

## Primjena praha otpadnih guma kao zamjenskog materijala (punila) u samozbijajućem betonu (SCC)

Robert Bušić<sup>1</sup>, Ivana Miličević<sup>1</sup>

(1) Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet, Republika Hrvatska,  
{rbusic; imilicevic}@gfos.hr

### Sažetak

S obzirom na ubrzan rast stanovništva u svijetu, broj otpadnih automobilskih guma je postao ozbiljan ekološki problem. Razgradnja otpadnih guma traje duže od pola stoljeća, a njihov broj je iz godine u godinu sve veći. Otpadne automobilske gume predstavljaju resurs za ponovni ulazak na tržište kao posve novi materijal. Posebno zanimljivo područje primjene reciklirane otpadne gume je unazad nekoliko desetljeća područje građevinskih materijala gdje se reciklirana otpadna automobilska guma koristi u sve većoj mjeri. Trenutno se samo 5% otpadne reciklirane automobilske gume koristi u građevinarstvu za potrebe gradnje novih ili rekonstrukcije postojećih građevina. U ovom je radu prikazana moguća primjena reciklirane otpadne automobilske gume u relativno novom proizvodu, samozbijajućem betonu (SCC) te mogući potencijal primjene praha otpadnih guma kao punila u samozbijajućem betonu (SCC).

*Ključne riječi: samozbijajući beton, prah otpadne gume, leteći pepeo*

## Application of waste tire powders as substitute materials (fillers) in self-compacting concrete (SCC)

### Abstract

Due to the exponential increase in the world population, many discarded waste vehicle tires has become a serious ecological problem. Decomposition of the waste tire rubber can take longer than half of the century, and their number is increasing each year. Waste tire rubber represents the potential for re-entering the market through the new materials. Over the past two decades, the area of construction and building materials has become particularly interesting area of application of recycled waste tires. Currently, only 5% of recycled waste tire rubber were used in civil engineering for the construction of a new or reconstruction of existing buildings. This paper presents a possible application of recycled waste tire rubber in the relatively new product, self-compacting concrete (SCC) and potential use of waste tire powder as a filler in self-compacting concrete (SCC).

*Keywords: self-compacting concrete, waste tire powder, fly ash*

## 1. Uvod

Broj neupotrebljivih otpadnih guma različitih tipova vozila ubrzano raste i može se reći da ovaj podatak predstavlja jedan od glavnih ekoloških problema 21. stoljeća. Približno 1000 milijuna otpadnih guma se proizvede svake godine [1]. Zbog sve većeg broja otpadnih guma diljem svijeta, odlagališta su pretrpana otpadnim gumama i priroda je izložena potencijalnim okolišnim prijetnjama kao što su komarci, miševi, štetočine, širenje zaraznih bolesti i povećana opasnost od požara [2], [3]. Zbog činjenice da je bionerazgradivi materijal te da ima relativno dug vijek trajanja, interes za korištenje otpadne gume kao zamjenskog materijala za prirodni sitni i krupni agregat je počeo plijeniti pozornost inženjerima i građevinskoj industriji ponajviše zbog mogućnosti plasiranja novog, ekološki prihvatljivog proizvoda na tržište, tzv. gumiranog betona (eng. *rubberized concrete*). U Republici Hrvatskoj je gospodarenje otpadnom gumom uređeno zakonskom regulativom. Zakonom o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/2013, 73/2017) [4] određena je obaveza odvojenog sakupljanja otpada, pa tako i otpadne gume kao jedne od posebnih kategorija otpada, dok su Pravilnikom o gospodarenju otpadnim gumama (NN 113/16) [5], koji proizlazi iz ranije navedenog Zakona, propisani postupci i ciljevi gospodarenja otpadnim gumama, vrsta otpadnih guma koje se sakupljaju te zahtjevi u pogledu sakupljanja i recikliranja otpadnih guma. Što se tiče upotrebe reciklirane automobilske gume kao zamjenskog materijala u betonu, pregledom literature je utvrđeno da je većina istraživača koristila granule guma kao zamjenu za prirodni sitni i krupni agregat, šljunak i/ili pijesak, prilikom izrade betonskih mješavina. Granule guma su se koristile u određenom postotku s obzirom na volumen ili ukupnu masu sitnog ili krupnog agregata. Manji broj istraživanja proveden je vezano za upotrebu praha otpadnih guma (eng. *waste tire powder*), veličine zrna 0.00 do 0.50 mm, kao zamjenskog materijala, tj. dodatak ili punilo (eng. *filler*) u samozbijajućem betonu. U nastavku rada je prikazan kratak pregled dosadašnjih istraživanja svojstava relativno nove vrste betona, samozbijajućeg betona (eng. *self-compacting concrete*), s gumom kao zamjenskim materijalom za prirodni sitni i krupni agregat, te preliminarni rezultati eksperimentalnih ispitivanja provedenih u svrhu boljeg razumijevanja ponašanja samozbijajućeg betona s prahom otpadnih automobilskih guma (eng. *waste tire rubber*). Dodatno je izrađena mješavina s letećim pepelom (eng. *fly ash*) kao punilom te je provjeren i istražen utjecaj letećeg pepela na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i u očvrslom stanju.

