dodataka na svojstva obradivosti, prolaznosti, punjenja i otpornost segregaciji. Samozbijajući betoni s dodacima postigli su u svježem stanju bolja svojstva od komparativnog samozbijajućeg betona bez dodataka.
- Ispitivanjem tlačne čvrstoće vidljiv je utjecaj letećeg pepela na smanjenje i metakaolina na povećanje tlačne čvrstoće nakon 28 dana, ali i smanjenje nakon jednog dana.
- Samozbijajući beton s dodacima ima bolje vrijednosti koeficijenta kapilarnog upijanja i koeficijenta difuzije klorida od komparativnog samozbijajućeg betona bez dodataka, u slučaju istog vodovezivnog omjera i količine veziva.

- Metakaolin poboljšava svojstva trajnosti samozbijajućih betona pri starosti do 28 dana u većoj mjeri od letećeg pepela, iako se dodaje u bitno manjoj količini od letećeg pepela.
- Leteći pepeo poboljšava svojstva trajnosti samozbijajućih betona pri starosti od 90 dana u većoj mjeri od metakaolina.
- Dodatkom mineralnih sastojaka postao je samozbijajući beton i ekološki prihvatljiviji jer je smanjena količina cementa, te na taj način i manja je emisija CO<sub>2</sub> u atmosferu prilikom proizvodnje cementa.
- Dodatak polipropilenskih vlakana u mješavinu samozbijajućeg betona s letećim pepelom i metakaolinom utječe na znatnije poboljšanje koeficijenta difuzije klorida.

Kombinacija mineralnih dodataka u samozbijajućem betonu otvara nova područja za praktičnu primjenu. Jedan od bitnih preduvjeta za to jest i donošenje jedinstvene norme za metakaolin.

Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenog projekta Suvremene metode ispitivanja građevnih materijala, broj projekta 082-0822161-2996, ostvarenog uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

## LITERATURA

- [1] Skazlić, M.: *Hibridni mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [2] Beslač, J., Skazlić, M., Kindij, A.: *Posebni betoni*, Betonske konstrukcije-gradnje, Secon, Andris, HDGK, Hrvatska sveučilišna naklada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007, 262-268.
- [3] Skarendahl, A.: *Changing concrete construction through use of self-compacting concrete*, Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, Hunan, Kina, 2005, 17-24.
- [4] Bartos, P.J.M.: *Testing-SCC: Towards new european standards for fresh SCC*, Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, Hunan, Kina, 2005, 25-46.
- [5] Brouwers, H.J.H., Radix, H.J.: *Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study*, Cement and Concrete Research 35 (2005) 11, 2116-2136.
- [6] Vujica, M.: *Samozbijajući ekološki održivi betoni*, studentski rad za Rektorovu nagradu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2011.
- [7] Association Française de Génie Civil: *Bétons Auto-Plaçants-Recommandations provisoires*, Documents scientifiques et techniques, 2000.
- [8] De Larrard, F.: *Concrete Mixture Proportioning: a Scientific Approach*, Modern Concrete Technology Series, E & FN Spon, London and New York, 1999.
- [9] Billberg P.: *Self-compacting concrete for civil engineering structures-the Swedish experience*, CBI Report, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1999.
- [10] Grunewald, S.: *Performance based design of self-compacting fibre reinforced concrete*, disertacija, University of Delft, Nizozemska, 2004, ISBN: 90-407-2487-3.
- [11] Zhu, W., Bartos, P.J.M.: *Microstructure and properties of interfacial transition zone in SCC*, Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, Hunan, Kina, 2005, 319-328.
- [12] Khatib, J.M.: *Performance of self-compacting concrete containing fly ash*, Construction and Building Materials 22 (2008) 9, 1963-1971.



- [13] Xie, Y., Liu, B., Yin, J., Zhou, S.: *Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash*, Cement and Concrete Research 32 (2002) 3, 477–480.
- [14] Sonebi, M.: *Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans*, Cement and Concrete Research 34 (2004) 7, 1199–1208.
- [15] Sukumar, B., Nagamani, K., Srinivasa, R.: *Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash*, Construction and Building Materials 22 (2008) 7, 1394–1401.
- [16] Skazlić, M., Rosković, R., Banjad Pečur, I.: *Svojstva samozbijajućeg betona s velikim udjelom letječeg pepela*, Građevinar 60 (2008) 11, 945–952.
- [17] Yazici, 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) 4, 456–462.
- [18] Okamura, H., Maekawa, K., Ozawa, K.: *High Performance Concrete*, Gihoudou Pub, Tokyo, Japan, 1993.
- [19] Cassagnabere, F., Mouret, M., Escadeillas, G., Broillard P., Bertrand, A.: *Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects*, Construction and Building Materials 24 (2010) 7, 1109–1118.
- [20] Vejmelkova, E., Keppert, M., Grzeszczyk, S., Skalinski, B., Černý, R.: *Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag*, Construction and Building Materials 25 (2011) 3, 1325–1331.
- [21] Guneşisi, E., Gesogku, M., Ozbay, E.: *Strength and drying shrinkage of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures*, Construction and Building Materials 24 (2011) 10, 1878–1887.
- [22] Siddique, R., Klaus, J.: *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*, Applied Clay Science 43 (2009) 3–4, 392–400.