Upotreba građevinskog otpada kao dodatak betonu

Slatina, Ivona

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:657842

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split







SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

ZAVRŠNI RAD

Ivona Slatina

Split, 2016

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Upotreba građevinskog otpada kao dodatak betonu

Završni rad

Split, 2016

Upotreba građevinskog otpada kao dodatak betonu

Sažetak:

Procjenjuje se da građevinarstvo u Europi proizvode 200 – 300 milijuna tona građevinskog otpada godišnje, što predstavlja ogromni potencijal neiskorištenog resursa. U ovom radu ispitana je mogućnost upotrebe građevinskog otpada u proizvodnji novog betona. Mljevenjem građevinskog otpada različitog podrijetla dobivena su dva praha koja su prosijana na situ 0,04 mm. Za potrebe ovoga rada korištena je frakcija 0,04-0,5 mm. Jedna mješavina je napravljena bez dodataka – kontrolna mješavina, a u ostale tri mješavine je određena količina cementa zamijenjena sa jednim od dva mljevena materijala. Mješavinama je u svježem stanju određena obradivost, a u očvrslom stanju kod starosti od 7 i 28 dana tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti.

Ključne riječi:

građevinski otpad, beton, obradivost, tlačna čvrstoća, dinamički modul elastičnosti

Use of construction waste materials as concrete additive

Abstract:

It is estimated that construction in Europe products 200-300 million tons of construction waste per year, which represents a huge potential of unused resources. This paper aims to investigate the possibility of using construction waste in the production of new concrete. Grinding of construction waste of different orgin resulted in two powders which are sieved on the sieve 0,04 mm. For the purpose of this paper, it was used fraction 0,04 – 0,5 mm. One mixture was made without any supplement – control mixture and in the other three mixtures a specified quantity of cement is replaced with one of the two ground materials. It was determined workability of the mixtures at fresh state and in hardened state at the age of 7 and 28 days compressive strength and dynamic modul of elasticity.

Keywords:

construction waste, concrete, workability, compressive strenght, dynamic modulus of elasticity

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ:	**PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	IVONA SLATINA
BROJ INDEKSA:	4016
KATEDRA:	**Katedra za građevinske materijale**
PREDMET:	Građevinski materijali 1

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Upotreba građevinskog otpada kao dodatak betonu

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti dosadašnja istraživanja u kojima se ponovo koristi građevinski otpad. Za eksperimentalni dio rada potrebno je mljevenjem građevinskog otpada – šuta, pripremiti dva dodatka frakcije 0.04 – 0.5 mm. Potrebno je izraditi jednu kontrolnu mješavinu betona sa 300 kg cementa po 1 m^3 betona i maksimalnim zrnom agregata D = 11.2 mm, a proračun sastava napraviti prema Fullerovoj krivulji. U ostale mješavine potrebno je 10 % cementa zamijeniti sa mljevenim šutom, a u jednoj mješavini i sa 20 % mljevenog šuta. Mješavinama je u svježem stanju potrebno odrediti obradivost metodama slijeganja, razastiranja i Vebe aparata, a u očvrslom stanju kod starosti od 7 i 28 dana tlačnu čvrstoću i dinamički modul elastičnosti. Rezultate je potrebno prikazati i komentirati.

U Splitu, 1.3.2016.

Voditelj Završnog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. GRAĐEVINSKI OTPAD 2
2.1. SVOJSTVA I MOGUĆE RECIKLIRANJE OTPADA NEISKORIŠTENOG TRANSPORTNOG BETONA (M.F. PISTILLI, C.F. PETERSON) [6] 2
2.2. UPOTREBA OTPADNOG BETONA KAO AGREGATA (I.B. TOPÇU, N.F. GÜNÇAN) [7] 6
2.3. UTJECAJ MLJEVENE GLINENE OPEKE NA SVOJSTVA SCLC BETONA U SVJEŽEM I OČVRSLOM STANJU (S. JURADIN, K. GRBEŠA) [8] 9
3. UPOTREBA INDUSTRIJSKOG OTPADA U BETONSKIM MJEŠAVINAMA(B. MESCI, S. ÇORUH I O. NURI ERGUN) [9] 13
4. EKSPERIMENTALNI DIO 19
4.1. UVOD 19
4.2. IZBOR KOMPONENTI 19
4.2.1. CEMENT 19
4.2.2. AGREGAT 21
4.2.3. VODA 22
4.2.4. ADITIV 23
4.2.5. DODATCI 23
4.3. IZRADA UZORAKA BETONA 24
4.3.1. RECEPTURA POKUSNIH MJEŠAVINA 24
4.3.2. PRIPREMA POKUSNIH MJEŠAVINA 27
4.3.3. UGRADNJA SVJEŽEG BETONA U KALUPE 28
4.4. ISPITIVANJA I REZULTATI 29
5. ZAKLJUČAK 42
LITERATURA 44

1. UVOD

Razvojem industrijalizacije i urbanizacije dolazi do kontinuiranog povećanja količine industrijskog otpada. Građevinski sektor u Europi odgovoran je za 200 – 300 milijuna tona građevinskog otpada godišnje, što uzrokuje proces onečišćenja okoliša koji se odvija brže od procesa prirodne obnove.[1]

Razvijene zemlje EU, Nizozemska, Belgija i Danska, recikliraju više od 80% građevinskog otpada i otpada od rušenja. U Hrvatskoj se godišnje proizvede više od 2,5 milijuna tona građevinskog otpada. Zbog neorganiziranosti sustava gospodarenja otpadom samo se 7,5% građevinskog otpada reciklira ili zbrinjava na prihvatljiv način. [2]

Beton je drugi materijal po upotrebi odmah poslije vode. Procjenjuje se da se proizvede 25 milijardi tona godišnje. Cement kao glavni sastojak betona neizostavan je materijal u građevinarstvu, ali pri njegovoj proizvodnji dolazi do velike potrošnje energije i emisije stakleničkog plina CO_2. Pri proizvodnji 1 tone klinkera portland cementa u okoliš se emitira 850 kg CO_2.[3] Agregat koji se koristi u proizvodnji betona može biti umjetnog ili prirodnog podrijetla. Prirodni agregat se najčešće vadi iz riječnih korita, ali zbog učestale eksploatacije može doći do promjene prirodnog toka rijeke.

Pošto se u građevinarstvu beton koristi duplo više od ostalih materijala, treba se raditi na održivosti betona i betonskih konstrukcija. Ekološki odgovoran i održiv način građenja temelji se na očuvanju prirodnih resursa i materijala. Recikliranje materijala može se koristiti za dobivanje nove sirovine za neki novi proizvod (agregat za beton) ili za dobivanje izvornog proizvoda (npr. glinena opeka ili crijep). Time se postiže zatvoreni ciklus upotrebe materijala što ima pozitivan učinak s ekološkog i ekonomskog stajališta. [4]

Građevinarstvo predstavlja jedan od glavnih pokazatelja razvitka i prosperiteta u zapadnim zemljama. Građevinski otpad ima visoku novčanu vrijednost, a tehnologija za separaciju i recikliranje građevinskog otpada je lako dostupna i u pravilu jeftina. [2]

2. GRAĐEVINSKI OTPAD

Građevinarstvo, kao proizvodna djelatnost, koristi prirodne resurse i sirovine, ali ujedno i stvara velike količine građevinskog otpada. Recikliranje građevinskog otpada jedno je od rješenja kojim građevinarstvo može pridonijeti očuvanju okoliša. Time se smanjuje potreba za novom eksploatacijom sirovina te rješava problem prostora koja zauzimaju odlagališta.

Reciklirani materijal otpada može se ponovno koristiti u gradnji kao materijali za nosive slojeve cesta, staza i parkirališta, materijal za nasipavanje, drenažu i kamenu zaštitu, dodatak za nove asfaltne mješavine, dodatak raznim vrstama betona i mortova, materijal za izradu betonskih elemenata i sklopova. [5]

U nastavku su prikazana provedena ispitivanja u kojima se ispitivala mogućnost upotrebe raznih građevinskog otpada u proizvodnji novog betona.

2.1. SVOJSTVA I MOGUĆE RECIKLIRANJE OTPADA NEISKORIŠTENOG TRANSPORTNOG BETONA (M.F. PISTILLI, C.F. PETERSON) [6]

Prema procjenama, za svaka 2 milijuna tona proizvedenog transportnog betona, oko 20 000 tona betona se neće iskoristiti. Neiskorišteni beton dobavljačima često stvara problem jer su se prema zakonima obvezni pobrinuti za njega i na prihvatljiv način ga zbrinuti.

Po završetku radnog dana zaostali beton se ispire iz kamiona-miksera. Tijekom ispiranja mehaničkim sredstvima može se izdvojiti krupna i sitna frakcija agregata. Isprani agregat se odvozi na ponovno prosijavanje i odlaže na predviđenim odlagalištima. Kasnije se može ponovno iskoristiti za proizvodnju novog betona.

Odvajanjem agregata iz betona ostaju cement, voda i najfinija frakcija agregata. Dio vode se može odvojiti, pročistiti i pustiti u kanalizacijski sustav. Ostatak se odlaže na odlagališta ili se reciklira te ponovno koristi za proizvodnju novog betona.

Mljevenjem očvrsle cementne paste, starosti mjesec dana, dobiven je prah. Ako se usporedi sa portland cementom tipa I, dobiveni prah ima nižu specifičnu težinu, veću specifičnu površinu čestica, a za postizanje iste obradivosti bit će potrebna veća količina vode.

S obzirom da je cementna pasta hidratizirani cement ispitala se mogućnost korištenja praha kao zamjena portland cementu u izradi novog betona.

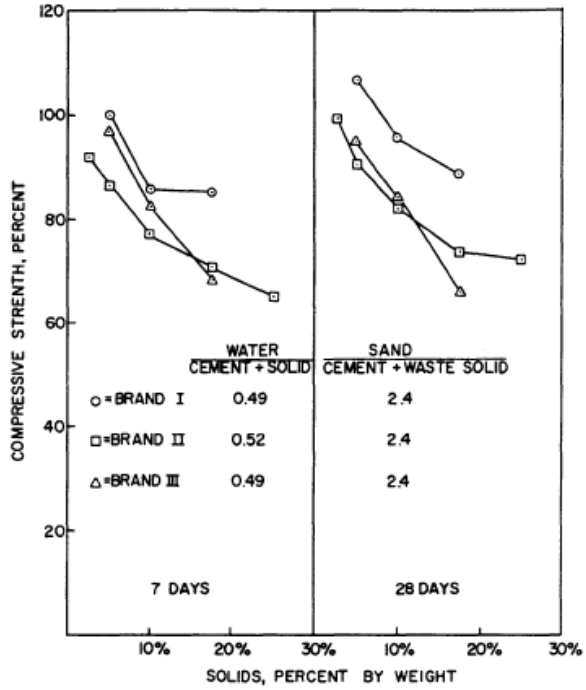
Za ispitivanje, uzorci su napravljeni sa različitim udjelima praha cementne paste i portland cementa tipa I tako da je količina veziva kod svih uzoraka jednaka. Korištene su tri različite vrste portland cementa I, čija su svojstva prikazana u Tablici 1.

Tablica 1. *Svojstva korištenih vrsta portland cementa tipa I*

	Vrsta 1	Vrsta 2	Vrsta 3
Blaine cm^2/g	3928	3795	3795
normalna konzistencija	26,6	26	24
vrijeme vezanja (min):			
početak	77	126	134
kraj	113	180	191

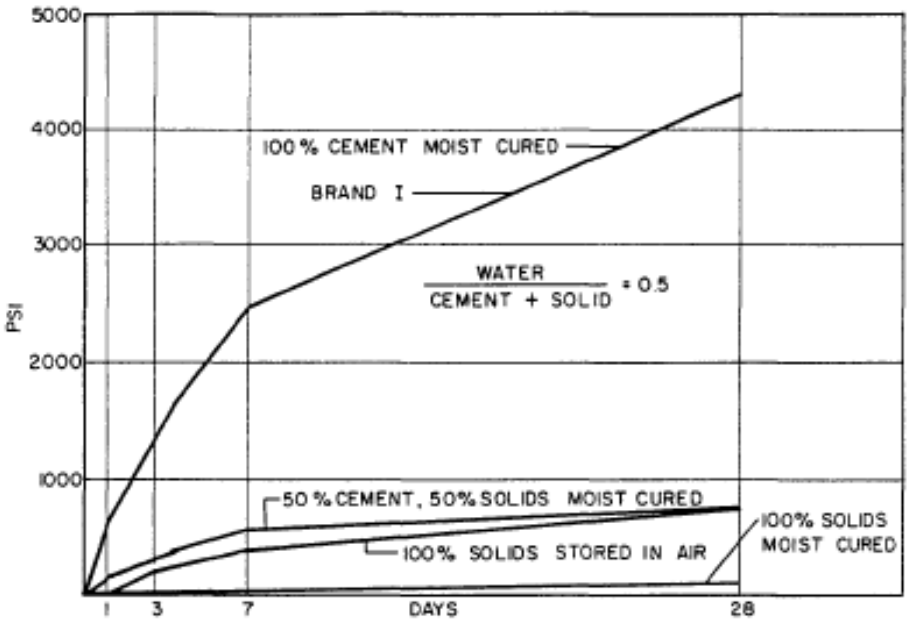
Obradivost pokusnih mješavina bila je slabija kod uzoraka koji su imali veći udio praha cementne paste. Uzrok tome može biti hidrofiličnost gela i hidratiziranog vapna koji se nalazi u prahu.

