

X Naučno/stručni simpozij sa međunarodnim učešćem
„METALNI I NEMETALNI MATERIJALI“ Bugojno, BiH, 24.-25. april 2014.

UPOTREBA RECIKLIRANOG AGREGATA ZA PROIZVODNJU BETONA

USE OF RECYCLED AGGREGATE IN CONCRETE

Adnan Mujkanović, Marina Jovanović, Adela Telalović
Fakultet za metalurgiju i materijale Univerziteta u Zenici

Almir Bajraktarević
ALMY d.o.o Zenica

Adis Ćatić
JUB d.o.o. Sarajevo

Kategorizacija rada: Originalni naučni rad

SAŽETAK

U cilju utvrđivanja mogućnosti primjene recikliranog agregata za proizvodnju betona, ispitana su svojstva recikliranog agregata i krečnjačkog agregata: granulometrijski sastav, stvarna gustoća čestica, gustoća čestica u suhom stanju, gustoća čestica u zasićenom površinski suhom stanju i upijanje vode, otpornost prema drobljenju i habanju i otpornost na udar. Ispitana je konzistencija i sadržaj uvučenog zraka svježeg betona, te čvrstoća na pritisak i modul elastičnosti očvrslog betona. Utvrđeno je da se, unatoč lošijim svojstvima recikliranog agregata, njime može zamijeniti 50 % mase frakcija 4-8, 8-16 i 16-31,5 mm prirodnog agregata, bez značajnijeg pogoršanja svojstava svježeg i očvrsnulog betona.

Ključne riječi: agregat, beton, recikliranje, zbrinjavanje građevinskog otpada

ABSTRACT

In order to determine the possibility of using recycled aggregate for concrete production, properties of recycled aggregate and limestone aggregates: particle size distribution, oven-dried particle density, saturated and surface dried particle density and apparent particle density, water absorption, resistance to fragmentation and impact resistance, were determined. Also, consistency and air content of fresh concrete were investigated, as well as compressive strength and modulus of elasticity of hardened concrete. It was found that, despite the inferior characteristics of recycled aggregate, it can replace 50% of three sieved fractions (4-8, 8-16, and 16-31.5 mm) of natural aggregate, with no significant deterioration in the properties of fresh and hardened concrete.

Keywords: aggregate, concrete, construction waste, recycling

1. UVOD

Upotrebom građevinskog otpada koji nastaje kao posljedica rušenja ili rekonstrukcije građevinskih objekata istovremeno se smanjuje potreba za prirodnim materijalima koji predstavljaju neobnovljive

resurse i vrši se zbrinjavanje otpada koji inače završava na deponijama. Ovaj inertni otpad se može prerađivati u odgovarajućim postrojenjima za recikliranje i tako prerađen koristiti kao dodatni ili alternativni materijal prirodnim agregatima. Nažalost, dok se u razvijenim industrijskim zemljama promovira recikliranje¹, u Bosni i Hercegovini je trenutno osnovni način upravljanja građevinskim otpadom njegovo zbrinjavanje na odlagalištima, što dovodi do nastanka sve većeg broja često divljih deponija. Mogućnost primjene otpadnog građevinskog materijala u proizvodnji betona i armiranog betona je naznačena u europskim standardima koji ne razlikuju agregate prema njihovom porijeklu već prema njihovim karakteristikama. Prema važećem standardu BAS EN 206-1:2002 „Agregati mogu biti prirodni ili vještački, a također i reciklirani, kada su dobiveni od materijala prethodno korištenih za građenje.“ Također, standardi BAS EN 12620:2004 (Agregati za beton), BAS EN 13139:2003 (Agregati za malter), BAS EN 13055- 1:2006 (Laki agregati za beton, malter i malter za injektiranje) i BAS EN 13043:2006 (Agregati za bitumenske mješavine i tretiranje površina za ceste, aerodrome i druge saobraćajne površine) se odnose i na agregate dobivene recikliranjem građevinskog otpada. Prema navedenim standardima u svim slučajevima kada se kao agregat koristi materijal sa čijom primjenom se nema dovoljno iskustva, kao što je bilo koji reciklirani agregat, neophodno je provesti detaljna ispitivanja svojstava kako samog agregata, tako i svježeg i očvrstalog betona [2].