## 2. Svojstva samozbijajućeg betona sa recikliranom gumom

### 2.1. Svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju

U dosadašnjim eksperimentalnim istraživanjima, većina je autora navela slično ponašanje samozbijajućeg betona u svježem stanju nakon dodavanja gume kao zamjenskog materijala, tj. smanjenje sposobnosti tečenja, sposobnosti zaobilazanja zapreka i otpornosti segregaciji te povećanje viskoznosti s povećanjem sadržaja gume. U Tablici 1 je vidljivo kako je većina autora obavljala eksperimentalna ispitivanja u kojima je sitni ili krupni prirodni agregat zamijenila gumom čak do 60%, i to radi očuvanja prihvatljivih svojstva

samozbijajućeg betona u svježem stanju. Od ostalih svojstava SCC-a u svježem stanju korisno je spomenuti da se sadržaj zraka i poroznost betona povećavaju s povećanjem udjela reciklirane gume u sastavu samozbijajućeg betona [6]–[9]. Čestice gume imaju grubu površinu i oštre rubove [10], te tako povećavaju poroznost SCC-a.

**Tablica 1.** Samozbijajući beton s recikliranom gumom kao zamjenskim materijalom za prirodni agregat

Referenca	Zrno (mm)	Postotak zamjene (%)	Zamijenjeni materijal
Uygunoğlu i Topçu [6]	1.00 – 4.00	10, 20, 30, 40 i 50	sitni agregat
Ganesan i sur. [11]	0 - 4.75	15 i 20	sitni agregat
Emiroğlu i sur. [2]	5 - 12	15, 30, 45 i 60	krupni agregat
Ismail i Hassan [12]	0 - 4	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 i 50	sitni agregat
Güneyisi [13]	0 - 4	5, 15 i 25	sitni agregat

## 2.2. Svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju

Budući da mehanička svojstva betona određuju područje primjene betona, većina je autora u sklopu znanstvenih istraživanja ispitivala tlačnu čvrstoću i sekantni modul elastičnosti, dok je manji broj autora ispitivao dinamička i trajnosna svojstva samozbijajućeg betona. U Tablici 2 je prikazan utjecaj veličine zrna, postotka zamjene i zamijenjenog materijala na promatrana mehanička svojstva samozbijajućeg betona.

**Tablica 2.** Utjecaj veličine zrna, postotka zamjene i zamijenjenog materijala na mehanička svojstva samozbijajućeg betona

Referenca	Zrno (mm)	Postotak zamjene (%)	Zamijenjeni materijal	Smanjenje $f_{ck}$ (%)	Smanjenje E (%)
Ismail i Hassan [12]	0 - 4	5, 10, 15, 20, 25, 30 i 40	sitni agregat	16, 21, 29, 42, 46, 53 i 67	6, 8, 18, 31, 32, 40 i 54
AbdelAleem i sur. [14]	<4.75	0, 5, 10, 15, 20, 25 i 30	sitni agregat	12, 29, 41, 49, 51 i 58	6, 13, 16, 25, 32 i 36
Ismail i sur. [15]	<4.75	5, 10, 15, 20, 30 i 40	sitni agregat	12, 19, 28, 39, 50 i 61	4, 8, 19, 28, 34 i 46
Ismail i Hassan [7]	<4.75	5, 10, 15, 20, 25 i 30	sitni agregat	12, 29, 41, 49, 51 i 58	6, 12, 16, 25, 32 i 36