Tlačna čvrstoća uzoraka ispitana je nakon 7 i 28 dana. Iz Slike 2.1. može se zaključiti da se porastom količine praha cementne paste smanjuje tlačna čvrstoća betona. Mali udjeli praha cementne paste (do 5%) ne utječu na razvoj tlačne čvrstoće, a uzorci koji su čuvani u vodi se ponašaju više kao vapno nego kao portland cement (Slika 2.3.)



Slika 2.1. *Tlačna čvrstoća morta u ovisnosti o udjelu praha u uzorku*

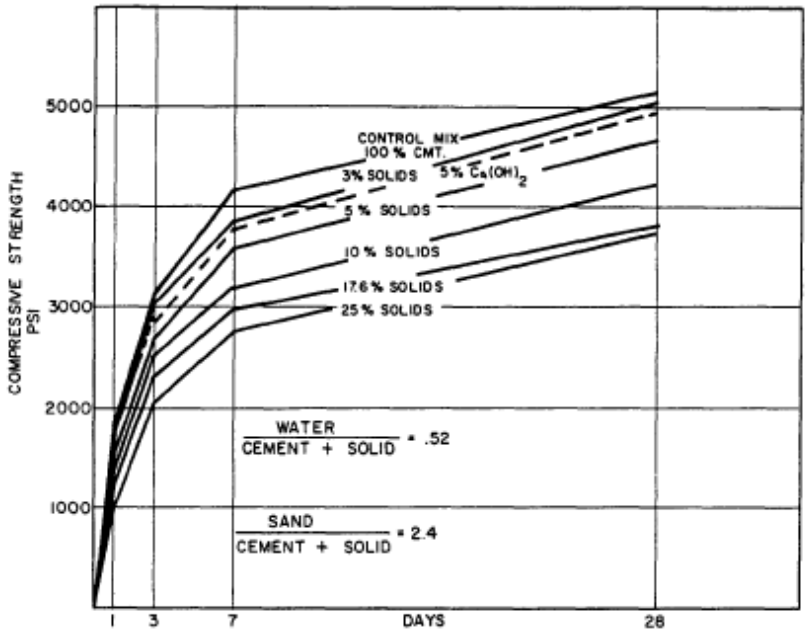
Na uzorcima od čiste cementne paste ispitan je utjecaj medija u kojem su se čuvani uzorci na razvoj tlačne čvrstoće. Kako bi se mogli usporediti napravljene su tri vrste uzoraka. Jedna vrsta je sadržavala samo portland cement tipa I, druga samo prah cementne paste, a treća je bila njihova kombinacija u omjeru 50:50. Rezultati su prikazani na Slici 2.2.



Slika 2.2. *Tlačna čvrstoća uzoraka sa čistom pastom*

Najveću tlačnu čvrstoću imaju uzorci sa 100 % portland cementa koji su čuvani u vodi. Uzorci sa 100% praha koji su bili ostavljeni na zraku imali su znatno veće tlačne čvrstoće od istih takvih uzoraka koji su čuvani u vodi.

Ispitivanjem tlačne čvrstoće utvrđeno je da 5%-tnom zamjenom cementa prahom cementne paste nema štetnog utjecaja na tlačnu čvrstoću betona (Slika 2.3).



Slika 2.3. *Tlačne čvrstoće uzoraka*

No, pitanje je da li ta zamjena ima utjecaja na njegova kasnija svojstva. Ispitivanje se provelo na uzorcima kojima je 5% portland cementa tipa I zamijenjeno sa prahom cementne paste i uzorcima kojima je zamijenjeno 5% pijeska sa prahom cementne paste. Uzorci predviđeni za mjerenje skupljanja bili su čuvani na 21˚C relativne vlažnosti zraka 45-50%, a ostali uzorci su bili predviđeni za mjerenje ekspanzije pri izlaganju 35% otopine natrijevog sulfata. Mjerenja su vršena nakon 1, 2, 4, 6 i 12 mjeseci. Rezultati ispitivanja pokazali su da nema utjecaja na skupljanje ni sulfatnu ekspanziju pri 5%tnoj zamjeni barem 12 mjeseci od izrade betona. Rezultati provedenog ispitivanja prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2. *Rezultati skupljanja i sulfatne ekspanzije*

Shrinkage and Sulfate Expansion

Expansion of 1" x 1" x 11 1/8" Mortar Bars Exposed to a 35% Na_2SO_4 Solution. Gage length = 10"

CONTROL MIX		5% SOLIDS replaced equal weight of cement	5% SOLIDS replaced equal volume of sand
Brand IV Cement (type I)	500 g	475 g	500 g
C109 Sand	1,375 g	1,375 g	1,348 g*
Solids	---	25 g	25 g
Water	48.5%	48.5%	48.5%
% Exp. at One Month:	+0.038	+0.046	+0.044
% Exp. at Two Months:	+0.052	+0.064	+0.058
% Exp. at Four Months:	+0.111	+0.154	+0.137
% Exp. at Six Months:	+0.223	+0.289	+0.274
% Exp. at Twelve Months:	+0.375	+0.430	+0.468

Drying Shrinkage of 1" x 1" x 11 1/8" Mortar Bars (at the same mix proportions as above). Gage length = 10"

CONTROL MIX Brand IV cement		5% SOLIDS replaced equal weight of cement	5% SOLIDS replaced equal volume of sand
% Exp. at One Month:	-0.092	-0.096	-0.105
% Exp. at Two Months:	-0.099	-0.102	-0.112
% Exp. at Four Months:	-0.101	-0.104	-0.115
% Exp. at Six Months:	-0.110	-0.115	-0.126
% Exp. at Twelve Months:	-0.140	-0.146	-0.155

2.2. UPOTREBA OTPADNOG BETONA KAO AGREGATA (I.B. TOPÇU, N.F. GÜNÇAN) [7]

Građevinski otpad nastao građenjem novih i rušenjem starih objekata znatno se povećao posljednjih godina uzrokujući vodeće ekološke probleme u mnogim zemljama, prvenstveno zbog nekontroliranog odlaganja na divljim deponijima.
Ostatci srušene građevine mogu se svesti na odgovarajuće veličine te se upotrijebiti kao agregat za proizvodnju novog betona. Pri obnavljanju autocesta i avionskih pista često se upotrebljava reciklirani agregat kako bi se smanjili troškovi odvoženja starog materijala i dovoženja prirodnog agregata čija su nalazišta često dosta udaljena od gradilišta.
U ekonomskom pogledu korištenje ovakvog agregata je prihvatljivo, no pitanje je da li beton sa recikliranim agregatom zadovoljava tehničke propise.

Na temelju prijašnjih ispitivanja provedenih na temu korištenja recikliranog betonskog agregata mogu se izvući neke zakonitosti u svojstvima betona.
Gustoća betona sa recikliranim agregatom je manja od gustoće običnog betona.
Kako bi se postigla željena obradivost potrebno je dodati veću količinu vode jer reciklirani beton ima visok apsorbcijski kapacitet. Preporučljivo je da se navlaži prije upotrebe.
Tlačna čvrstoća betona sa recikliranim agregatom je uvijek niža od tlačne čvrstoće običnog betona. Podešavanjem određenih faktora koji utječu na tlačnu čvrstoću, može se dobiti beton približne tlačne čvrstoće kao kod običnog betona.
Beton kojemu je krupna frakcija agregata zamijenjena sa recikliranim agregatom, a sitinija frakcija je prirodni pijesak, ima veću tlačnu čvrstoću od betona kojem su i sitna i krupna frakcija zamijenjena recikliranim agregatom. Povećanjem količine recikliranog agregata u betonu, smanjuje se tlačna čvrstoća. Nadalje, smanjivanjem vodocementnog faktora može se postići tlačna čvrstoća običnog betona, a u nekim slučajevima i veća vrijednost. Otpadni agregat čvrstoće manje od 14 MPa nema utjecaj na čvrstoću novog betona.
Moduli elastičnosti betona ovise o istim čimbenicima kao i tlačna čvrstoća. Sve spomenuto za tlačnu čvrstoću može se primijeniti na module elastičnosti.
Ispitivanja su pokazala da aditivi dodani originalnom betonu utječu na svojstva novog betona, a dodavanjem gipsa građevinskoj šuti mogu se poboljšati neka svojstva betona.
Možda je najzanimljivije raspraviti o količini otpadnog betona koji bi se upotrijebio kao agregat za izradu novog betona, a da pri tome ima zanemariv štetni utjecaj na njegova svojstva.

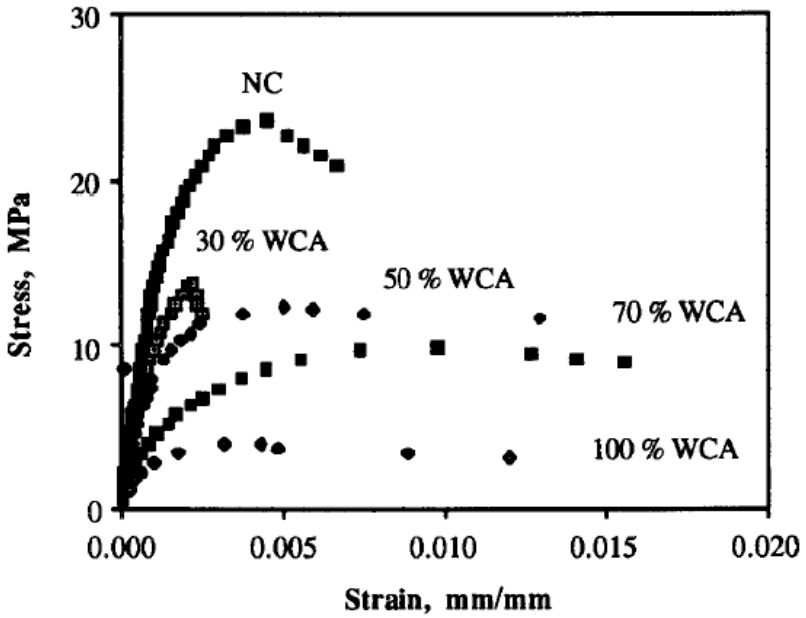
Topçu i Günçan su proveli ispitivanje o utjecaju količine otpadnog betona na svojstva betona. Uzorci su podijeljeni u 5 grupa. Svakoj grupi je zamijenjen dio agregata sa otpadnim betonom, ali u različitim količinama. Udjeli otpadnog betona na količinu agregata su 0, 30, 50, 70 i 100%. Ispitano je slijeganje i gustoća uzoraka betona u svježem stanju, a iz σ-ε dijagrama su izračunati modul elastičnosti, žilavost, plastična i elastična energija betona u očvrslom stanju.
Sastav uzoraka betona i rezultati ispitivanja u svježem stanju prikazani su u Tablici 4.

Tablica 4. *Uzorci betona i rezultati ispitivanja betona u svježem stanju*

			agregat (kg)							
WCA (%)	cement (kg)	voda (kg)	0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm	16-31,5 mm	WCA (kg)	gustoća (kg/m3)	slijeganje (mm)	modul finoće
0	315	190	522	355	444	444	-	2370	100	4,94
30	310	185	430	270	270	270	532	2267	95	6,02
50	300	180	345	180	180	180	894	2259	80	6,19
70	285	170	258	90	90	90	1262	2245	80	6,34
100	285	170	-	-	-	-	1780	2235	75	5,84

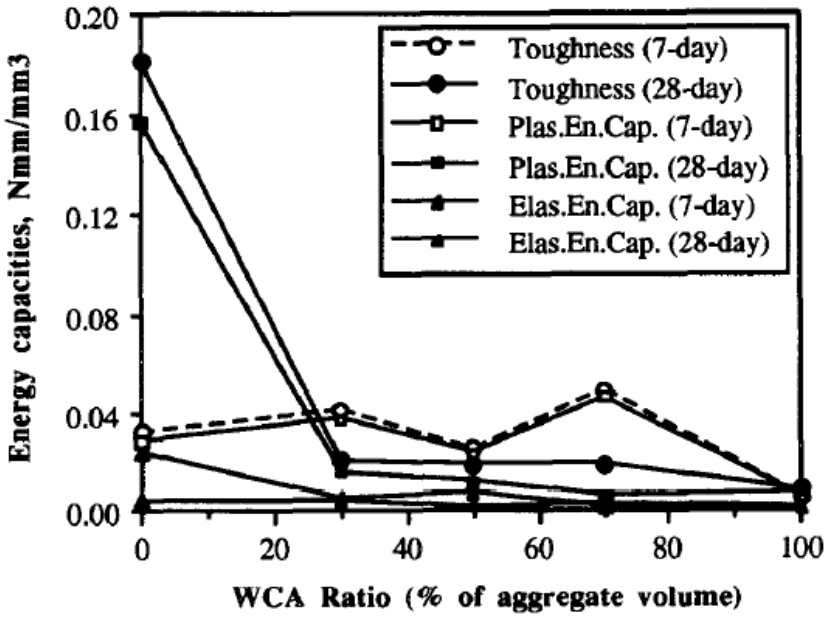
WCA - otpadni beton

Rezultati ispitivanja pokazuju da je gustoća betona sa otpadnim betonom manja od gustoće normalnog betona. Iz prethodnih ispitivanja bilo je poznato da otpadni beton upija veću količinu vode. Iz tog razloga napravljene su korekcije količine vodu u proračunima receptura. Unatoč poduzetim mjerama obradivost je bila niska.
Gustoća i obradivost betona otpada sa povećanjem otpadnog betona u uzorcima.



Slika 2.4. *σ-ε dijagram uzoraka betona nakon 28 dana*

Ispitivanja u očvrslom stanju vršena su nakon 7 i 28 dana. Rezultati σ-ε dijagrama nakon 28 dana su prikazani na Slici 2.4. Rezultati svojstava betona u očvrslom stanju prikazani su na Slici 2.5.



Slika 2.5. *Promjene žilavosti, plastična i elastična energija sa povećanjem udjela recikliranog agregata*

Rezultati ispitivanja nakon 7 i 28 dana su bili slični. Zaključak donesen na temelju rezultata je da se povećanjem udjela otpadnog betona, smanjuje tlačna čvrstoća, moduli elastičnosti, žilavost, plastična i elastična energija.

2.3. UTJECAJ MLJEVENE GLINENE OPEKE NA SVOJSTVA SCLC BETONA U SVJEŽEM I OČVRSLOM STANJU (S. JURADIN, K. GRBEŠA) [8]

Samozbijajući beton je revolucionarno otkriće 20. stoljeća koji je nastao s ciljem smanjenja utjecaja ljudskog faktora na kvalitetu betona. Teče pod utjecajem vlastite težine bez segregacije, u potpunosti ispunjava sve dijelove oplate zaobilazeći armaturu,a ne zahtjeva upotrebu vibracijskih uređaja prilikom ugrađivanja i zbijanja. U usporedbi sa običnim betonom ima manji udio krupnog agregata, niži vodovezivni faktor, a povećan je udio paste i superplastifikatora.

Prednosti uporabe samozbijajućeg betona su brža gradnja, smanjene broja radnika, lakše ugrađivanje, poboljšana trajnost, produljenje vijeka trajanja oplate, veća sloboda oblikovanja elemenata. Iako znatno pridonosi povećanju kvalitete betonskih konstrukcija, ne primjenjuje se često zbog visoke cijene proizvodnje. [5]

U proizvodnji samozbijajućeg betona upotrebljavaju se razni dodatci u svrhu poboljšanja otpornosti ka segregaciji te poboljšanja konzistencije i stabilnosti betona.

Najčešće se koriste leteći pepeo, silikatna prašina, kameno brašno i granulirana zgura visokih peći, a rijeđe brušeno staklo, prirodni pucolani, industrijski otpadni materijala...

Procijenjeno je da rušenjem starih objekata oko 30% otpada čine keramičarski proizvodi. Dokazano je da bi se taj otpad mogao iskoristiti za proizvodnju samozbijajućeg betona koji bi ispunjavao sve propisane zahtjeve.

Poboljšanje svojstava samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju primijećeno je kod onih uzoraka betona koji su sadržavali filere otpadnih materijala i kod onih kojima je sitna frakcija agregata zamijenjena sa otpadnim materijalom.

Ispitivanje utjecaja mljevene opeke na svojstva betona je provedeno na 5 različitih mješavina samozbijajućeg laganog betona (SCLC).

Mljevena opeka podijeljena je na 2 frakcije, filer < 0,125 mm i agregat 0,125 - 0,5 mm.

Osim mljevene opeke mješavine sadrže dodatke silikatne prašine, filer recikliranog starog betona. Korištene su dvije frakcije agregata od ekspandirane pečene gline.

Sastav pokusnih mješavina i korištenih dodataka prikazani su u Tablicama 5.- 6.

Tablica 5. *Sastav pokusnih mješavina*

			Mljevena opeka						Agregat	
	Cement	Voda	< 0,125	> 0,125	Filer 2	Filer 3	Silika	PCE	0-2	4-8
Oznaka	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg		kg	kg
SCLC 1	400	200	65	-	-	-	-	4,8	498,2	513,3
SCLC 2	400	200	32	-	-	43,5	-	4,8	498,6	513,7
SCLC 3	400	200	32	-	-	-	37	4,8	498,6	513,7
SCLC 4	400	200	-	173,3	-	156	-	4,8	334,2	491,9
SCLC 5	400	200	-	173,6	142	-	-	4,8	334,2	491,7

Tablica 6. *Podatci o korištenim dodatcima*

Oznaka	Dodatak	Specifična površina po Blaineu (cm^2/g)	Specifična težina (g/cm^2)
Filer 1	mljevena opeka	4992	2,4
Filer 2	reciklirani stari beton	7891	2,45
Filer 3	kameno brašno	-	2,7
Silika	silikatna prašina	>15000	2,3

Provedena ispitivanja na betonu u svježem stanju su rasprostiranje, T50 , V- lijevak, L-box test i J-ring. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablicama 7.- 8.

Nakon 7 i 28 dana ispitana je tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti.

Tablica 7. *Rezultati rasprostiranja, T500 i V-lijevka uz klasifikaciju po EFNARC-u*

	Slijeganje		T500		V-lijevak	
Oznaka	izmjereno	klasa	izmjereno	klasa	izmjereno	klasa
SCLC1	762,5	SF3	1,16	VS1	6,96	VF1
SCLC2	757,5	SF3	1,87	VS1	8,97	VF2
SCLC3	655	SF2	2,47	VS2	7,31	VF1
SCLC4	572,5	SF1	2,17	VS2	10,31	VF2
SCLC5	700	SF2	1	VS1	7	VF1

Tablica 8. *Sposobnost prolaska i klasifikacija po EFNARCU-u*

	PL		PJ	
Oznaka	izmjereno	klasa	izmjereno	klasa
SCLC1	0,95	PL2	15	-
SCLC2	0,96	PL2	23,75	-
SCLC3	0,83	PL2	31,75	-
SCLC4	0,46	-	46,75	-
SCLC5	0,73	-	36,25	-

Testovima L- box i J-ring ispituje se sposobnost prolaska samozbijajućeg betona kroz prepreke pod utjecajem vlastite težine.

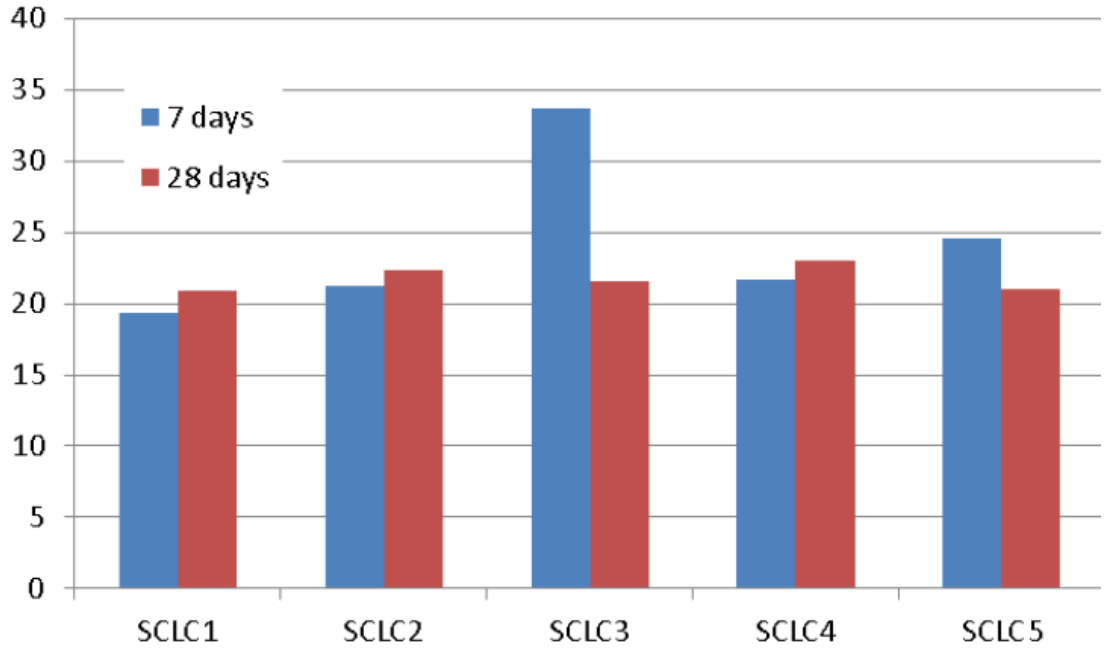
Prema kriterijima EFNARC samo su tri mješavine su zadovoljile kriterije ispitivanja metodom L-boxa, dok ni jedna mješavina nije zadovoljila kriterije za J-ring.

Mješavine SCLC 1 i SCLC2 zadovoljile su kriterije L-boxa, ali se nisu pokazale stabilnima. Vizualnim pregledom tijekom svih ispitivanja uočena je pojava segregacije te izlučivanje vode na rubovima.

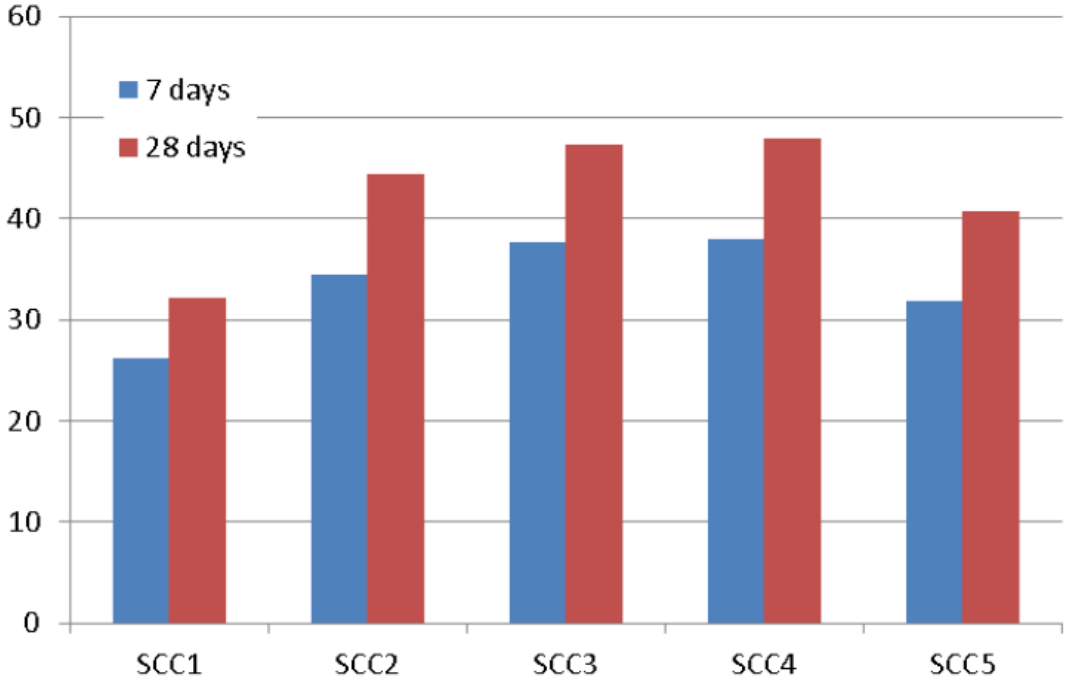
Mješavina SCLC 3 je napravljena sa filerom mljevene opeke kao i mješavine SCLC1 i SCLC 2, ali je kao dodatak imala silikatnu prašinu koja je utjecala na poboljšanje stabilnosti.

Iako nije došlo do segregacije niti izlučivanja vode, mješavina SCLC 3 pokazala je slabije rezultate kod popunjavanja i tečenja kroz prepreke pod utjecajem vlastite težine. Potrebno je dodati VMA i HR WA kako bi se uklonili ti nedostatci.

Metodom ulrazvuka određen je dinamički modul elastičnosti čije su vrijednosti prikazane na Slici 2.5. Vrijednosti modula elastičnosti nakon 28 dana se kreću u rasponu 21-23 GPa.



Slika 2.5. *Dinamički modul elastičnosti uzoraka kod različite starosti*



Slika 2.6. *Tlačna čvrstoća uzoraka kod različitih starosti*

Najbolje rezultate ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana zabilježeni su kod uzoraka SCLC 4 i SCLC 3. Mješavini SCLC 4 dio sitnog agregata je zamijenjen je agregatom mljevene opeke i kombiniran sa filerom kamenog brašna.

Uspoređujući mješavine koje su napravljene sa filerom mljevene opeke može se doći do zaključka da količina otpadnog materijala utječe na tlačnu čvrstoću betona. Za veće tlačne čvrstoće najbolje je koristiti filer mljevene opeke,čestica manjih od 0,04 mm, u kombinaciji sa drugim filerima.

3. UPOTREBA INDUSTRIJSKOG OTPADA U BETONSKIM MJEŠAVINAMA(B. MESCI, S. ÇORUH I O. NURI ERGUN) [9]

Razvojem tehnologije i industrije stvara se sve veća količina otpadnog industrijskog materijala. U cilju očuvanja okoliša razmatraju se mogućnosti iskorištavanja tog istog materijala za novu proizvodnju. Zbog visokih cijena zbrinjavanja ovakvih otpada u svijetu postoji trend korištenja industrijskog otpada ili nusproizvoda kao dodataka ili kao primjesa u proizvodnji mješavina betona. Zahvaljujući razvijenim procesima koji otklanjaju opasne supstance moguće je ponovo iskoristiti nusproizvode koji predstavljaju opasnosti za ekosustav.

Industrijski otpad kromitne industrije je talog koji predstavlja ekološki i zdravstveni problem zbog toga što sadrži kancerogeni Cr^{+6}.
Stabilizacija je efikasan proces kojom se može smanjiti koncentracija Cr^{+6} u talogu, te tako omogućiti ponovno korištenje takvog industrijskog otpada. Posrednik u procesu stabilizacije je portland cement koji svojom alkalnošću smanjuje topljivost mnogih anorganskih toksičnih i opasnih metala. Time se otvara mogućnost korištenja tog industrijskog otpada u građevinarstvu za proizvodnju betona.

U mnogim industrijama upotrebljavaju se legure aluminija koje poboljšavaju prvobitna svojstva aluminija. Radi svoje reaktivnosti u prirodi se ne može naći u elementarnom obliku, pa se dobiva preradom ruda.
Bayerovim postupkom iz rude boksita dobijemo glinicu iz koje se daljnjim postupkom dobije aluminij. Nusproizvod Bayerovog postupka je crveni mulj.
Umjesto odlaganja na deponije koji zauzimaju veliki prostor, čime utječu na životnu sredinu, kao i na kvalitetu vode, zraka i tla, može se znatno ekonomičnije iskoristiti.
Ispitivanja su pokazala da nije toksičan, a zbog svog sastava može se upotrijebiti u pročišćavanju otpadnih voda, jer na sebe veže i otklanja teške metale. Osim u građevinarstvu moguće ga je iskoristiti u proizvodnji keramike, kao katalizatore u kemijskoj industriji, u proizvodnji pigmenata boje itd.

Mesci, Çoruh i Nuri Ergun su proveli istraživanje o mogućnosti korištenja crvenog mulja i taloga kao otpada kromitne industrije u proizvodnji betona.
U svrhu ispitivanja pripremljeno je 10 pokusnih mješavina betona. Prva mješavina je običan beton, a ostale mješavine su napravljene sa različitim udjelima crvenog mulja i taloga kromitne industrije. Sastav pokusnih mješavina prikazan je u Tablici 9.

Tablica 9. *Sastav betonskih mješavina*

Oznaka	Materijali						
	Vezivo	Cement (kg/m^3)	Krupni agregat (kg/m^3)	Pijesak (kg/m^3)	Talog (kg/m^3)	Crveni mulj (kg/m^3)	W/C
R	100%PC	350,0	1038	752	0	0	0,58
C1	5%C + 95%PC	332,5	1041	753	17,5	0	0,58
C2	10%C + 90%PC	315,0	1041	754	35,0	0	0,58
C3	15%C + 85%PC	297,5	1042	755	52,5	0	0,58
RM1	5%RM + 95%PC	332,5	1039	752	0	17,5	0,58
RM2	10%RM + 90%PC	315,0	1039	753	0	35,0	0,58
RM3	15%RM + 85%PC	297,5	1040	753	0	52,5	0,58
CRM1	2,5%C + 2,5%RM + 95%PC	332,5	1039	753	8,75	8,75	0,58
CRM2	5%C + 5%RM + 90%PC	315,0	1040	753	17,5	17,5	0,58
CRM3	7,5%C + 7,5%RM + 85%PC	297,5	1041	754	26,25	26,25	0,58

PC – portland cement; C – talog kromitne industrije; RM – crveni mulj

Ispitivanja provedena na svježem betonu su slijeganje i vrijeme vezanja betona, a u očvrslom stanju ispitana je tlačna čvrstoća nakon 2, 7, 28 i 90 dana.

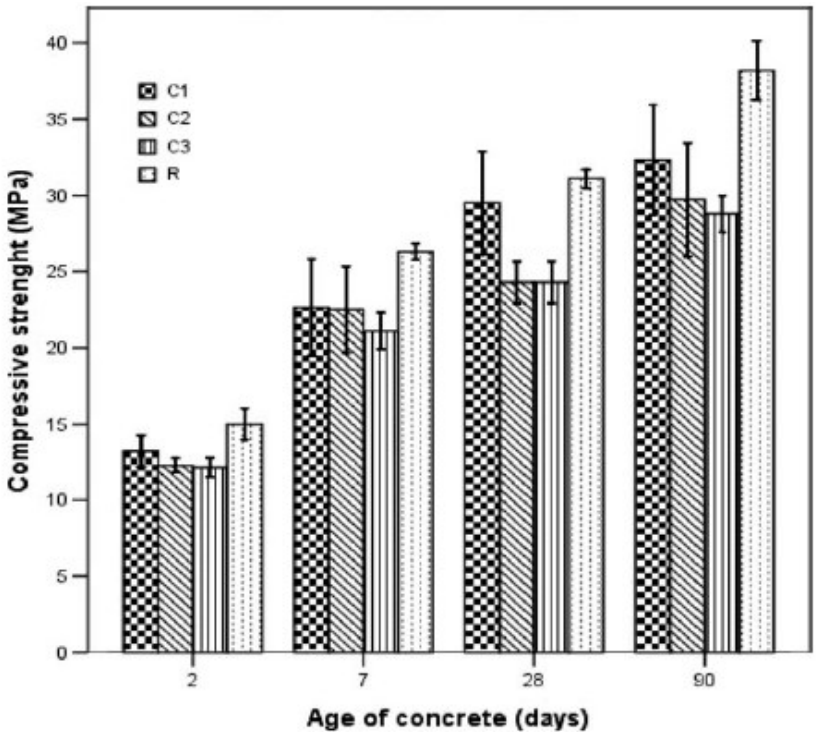
Rezultati ispitivanja slijeganja pokazali su da izmjerena slijeganja kod svih uzoraka koji sadrže otpadni materijal su manja od slijeganja referentnog uzorka tj. običnog betona.
Iako se slijeganje smanjuje s povećanjem količine otpadnih materijala sadržanih u betonu, zaključili su da otpadni materijal u betonu ne utječe na njegovu obradivost.

Vrijeme vezivanja kod uzoraka betona sa 5% crvenog mulja je najbliže vremenu vezanja referentnog uzorka. Zamijećeno je da već povećavanjem udjela crvenog mulja u mješavini opadaju vremena vezivanja.
Kod ostalih uzoraka je došlo do odgađanja početka, ali i kraja vezivanja. Odgoda vremena vezivanja je veća što su veći postotci zamijenjenog portland cementa sa otpadnim materijalom. Razlog ove pojave je pucolanska reakcija kalcijevog hidroksida i betona koja je sporija sporija od hidratacije cementa.
Rezultati ispitivanja slijeganja i vremena vezivanja su prikazani u Tablici 10.

Tablica 10. *Rezultati slijeganja i vremena vezanja betonskih mješavina*

Oznaka	Vezivo	slijegnje (cm)	vrijeme vezanja (h:min)	
			početak	kraj
R	100%PC	15,0	2:45	3:45
C1	5%C + 95%PC	14,0	2:57	4:20
C2	10%C + 90%PC	13,0	3:15	4:40
C3	15%C + 85%PC	10,0	3:30	4:57
RM1	5%RM + 95%PC	10,5	3:05	4:00
RM2	10%RM + 90%PC	11,5	3:00	4:05
RM3	15%RM + 85%PC	7,5	2:50	4:00
CRM1	2,5%C + 2,5%RM + 95%PC	14,0	2:45	4:00
CRM2	5%C + 5%RM + 90%PC	12,5	3:00	4:15
CRM3	7,5%C + 7,5%RM + 85%PC	9,0	3:05	4:20

Kod uzoraka betona sa otpadnim talogom kromitne industrije, tlačna čvrstoća nakon 28 dana je manja nego tlačna čvrstoća referentnog uzorka. Primjećuje se da veći udio zamijenjenog portland cementa ovim otpadnim materijalom rezultira nižom krajnjom čvrstoćom betona. Rezultati su pokazali da uzorci koji sadržavaju 5% otpadnog taloga imaju sličnu tlačnu čvrstoću kao referentni uzorak, iz čega se može zaključiti da u manjim količinama ovaj otpad ima neznatan utjecaj na čvrstoću betona. Rezultati su prikazani na Slici 3.1.

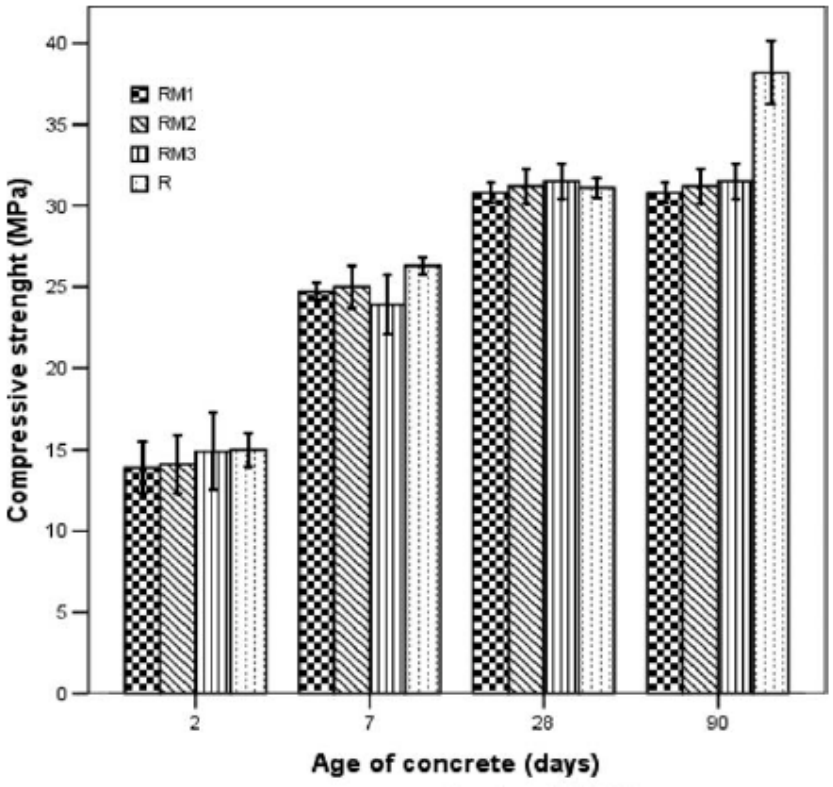


Slika 3.1. *Usporedba tlačne čvrstoće običnog betona i tlačne čvrstoće betona koji sadržava talog kromitne industrije*

Tlačna čvrstoća uzoraka, kojima je dio portland cementa zamijenjen sa crvenim muljem, opada povećanjem udjela crvenog mulja. Crveni mulj u količini 5% zamijenjenog cementa najmanje utječe na krajnju čvrstoću betona.

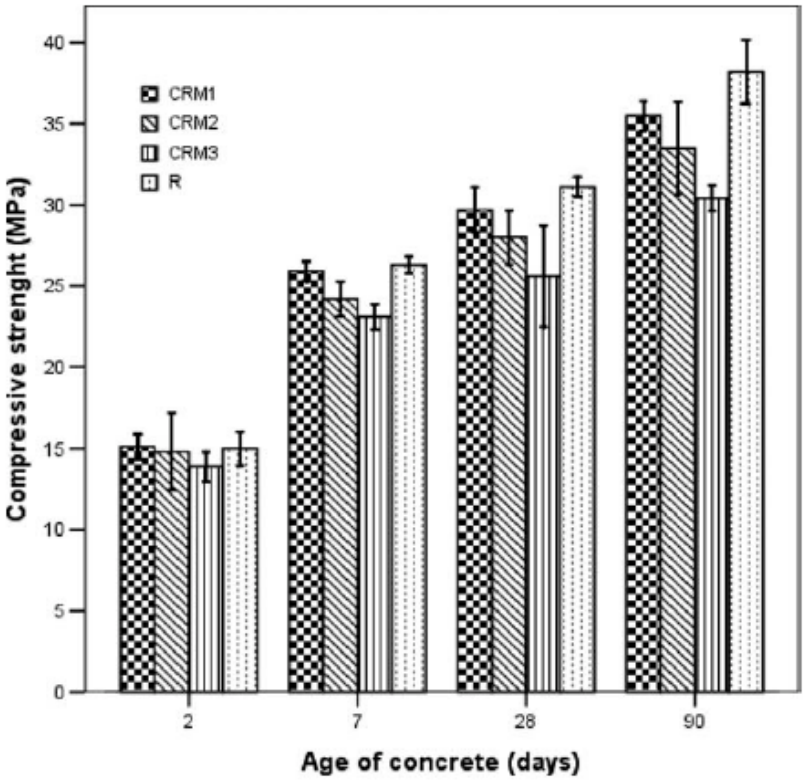
Iz rezultata ispitivanja Slika 3.2. primjećuje se da su tlačne čvrstoće mjerene nakon 90 dana približno jednake tlačnim čvrstoćama nakon 28 dana, a kod nekih uzoraka zabilježeno je smanjenje čvrstoće.

Tlačne čvrstoće nakon 28 dana bile su približno jednake tlačnoj čvrstoći referentnog uzorka. Razlog tome može biti što čestice crvenog mulja mogu osigurati dodatna mjesta za produkte cementne hidratacije ili zbog toga što crveni mulj sadrži tvari koje ubrzavaju proces hidratacije.



Slika 3.2. *Usporedba tlačne čvrstoće običnog betona i tlačne čvrstoće betona koji sadržava crveni mulj*

Tlačne čvrstoće uzoraka koji sadrže i otpadni talog i crveni mulj imaju veće tlačne čvrstoće od ostalih uzoraka nakon 28 i 90 dana. Rezultati su prikazani na Slici 3.3.



Slika 3.3. *Usporedba tlačne čvrstoće običnog betona i tlačne čvrstoće betona koji sadržava talog kromitne industrije + crveni mulj*

Otpad kromitne industrije koji se koristio u pripremi pokusnih mješavina prije upotrebe nije bio neutraliziran, a kao takav je opasan za okolinu i ljudsko zdravlje jer sadrži kancerogeni Cr^{6+}. Iz tih razloga se treba kontrolirati koncentracija Cr^{6+} u otpadu tijekom njegove upotrebe.
Najčešće korištena metoda je Toxic Characteristics Leaching Procedure (TCLP).
Na početku ispitivanja izmjerena koncentracija Cr^{6+} na TCLP testu je bila 149,40 mg/L. Ponovo je mjerena nakon 2, 7, 28 i 90 dana. Rezultati mjerenja prikazani su u Tablici 11.

Tablica 11. *Rezultati mjerenja koncentracije Cr^{6+} u uzorcima betona TCLP testom, mg/L*

	2 dana		7 dana		28 dana		90 dana	
Uzorci	Cr^{6+}	ph	Cr^{6+}	ph	Cr^{6+}	ph	Cr^{6+}	ph
C1	0,02	10,58	0,02	10,58	<0,01	11,0	<0,01	11,02
C2	0,02	10,54	0,04	10,56	0,02	11,08	0,01	11,10
C3	0,04	10,48	0,06	10,50	0,03	11,16	0,01	11,16
CRM1	0,02	11,06	0,01	11,16	<0,01	11,30	<0,01	11,40
CRM2	0,01	11,14	0,01	11,26	<0,02	11,32	<0,01	11,38
CRM3	<0,01	11,12	<0,01	11,26	<0,03	11,38	<0,01	11,40

Iz rezultata prikazanih u Tablici 11. isčitava se da je koncentracija Cr^{6+} pala na minimalne vrijednosti, a krajnja ph vrijednost uzoraka betona je oko 11 tj. uzorci su visoko alkalični. Prema ovim vrijednostima može se reći da otpad kromitne industrije više ne spada u opasne otpade. Razlog ovakvih niskih vrijednosti koncentracija Cr^{6+} iona je proces stabilizacije. Tim procesom se otklanjaju opasne tvari koje se nalaze u otpadu. Medij stabilizacije često se koristi portland cement, a rezultati iz Tablice 11. dokazuju njegovu učinkovitost.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. UVOD

Zadatak eksperimentalnog dijela rada je usporediti svojstva betona sa dodatkom od recikliranog građevinskog otpada u odnosu na svojstva običnog betona bez dodataka.
Za potrebe ispitivanja napravljene su 4 pokusne mješavine betona.
Sve mješavine sadrže cement, agregat, vodu i aditiv. Razliku između mješavina čine dodatci, crveni i bijeli prah koji su nastali mljevenjem betonskog otpada. Detaljnije u točki 4.2.
Jedan uzorak je napravljen bez dodataka – kontrolna mješavina, a ostalim uzorcima je određena količina cementa zamijenjena crvenim ili bijelim prahom.

UZORAK 1– kontrolna mješavina, etalon
UZORAK 2– mješavina s dodatkom crvenog praha kojim je zamijenjeno 10% količine cementa
UZORAK 3– mješavina s dodatkom bijelog praha kojim je zamijenjeno 10% količine cementa
UZORAK 4– mješavina s dodatkom crvenog praha kojim je zamijenjeno 20% količine cementa

Izrađena su po 6 uzoraka betona iz svake mješavine.

Svojstva betona u svježem stanju ispitana su metodom slijeganja, metodom rasprostiranja i VB metodom. U očvrslom stanju ispitana je tlačna čvrstoća betona i dinamički modul elastičnosti nakon 7 i 28 dana od izrade uzoraka.

U nastavku slijedi opis istraživanja, provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata.

4.2. IZBOR KOMPONENTI

4.2.1. CEMENT

Za pripremu pokusnih mješavina upotrijebljen je metalurški cement niske topline hidratacije CEM III/A 42.5 N LH s dodatkom zgure.
Proizvođač cementa je CEMEX Hrvatska d.d., tvornica Sveti Juraj.
Potvrda o sukladnosti prema zahtjevima HRN EN 197-1, HRN EN 197-2, BAS EN 197-1 i BAS EN 197-2. [10]

Sastav:

TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K) + Gips (G)	45-55 %	35-64
Zgura (S)	45-55 %	36-65
Sporedni sastojci	0-4 %	0-5

Karakteristike:

- visoka konačna čvrstoća
- olakšana obradljivost i njega betona
- niska toplina hidratacije
- reducirana tendencija skupljanja i nastanka pukotina
- značajno povećanje čvrstoće pri većoj starosti betona (nakon 28 dana)
- duži početak vezivanja
- otpornost na utjecaj čiste i agresivne vode
- zadržavanje prikladne ugradivosti
- izvrsna reološka svojstva morta i betona (ugradljivost, pumpabilnost)

Preporuke za primjenu:

- beton za široku primjenu
- betoni s različitim vrstama aditiva
- izrada nosivih konstrukcijskih elemenata u visokogradnji
- konstrukcije u vlažnoj i umjereno sulfatno-agresivnoj sredini
- radovi u cestogradnji, izrada masivnih temelja i drugih masivnih betona
- pomorski i priobalni objekti
- podzemni radovi te stabilizacija i injektiranje tla

4.2.2. AGREGAT

Agregat potječe iz kamenoloma Klis-Kosa kod Splita. Postrojenje za drobljenje i separaciju kamena omogućava proizvodnju agregata za sve vrste betona i cestogradnju.

Korištene su 3 frakcije drobljenog agregata 0-4 mm, 4-8 mm i 8-11.2 mm.

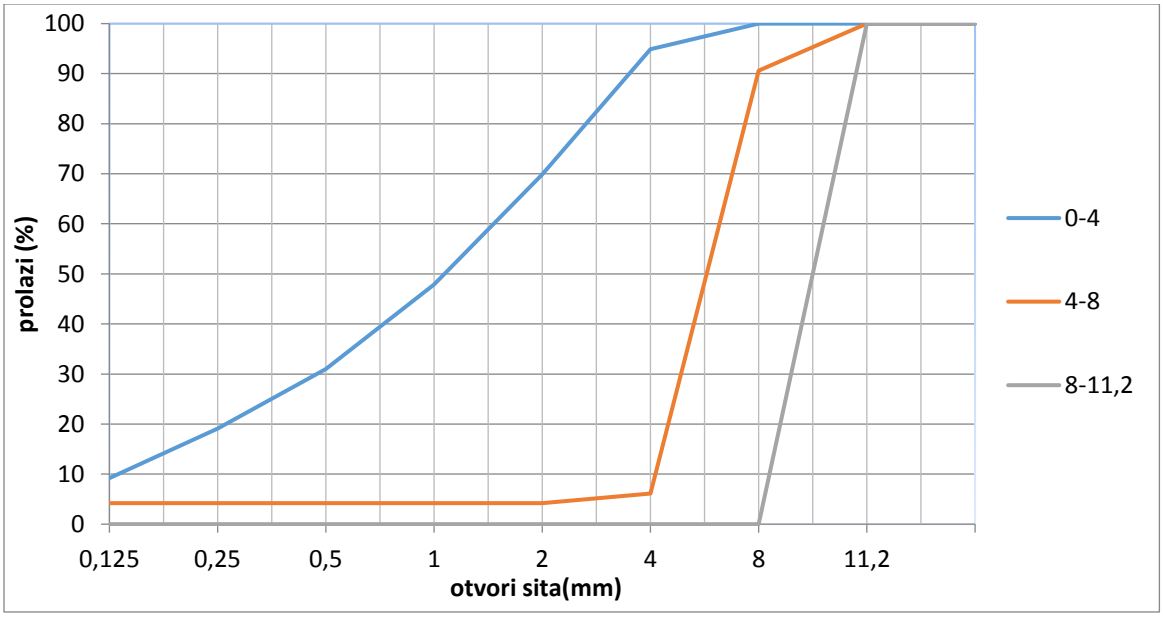
Gustoća agregata ρ_a = 2,68 g/cm^3. Granulomterijski sastav frakcija agregata prikazan je u Tablici 12., a granulometrijska krivuja frakcija agregata na Slici 4.1.

Odabrana granulometrijska krivulja agregata je Fullerova krivulja (Slika 4.2.):

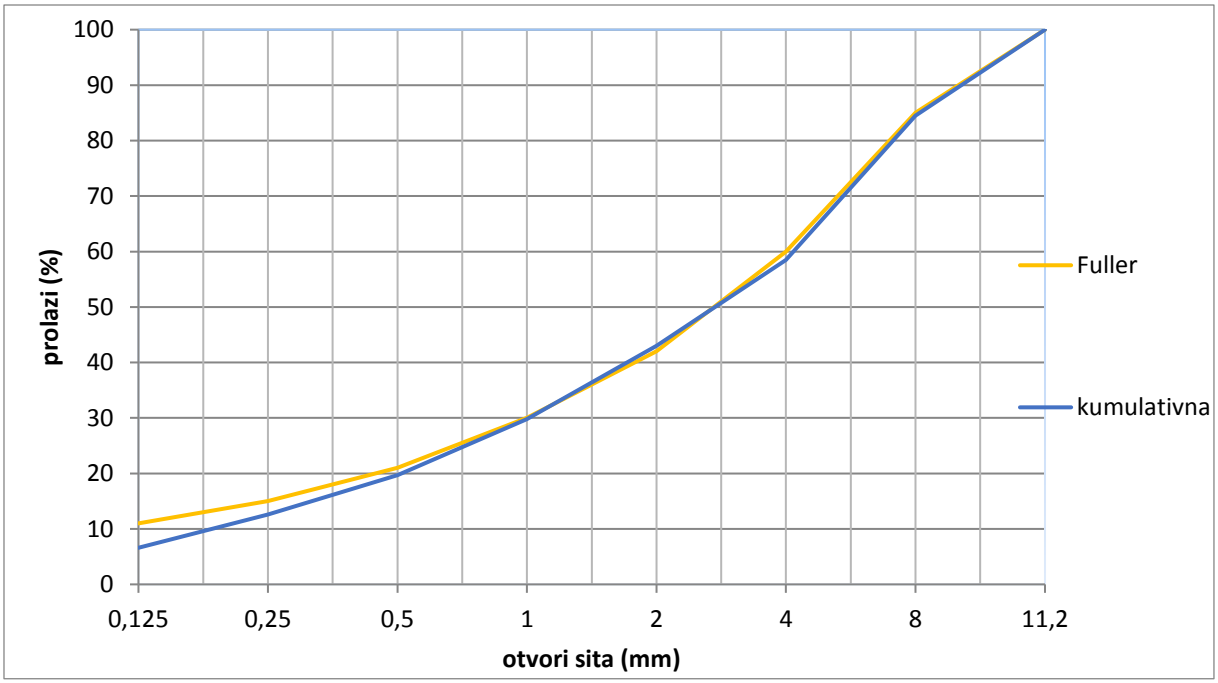
$$p = 100 \times \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Tablica 12. *Granulometrijski sastav frakcija raspoloživog agregata*

Frak. br.	**Veličina**	**GRANULACIJA - PROLAZ U %**								
		0,125	**0,25**	**0,5**	**1**	**2**	**4**	**8**	**11,2**	**16**
1.	***0 - 4***	9,2	19,1	31	47,9	69,9	94,9	100	100	100
2.	***4 - 8***	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	6,1	90,6	100	100
3.	***8 - 11,2***	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	100	100



Slika 4.1. *Granulomerijska krivulja frakcija agregata Klis-Kosa*



Slika 4.2. *Kumulativna krivulja agregata*

4.2.3. VODA

Tvari koje se nalaze otopljene u vodi koja će se koristiti za izradu betona mogu utjecati na svojstva, a time i na kvalitetu betona.

Smije se upotrebljavati samo ona voda koja zadovoljava normirane uvjete kvalitete.

Jedino se pitka voda može se koristiti bez prethodnog ispitivanja uporabljivosti.

Sve ostale vrste voda smiju se koristiti tek kada je za njih izdana svjedodžba o kvaliteti za izradu betona.

Voda ne smije sadržavati:

- sulfate
- kloride
- anorganske i organske soli
- šećer, masti, naftu, sapun,...[12]

4.2.4. ADITIV

Superplastifikator je kemijski dodatak koji se najčešće primjenjuje kod izrade samozbijajućih betona, betona vrlo visoke čvrstoće, betona s niskim vodocementim faktorom ili betona sa smanjenim sadržajem cementa, a konstantnog vodocementnog faktora.
Dodavanjem superplastifikatora povećava se žitkost i obradivost betona te krajnja čvrstoća betona. Ubrzava razvoj čvrstoće, čime se može izbjeći zagrijavanje betona te na taj način skratiti vrijeme ugradbe betona. Osim toga, upotrebom superplastifikatora mogu se postići znatne uštede cementa i vode.
Nedostatak superplastifikatora je ograničeno vrijeme djelovanja na svježi beton. [12]

Za izradu pokusnih mješavina koristili smo superplastifikator MasterGlenium Sky 629, čije su karakteristike prikazane u Tablici 13.

Tablica 13. *Karakteristike superplastifikatora MasterGlenium Sky 629*[11]

oblik	tekućina
boja	smeđa
gustoća (na 20˚C)	1,060 -1,100 g/ml
ph vrijednost	
sadržaj klorida	< 0,1 %
preporučena doza	0,8-1,4 l na 100kg veziva
maksimalna doza	1,6 l na 100kg veziva

4.2.5. DODATCI

Crveni prah je reciklirani betonski otpad. Nastao je mljevenjem betonskog šuta, Slika 4.3., koji je sadržavao beton, opeku, mort, staklo, stiropor, ljepilo i pločice u mlinu sa kuglama.
Nakon mljevenja je prosijan.
U ispitivanju je korištena frakcija 0,04 - 0,5 mm. Gustoća praha je 2,45 g/cm^3.
Bijeli prah je reciklirani betonski otpad. Nastao mljevenjem betonskih elemenata (elementi betonskog komina) u mlinu sa kuglama.
Nakon mljevenja je prosijan.
U ispitivanju je korištena frakcija 0,04 - 0,5 mm. Gustoća praha je 2,45 g/cm^3.



Slika 4.3**.** *Betonski otpad prije mljevenja*

Točka 4.2.5 preuzeta je iz Diplomskog rada u kojem je za ispitivanja betona korišten isti crveni i bijeli prah, ali frakcija <0,04 mm.

4.3. IZRADA UZORAKA BETONA

4.3.1. RECEPTURA POKUSNIH MJEŠAVINA

Ulazni podatci za proračun receptura pokusnih mješavina prikazani su u Tablici 14., a recepture pokusnih mješavina za 1 m^3 u Tablici 15.

Tablica 14.*Ulazni podatci za proračun receptura pokusnih mješavina*

Vrsta cementa	CEM III/A 42.5 N LH
Vrsta agregata	drobljeni agregat Klis-Kosa
Najveće zrno agregata D (mm)	11.2
Udio zraka u betonu (%)	2.0
W/C omjer	0.45
Superplastifikator	MasterGleniumSky 629
Količina cementa (kg)	300 kg

Tablica 15. *Recepture pokusnih mješavina za 1m^3*

SASTOJAK (kg)	UZORAK 1	UZORAK 2	UZORAK 3	UZORAK 4
Cement	300	270	270	240
Agregat				
0-4 mm	1317,1	1336,7	1336,7	1356,4
4-8 mm	491,2	498,5	498,5	505,8
8-11,2 mm	261,9	265,8	265,8	269,7
Crveni prah	-	30	-	60
Bijeli prah	-	-	30	-
Aditiv	1,8	1,62	1,62	1,44
Voda	135	121,5	121,5	108

Za jedno laboratorijsko miješanje potrebne su 22 litre betona. U Tablicama 16. - 19. prikazane su recepture pokusnih mješavina betona za jedno laboratorijsko miješanje.

Tablica 16. *Receptura mješavine 1*

SASTOJAK	KOLIČINA (kg)
Cement	6,6
Agregat	
0-4 mm	28,98
4-8 mm	10,81
8-11,2 mm	5,76
Voda	3,18
Aditiv	0,04

Tablica 17. *Receptura mješavine 2*

SASTOJAK	KOLIČINA (kg)
Cement	5,94
Agregat	
0-4 mm	29,41
4-8 mm	10,97
8-11,2 mm	5,85
Dodatak-crveni prah	0,66
Voda	3,58
Aditiv	0,036

Tablica 18. *Receptura mješavine 3*

SASTOJAK	KOLIČINA (kg)
Cement	5,94
Agregat	
0-4 mm	29,41
4-8 mm	10,97
8-11,2 mm	5,85
Dodatak-bijeli prah	0,66
Voda	3,79
Aditiv	0,036

Tablica 19. *Receptura mješavine 4*

SASTOJAK	KOLIČINA (kg)
Cement	5,28
Agregat	
0-4 mm	29,84
4-8 mm	11,13
8-11,2 mm	5,93
Dodatak-crveni prah	1,32
Voda	3,66
Aditiv	0,032

4.3.2. PRIPREMA POKUSNIH MJEŠAVINA

Potrebne količine sastojaka izvagane su na preciznoj vagi. Svi sastojci su izmiješani u laboratorijskoj miješalici, Slika 4.4. Tijekom miješanja kod svih mješavina primijećena je slabija obradivost zbog čega je naknadno dodana voda. Dodana količina vode je uključena u sadržaj vode prikazan u Tablicama 16.-19.



Slika 4.4. *Laboratorijska mješalica* [*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]

4.3.3. UGRADNJA SVJEŽEG BETONA U KALUPE

Odabrani kalup za ugradnju svježeg betona je kocka dimenzija 15x15x15 cm. Ugrađivanje svježeg betona vršeno je uronjavajućim vibratorom, Slika 4.5.



Slka 4.5. *Uronjavajući vibrator*[13]

Beton vibriramo sve dok iz njega izlaze veći mjehurići zraka i dok se površina ne izravna. Vibriranje se mora prekinuti kada se na površinu betona počne izlučivati pasta. Ukoliko je potrebno površina betona se dodatno zagladi.

Uzorci stoje u kalupima 24 sata u kontroliranim uvjetima, pri relativnoj vlažnosti zraka većoj od 90% i na temperaturi od 20± 2°C.

Nakon 24 sata uzorci se vade iz kalupa i potapaju se u vodu gdje se čuvaju do dana ispitivanja.

Napravljeno je po 6 uzoraka svake mješavine.

4.4. ISPITIVANJA I REZULTATI

ISPITIVANJE SVJEŽEG BETONA

Metoda slijeganja

Ovom metodom ispitujemo konzistenciju svježeg betona.

Postupak ispitivanja

Na horizontalnu ravnu podlogu postavimo kalup kojeg punimo uzorkom svježeg betona u 3 sloja. Visina svakog sloja odgovara trećini visine kalupa.

Svaki sloj se zbija sa 25 udaraca standardnom šipkom tako da nabijanja prodru samo u sloj koji je neposredno ispod. Zbijanje šipkom treba biti jednoliko po cijelom presjeku.

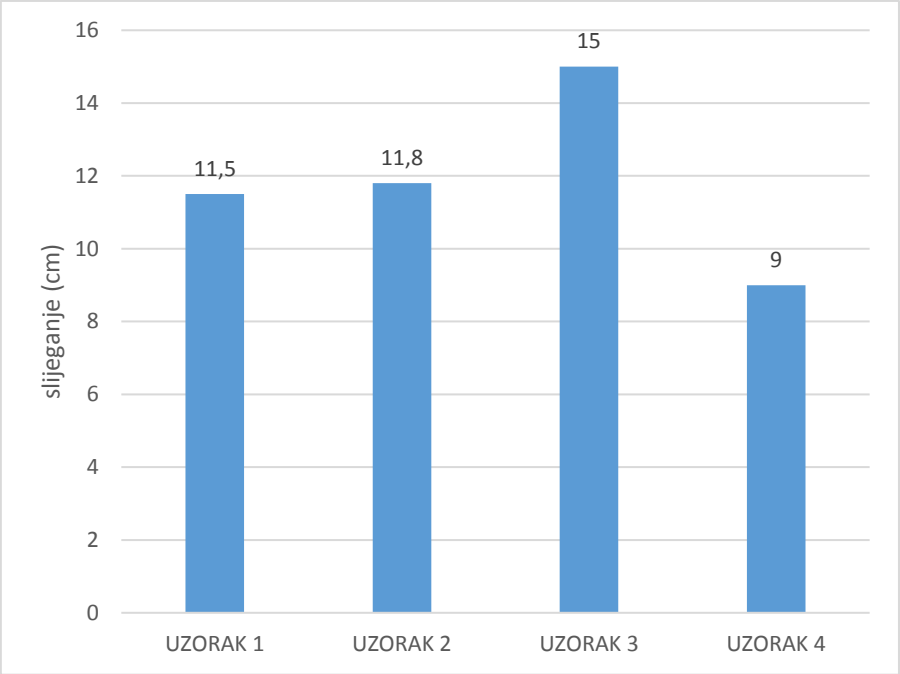
Gornji sloj treba napuniti preko ruba kalupa prije zbijanja šipkom.

Ukoliko kalup nije ispunjen do vrha nakon zbijanja, potrebno ga je nadopuniti betonom i izravnati površinu betona.

Kalup se vertikalno izvuče i izmjeri se slijeganje,razlika između visine kalupa i najviše točke slegnutog ispitnog uzorka.

Rezultati ispitivanja

Rezultati izmjerenih slijeganja uzoraka prikazani su na Slici 4.6. i 4.7.



Slika 4.6. *Rezultati izmjerenih slijeganja uzoraka*



Slika 4.7. *Slijeganja uzoraka betona* [*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]

Prema EN 206-1:2000 uzorci 1,2 i 3 spadaju u klasu S3, a uzorak 4 u klasu S4.

Kod svih betona primijećena je dosta velika obradivost.

Najveće slijeganje izmjereno je kod uzorka 3, betona sa bijelim prahom. Tom uzorku je dodana najveća količina vode tijekom pripreme mješavine.

Uzorci 1 i 2 imaju slična slijeganja, dok uzorak 4 ima najmanje slijeganje. Uzorci 2 i 4 imaju isti dodatak, samo u različitim količinama. Ako se usporede, iz rezultata ispitivanja može se zaključiti da reciklirani betonski otpad utječe na obradivost. Povećanjem njegovog udjela u betonu se smanjuje obradivost svježeg betona.

Nakon odstranjivanja kalupa uzorci 1, 2 i 4 su se pravilno slijegali, što upućuje da se radi o stabilnim plastičnim betonima.

Metoda pomoću Vebe aparata

Za određivanje konzistencije svježeg betona ovom metodom potreban je Vebe aparat, prikazan na Slici 4.8. metoda pomoću Vebe aparata prikazana je na Slici 4.9.



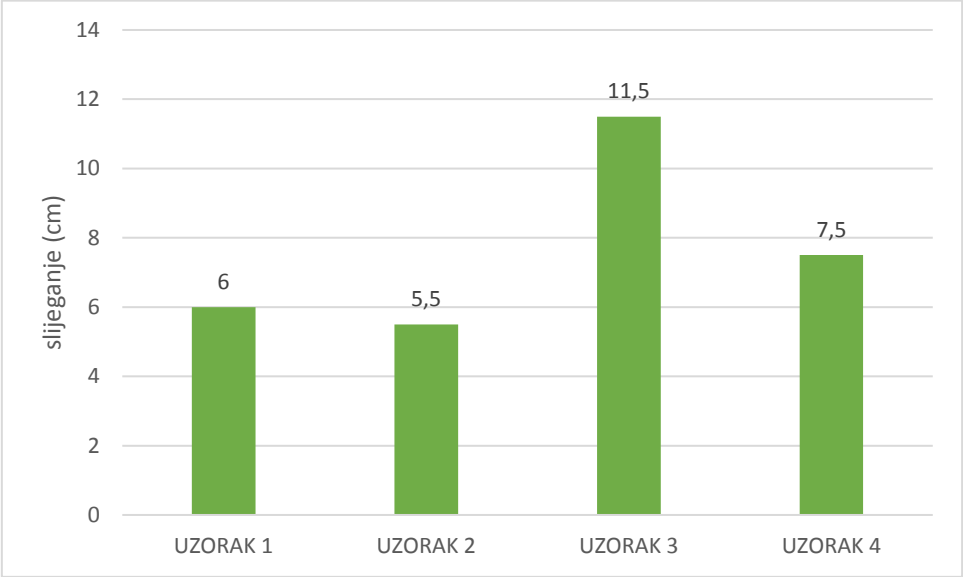
Slika 4.8. *Vebe aparat* [14]

Postupak ispitivanja

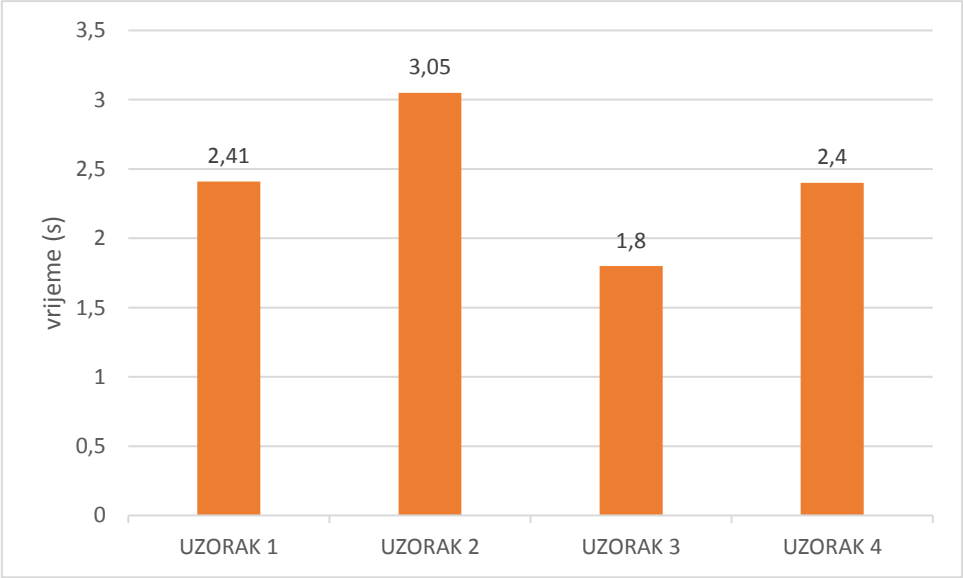
Abramsov kalup se postavi u cilindričnu posudu i napuni se uzorkom betona na isti način kao i kod metode slijeganja. Kalup se vertikalno podigne i izmjeri se slijeganje.
Rezultati slijeganja uzoraka betona prikazani su na Slici 4.10.
Na slegnutu betonsku masu postavi se prozirna ploča i uključi aparat. Vibriranjem se beton zbija sve do trenutka kada prozirna ploča ne nalegne na površinu betona. Mjeri se vrijeme od uključivanja vibratora do potpunog nalijeganja ploče.
Rezultati VB vremena prikazani su na Slici 4.11.



Slika 4.9. *Metoda pomoću Vebe aparata* [*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]



Slika 4.10. *Rezultati izmjerenih slijeganja uzoraka*

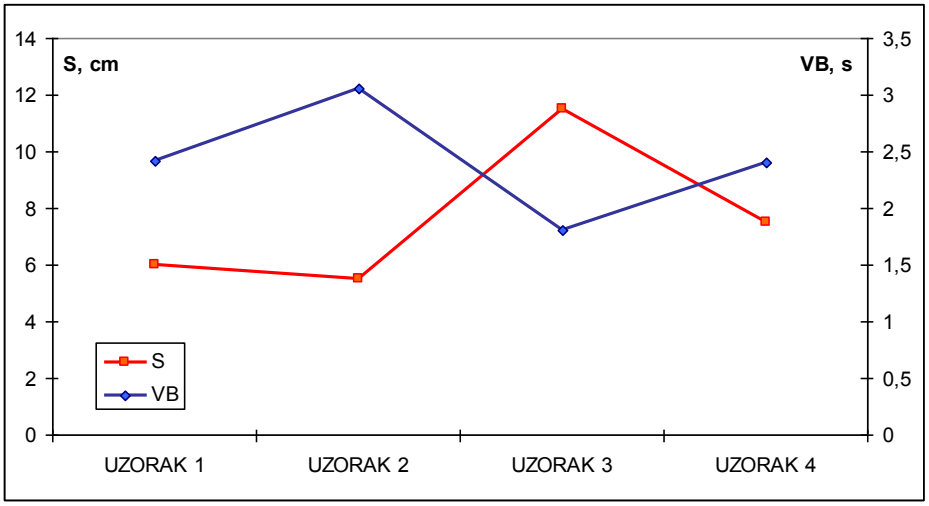


Slika 4.11. *Rezultati VB vremena uzoraka betona*

Kako bi se otklonio utjecaj cilindrične posude na slijeganje uzorka, vrijednosti izmjerenog slijeganja dodano je +0,5 cm. Slijeganja uzoraka kod Vebe metode su slična rezultatima slijeganja kod metode slijeganja, a uzorak 3 i ovdje ima najveće slijeganje. Uzorak 1 i 2 opet imaju slična slijeganja. Uzorak 4 ovdje nema najmanje slijeganje kao što je to slučaj kod metode slijeganja. Vrijednosti slijeganja kod Vebe metode su nešto niža nego kod metode slijeganja vjerojatno zbog toga što je kasnije izvođena pa je došlo do gubitka konzistencije.

Prema EN 206-1:2000 svi uzorci spadaju u klasu V4. Tu spadaju betoni sa plastičnom konzistencijom.

Između parametara slijeganja i VB vremena ne postoji funkcionalna veza.



Slika 4.12. *Zakonitost ponašanja slijeganja i VB vremena*

Prema dijagramu na Slici 4.12. je vidljivo da uzorci sa manjim slijeganjem imaju veće VB vrijeme i obrnuto, što je i logično.

Metoda rasprostiranja

Ovom metodom ispitujemo konzistenciju svježeg betona.

Postupak ispitivanja

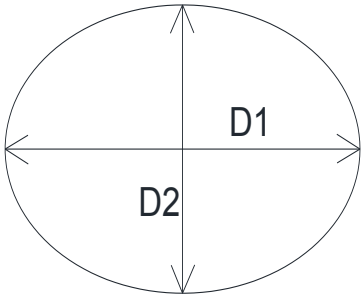
Unutrašnjost kalupa i podloga se navlaže mokrom krpom prije ispitivanja.
Kalup se postavi na sredinu podložneploče i puni betonom u dva sloja pri čemu se vrši zbijanje svakog sloja sa 10 ravnomjerno raspoređenih udaraca drvenim nabijačem. Ako je potrebno, gornji sloj se nakon zbijanja dopuni betonom. Površina betona se zaravna, a kalup se vertikalno izvuče nakon 30 sekundi. Zatim se podložna ploča podiže i spušta 15 puta. Svaki ciklus podizanja i spuštanja traje 2 do 5 sekunda. Metoda je prikazana na Slici 4.13.
Betonska masa poprima kružni oblik.
Izmjerimo najveći promjer D_1 i promjer okomit na njega D_2, Slika 4.14.

Izračuna se srednja vrijednost dva promjera :

$$F = \frac{D_1 + D_2}{2}$$



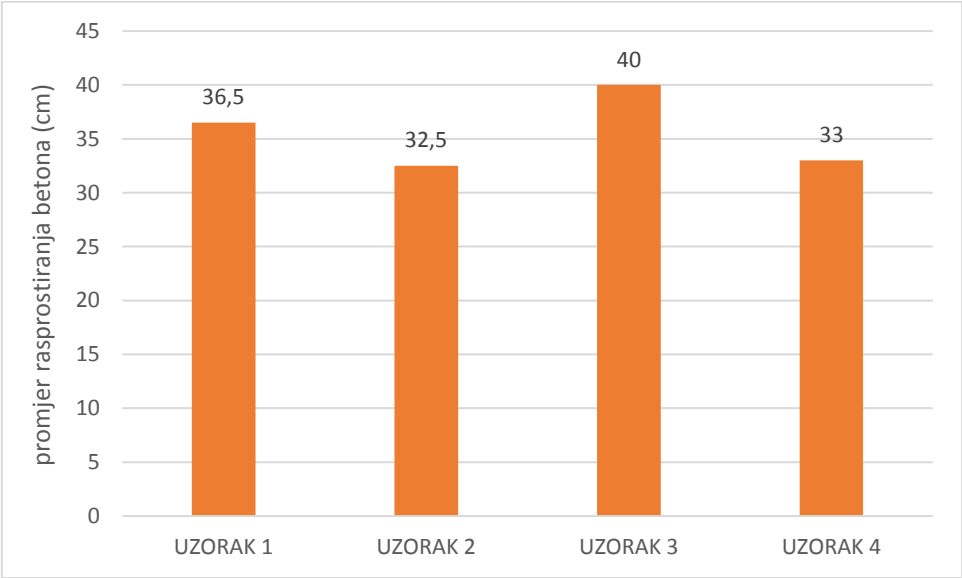
Slika 4.13. *Metoda rasprostiranja* [*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]



Slika 4.14. *Promjeri rasprostiranja*

Rezultati ispitivanja

Na slici 4.15. prikazana je srednja vrijednost F izmjerenih promjera rasprostiranja betona.



Slika 4.15. *Rezultati srednje vrijednosti promjera rasprostiranja betona*

Prema EN 206-1:2000 uzorci 1 i 3 spadaju u klasu F2, beton plastične konzistencije.
Uzorci 2 i 4 svrstani su u klasu F1, beton krute konzistencije. U oba uzorka je dio cementa zamijenjen sa crvenim prahom samo u različitim količinama.
Svi uzorci su imali približne vrijednosti oba promjera. Najveći promjeri su izmjereni kod uzorka 3, koji se i u prethodnim ispitivanjima pokazao kao uzorak sa najboljom obradivosti. Uzorci 2 i 4 skoro pa jednake vrijednosti, ali manje u odnosu na preostala dva uzorka. Oba sadrže crvenim prah pa se može zaključiti da taj dodatak utječe na konzistenciju betona. Vizualnim pregledom nije primijećeno izlučivanje vode i paste ni kod jednog uzorka pa se može zaključiti da su svi uzorci betona stabilni.

Gustoća svježeg betona

Gustoća svježeg betona određuje se prema izrazu:

$$\rho_b = \frac{M_b - M_p}{V_p}$$

Masa praznog kalupa M_p izvaže se na preciznoj vagi. Beton se u kalup ugradi kao u točki 4.3.3. te izvaže se masa kalupa sa betonom M_b. V_p je volumen kalupa. Izračunata gustoća svježeg betona prikazana je u Tablici 20.

Tablica 20. *Gustoća uzoraka betona u svježem stanju*

	V_p [cm^3]	M_p [g]	M_b [g]	ρ [g/cm^3]
UZORAK 1	3375,0	1512,1	7891,1	1,890
UZORAK 2	3375,0	1499,2	7906,8	1,899
UZORAK 3	3375,0	1512,1	7763,9	1,852
UZORAK 4	3375,0	1512,1	7785,0	1,859

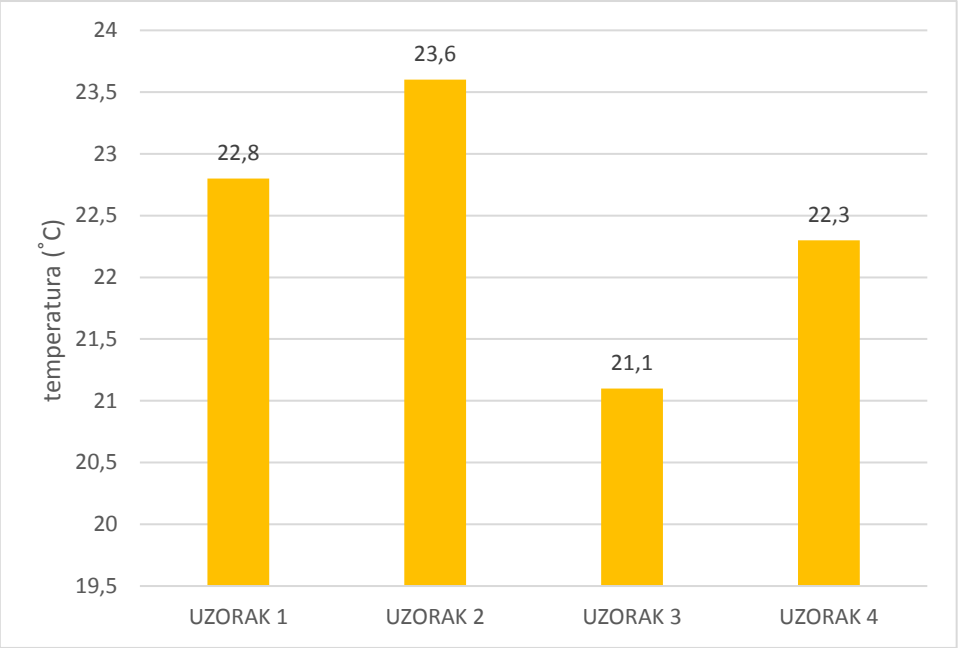
Gustoće betona u svježem stanju kod svih uzoraka su približno jednake.

Temperatura svježeg betona



Slika 4.16. *Mjerenje temperature*[*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]

Temperatura svježeg betona mjerena je digitalnim termometrom, Slika 4.16
Izmjerene vrijednosti temperature svakog uzorka prikazane su na Slici 4.17.



Slika 4.17. *Temperatura uzoraka betona*

ISPITIVANJE OČVRSLOG BETONA

Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća betona ispitana je nakon 7 i 28 dana standardnim postupkom u laboratorijskoj preši za određivanje tlačne čvrstoće uzoraka betona.
Uzorci betona su napravljeni i njegovani prema točki 4.3.

Postupak ispitivanja

Na dan ispitivanja uzorci se vade iz vode. Obrišu se površine kako bi bile suhe, a zatim se izvažu mase i izmjere sve dimenzije uzoraka. Izmjerene vrijednosti i izračunate gustoće uzoraka nakon 7 i 28 dana dane su u Tablici 21. i 22.
Uzorak se stavi u prešu prikazanoj na Slici 4.18. i opterećuje brzinom od 0,6±0,4 MPa/s do loma. Očita se naprezanje f_c i sila u trenutku loma F, Tablica 23.



Slika 4.18. *Laboratorijska preša za određivanje tlačne čvrstoće betonskih uzoraka* [*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]

Rezultati ispitivanja

Kvaliteta uzoraka varira, pa se prilikom obrade rezultata kao mjerodavna vrijednost uzima srednja vrijednost od 3 uzorka.

Tablica 21. *Gustoća uzoraka nakon 7 dana*

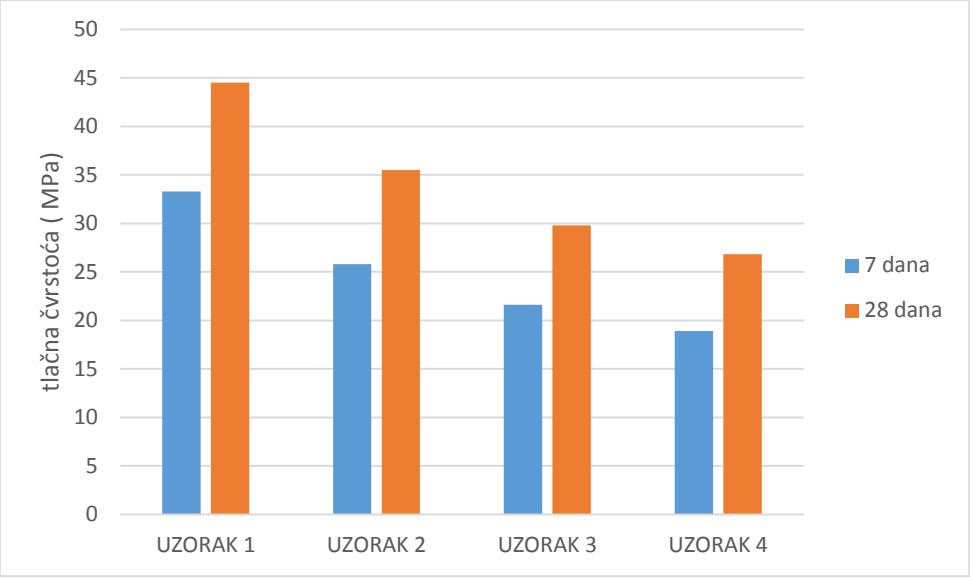
oznaka	Masa [g]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Volumen [mm^3]	Gustoća [kg/m^3]
UZORAK 1	7936,4	151	150	150	3397500	2336,0
UZORAK 2	7807,4	151,5	150	150	3408750	2290,4
UZORAK 3	7708,7	151,6	150	150	3411000	2260,0
UZORAK 4	7718,6	150,5	150	150	3386250	2279,4

Tablica 22. *Gustoća uzoraka na 28 dana*

oznaka	Masa [g]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Volumen [mm^3]	Gustoća [kg/m^3]
UZORAK 1	7932,6	151,5	150	150	3408750	2327,1
UZORAK 2	7869,8	151,3	150	150	3404250	2311,8
UZORAK 3	7739,5	151,3	150	150	3404250	2273,5
UZORAK 4	7793,6	151	150	150	3397500	2293,9

Tablica 23. *Tlačne čvrstoće f_c i sila u trenutku loma F nakon 7 i 28 dana*

Oznaka	nakon 7 dana			nakon 28 dana		
	Masa [g]	f_c [MPa]	F [kN]	Masa [g]	f_c [MPa]	F [kN]
UZORAK 1	7936,4	33,3	748,3	7932,6	44,5	1001,2
UZORAK 2	7807,4	25,8	580,3	7869,8	35,5	799,2
UZORAK 3	7708,7	21,6	486,4	7739,5	29,8	671,4
UZORAK 4	7718,6	18,9	426,1	7793,6	26,8	602,7



Slika 4.19. *Tlačne čvrstoće uzoraka betona nakon 7 i 28 dana*

Prema rezultatima ispitivanja sa Slike 4.19. najveću tlačnu čvrstoću ostvario je uzorak 1, običan beton. Nakon 28 dana uzorak 2 ima oko 20% nižu tlačnu čvrstoću od uzorka 1, uzorak 3 oko 33 %, a uzorak 4 čak 40% nižu tlačnu čvrstoću od uzorka 1.

Uzorci 2 i 3 sadrže jednaku količinu cementa. Može se primijetiti da uzorak 3 ima nešto nižu tlačnu čvrstoću nego uzorak 2. Razlog tome je što uzorak 3 sadrži veću količinu vode koja mu je dodavana prilikom pripreme mješavine.

Najniža tlačna čvrstoća zabilježena je kod uzorka 4 kojemu je 20% cementa zamijenjeno crvenim prahom, duplo više nego uzorku 2. Uspoređujući ta dva uzorka zaključuje se da veći udio recikliranog betonskog otpada u betonu rezultira nižim tlačnim čvrstoćama.

Metoda ultrazvuka

Metoda ultrazvuka je nerazorna metoda ispitivanja koja se u građevinarstvu primjenjuje za određivanje homogenosti betona, procjenu čvrstoće u konstrukciji, praćenje napredovanja čvrstoće, procjenu oštećenosti betona, utvrđivanje pukotina i gnijezda.
U ovom radu metoda ultrazvuka korištena je za određivanje dinamičkog modula elastičnosti:

$$E_{din} = \frac{v^2 \times \rho \times (1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}$$

gdje je:
v - brzina ultrazvučnog vala [m/s]
ρ – gustoća betona [kg/m3]
μ – poissonov koeficijent [μ =0.2]

Postupak ispitivanja

Generator impulsa preko sonde odašiljača predaje betonu impuls uzdužnih oscilacija koji se prolaskom kroz beton duljine L u sondi prijemniku pretvara u električni impuls. [15]



Slika 4.20. *Ispitivanje ultrazvukom* [*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]

Bilježi se vrijeme prolaska impulsa T od sonde odašiljača do sonde prijemnika.

Brzina širenja ultrazvučnog vala izračuna se prema formuli:

$$v = \frac{L}{T}$$

Rezultati ispitivanja

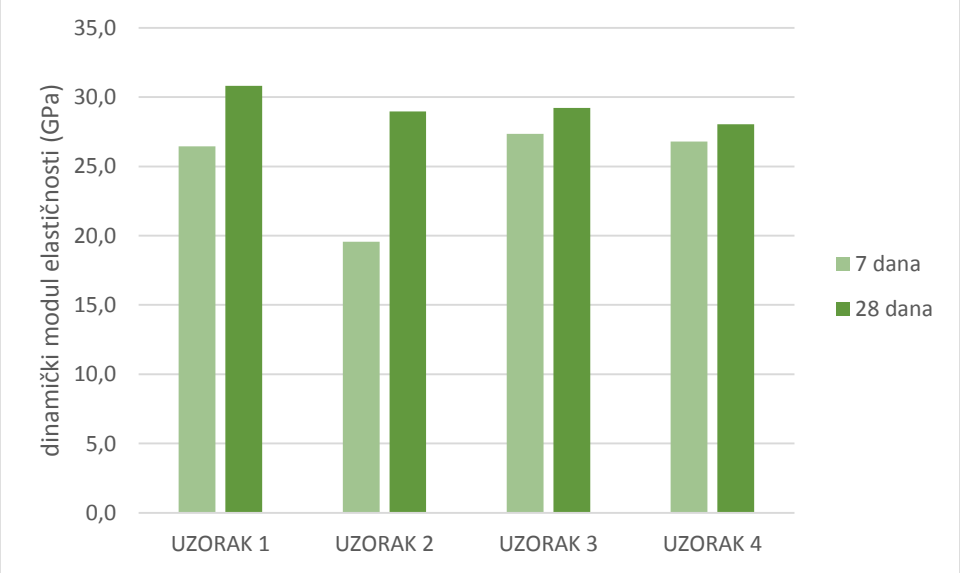
Ispitivanje se provodi nakon 7 i 28 dana.

Uzorak betona je kocka brida 15 cm. Vrijeme prolaska impulsa T mjerilo se u tri točke uzorka betona. Rezultat mjerenja predstavlja srednju vrijednost zabilježenih vrijednosti.

Izračunati dinamički moduli elastičnosti uzoraka betona nakon 7 i 28 dana prikazani su u Tablici 24. i na Slici 4.21.

Tablica 24. *Dinamički modul elastičnosti nakon 7 i 28 dana*

Starost betona - 7 dana						
oznaka	L [mm]	T [µs]	v [m/s]	Gustoća [kg/m^3]	µ	E_{din} [GPa]
UZORAK 1	150	42,3	3546,1	2336,0	0,2	26,4
UZORAK 2	150	48,7	3080,1	2290,4	0,2	19,6
UZORAK 3	150	40,9	3667,5	2260,0	0,2	27,4
UZORAK 4	150	41,5	3614,5	2279,4	0,2	26,8
Starost betona - 28 dana						
oznaka	L [mm]	T [µs]	v [m/s]	Gustoća [kg/m^3]	µ	E_{din} [GPa]
UZORAK 1	150	39,1	3836,3	2327,1	0,2	30,8
UZORAK 2	150	40,2	3731,3	2311,8	0,2	29,0
UZORAK 3	150	39,7	3778,3	2273,5	0,2	29,2
UZORAK 4	150	40,7	3685,5	2293,9	0,2	28,0



Slika 4.21. *Dinamički modul elastičnosti nakon 7 i 28 dana*

Najveći dinamički modul elastičnosti nakon 7 dana imao je uzorak 3 sa bijelim filerom, a nakon 28 dana uzorak 1, običan beton. Nakon 28 dana vrijednosti kod svih uzoraka su ujednačene i kreću se od 28 do 31 GPa.
Odstupanje u rezultatima je vidljivo kod uzorka 2 nakon 7 dana što se može objasniti pogreškom u mjerenju.

5. ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu ovog rada ispitan je utjecaj recikliranog građevinskog otpada kao dodatka betonu na njegova svojstva u svježem i očvrslom stanju. U svrhu ispitivanja napravljene su 4 pokusne mješavine. Prva mješavina bila je kontrolna mješavina koja se sastojala od cementa, agregata frakcija 0-4, 4-8 i 8-11,2 mm, vode i superplastifikatora. Ostalim mješavinama dio cementa, u određenim količinama, bio je zamijenjen mljevenim recikliranim građevinskim otpadom. Na raspolaganju smo imali dva praha, crveni i bijeli, koji su bili podijeljeni u dvije frakcije. U radu je korištena frakcija od 0,04 - 0,5 mm. Druga mješavina sadržavala je crveni prah u količini od 10% količine cementa, treća mješavina bijeli prah u količini od 10% količine cementa, a četvrta mješavina crveni filer u količini od 20% količine cementa.
U svježem stanju ispitana je konzistencija uzoraka betona metodom slijeganja, metodom pomoću Vebe aparata i metodom rasprostiranja. Uzorak 3 koji je sadržavao bijeli filer je imao najbolju obradivost kod svih metoda ispitivanja. Tom uzorku je dodana najveća količina vode tijekom spravljanja mješavine. Ostali uzorci imali su nešto niže vrijednosti nego uzorak 3, ali je i kod njih primijećena dosta dobra obradivost. Kod uzoraka koji su sadržavali crveni prah zabilježene su niže vrijednosti parametara konzistencije koje su se smanjivale povećanjem njegova udjela u betonu. Iz toga se naslućuje da vrsta i količina recikliranog otpada utječe na konzistenciju betona u svježem stanju.
U očvrslom stanju ispitana je tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti uzoraka nakon 7 i 28 dana. Najveću tlačnu čvrstoću nakon 7 dana postigao je uzorak 1, običan beton što se nije promijenilo ni nakon 28 dana. Prema rezultatima ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 28 dana, uzorak 2 ima oko 20% nižu tlačnu čvrstoću od uzorka 1, uzorak 3 oko 33 %, a uzorak 4 čak 40% nižu tlačnu čvrstoću od uzorka 1. Iako uzorci 2 i 3 sadrže jednaku količinu cementa,uzorak 3 ima niže vrijednosti tlačne čvrstoće, što je i očekivano jer mu je dodana veća količina vode. Najniže vrijednosti tlačne čvrstoće očitane se kod uzorka 4, uzorak kojemu je 20 % cementa

zamijenjeno crvenim prahom recikliranog betona. Najveći dinamički modul elastičnosti nakon 7 dana imao je uzorak 3 sa bijelim filerom. Nakon 28 dana svi uzorci imaju približne vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti koje se kreću u intervalu 28-31 GPa.

Iz provedenog ispitivanja dolazi se do zaključka da bi se dio cementa mogao zamijeniti recikliranim betonskim otpadom, ali kod betona nižih marki i kod slabije izloženih klasa. Utjecaj recikliranog betona na svojstva svakako bi trebalo dodatno ispitati te pronaći načine kako da se podešavanjem određenih faktora koji utječu na tlačnu čvrstoću, dobije beton približne tlačne čvrstoće kao kod običnog betona.

LITERATURA

[1] Jurić, E.: *Svojstva betona sa recikliranim betonskim agregatom*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet,2014

[2] PRIMJENA RECIKLIRANOG AGREGATA IZ GRAĐEVINSKOG OTPADA
Dostupno na:
http://www.igh.hr/CONWAS/www/Primjena_HR.pdf

[3]Štrimer N.: *Utjecaj građevinskog materjala na okoliš*, Radovi Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Požegi, 1(2012), str. 293-311

[4]Kesegić I., Bjegović D., Netinger I.: *Utjecaj reciklirane opeke kao agregata za beton*, Građevinar 61, 2009.,str. 15-22

[5]Strinić Ž.: *Samozbijajući beton s opekarskim lomom*, Diplomski rad, Građevinski fakultet Osijek,2016.

[6] Pistilli M. F., Peterson C. F., Shah S.P.: *Properties and possible recycling of solid waste from ready-mix concrete*, Cement and Concrete Research, Vol 5., No. 3., 1975., str. 249-260

[7] Topçu I.B., Günçan N. F.: *Using waste concrete as aggregate*, Cement and Concrete Research, Vol.25, No. 7, 1995, str.1385-1390

[8] Juradin S., Grbeša K.: *Influence of ground clay brick on the properties of the fresh and hardened SCLC*, 21st Czech Concrete Day, 2014

[9] Mesci B., Çoruh S., Ergun N. O.: *Use of Selected Industrial Waste Materials in Concrete Mixture*, Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol.30, No.3, October 2011,str.368-376

[10] Tehnička uputa za cement
Dostupno na:
http://www.cemex.hr/Userfiles/pdf/Tehnicke%20upute/CEM%20III%20A%2042,5%20N%20LH-SvJuraj.pdf (3.8.2016.)

[11] Tehnički list za MasterGleniumSky 629
Dostupno na:
http://www.agenziagdl.it/file/schede/GLENIUM%20SKY%20629%20sett-09%20BASF.pdf
(3.8.2016.)

[12] Krstulović,P.: *Svojstva i tehnologija betona*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Institut Građevinarstva Hrvatske, Split, 2000

[13]Slika 4.5.
Dostupno na: http://orcus.hr/vibrator-za-beton/ (3.8.2016.)

[14] Slika 4.8.
Dostupno na:
http://www.formtest.de/de/laborgeraete/frischbetonpruefung/konsistenzbestimmung-am-frischbeton.php (3.8.2016.)

[15] http://www.gfos.unios.hr/portal/images/stories/studij/sveucilisni-diplomski/ispitivanje-konstrukcija/nerazorne-metode.pdf (3.8.2016)