

Ivanka Bevanda, dipl. ing. građ.

«IGH-Mostar» d.o.o. Mostar e-mail: ibevanda@igh-mostar.ba

Mr sc. Krešimir Šaravanja, dipl. ing. građ.

«IGH-Mostar» d.o.o. Mostar i Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru e-mail: ksaravanja@igh-mostar.ba

RECIKLIRANI BETON

1. UVOD

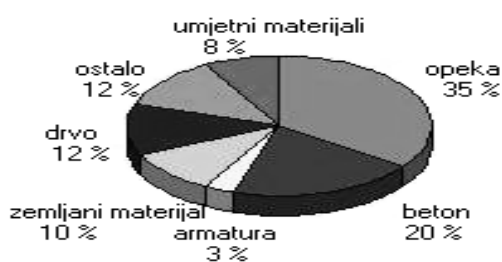
Predmet ovog rada su svojstva svježeg i očvrstlog recikliranog betona. **Reciklirani beton je beton od recikliranog agregata**, odnosno agregata koji je dobiven preradom građevinskog otpada. Ideja o preradi tj. ponovnoj upotrebi građevinskih materijala koji potječu iz porušenih objekata javila se nakon II. svjetskog rata. Međutim, tek 70-tih godina prošlog stoljeća prerada građevinskog otpada dobiva sve više na značenju, prvenstveno zbog sve manjih rezervi prirodnih sirovina, sve veće količine odloženog građevinskog otpada i porasta svijesti o potrebi zaštite okoliša. Preradom otpada od građevinskih materijala povećava se i prostor za odlaganje komunalnog otpada, uz istovremenu uštedu prirodnih sirovina.

Da bi se dobila kvalitetna sekundarna sirovina potrebno je provesti racionalnu razgradnju objekta, selekcionirati materijal i osigurati tehnički-tehnološko pogodno postrojenje, kontrolu kvalitete pri prijemu materijala u postrojenje i tokom prerade. Kvaliteta recikliranog agregata jeste u funkciji kvaliteta ulazne sirovine, ali svojstva kao što su oblik zrna i sadržaj sitnih čestica su u direktnoj ovisnosti o tehnološkom procesu prerade.

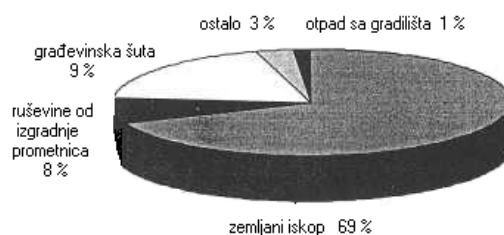
Prema nekim istraživanjima građevinski otpad čini oko 2/3 ukupnog otpada, a otprilike 80% građevinskog otpada, ovisno o njihovom porijeklu i sastavu, uz određene tehnologije recikliranja, može se ponovo iskoristiti kao ekonomski vrijedna sekundarna sirovina za ponovnu upotrebu kao:

- agregat za razne vrste betona i asfalt –betonskih mješavina,
- materijal za nosive slojeve cesta,
- materijal za izradu betonskih elemenata.

Primarni cilj ovog rada je aktualizirati temu recikliranje građevinskog otpada u našoj zemlji i njegovu daljnju upotrebu u građevinarstvu, pa tako i za proizvodnju betona. Na žalost, kod nas građevinski otpad se još uvijek zbrinjava u okviru komunalnog otpada (praksa pokazuje da se građevinski otpad najčešće nekontrolirano odlaže). Podloga rada je diplomski rad [1] u čijem su teoretskom dijelu obrađena svojstva recikliranog betona, odnosno utjecaj raznih vrsta recikliranog agregata na pojedina svojstva. Prikazani rezultati ispitivanja za pojedina svojstva betona u poglavlju 2. su rezultati ispitivanja koja su rađena u okviru istraživačkog projekta BIM (*Baustoffkreislauf im Massivbau*) za DAfStb (Deutscher Aufschuss fuer Stahlbeton) kao naručitelja. U okviru eksperimentalnog dijela (poglavlje 3.) zadatak je bio ispitati mogućnost korištenja slučajno izabranih komada «starog» betona za spravljanje recikliranog betona.



Slika 1. Sastav građevinskog otpada nastalog kod razgradnje stambenih objekata



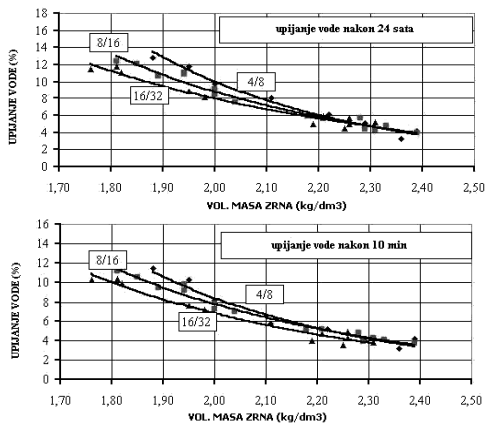
Slika 2. Udio pojedinih vrsta građevinskog otpada