Efekt smanjenja vrijednosti mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona s povećanjem postotka zamjene prirodnog sitnog i krupnog agregata recikliranom gumom, može se objasniti lošom adhezijom i slabom čvrstoćom veze između čestica gume i cementne paste, niskim modulom elastičnosti gume u usporedbi s modulom elastičnosti prirodnog riječnog agregata i povećanim udjelom pora i zraka zarobljenog između čestica gume i cementne paste [9], [16]. U literaturi se također pojavljuju betonske mješavine u kojima su korišteni različiti materijali kao zamjena cementu (eng. supplementary cementing materials) poput letećeg pepela (eng. fly ash), silicijske prašine (eng. silica fume), metakaolina (eng. metakaolin) te zgure (eng. slag), sve u svrhu poboljšanja mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona s gumom [12], [15]. Stoga će se, pored utjecaja praha otpadnih

automobilskih guma, u nastavku rada prikazati i utjecaj letećeg pepela (FA) na mehanička svojstva samozbijajućeg betona.

### 3. Preliminarna laboratorijska ispitivanja

U ovom su radu prikazana ispitivanja svježeg i očvrslog samozbijajućeg betona temeljena na djelomičnoj zamjeni punila (filera) prahom otpadnih automobilskih guma i letećim pepelom. Kako bi se mogli definirati konačni sastavi mješavina samozbijajućih betona, provedena su preliminarna laboratorijska ispitivanja na probnim mješavinama u Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Osijeku. Projektirane su tri probne betonske mješavine, a sastav betonskih mješavina je u Tablici 3. Betonske mješavine su projektirane u skladu s Europskim smjernicama za samozbijajući beton [17].

**Tablica 3.** Sastavi betonskih mješavina

Materijal	Gustoća (kg/dm <sup>3</sup> )	SCC-0 (kg)	SCC-25-FA (kg)	SCC-25-TP (kg)	
Cement 32.5 N	2.72	450.00	450.00	450.00	
Voda Gradski vodovod	1.00	202.50	202.50	202.50	
v / c Vodocementni omjer	-	0.45	0.45	0.45	
Dodatak 1 Glenium ACE 430	1.06	4.50	4.50	4.50	
Dodatak 2 RheoMatrix	1,00	0.90	0.90	0.90	
Punilo (filer)	Dolomitno brašno	2.86	150.00	112.50	112.50
	Leteći pepeo (FA)	1.98	0.00	37.50	-
	Prah reciklirane gume (TP)	1.23	0.00	0.00	37.50
Agregat	Pijesak riječni 0-2 mm	2.60	290.92	289.15	286.27
	frakcija 0-4 mm - dolomit	2.82	552.19	548.83	543.36
	frakcija 4-8 mm - dolomit	2.75	307.71	305.83	302.79
	frakcija 8-16 mm- dolomit	2.81	393.02	390.63	386.74

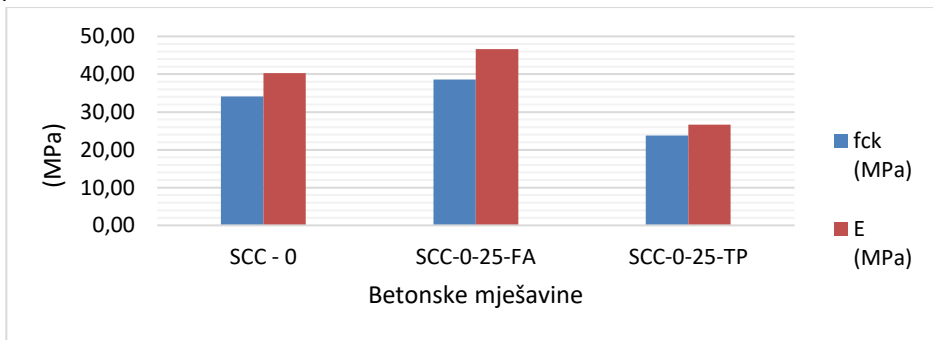
U ispitivanju se koristio leteći pepeo (FA) iz termoelektrane Tuzla te reciklirana guma (TP) tvrtke Gumiimpex-GRP d.o.o. Varaždin. Finoća punila je ispitana metodom propusnosti zraka na Blaineovom aparatu. Finoća dolomitnog brašna je iznosila 5406.70 cm<sup>2</sup>/g, letećeg pepela 3698.26 cm<sup>2</sup>/g, a praha reciklirane gume 1685.91 cm<sup>2</sup>/g. Ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju su provedena u skladu s važećim normama HRN EN 12350-8:2010 [18], HRN EN 12350-10:2010 [19], HRN EN 12350-12:2010 [20] te u skladu s Europskim smjernicama za samozbijajući beton [17]. U Tablici 4 su rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju i u očvrsлом stanju.