U nekim evropskim zemljama, kao što su Njemačka, Velika Britanija, Španija, Holandija i Mađarska, usvojene su tehničke preporuke za primjenu recikliranih agregata, bilo kao posebni standardi ili kao dodatak postojećim EN standardima. Tako se u aneksu 15 Propisa za betonske konstrukcije Kraljevine Španije navodi da se reciklirani agregat može koristiti za proizvodnju betona i armiranog betona čija karakteristična čvrstoća nije veća od 40 N/mm², dok se za proizvodnju prednapregnutog betona ne smije koristiti. Preporučuje se korištenje krupnog recikliranog agregata sa maksimalnim masenim udjelom od 20 % od ukupne količine krupnog agregata. Upijanje vode recikliranog agregata ne smije biti veće od 7%, dok je upijanje vode prirodnog agregata ograničeno na max. 4,5 % [3].

RILEM² je još 1994. godine objavio preporuke prema kojima se za proizvodnju betona može koristiti isključivo krupni reciklirani agregat (≥ 4 mm), koji se klasificira u tri kategorije:

- a) Tip I – agregat dobiven drobljenjem opeke;
- b) Tip II – agregat dobiven drobljenjem betona;
- c) Tip III – agregat dobiven miješanjem prirodnog i recikliranog agregata (min. 80% prirodnog, max. 10% agregata tipa II).

Prema ovim preporukama u recikliranom agregatu od drobljenog betona (tip II) sadržaj stranih materijala (metali, staklo, bitumen i sl.) ograničava na max. 1 %, dok se sadržaj organskih materija ograničava na 0,5%.

Prema DAfStb-smjernici (Deutscher Aufschuss für Stahbeton) reciklirani agregat za beton je građevinski materijal koji ima slijedeći sastav:

- udio drobljenog betona u ukupnom recikliranom agregatu ≥ 95 % mase agregata,
- udio mineralnih sastojaka i asfalta u ukupnom recikliranom agregatu je ≤ 5 % mase agregata,
- udio nemineralnih sastojaka u ukupnom recikliranom agregatu je $\leq 0,2$ % mase agregata.

Ipak, s obzirom da uticaj recikliranog agregata na svojstva betona u velikoj mjeri zavisi od porijekla agregata i drugih faktora kao što su metoda miješanja, udio recikliranog agregata, vrsta i udio hemijskih i mineralnih dodataka, sve navedene preporuke trebaju se uzeti sa rezervom, odnosno neophodno je izvršiti eksperimentalnu provjeru mogućnosti korištenja recikliranog agregata za svaku konkretnu primjenu. U

¹ 2008. godine Europska komisija objavila direktivu koja postavlja cilj recikliranja od 50% za komunalni otpad i 70% za građevinski otpad, kojeg treba postići do 2020 [1].

² The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

ovom radu predstavljeni su eksperimentalni rezultati ispitivanja svježeg i očvrtnulog betona sa povećanim udjelom recikliranog agregata u odnosu na preporučene vrijednosti. Kao osnova za usporedbu poslužili su rezultati ispitivanja betona sa prirodnim agregatom.

2. PRIPREMA I ISPITIVANJE NAJVAŽNIJIH SVOJSTAVA AGREGATA OD RECIKLIRANOG BETONA

Beton za izradu recikliranog agregata preuzet je sa gradilišta tvornice ALMY d.o.o. (slika 1). Krupniji komadi su usitnjeni korištenjem hidrauličnog čekića, a zatim se pristupilo daljem usitnjavanju na vertikalno-konusnoj drobilici BABBITLES BS 702 tipa 15-FN, kapaciteta 100 t/h, sa nazivnim maksimalnim zrnom promjera 400 mm.