2. SVOJSTVA BETONA OD RECIKLIRANIH AGREGATA

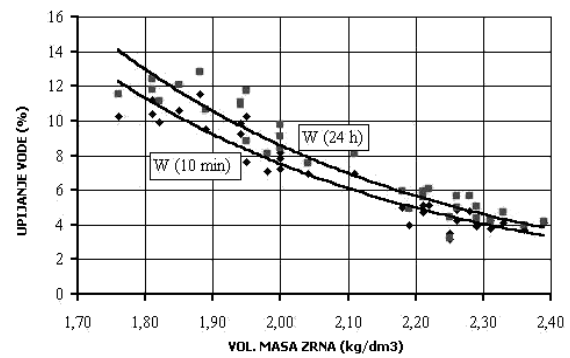
2.1. Svojstva svježeg betona od recikliranog agregata

Reciklirani agregat smanjuje **obradljivost betona**. Naime, ključno svojstvo po kojem se reciklirani agregat razlikuje od prirodnog je **upijanje vode**. U usporedbi s prirodnim agregatom za beton reciklirani agregat pokazuje zbog veće poroznosti veće upijanje vode, što smanjuje obradivost betona. Ovaj problem je poznat iz tehnologije izrade lakih betona, s tim da je razlika u tome da se kod recikliranih agregata proces upijanja vode najvećim dijelom odvija u prvih 10 minuta nakon miješanja. Poslije ovog vremena upijanje vode je neznatno. Zbog toga je bitno poznavati, odnosno utvrditi količinu upijanja vode svakog reciklata.

Upijanje vode recikliranog agregata ovisi od volumne mase agregata (Sl. 3.-4.[2]). Vidljivo je da s porastom volumne mase zrna recikliranog agregata opada količina upijene vode. Osim toga rezultati ispitivanja pokazuju da reciklirani agregat upije oko 90 % vode od ukupne količine u prvih 10 min. nakon dodavanja.



Slika 3. Upijanje vode nakon 10 min i 24 sata



Slika 4. Utjecaj volumne mase agregata na upijanja vode

Zbog velikog početnog upijanja recikliranog agregata pri spravljanju betona plastifikator/superplastifikator se dodaje najranije 10 minuta nakon početka miješanja da bi se izbjegla mogućnost da ga agregat upije.

Poboljšanje obradivosti recikliranih betona može se postići i prethodnim kvašenjem agregata, s tim da treba voditi računa da ova mjera negativno utječe na skupljanje i pužanje betona, tj. povećava ove vrste deformacija.

Znatan utjecaj na konzistenciju i očvršćavanje recikliranih betona ima i **vlažnost agregata**. Ispitivanja su pokazala da kod betonskih mješavina spravljenih sa potpuno suhim recikliranim agregatom dolazi do bržeg očvršćavanja betona zbog upijanja vode u odnosu na betonske mješavine koje su spravljene sa zasićenim recikliranim agregatom.

Da bi se poboljšala obradivost recikliranog betona preporuča se sitnu recikliranu frakciju (< 4 mm) zamijeniti prirodnim pijeskom.

Volumna masa svježeg recikliranog betona izravno ovisi o volumnoj masi zrna recikliranog agregata. Pošto reciklirani agregati imaju niže vrijednosti volumne mase od prirodnih agregata, kod primjene recikliranih agregata treba računati sa 3-10 % nižom vrijednosti volumne mase svježeg betona od normalnih betona.

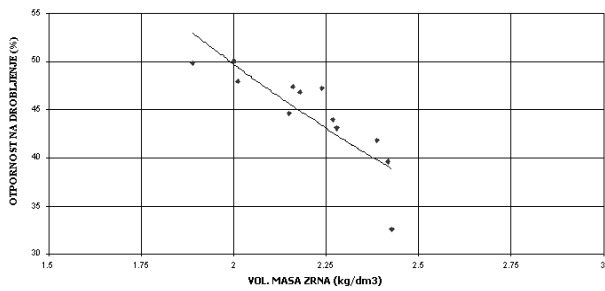
Na znama recikliranog agregata od betona ostaje zalijepljeno nešto cementnog morta pa zbog toga ona ima hrapaviju površinu i samim tim manju volumnu masu zrna. Reciklirani agregat od građevinske šute ima još manju volumnu masu zrna zbog heterogenog sastava i poroznosti samog agregata. Mala volumna masa zrna je naročito izražena kod recikliranih agregata s velikim udjelom opeke (jako porozan materijal), pa je volumna masa svježeg betona manja i za 15%.

Poroznost svježeg betona od recikliranog agregata je u direktnoj ovisnosti od hrapavosti površine samog zrna agregata, pa je samim tim i sadržaj zraka kod ovih betona u odnosu na uobičajeni beton veći. Ispitivanja pokazuju da reciklirani betoni imaju i do 3 puta veću količinu zahvaćenog zraka u odnosu na uobičajene betone.

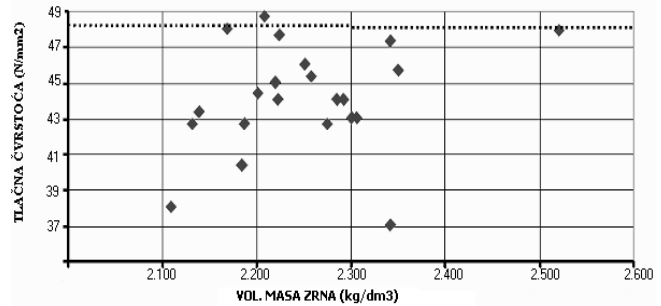
2.2. Svojstva očvrstlog betona od recikliranog agregata

Općenito za reciklirane betone vrijedi da je rasipanje rezultata, naročito kod čvrstoća, jako veliko. Rasipanja su veća što je reciklirani agregat nehomogeniji. To znači da je najveće rasipanje rezultata kod agregata dobivenih preradom građevinske šute, dok se kod recikliranog agregata od betona dobivaju ujednačeni rezultati ispitivanja. Istraživanja u okviru projekta BIM pokazuju da se razlike svojstava između običnog i recikliranog betona mogu ukloniti tehnološkim mjerama. Tako npr. pad tlačne čvrstoće recikliranog betona u odnosu na izvorni beton (reciklirani agregat je od «starog» betona) se može smanjiti povećavanjem količine cementa ili smanjenjem w/c-omjera.