**Tablica 4.** Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem i očvrsлом stanju

Oznaka mješavine	p (%)	PJ (mm)	T500 (s)	H2/H1	f <sub>ck</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E (MPa)
SCC-0	2.10	25.8	1.8	0.56	34.10	40.33
SCC-25-FA	0.71	22.0	2.0	0.75	38.63	46.64
SCC-25-TP	2.50	34.5	2.3	0.42	23.77	26.69

Uspoređujući s referentom mješavinom (SCC-0), utvrđeno je da je zamjena 25% dolomitnog brašna letećim pepelom (SCC-25-FA) uzrokovala pad poroznosti svježeg samozbijajućeg betona za 66%, te povećanje sposobnosti zaobilaženja zapreka za 15% (j-prsten) i 43% (L-kutija) te povećanje viskoznosti za 11%. Rezultati dobiveni zamjenom 25% dolomitnog brašna prahom otpadnih automobilskih guma (SCC-25-TP) pokazuju povećanje poroznosti za 19%, smanjenje sposobnosti zaobilaženja zapreka za 34% (j-prsten) i 26% (L-kutija) te povećanje viskoznosti za 28%, u usporedbi s referentom mješavinom (SCC-0). Iz navedenog se zaključuje da se upotrebom otpadnog praha automobilskih guma (TP) i letećeg pepela (FA) mogu dobiti zadovoljavajuća svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju pri čemu je značajna razlika vidljiva jedino u svojstvu poroznosti uslijed upotrebe letećeg pepela (FA) što ima za posljedicu beton boljih svojstava u očvrslom stanju.

Tlačna čvrstoća je ispitana na uzorcima kocke dimenzija 150×150×150 mm u skladu s normom HRN EN 12390-3:2009 [21], a statički modul elastičnosti je ispitana na uzorcima valjka dimenzija 150×300 mm u skladu s normom HRN EN 12390-13:2013 [22]. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti samozbijajućeg betona su grafički prikazani na Slici 1.



**Slika 1.** Srednja vrijednost tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti ispitanih uzoraka samozbijajućeg betona

Sve su betonske mješavine imale vrijednost tlačne čvrstoće veću od 23 N/mm<sup>2</sup>, te vrijednost statičkog modula elastičnosti veću od 25 MPa. Povećanje tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti u iznosu od 13.28% i 15.66% je ostvareno zamjenom 25% mase punila (dolomitnog brašna) letećim pepelom (mješavina SCC-0-25-FA), dok smanjenje istih mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona iznosi 30.28% i 33.82% ako 25% mase punila (dolomitnog brašna) zamijenimo prahom otpadnih automobilskih guma (mješavina SCC-0-25-TP). Iz navedenog proizlazi zaključak da svojstva samozbijajućeg betona u očvrslom stanju mogu biti zadovoljavajuća ako se otpadni prah automobilskih guma ili leteći pepeo iskoristi kao punilo te se može predložiti istovremena zamjena punila letećim pepelom i otpadnim prahom automobilskih guma.

#### 4. Zaključak

Korištenjem reciklirane otpadne automobilske gume u samozbijajućem betonu (SCC) potencijalno se smanjuje negativan učinak i rast broja odlagališta otpadnih guma kao i njihov

negativan ekološki učinak. Dosadašnja eksperimentalna istraživanja su temeljena na zamjeni prirodnog krupnog ili sitnog agregata granulama reciklirane otpadne automobilske gume, s tim da je većina laboratorijskih ispitivanja provedena na zamjeni sitnog agregata tj. pijeska, granulama gume. Za razliku od dosadašnjih eksperimentalnih ispitivanja, u ovom je radu prikazan drugačiji pristup. Punilo (filer) se u određenom postotku zamijenilo prahom otpadnih automobilskih guma. Rezultati ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju pokazuju povećanu viskoznost te smanjenu sposobnost tečenja i zaobilaženja zapreka nakon zamjene filera prahom otpadne gume. Uočen je i pad vrijednosti tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti s tim da je smanjenje navedenih vrijednosti u granicama koje i dalje pokazuju potencijal korištenja samozbijajućeg betona s otpadnim prahom automobilskih guma. S druge strane pozitivan efekt zamjene punila letećim pepelom se mogao uočiti kod svježeg i očvrstlog betona. S obzirom na dobivene rezultate ispitivanja, zaključuje se da bi se samozbijajući beton s gumom potencijalno mogao koristiti za konstruktivne svrhe, ali se postotak zamjene punila mora racionalno odrediti u svrhu očuvanja prihvatljivih vrijednosti mehaničkih svojstava samozbijajućeg betona. Nadalje predlaže se provedba eksperimentalnih istraživanja samozbijajućeg betona u kojemu će se punilo istovremeno zamijeniti prahom otpadnih guma i letećim pepelom kako bi se pokušao umanjiti ili čak neutralizirati negativan učinak praha otpadnih guma na mehanička svojstva samozbijajućeg betona. Uz mehaničke karakteristike samozbijajućeg betona poput tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće savijanjem i modula elastičnosti predlaže se i dodatno eksperimentalno ispitivanje očvrstlog samozbijajućeg betona s otpadnim prahom automobilskih guma koje će obuhvaćati i ispitivanje skupljanja betona, veze betona s armaturom te bitnih trajnosnih svojstava samozbijajućeg betona kao što su otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, vodopropusnost, plinopropusnost te otpornost na karbonizaciju i difuziju klorida.