Slika 1. Beton korišten za izradu recikliranog agregata

Klasiranjem drobljenog agregata na laboratorijskom kompletu sita dobivene su frakcije agregata: 0 - 4 mm (I), 4 - 8 mm (II), 8 - 16 mm (III) i 16 - 31,5 mm (IV). Frakcija 0 - 4 mm je zbog prevelike količine sitnih čestica izostavljena iz daljeg toka ispitivanja, dok su preostale tri frakcije pomiješane u masenim odnosima II:III:IV=1:1:1,5. Odnos frakcija u uzorku za ispitivanje agregata je identičan njihovom odnosu u uzorcima betona. Pored recikliranog agregata, u cilju uporedbe, pripremljen je uzorak prirodnog krečnjačkog agregata, te su paralelno ispitana važna fizičko-mehanička svojstva i jednog i drugog agregata. Granulometrijski sastav agregata ispitan je u skladu sa standardom BAS EN 933-1, a rezultati ispitivanja su dati u tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Granulometrijski sastav drobljenog krečnjačkog agregata

Frakcija	Prolaz kroz sito (%)									
	0,125 mm	0,25 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm	4,0 mm	8,0 mm	16,0 mm	31,5 mm	63,0 mm
0/4	5,35	9,08	23,54	44,72	70,18	98,23	100,0	100,0	100,0	100,0
4/8	-	-	-	0,89	1,25	4,38	99,02	100,0	100,0	100,0
8/16	-	-	-	-	-	1,02	7,16	98,36	100,0	100,0
16/31,5	-	-	-	-	-	-	0,71	5,48	99,03	100,0

Tabela 2. Granulometrijski sastav recikliranog agregata

Frakcija	Prolaz kroz sito (%)									
	0,125 mm	0,25 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm	4,0 mm	8,0 mm	16,0 mm	31,5 mm	63,0 mm
4/8	-	-	-	-	-	3,5	100,0	100,0	100,0	100,0
8/16	-	-	-	-	-	-	1,16	100,0	100,0	100,0
16/31,5	-	-	-	-	-	-	-	2,18	100,0	100,0

Manja količina nadmjernih i podmjernih zrna u frakcijama betona od recikliranog agregata objašnjava se time što je recikirani agregat klasiran pomoću laboratorijskih sita. Za ispitivanje stvarne gustoće čestica (ρ_a), gustoće čestica u suhom stanju (ρ_{rd}), gustoće čestica u zasićenom površinski suhom stanju (ρ_{ssd}) i upijanja vode (WA_{24}) korištena je metoda propisana standardom BAS EN 1097-6. Ispitivanje otpornosti agregata prema drobljenju i habanju izvršeno je prema standardu BAS EN 1097-2, dok je ispitivanje otpornosti agregata na udar izvršeno u skladu sa standardom BS 812-112. Rezultati navedenih ispitivanja predstavljani su u tabelama 3 i 4.

Tabela 3. Rezultati ispitivanja gustoće i upijanja vode agregata

Vrsta agregata	ρ_{rd} , Mg/m ³	ρ_a , Mg/m ³	ρ_{ssd} , Mg/m ³	WA_{24} , %
Reciklirani agregat	2,16	2,51	2,30	6,60
Prirodni agregat	2,59	2,77	2,65	2,47

Tabela 4. Rezultati ispitivanja otpornosti prema drobljenju i habanju i otpornosti agregata na udar

Vrsta agregata	LA koeficijent, %	AIV, %
Reciklirani agregat	34,6	24,07
Prirodni agregat	22,5	17,25

Iz prikazanih rezultata se vidi da se reciklirani agregat odlikuje znatno većim upijanjem vode od prirodnog, te manjom gustoćom u zasićenom površinski suhom stanju i gustoćom u suhom stanju. S druge strane, razlika između stvarne gustoće dva agregata je manja. Dobiveni rezultati se mogu objasniti velikom otvorenom poroznošću recikliranog agregata, odnosno time što su zrna agregata obavijena poroznim malterskim slojem. Na osnovu dobivenih rezultata, a u skladu sa klasifikacijom agregata prema vrijednosti LA koeficijenta (BAS EN 12620), reciklirani agregat se svrstava u klasu LA₃₅, a prirodni agregat u klasu LA₂₅. Rezultati ispitivanja otpornosti prema drobljenju i habanju bili su očekivani, s obzirom na to da reciklirani agregat sadrži značajan udio cementnog kamena koji je znatno manje čvrstoće od prirodnog agregata, te se nakon njegovog tretmana u Los Angeles mašini dobiva veći udio sitnih čestica. Rezultati prikazani u tabeli 4 pokazuju znatno veću otpornost na udar prirodnog agregata nego što je to slučaj sa recikliranim agregatom, što se takođe objašnjava prisustvom cementnog kamena koji se pri udarnim opterećenjima lakše usitnjava od prirodnog kamena.

3. SVOJSTVA SVJEŽEG BETONA

Kao referentni materijal poslužio je beton koji je u svemu identičan ispitivanom betonu, osim što u svoj sastav uključuje isključivo prirodni krečnjački agregat kamenoloma Sokolica. Za izradu

uzoraka betona sa recikliranim agregatom prethodno su pripremljene frakcije agregata: 4 - 8 mm, 8 - 16 mm i 16 - 31,5 mm, koje sadrže po 50% recikliranog i prirodnog krečnjačkog agregata Kamenoloma „Sokolica“, dok je kao sitna frakcija (0 - 4 mm) korišten samo prirodni krečnjački agregat Kamenoloma „Sokolica“. Naime, ocijenjeno je da reciklirani agregat sadrži suviše veliku količinu frakcije praha koja bi štetno uticala na svojstva svježeg i očvrstlog betona. Prije miješanja sa ostalim komponentama betona i prirodni i drobljeni agregat su vlaženjem dovedeni u zasićeno površinski suho stanje (ZPS). Kao vezivna komponenta korišten je cement Tvornice cementa Kakanj CEM II/B-W 42,5N, koji sadrži 65-79% portland cementnog klinkera i 21-35% dodatka kalcijskog letećeg pepela i do 5% prirodnog gipsa kao regulatora vezivanja. Za poboljšanje obradivosti betonske mješavine korišten je tečni superplastifikator na polikarboksilatnoj bazi. Aditiv je u betonsku mješavinu dodat nakon što je ona prethodno miješana 10 minuta, kako bi se izbjeglo njegovo značajnije upijanje u agregat. U tabeli 5 prikazani su sastav i projektovana svojstva betonske mješavine.

Tabela 5. Sastav i svojstva betonske mješavine

Klasa konzistencije	S3
Klasa betona	C 25/30
Maksimalni dijаметar zrna	31,5 mm
Maseni udio cementa	350 kg/m ³
Maseni udjeli frakcija :	
• 0 – 4 mm	30%
• 4 – 8 mm	20%
• 8 – 16 mm	20%
• 16 -31,5 mm	30%
Maseni udio superplastifikatora	0,5 % (na masu cementa)
Vodocementni faktor (za agregat u ZPS stanju)	0,55

Ispitivanje konzistencije izvršeno je u skladu sa standardom BAS EN 12350-2, ispitivanje količine uvučenog zraka prema standardu BAS EN 12350-7, dok je zapreminska masa određena prema standardu 12350-6. Rezultati ispitivanja svojstava svježeg betona predstavljeni su u tabeli 6.

Tabela 6. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju

Vrsta betona	Slijeganje, cm	Sadržaj uvučenog zraka, %	Zapreminska masa, kg/m ³
Beton sa recikliranim agregatom	12,8	1,93	2498
Beton sa prirodnim agregatom	14,9	1,83	2550

S obzirom da su oba agregata prije miješanja sa betonom dovedana u zasićeno površinski suho stanje, nisu uočene značajne razlike u mjeri slijeganja. Ipak, reciklirani agregat ima značajnije površine, što dovodi do smanjene pokretljivosti svježeg betonske mješavine, i to je dovelo do izjavnog smanjenja mjere slijeganja. Nešto veća količina uvučenog zraka izmjerena je kod betona sa recikliranim agregatom, što se može objasniti većom poroznošću i površinskom hrapavošću recikliranog agregata. Rezultati ispitivanja zapreminske mase svježeg betona pokazuju da kod svježeg betona sa recikliranim agregatom imamo manju zapreminsku

masu nego kod referentnog betonskog uzorka. To je bilo i za očekivati jer je zapreminska masa zrna recikliranog agregata manja nego kod prirodnog agregata.

4. SVOJSTVA OČVRSNULOG BETONA

Postupak izrade i njegovanja uzoraka za ispitivanje izvršen je prema standardu BAS EN 12390-2. Ispitivanje čvrstoće na pritisak je izvršeno prema standardu BAS EN 12390-3, pomoću hidraulične prese kapaciteta 2000 kN, dok je na osnovu rezultata dobivenim ispitivanjem pomoću ultrazvučne metode prema standardu BAS EN 12504-4, određen dinamički modul elastičnosti uzoraka očvrsnulog betona. Rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak i modula elastičnosti dati su u tabeli 7.

Tabela 7. Rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak i modula elastičnosti očvrsnulog betona

Vrsta betona	Čvrstoća na pritisak, MPa	Modul elastičnosti, GPa
Beton sa recikliranim agregatom	38,5	33,2
Beton sa prirodnim agregatom	39,2	33,3

Na osnovu dobivenih rezultata može se konstatovati da beton sa recikliranim agregatom ima za oko 4 % nižu vrijednost čvrstoće na pritisak od betona sa prirodnim agregatom, dok se vrijednosti modula elastičnosti bitno ne razlikuju.

3. ZAKLJUČAK

Ispitivanjem je utvrđeno je da reciklirani agregat ima manju zapreminsku masu, kao i otpornost prema habanju i drobljenju, te veće upijanje vode od prirodnog agregata. Što se tiče svojstva betona, utvrđeno je da zamjena polovine krupnog prirodnog agregata recikliranim agregatom ne dovodi do velike promjene svojstava betona u svježem i očvrnulom stanju. Zbog povećane poroznosti recikliranog agregata i izraženije hrapavosti površine zrna, dolazi do određenog smanjenja obradivosti mješavine svježeg betona. Zapreminska masa svježeg betona sa recikliranim agregatom je takođe manja (2498 kg/m^3) nego kod betona sa prirodnim agregatom (2550 kg/m^3), a to se odnosi i na čvrstoću na pritisak očvrnulog betona (38 MPa beton sa recikliranim agregatom, 39,7 MPa beton sa prirodnim agregatom). Međutim, u svim ispitivanjima svježeg i očvrnulog betona, utvrđeno je da razlike u svojstvima betona sa i bez recikliranog agregata nisu velike, odnosno da upotreba recikliranog agregata nije uticala u značajnoj mjeri na svojstva finalnog proizvoda. Ovo naravno važi samo u slučaju ako se betonska mješavina pravilno komponuje, odnosno ukoliko se doziranje i miješanje komponenta izvrši na ispravan način.

4. LITERATURA

- [1] eur-lex.europa.eu
- [2] G. L. Balázs, T. Kausay, T. K. Simon: Technical Guideline For The Production And Utilisation Of concrete Out Of Recycled Aggregates In Hungary, Concrete Structures (Annual Journal Of The Hungarian Group Of Fib, Budapest) 2008. Vol. 9. Pp. 45-55
- [3] EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. Publicaciones del Ministerio de Fomento; Secretaría General Técnica, Madrid, 2008.
- [4] P. Grübl, M. Rühl, German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb) - Code: Concrete with Recycled Aggregates, 1998, University of Dundee, Concrete Technology Unit, London, UK