Tlačna čvrstoća recikliranog betona ne ovisi o tlačnoj čvrstoći izvornog betona, već tlačna čvrstoća upotrijebljenog recikliranog agregata (ispituje se neizravno - metodom «Los Angeles») izravno utječe na tlačnu čvrstoću od njega spravljenog betona. «Čvrstoća agregata» je opet u vezi sa volumnom masom zrna agregata (Sl.5.). Pošto reciklirani agregati imaju, kao što je već navedeno, manju volumnu masu zrna od prirodnih agregata to je i tlačna čvrstoća recikliranih betona u usporedbi s običnim betonom manja. Pad tlačne čvrstoće je 10-30 %. Da bi se postigla ekvivalentna tlačna čvrstoća kao kod izvornog betona potrebno je staviti 10-15 % više cementa u betonsku mješavinu ili smanjiti w/c-omjer dodatkom aditiva. Na Sl. 6. je prikazan utjecaj volumne mase zrna agregata na tlačnu čvrstoću betona spravljenog s variranim udjelom recikliranog agregata. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće recikliranog betona su i upoređeni s referentnim betonom (vodoravna crta na dijagramu) tlačne čvrstoće 48 MPa i volumne mase zrna agregata 2.560 kg/dm³.



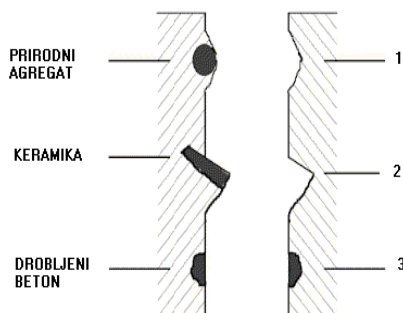
Slika 5. Veza čvrstoće agregata i volumne mase agregata



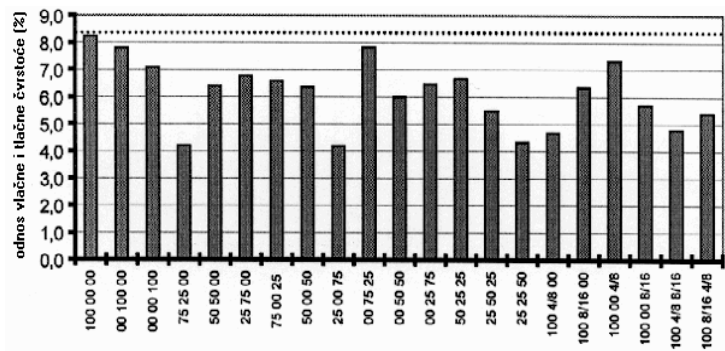
Slika 6. Utjecaj volumne mase zrna recikliranog na tlačnu čvrstoću betona [3]

Reciklirani betoni mogu postići jednake vrijednosti tlačne čvrstoće kao i obični betoni ako je “čvrstoća agregata” zadovoljavajuća, tj. “čvrstoća agregata” je veća ili približna čvrstoći cementnog kamena. U ovisnosti od čvrstoće i teksture površine zrna agregata javljaju se različiti tipovi loma plohe (Sl. 7.). Analiziranjem plohe loma kod uzoraka recikliranog betona uočeno je da se javljaju sljedeći tipovi sloma: I - ploha sloma prolazi kroz cementni kamen i kontaktnu zonu sa zrnima agregata; II - ploha sloma prolazi kroz kontaktnu zonu cementni kamen-površina zrna agregata.; III - ploha sloma prolazi kroz cementni kamen i zrno agregata. Ovaj tip sloma se javlja u slučaju da su cementni kamen i agregat približne čvrstoće. Znak je i dobre prionljivosti zrna agregata, ali je ujedno i pokazatelj male “čvrstoće agregata”.

I tip sloma javlja se, kao što je rečeno, kod betona spravljenog od prirodnog agregata i kod recikliranih betona odnosno agregata s malom količinom «starog» cementnog morta. Kod ovog tipa sloma mjerodavna je čvrstoća cementnog kamena «novog» betona. II tip sloma karakterističan je za reciklirane betone s agregatom dobivenim iz građevinske šute, gdje ima duguljastih, pljosnatih zrna s glatkom površinom, npr. dijelovi keramičkih pločica. III tip sloma znak je da je agregat male čvrstoće, tj. približno jednake vrijednosti kao i cementni kamen. Javlja se kada se koristi drobljeni beton kao agregat. Zbog približnih vrijednosti čvrstoća i dobre prionljivosti zrna agregata beton od ove vrste recikliranog agregata je prilično homogen.



Slika 7. Tipovi sloma kod recikliranog betona



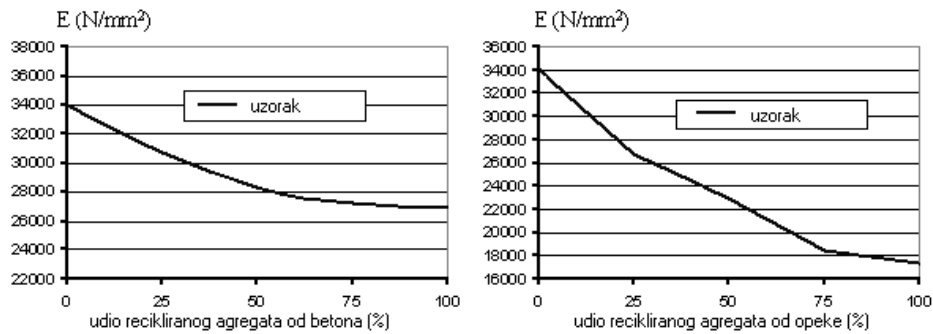
Slika 8. Odnos vlačne čvrstoće cijepanjem i tlačne čvrstoće [3]

Vlačna čvrstoća ovisna je o vlačnoj čvrstoći cementnog kamena i recikliranog agregata, kao i o samoj povezanosti cementnog kamena i agregata. Na Sl. 8. prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem, predstavljeni odnosom f_{vc}/f_t . Na vodoravnoj osi dijagrama nanесeni su podaci sastava ispitanih uzoraka (prvi broj je masena količina prirodnog agregata; drugi broj predstavlja količinu drobljenog betona, a treći drobljene opeke; svi podaci su u %). Vodoravnom crtom označen je odnos f_{vc}/f_t za beton od prirodnog agregata. Ovaj uzorak ima najveći odnos vlačne/tlačne čvrstoće, $f_{vc}/f_t=8\%$.

Općenito se može uzeti da je vlačna čvrstoća recikliranog betona u usporedbi s običnim manja za 20-40 %. Ovakvo rasipanje rezultata se objašnjava variranjem količine «starog» cementa koji je zalijepljen za zrna recikliranog agregata. Mikropukotine na površini zrna, nastale zbog velikog mehaničkog naprezanja recikliranog agregata u procesu prerade, negativno utječu na vlačnu čvrstoću recikliranog betona. Pri opterećivanju recikliranog betona dolazi do preuranjenog sloma ispitnog tijela upravo zbog mikropukotina na površini zrna, koje su slabe točke u strukturi betona.

Modul elastičnosti betona od recikliranih agregata je u prosjeku za oko 30 % manji u odnosu na običnog betona. Opada sa povećanjem udjela recikliranog agregata u mješavini agregata. Na Sl.9. je jasno vidljivo da s porastom udjela recikliranog agregata (recikliranog betona i reciklirane opeke) u mješavini agregata modul elastičnosti opada u odnosu na obični beton. Pri zamjeni prirodnog agregata recikliranim beton E-modul opada za oko 20 % a kod zamjene recikliranom opekam oko 50 %.

Deformacije betona ovise od deformacija agregata i cementnog kamena. Kod betona od recikliranog agregata agregatni skelet je, zbog manje «čvrstoće agregata», popustljivija komponenta. Samim tim je i cementni kamen više opterećen. Naprežanja uslijed deformacija se koncentriraju upravo u cementnom kamenu, pa se može zaključiti da se E-modul recikliranog betona približava E-modulu cementnog kamena



Slika 9. Utjecaj vrste i udjela recikliranog agregata u betonu na modul elastičnosti [4]

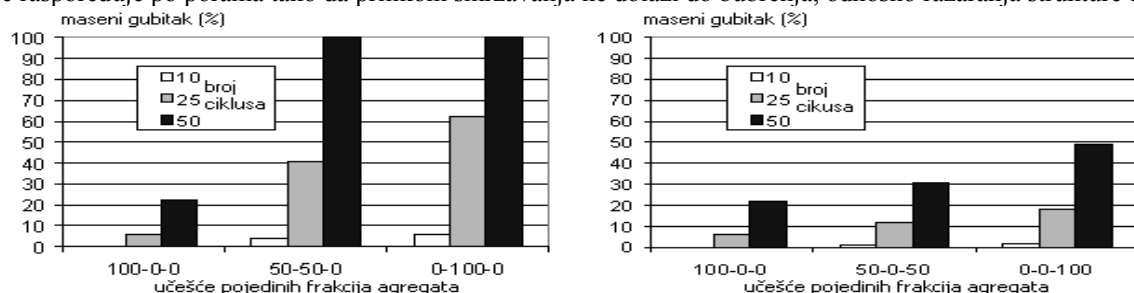
Skupljanje recikliranog betona je 40-60 % veće nego kod običnog betona. Skupljanje raste s povećanjem udjela recikliranog agregata. To je posljedica zaostataka «starog» cementa i povećanog upijanja vode od strane agregata, odnosno većeg w/c omjera u odnosu na obični beton. Manji E-modul recikliranih agregata isto doprinosi većem skupljanju recikliranog betona, jer je manji otpor agregatnog skeleta deformaciji.

Koeficijent puzanja betona od recikliranog agregata je za oko 50 % veći nego kod običnog betona. Deformacije puzanja rastu s povećanjem udjela recikliranog agregata, jer reciklirani agregat ima manji modul elastičnosti od prirodnog agregata (za oko 30%). Osim toga i ostatak «starog» cementa puže i tako doprinosi povećanju deformacijama puzanja.

Reciklirani betoni imaju veću poroznost od običnih betona, jer su reciklirani agregati porozniji u odnosu na prirodni agregat. Kao posljedica toga reciklirani betoni su podložniji procesu **karbonizacije**. Dubina karboniziranog sloja betona se povećava s povećanjem udjela recikliranog agregata u mješavini agregata. Proces karbonizacije je neovisan od vrste recikliranog agregata i prethodne pripreme agregata kod spravljanja mješavine.

Vodopropusnost betona od recikliranog agregata se ne razlikuje od vodopropusnosti običnog betona. Ispitivanja pokazuju da opor betona prodiranju vode ne ovisi od vrste i udjela recikliranog agregata. Rezultati ispitivanja također pokazuju da se reciklirani agregati mogu upotrebljavati za vodonepropusne betone. U tom slučaju je bitno, prema DAfStb-smjernici za betone od recikliranih agregata, potrebno je poznavati porijeklo agregata, odnosno građevinskog otpada i ispitati osjetljivost recikliranog agregata na djelovanje alkalija.

Otpornost recikliranog betona na mraz ovisi od vrste recikliranog agregata. Različita istraživanja dokazuju da se može dobiti reciklirani beton koji je otporan na mraz, iako je za njegovu proizvodnju upotrijebljen agregat koji nije otporan na djelovanje mraza. To je npr. slučaj kod upotrebe reciklirane opeke. Pošto je opeka veoma porozan materijal voda se raspoređuje po porama tako da prilikom smrzavanja ne dolazi do bubrenja, odnosno razaranja strukture betona.



Slika 10. Maseni gubitak b. uzoraka s različitim udjelom agregata od recikliranog betona (I), odnosno opeke (II)[4]

Na Sl.10. su prikazani rezultati ispitivanja uzoraka betona od recikliranog agregata (drobljenog betona i drobljene opeke) na djelovanje mraza. Prikazani rezultati predstavljaju gubitak mase uzoraka nakon 10, 25 i 50 ciklusa smrzavanja-odmrzavanja. Iz dobivenih rezultata vidi se da je otpornost na mraz veća kod uzoraka s agregatom od reciklirane opeke (II), nego sa drobljenim betonom (I), kod kojeg je nakon 50 ciklusa došlo do raspadanja .

Djelovanje soli na betone od recikliranih agregata prije svega ovisi od prethodno upijene količine soli, koja opet ovisi od vrste i količine recikliranog agregata. Kao i kod običnih betona i kod recikliranih otpornost na mraz i soli prvenstveno ovisi od poroznosti samog betona. Prema DAfStb-smjernici za betone od recikliranih agregata da bi reciklirani agregat mogao upotrijebiti za spravljanje betona otpornog na mraz potrebno je poznavati njegovo porijeklo i ispitati osjetljivost na alkalije.

2.3. Projektiranje betona od recikliranog agregata

Prema DAfStb-smjernici reciklirani agregat za beton je građevinski materijal koji ima sljedeći sastav:

- **drobljenog betona (frakcije 4/16(32) mm) > 95 % (mas.),**
- **mineralnih sastojaka (npr. opeka) i asfalt ≤ 5% (mas.),**

- **nemineralnih sastojaka ≤ 0.2 % (mas.).**

Mješavina s recikliranim agregatom (sitne i krupne frakcije) traži 15 % više vode. Ako se sitne frakcije recikliranog agregata zamijene prirodnim pijeskom treba samo 5 % više vode.

Pri spravljanju betona od recikliranog agregata koji je dobiven preradom «starog» beton [10] preporučuje se:

- sitne reciklirane frakcije zamijeniti prirodnim pijeskom radi bolje obradivosti recikliranog betona i manjeg w/c faktora;
- zrna recikliranog agregata < 2 mm odstraniti da bi se smanjio gubitak čvrstoće (tlačne i vlačne);
- reciklirani agregat prije spravljanja betonske mješavine izmiješati u suho da bi se poboljšao oblik zrna odnosno na taj način se odstranjuje «stari» cementni mort.

Također, prema navedenoj Smjernici, ako je poznato porijeklo izvornog betona i u njemu sadržanog agregata i ako je od strane nadležnog organa utvrđeno da ne postoji opasnost odnosno osjetljivost izvornog betona na djelovanje alkalija, tada se prerađeni izvorni beton (drobljeni beton) može koristiti kao agregat za:

- beton za unutrašnje konstruktivne elemente,
- beton za vanjske konstruktivne elemente,
- vodonepropusni beton,
- beton velike otpornosti na djelovanje mraza,
- beton velike otpornosti na djelovanje slabih kemikalija.

Reciklirani betoni se mogu proizvoditi do MB 35. Potpuna zamjena prirodnog agregata recikliranim agregatom nije dopuštena.

Tablica 3. Maksimalno dopušteni udio recikliranog agregata u mješavini agregata

Vrste konstruktivnih elemenata/ marka betona	drobljeni beton i sitne reciklirane frakcije ¹⁾ >2 mm [%, vol.]	sitne reciklirane frakcije ¹⁾ ≤ 2 mm [%, vol.]
unutarnji konstruktivni elementi / MB ≤ 25 ²⁾	35	7
unutarnji konstruktivni elementi / MB ≤ 35 ²⁾	25	
MB ≤ 35 ²⁾ <ul style="list-style-type: none"> • beton za vanjske konstruktivne elemente • vodonepropusni beton • beton velike otpornosti na djelovanje mraza • beton velike otpornosti na djelovanje «slabih»kemikalija 	20	0

¹⁾ sitne reciklirane frakcije moraju potjecati od prerade betona frakcije veće od 32 mm

²⁾ prema DIN 1045

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U okviru eksperimentalnog dijela diplomskog rada zadatak je bio ispitati mogućnost korištenja slučajno izabranih komada «starog» betona i armiranog betona iz jedne devastirane stambene zgrade u Mostaru, kao recikliranog agregata, za spravljanje betona i ispitati utjecaj recikliranog agregata na obradivost i tlačnu čvrstoću, odnosno da li postignuta tlačna čvrstoća nakon 28 dana odgovara projektiranoj MB-30.

Betonski komadi (Sl.11) su prerađeni na separaciji «Mokri Do» u Miljkovićima, kod Mostara. Pošto je veličina ulaznih betonskih komada bila nešto manja, prvi stupanj prerade kroz primarnu – čeljusnu drobilicu nije urađen, već su komadi «starog» betona odmah stavljeni mlin za sekundarnu preradu materijala, u cilju usitnjavanja. Armatura je prije prerade ručno izdvojena iz betona Usitnjeni materijal je separiran na frakcije 0/4, 4/8, 8/16 i 16/32 i ispitivan u CL-u «IGH-Mostar» d.o.o. Mostar (Sl.12.).



Slika 11. «Stari» beton – prije prerade



Slika 12. Reciklirani agregat – “stari” beton nakon prerade

3.1. Ispitivanje agregata od predrobljenog betona

Za tako dobiveni agregat od predrobljenog betona ispitana su sljedeća svojstva agregata (rezultati ispitivanja vidi tab.4 i Sl.13.):

- oblik zrna agregata,
- upijanje vode,
- volumna masa zrna agregata,
- granulometrijski sastav.

Napomena. Određivanje čvrstoće, agregata odnosno otpornosti agregata protiv drobljenja prema normi U.M8.030 u okviru ovog rada nije urađeno.

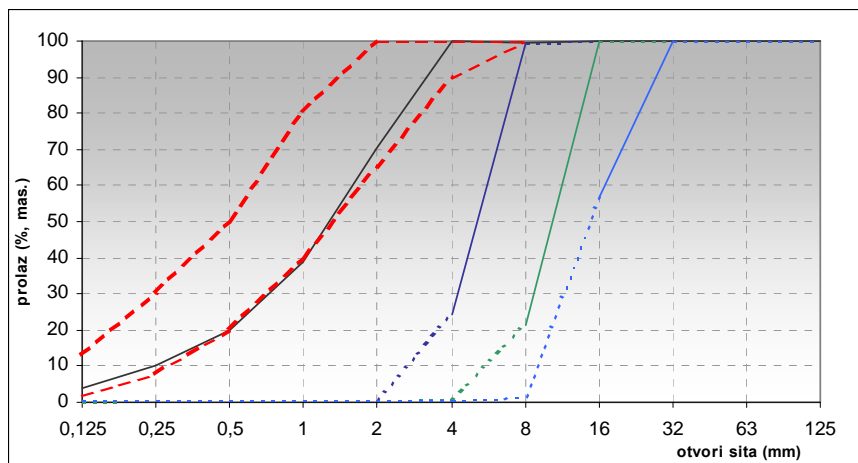
Tablica 4. Rezultati ispitivanja agregata i uvjeti kvalitete za pojedina svojstva prema PBAB`87 i DAfStB-smjernici

Frakcija	Vol.koe.oblika		Vol.masa.zrna. [kg/m ³]		Upijanje vode (%)			
	Rezultat	Uvjet kvalitete ¹⁾	Rezultat	Uvjet kvalitete ¹⁾	U _{10min}	U _{24sata}	Uvjet kvalitete	
							PBAB '87	DAfStB
0/4	-	-	2.570	2.000-3.000	6.45	7,21	max.1,5	max. 10
4/8	0,30	> 0,18	2.460	2.000-3.000	3.20	3,39	max.1,5	max. 5
8/16	0,30	> 0,18	2.480	2.000-3.000	2.77	3,10	max.1,5	max. 5
16/32	0,33	> 0,18	2.440	2.000-3.000	3.30	3,54	max.1,5	max. 5

¹⁾ prema PBAB`87

Rezultati ispitivanja volumnog koeficijenta oblika pokazuju da reciklirani agregat ima povoljan oblik. Rezultati ispitivanja volumne mase zrna agregata su pokazala da se radi o drobljenom betonu koji zadovoljava PBAB-om zahtijevani uvjet kvalitete. Upijanje vode je prema očekivanju znatno veće nego kod prirodnih agregata, ali je u okviru dopuštenih granica prema DAfStB-smjernici. Dobiveni rezultati ispitivanja za ispitana svojstva su pokazali da se agregat može koristiti za proizvodnju betona.

Sitna frakcija 0/4 mm ima neznatno lošiji sastav prema ovim graničnim krivuljama prosijavanja prema normi B.B8.010. Dobiveni modul znatosti za ovu frakciju se nalazi na granici i iznosi MF =3.6 (2.3-3.6). Pošto postrojenje na separaciji nije prilagođeno preradi «starog» betona, dobivene su frakcije s mnogo većom količinom podmjernih zrna od dopuštene (uvjet kvalitete prema PBAB-u je max.15%) 4/8 - 24.5 % podmjernih zrna, 8/16 - 21.2 % i 16/32 - 57.0 %. Zbog vrlo velike količine podmjernih zrna frakcija 16/32 nije ni korištena za spravljanje recikliranog betona. U pogledu max.dop.sadržaja nadmjernih zrna (max.10% prema PBAB) sve frakcije zadovoljavaju 4/8 - 0 %, 8/16 - 0 % i 16/32 – 0,5 %.



Slika 13. Granulometrijski sastav agregata od predrobljenog betona

3.2. Projektirani sastav laboratorijskih mješavina

Da bi se mogla ispitati tlačna čvrstoća betonskih uzoraka od recikliranog betona odnosno utjecaj ovog agregata na ovu osobinu, što je bio i zadatak ovo dijela diplomskog rada, napravljene su sljedeće mješavine betona i to:

- betonska mješavina I (RC-B I): sve frakcije agregata su od predrobljenog betona,
- betonska mješavina II (RC-B II): frakcija 0/4 mm je zamijenjena prirodnim (riječnim) agregatom, a ostale frakcije su od recikliranog agregata,
- betonska mješavina III - referentni beton (B III): sve frakcije agregata su od riječnog agregata.

Uzimajući u obzir zadatak (ispitati utjecaj predrobljenog betona na tlačnu čvrstoću) sastav betonskih mješavina je tako projektiran da su količina cementa, vode, odnosno w/c omjer za sve 3 mješavine isti. Projektirana marka betonskih mješavina je MB-30 pa je preporučena količina cementa 350 kg/m^3 . Sastavi laboratorijskih mješavina su dati u tab. 5. Prema uvjetu projektirane MB odabran je w/c omjer = 0.6 (za obične betone - u granicama od 0.45 do 0.55), jer se očekivalo veće upijanje vode recikliranog agregata. Varirana je vrsta i udio pojedinih frakcija agregata. Sve 3 mješavine imaju isti volumne agregata u 1 m^3 betona ($V_a = 0.662 \text{ m}^3$) i krivulju granulometrijskog sastava agregata u području između A16/B16, prema normi U.M1.057.

Tablica 5. Sastavi betonskih mješavina

Komponente	RC-B I		RC-B I		B III	
	kg po 1 m^3		kg po 1 m^3		kg po 1 m^3	
PC 30z 45 S	350		350		350	
voda	210		210		210	
w/c = 0,6						
agregat	100 % predrobljeni	1668	miješani	1713	100 % riječni	1790
0/4 mm	50 % predrobljeni	834	47 % riječni	805	46 % riječni	823
4/8 mm	20 % predrobljeni	334	20 % predrobljeni	343	20 % riječni	534
8/16 mm	30 % predrobljeni	500	33 % predrobljeni	565	34 % riječni	430
pore 1.5 %	0		0		0	
UKUPNO	2228		2273		2350	

3.3. Rezultati ispitivanje i analiza rezultata ispitivanja laboratorijskih mješavina

Sva svojstva spravljenih mješavina betona ispitana su prema PBAB'87 važećim normama. Rezultati ispitivanju su dati u tab. 6. i na Sl.14-15.

Tablica 6. Tablični prikaz dobivenih rezultata ispitivanja laboratorijskih mješavina betona

Vrsta ispitivanja		Rezultati ispitivanja			
		RC-B I	RC-B II	B III	
svježi beton	Slump (cm)	0	7	12.5	
	Konzistencija	kruta (KS)	plastična (KR)	tekuća (KF)	
	Poroznost (%)	2.7	1.8	1.3	
	Vol. masa (kg/m^3)	2.307	2.340	2.360	
očvršli beton	Tlačna čvrstoća (MPa)	3 d	18,1	27,1	34,4
		7 d	27,1	30,8	40,3
		28 d	40,3	34,4	41,5
	Vol. masa (kg/m^3)	28 d	2.301	2.344	2.370

Analizom dobivenih rezultata ispitivanja obradljivosti svježeg betona za spravljene mješavine utvrđeno je sljedeće:

- **Obradljivost betonskih mješavina** izražena mjerom slijeganja je bila bitno različita: od krute za betonsku mješavinu I, plastične za betonsku mješavinu II, do tekuće za betonsku mješavinu III. Ova razlika konzistencija betonskih mješavina je rezultat upijanja vode recikliranog agregata iz betonske mješavine tokom pripreme (naročito sitne frakcije), što se može zaključiti iz usporedbe rezultata ispitivanja konzistencije betonskih mješavina. Smanjenje količine slobodne vode negativno je utjecalo na obradljivost svježeg betona I. Dakle, samo zamjenom sitna frakcija recikliranog agregata riječnim kod betonske mješavine II postignuta je plastična konzistencija – beton koji je ugradljiv;

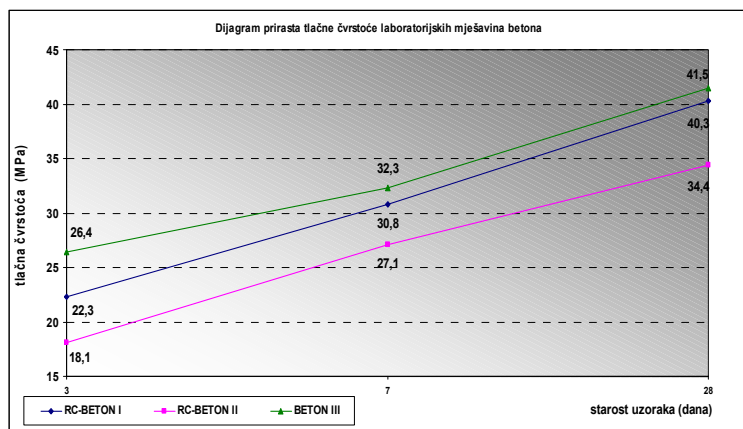
- Velika razlika između **volumne mase svježeg betona** I, II i računске volumne mase navedenih betona je posljedica razlike volumne mase zrna recikliranog agregata u trenutku spravljanja betonskih mješavina od vrijednosti koje su dobivene ispitivanjem volumne mase zrna suhog agregata i s kojim je računata receptura betona. Naime, betonske mješavine su pripremljene s «prirodno» vlažnim agregatom. Zbog toga masu suhog agregata treba povećati za količinu vode u porama. Vlažnost agregata prije spravljanja mješavina nije ispitana, pa nije moguće korigirati volumnu masu zrna recikliranog agregata;

-Rezultati ispitivanja **poroznosti recikliranog betona** pokazuju da je količina zraka u recikliranom betonu veća nego kod običnih betona. Betonska mješavina I ima veću količinu zraka od betonske mješavine II. Ovakav rezultat se mogao očekivati, s obzirom na krutu konzistenciju betonske mješavine I, tj. veći sadržaj zraka zbog nedovoljnog zbijanja betona.

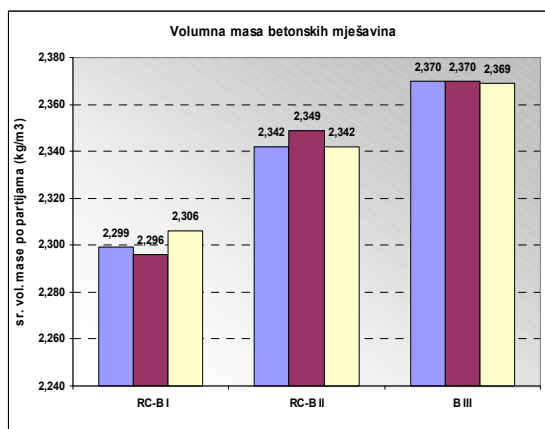
Analizom dobivenih rezultata ispitivanja očvrstlog betona za spravljene mješavine utvrđeno je :

- Obe betonske mješavine spravljene sa recikiranim agregatom (RC-B I, RC-B II) pokazuju da je zadovoljena tražena MB-30. Betonska mješavina I, spravljena sa 100 % udjelom recikliranog agregata, postigla je veću tlačnu čvrstoću od betonske mješavine II. Uzrok ovakvog rezultata je u upijanju vode sitne frakcije recikliranog agregata koja je korištena za spravljanje betonske mješavine I. Zbog velikog upijanja vode ove frakcije došlo je do smanjenja efektivnog w/c omjera, što je utjecalo je na tlačne čvrstoće u odnosu na razvoj tlačne čvrstoće betonske mješavine II. Beton III ima najveću tlačnu čvrstoću, što je i očekivano s obzirom da je ova betonska mješavina spravljena sa 100% udjelom riječnog agregata. Uočljiv je ujednačen prirast tlačne čvrstoće recikliranih betona. Prirast čvrstoće recikliranih betona nakon 3 dana je bio sporiji u odnosu na referentni, dok je nakon 7 dana postignut prirast kao i kod referentnog betona;

- Dobiveni rezultati **volumne mase** za betonske mješavine I i II manje su od volumne mase referentnog betona. Ovakav rezultat je bio za očekivati ako se uzme u obzir da je i volumna masa zrna agregata u betonskim mješavinama I i II manja od volumne mase zrna prirodnog agregata u betonskoj mješavini III. Sa Sl.15. je vidljivo da je variranje vrijednosti volumne mase betona za betonske mješavine I i II jako malo, što je pokazatelj ujednačenosti kvaliteta/sastava recikliranog agregata u ovim betonskim mješavinama.



Slika 14. Dijagram prirasta tlačne čvrstoće betonskih mješavina I, II, III [1]



Slika 15. Sr.vrijednosti vol.mase po partijama

Na osnovu dobivenih rezultata može se zaključiti da:

- *upijanje vode, odnosno poroznost upotrijebljenog recikliranog agregata od predrobljenog betona nema negativan utjecaj na razvoj tlačne čvrstoće betona. To nije slučaj kada je u pitanju obradivost svježeg betona, pošto je veliko upijanje vode sitne frakcije recikliranog agregata smanjilo obradivost svježeg betona;*
- *betonska mješavina I, iako zadovoljava što se tiče postignute tlačne čvrstoće, nije beton koji se može koristiti jer je praktično neugradljiv. Betonska mješavina II zadovoljava sve uvjete kvalitete koji su definirani za obične betone. Postignuta je zahtjevana tlačna čvrstoća (34,3 MPa) uz dobru ugradljivost (Slump=7 cm), poroznost (1,8 %) i volumnu masu (2.344 kg/m³) koja odgovara običnom betonu.*

4. LITERATURA

- [1] Bevanda, I.: Reciklirani beton – prikaz i osobine, diplomski rad , Građevinski fakultet, Sveučilište u Mostaru 2002
 [2] Ruehl, M.: Water absorption capacity of recycled demolition rubbish, Darmstadt Concrete 1997
 [3]Gruebl, P., Ruehl, M.: Der Einfluss von Recyclingzuschlagen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung fuer Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045, TP E/03 Januar 1998

[4]Gruebl, P., Ruehl, M.: Der Einfluss von Recyclingzuschlagen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung fuer Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045, TP E/03 September 1998

[5] [http://: www.b-i-m.de](http://www.b-i-m.de)