## Zahvala

Autori zahvaljuju na potpori istraživanju koje je financirala Hrvatska zaklada za znanost kroz uspostavni istraživački projekt: **Razvoj armiranobetonskih elemenata i sustava s otpadnim prahom automobilskih guma**, UIP-05-2017-7113.

## Literatura

- [1] Rahman, M. M., Usman, M., Al-Ghalib, A. A.: Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC),” *Construction and Building Material*, vol. 36, pp. 630–637, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.116
- [2] Emiroğlu, M., Yıldız, S., Keleştemur, O., Keleştemur, M. H.: Bond performance of rubber particles in the self-compacting concrete, *Bond in Concrete 2012 - Bond in New Materials under Severe Conditions*, pp. 779–786, 2012
- [3] Miller, N. M., Tehrani, F. M.: Mechanical properties of rubberized lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 147, pp. 264–271, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.155
- [4] Zakon o održivom gospodarenju otpadnom (NN 94/2013, 73/2017)
- [5] Pravilnik o gospodarenju otpadnim gumama (NN 113/16)

- [6] Uygunođl, T., Topçu, I. B.: The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars, *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 7, pp. 1141–1150, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.027
- [7] Ismail, M. K., Hassan, A. A. A.: Impact Resistance and Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete Reinforced with Steel Fibers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001731
- [8] Najim, K. B., Hall, M. R.: Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC), *Materials and Structures*, vol. 46, no. 12, pp. 2029–2043, 2013, doi: 10.1617/s11527-013-0034-4
- [9] AbdelAleem, B. H., Hassan, A. A. A.: Development of self-consolidating rubberized concrete incorporating silica fume, *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 389–397, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.146
- [10] Si, R., Wang, J., Guo, S., Dai, Q., Han, S.: Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber, *Journal of Cleaner Production*, vol. 180, pp. 823–831, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.180
- [11] Ganesan, N., Bharati Raj, J., Shashikala, A. P.: Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 7–14, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.077
- [12] Ismail, M. K., Hassan, A. A. A.: Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber, *Journal of Cleaner Production*, vol. 125, pp. 282–295, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.044
- [13] Güneysisi, E.: Fresh properties of self-compacting rubberized concrete incorporated with fly ash, *Materials and Structures*, vol. 43, no. 8, pp. 1037–1048, 2010, doi: 10.1617/s11527-009-9564-1
- [14] AbdelAleem, B. H., Ismail, M. K., Hassan, A. A. A.: The combined effect of crumb rubber and synthetic fibers on impact resistance of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 816–829, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.077
- [15] Ismail, M. K., De Grazia, M. T., Hassan, A. A. A.: Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete with Different Supplementary Cementing Materials, *International Conference of Transportation and Civil Engineering*, pp. 68–74, 2015, doi: 10.17758/UR.U0315331
- [16] Aslani, F., Ma, G., Yim Wan, D. L., Tran Le, V. X.: Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 1835–1847, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.003
- [17] EFNARC, “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete,” 2005.
- [18] HRN EN 12350-8:2010: Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump flow test.
- [19] HRN EN 12350-10:2010: Testing fresh concrete - Part 10: Self-compacting concrete - L box test
- [20] HRN EN 12350-12:2010: Testing fresh concrete - Part 12: Self-compacting concrete - J-ring test
- [21] HRN EN 12390-3:2009: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens

- [22] HRN EN 12390-13:2013: Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression