

Primljen / Received: 8.1.2015.

Ispravljen / Corrected: 31.5.2015.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2015.

Dostupno online / Available online: 10.3.2016.

Beton s bakrenom zgurom i dodatkom polipropilenskih vlakana

Autori:



Vijayaprabha Chakrawarthy, mag.ing.aedif.
Sveučilište Alagappa Chettiar, Indija
Građevinski fakultet
vijayaprabha.struct@gmail.com



Doc.dr.sc. **Brindha Darmar**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Thiagarajar, Indija
Građevinski fakultet
dbrindha@yahoo.co.in



Ashokkumar Elangovan, mag.ing.aedif.
Indijski Institute za tehnologiju - Madras, Indija
ashokkumar.structural@gmail.com

Izvorni znanstveni rad

Vijayaprabha Chakrawarthy, Brindha Darmar, Ashokkumar Elangovan

Beton s bakrenom zgurom i dodatkom polipropilenskih vlakana

Projektiranje održivog betona postao je glavni zahtjev u današnjoj industriji betona. U ovom radu je prikazan i analiziran dio opsežnog istraživačkog projekta koji je usmjeren na istraživanje mogućnosti korištenja bakrene zgre (eng. *copper slag* - CS) i polipropilenskih (PP) vlakana (eng. *polypropylene fibre*). Ispitivanja su provedena s ciljem utvrđivanja obradljivosti, gustoće, tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće i svojstava mikrostrukture betona te granične nosivosti armiranobetonskih greda izrađenih od takvog betona.

Ključne riječi:

bakrena zgura, polipropilenska (PP) vlakna, gospodarenje otpadom, mehanička svojstva, mikrostruktura betona

Original scientific paper

Vijayaprabha Chakrawarthy, Brindha Darmar, Ashokkumar Elangovan

Copper slag concrete admixed with polypropylene fibres

A sustainable concrete design has become an imperative requirement for the present-day concrete industry. A part of an extensive research project aimed at studying possibilities for using copper slag (CS) and polypropylene (PP) fibres in concrete is presented and analysed. Measurements were conducted to investigate the workability, density, compressive strength, tensile strength, and micro-structural properties of concrete, as well as the ultimate load carrying capacity of reinforced-concrete beams made of this type of concrete.

Key words:

copper slag, polypropylene (PP) fibres, waste management, mechanical properties, concrete microstructure

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Vijayaprabha Chakrawarthy, Brindha Darmar, Ashokkumar Elangovan

Beton mit Kupferschlacke und Zusatz von Polypropylenfasern

Die Ausführung nachhaltigen Betons ist in der heutigen Betonindustrie zu einer der Hauptanforderungen geworden. In dieser Arbeit wird ein Teil eines aufwendigen Projekts dargestellt und analysiert, das sich mit Untersuchungen zur möglichen Anwendung von Kupferschlacke (eng. *copper slag* - CS) und Polypropylenfasern (eng. *polypropylene fibre*) befasst. Die Untersuchungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, die Bearbeitbarkeit, die Dichte, die Druck- und Zugfestigkeit und die Eigenschaften der Mikrostruktur des Betons zu ermitteln, sowie die Tragfähigkeit von Stahlbetonträgern, die aus diesem Beton hergestellt sind, zu bestimmen.

Schlüsselwörter:

Kupferschlacke, Polypropylenfasern, Abfallwirtschaft, mechanische Eigenschaften, Betonmikrostruktur

1. Uvod

U industriji proizvodnje bakra godišnje se proizvede 0,4 milijuna tona bakra te se pri toj proizvodnji generira 1,4 milijuna tona bakrene zgre i 0,41 milijun tona gipsa. Povećanje troškova pri postupanju s otpadom, bilo spaljivanjem ili odlaganjem na odlagališta, osiromašivanje izvora prirodnih sirovina i nužnost za osiguranjem održivog razvoja osnažili su potrebu za ponovnom upotrebom različitih materijala kao zamjene za prirodne sirovine [1]. Udio triju oksida (silicijev, aluminijev i željezni) u bakrenoj zgri iznosi 89 %, što premašuje 70 %-tni zahtjev za prirodne pucolane [2]. Bakrena zgura je prikladna zamjena za obični portland cement jer posjeduje jednaku pa čak i veću čvrstoću [3]. Osim toga, bakrena zgura ima mehanička svojstva povoljna za agregat, poput odličnih trajnosnih svojstava, dobru otpornost na abraziju i dimenzionalnu stabilnost [4], a razina ispiranja teških metala je unutar dopuštenih granica [5].

Prilikom zamjene cementa, mljevenje bakrene zgre zahtijeva približno samo 10 % energije potrebne za proizvodnju portland cementa, što dovodi do smanjenja sveukupnog troška gradnje [6]. Povećanjem udjela bakrene zgre u vezivnom materijalu smanjuje se mehanička čvrstoća očvrstulih mortova, osobito u ranoj starosti [7] zbog niskog udjela CaO koji usporava proces hidratacije [8]. Najveći porast čvrstoće se događa u periodu nakon 28 - 90 dana starosti uzorka [9]. Dugoročni rezultati su pokazali jednaku ili veću čvrstoću uzorka s bakrenom zgurom, bez narušavanja drugih svojstava [10]. Jedan izvor literature navodi da se modificirano projektiranje sastava mješavina može primijeniti uvođenjem i množenjem konstante s ciljanom vrijednosti srednje čvrstoće te korekcijom količine vode kako bi se ostvarilo ravnomjerno, stalno slijeganje betona [11]. Zamjena bakrenom zgurom u iznosu od 40 % pokazuje veće tlačne i vlačne čvrstoće nakon 28 i 56 dana starosti za mješavine betona razreda C25/30 i C30/37 [12].

Mješavina letećeg pepela, bakrene zgre i granitnog praha pruža mogućnost postizanja visokih čvrstoća pri 28 dana starosti, primjerice 51 N/mm² za mješavinu betona razreda C25/30 [13].

Mješavina letećeg pepela, silicijske prašine, bakrene zgre i vlakana ponaša se kao hibridni materijal koji pridonosi povećanju žilavosti pri savijanju, indeksa duktilnosti i granične nosivosti [14]. Bakrena zgura u udjelu zamjene do 50 % može se upotrijebiti i za žbukanje vertikalnih površina, a u udjelu zamjene do 25 % za žbukanje horizontalnih površina [15]. Nedavna istraživanja su se usredotočila na ispitivanje hibridnih materijala i to na bazi bakrene zgre s dodatkom silicijske prašine, letećeg pepela, granitnog praha i vlakana. U sklopu ovog istraživanja ispitivan je utjecaj kombinacije bakrene zgre i polipropilenskih vlakana na mehaničko ponašanje i savijanje armiranobetonskih greda.

2. Eksperimentalno istraživanje

2.1. Materijali i projektiranje sastava mješavina

Za potrebe ispitivanja provedenih u sklopu ovog istraživanja korišten je obični portland cement OPC 43 prema normi IS

8112-2013 [16] (CEM I 42,5N prema EN 197-1). Kao zamjena za sitni agregat korištena je bakrena zgura u skladu s normom ASTM C 618-92a [17]. Kemijski sastav cementa i bakrene zgre [18] uspoređen je u tablici 1.

Polipropilenska vlakna su dodana kako bi se poboljšala vlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, žilavost i udarna čvrstoća te modovi sloma betona [19]. Tablica 2. prikazuje svojstva polipropilenskih vlakana u skladu s normom ASTM C 1116-tip III [20].

Slika 1. prikazuje bakrenu zguru i PP vlakna. Prosijavanje materijala je provedeno prema normi IS383-1970 [21] kako bi se odredio granulometrijski sastav te napravila usporedba sa zahtjevima granulacije danima u relevantnim normama. Krivulje prosijavanja (slika 2.) pokazuju da svi postoci zamjene sitnog agregata bakrenom zgurom imaju usporedivu granulaciju između graničnih granulacijskih zona I i II, koje se koriste za određivanje udjela krupnog agregata u betonu.

Projektiranje sastava mješavine betona razreda C25/30 provedeno je prema IS10262-2009 [22]. Omjer mješavine iznosi 1:1,71 i 1:3,70, a vodo-cementni omjer iznosi 0,41. Pripremljene su armiranobetonske grede dimenzija 3000 x 230 x 300 mm kako bi se ispitala svojstva pri savijanju i progib greda pripremljenih od betona s dodatkom bakrene zgre i PP vlakana. Poprečni presjek armiranobetonskih greda je prikazan na slici 3.

Tablica 1. Kemijski sastav cementa i bakrene zgre

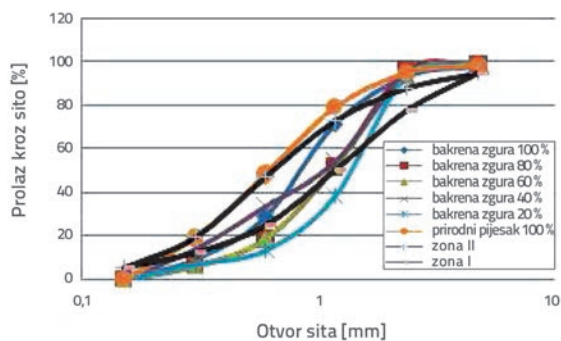
Spojevi	Cement [%]	Bakrena zgura [%]
SiO ₂	20,85	33,05
Al ₂ O ₃	4,78	2,79
Fe ₂ O ₃	3,51	53,45
CaO	63,06	6,06
MgO	2,32	1,56
SO ₃	2,48	1,89
K ₂ O	0,55	0,61
Na ₂ O	0,24	0,28
TiO ₂	0,25	0
Na ₂ O	0,05	0,06
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ +CaO	92,2	95,35



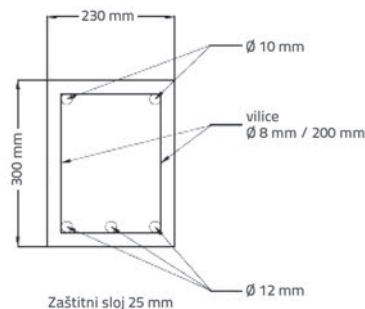
Slika 1. Korišteni materijali: PP vlakna (lijevo), bakrena zgura (desno)

Tablica 2. Svojstva polipropilenskih vlakana

Proizvod	sintetička polipropilenska vlakna
Polimer	100 % homopolimerni polipropilen
Proizvodnja	vlakna različitih dimenzija
Duljina	raspon između 10 mm i 20 mm.
Specifična težina	0,91
Točka taljenja	162 - 164 °C
Reaktivnost	inertna: lužine, kiseline i cementni beton ne utječu do temperature 110 °C
Reakcija s betonom	nema reakcije, inertni materijal služi kao mikroarmatura
Čvrstoća	500 - 550 N/mm ²
Duljina vlakana	10 - 12 mm
Produljenje	15 - 18 %
Debljina	35 - 40 μ



Slika 2. Granulometrijski sastav



Slika 3. Poprečni presjek armiranobetonske grede

2.2. Miješanje i ugradnja betona

Pripremljeno je 17 mješavina s različitim udjelima bakrene zgre i PP vlakana. Svaka mješavina ima različitu oznaku. Bakrenom zgurom je zamijenjen prirodni pijesak (20 %, 40 %, 60 % i 80 %), a PP vlakna su dodana u četiri različita postotka na ukupni volumen betona (0,2 %, 0,4 %, 0,6 % i 0,8 %). Količine materijala koje odgovaraju pojedinim mješavinama prikazane su u tablici 3. Ispitivana svojstva, broj uzoraka, dimenzije kalupa i starost uzoraka prilikom ispitivanja su prikazani u tablici 4. Drobljeni agregat, pijesak, bakrena zguza i cement su miješani prema sljedećem redosljedu. U mješavinu

je dodan superplastifikator Conplast SP430 u skladu s normom IS 9103:1999, na bazi sulfoniranog naftalena [23] te je uzeta u obzir proračunana količina vode. Kada su sastojci izmiješani, dodano je oko 80 % ukupne količine vode u miješalicu te je miješanje nastavljeno sljedeće tri minute. Nakon slučajne raspodjele PP vlakana dodana je preostala količina vode. Svi sastojci su zatim miješani još dvije minute u miješalicu za beton velike brzine kako bi se postigla jednolika raspodjela materijala. Obradljivost betona je ispitana za svaku mješavinu posebno, prije ugradnje betona u kalupe. Kalupi su nauljeni i učvršćeni prije ugradnje betona. Nakon ugradnje, beton je zbijan štapom. Gornja površina uzoraka u kalupima je zaglađena. Nakon 24 sata uzorci su izvađeni iz kalupa i njegovani zahtijevano vrijeme. Uzorci betona te kalup za grede s postavljenom armaturom prikazani su na slici 4.

2.3. Metode

Hidraulička preša nosivosti 2000 kN upotrijebljena je za ispitivanje tlačne čvrstoće betonskih kocki i vlačne čvrstoće betonskih valjaka cijepanjem. Sve su grede projektirane kao poddimenzionirane u pogledu količine armature te su izložene savijanju u četiri točke. Opterećenja od 500 kN nanošena su uz



Slika 4. Pripremljene betonske kocke, valjci i kalup za betonsku gredu s postavljenom armaturom

Tablica 3. Sastav mješavina

Redni broj	Oznaka mješavine	CS	PPF	C	FA	CS	CA	WC	SP	PPF
		[%]		[kg/m ³]						
1	CS11	0	0	363	620	0	1343	148,8	1,81	0
2	CS22	20	0,2	363	495	177	1343	148,8	1,81	1,82
3	CS23		0,4	363	494	177	1343	148,8	1,81	3,64
4	CS24		0,6	363	493	176	1343	148,8	1,81	5,46
5	CS25		0,8	363	492	176	1343	148,8	1,81	7,28
6	CS32		40	0,2	363	371	354	1343	148,8	1,81
7	CS33	0,4		363	371	354	1343	148,8	1,81	3,64
8	CS34	0,6		363	370	353	1343	148,8	1,81	5,46
9	CS35	0,8		363	369	352	1343	148,8	1,81	7,28
10	CS42	60		0,2	363	247	531	1343	148,8	1,81
11	CS43		0,4	363	247	530	1343	148,8	1,81	3,64
12	CS44		0,6	363	246	529	1343	148,8	1,81	5,46
13	CS45		0,8	363	246	528	1343	148,8	1,81	7,28
14	CS52		80	0,2	363	124	708	1343	148,8	1,81
15	CS53	0,4		363	124	707	1343	148,8	1,81	3,64
16	CS54	0,6		363	123	705	1343	148,8	1,81	5,46
17	CS55	0,8		363	123	704	1343	148,8	1,81	7,28

CS - Bakrena zgura, PPF - Polipropilenska vlakna, C - Cement, CA - Krupni agregat, WC - omjer vode i cementa, SP - Superplastifikator

Tablica 4. Ispitivana svojstva, broj uzoraka, starost uzoraka pri ispitivanju, dimenzije i metode

Ispitivano svojstvo	Broj uzorka	Starost uzoraka pri ispitivanju [dani]	Dimenzije [mm]	Norme
Konzistencija slijeganjem	----	---	---	IS7320-1974 [24]
Gustoća u očvrslom stanju	17	28	150 x 150 x 150	---
Tlačna čvrstoća	102	7,28	150 x 150 x 150	IS516-1959 [25]
Vlačna čvrstoća cijepanjem	52	28	150 x 300	IS5816-1999 [26]
Ponašanje AB grede pri savijanju	4	28	3200 x 230 x 300	IS456:2000 [27]
Svojstva mikrostrukture	17	28	10 grama uzorka prosijano kroz sito otvora 90 mikrona	----

pomoć hidrauličnog piston. Porast opterećenja iznosio je 0,1 N/mm², a ostvaren je pritiskom hidrauličnog piston preko kojeg je opterećenje preneseno na podložak koji je na dva mjesta bio oslonjen na armiranobetonsku gredu. Mjeren je progib u sredini raspona i u trećini raspona pomoću LVDT senzora (eng. *Linear Variable Differential Transducer - LVDTs*) preciznosti ± 0,01 mm.

3. Rezultati i rasprava

3.1. Fizikalna svojstva i analiza svojstava betona u svježem stanju

Nizak udio CaO u bakrenoj zguri upućuje na slaba cementna svojstva (svojstvo vezivanja), ali postoji potencijal za stvaranjem

visokovrijednog pucolana zbog visoke koncentracije silicijevog, aluminijevog i željeznog oksida.

Fizikalna svojstva prikazana u tablici 5. pokazuju da bakrena zgura ima veliku specifičnu težinu (3,56) koja je veća u usporedbi s pijeskom (2,51), ali vrijednost apsorpcije vode za bakrenu zguru i pijesak iznosi približno 0,15 %, odnosno 1,25 %. U tablici 6. može se vidjeti da beton izrađen s većim udjelom bakrene zgre ima veću gustoću, i to u rasponu od 2500 kg/m³ do 2800 kg/m³.

Međutim, treba napomenuti da se povećanjem količine vlakana smanjuje gustoća betona. S druge strane, zbog slabe apsorpcije vode kod bakrene zgre, količina se slobodne vode u betonskoj mješavini povećava s povećanjem udjela bakrene zgre. Treba također napomenuti da veći udio bakrene zgre može

Tablica 5. Svojstva agregata

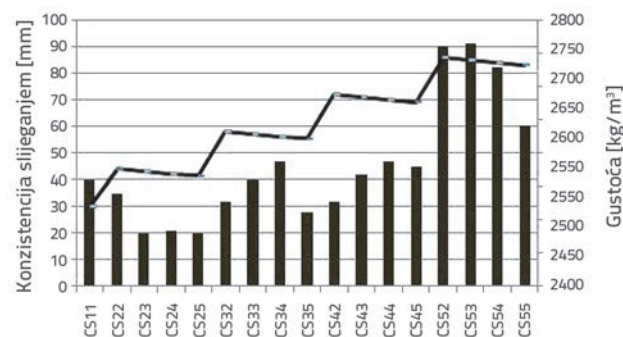
Vrsta agregata	Specifična težina	Volumenska masa [g/cm ³]	Modul finoće	Apsorpcija vode [%]
Pijesak	2,51	1,42	2,74	1,25
Bakrena zgura	3,56	1,75	3,51	0,15
Krupni agregat	2,85	1,38	7,61	0,92

uzrokovati pojavu segregacije i otpuštanja vode iz betona, što u konačnici može imati nepovoljan utjecaj na svojstva betona [28]. Sve se to zasigurno može spriječiti dodavanjem PP vlakana koja kontroliraju otpuštanje slobodne vode iz betona.

Iz tablice 6. može se zaključiti da su vrijednosti konzistencije slijevanjem za beton s udjelom bakrene zgre od 40 % i 60 %, bile u pravilu iste kada je u mješavini povećan udio PP vlakana sa 0,2 % na 0,6 %. Trend povećanja konzistencije slijevanjem može se uočiti na slici 5.

Mrežasta struktura vlakana smanjuje segregaciju i tok slobodne vode u betonu. Vlakna upijaju više cementne paste zbog velike specifične površine, a time se smanjuje tečenje betona.

Rezultati ispitivanja konzistencije slijevanjem, prikazani u tablici 4., pokazuju da u betonskoj mješavini s dodatkom 80 % bakrene zgre nije zabilježena pojava segregacije. PP vlakna (u udjelu od 0,8 %) stvaraju gustu mješavinu koja je teško obrađiva, a vlakna su vidljiva na površini i unutar betonske mješavine (tzv. stvaranje gnijezda).

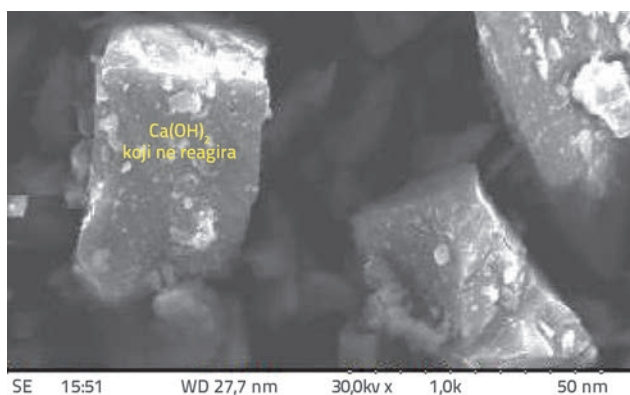


Slika 5. Usporedba rezultata ispitivanja konzistencije slijevanjem i gustoće mješavine

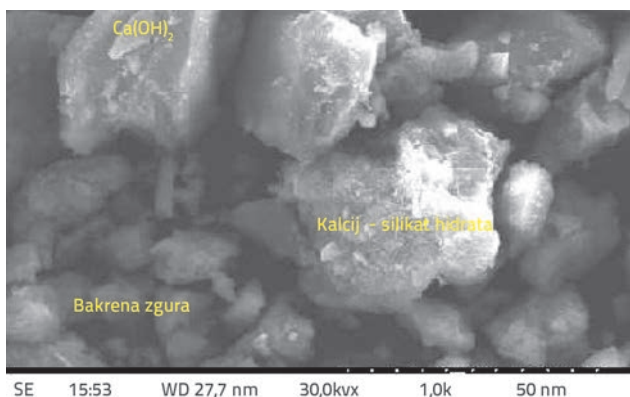
3.1. Svojstva mikrostrukture

Ključna reakcija u razvoju čvrstoće betona je hidracija trikalcijskog silikata (C₃S). Hidracija C₃S proizvodi višak kalcijeva hidrata (CH) koji može utrošiti bakrena zgura. Bakrena zgura proizvodi dodatne silikatne ione (S) koji reagiraju sa CH i stvaraju više C-S-H (kalcijev silikatni hidrat) gela [29]. Ispitivanje pretražnim elektronskim mikroskopom (eng. *Scanning Electron Microscopy* - SEM), (slike 6. do 11.) pokazalo je da se gušća struktura može prepoznati kod betonske mješavine s bakrenom zgurom u usporedbi sa strukturom kontrolne mješavine. Gustoća strukture betona može biti povezana s pucolanskim reakcijama i svojstvom punjenja koje posjeduje bakrena zgura. Budući da bakrena zgura ima srednju pucolansku aktivnost, neizbježna je pojava nehidriranog

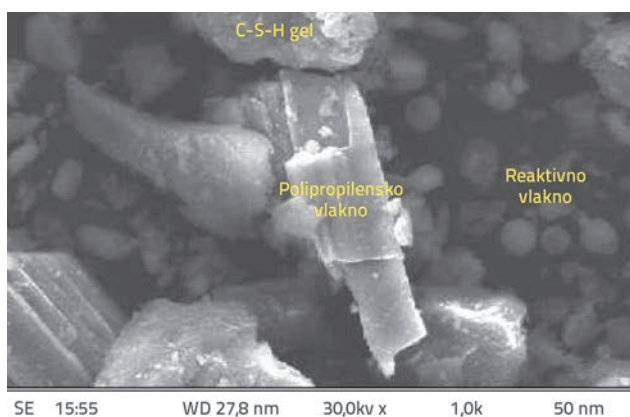
Ca(OH)₂. Gušća struktura upućuje na jaku vezu cementne paste i matrice agregata, a reagirane komponente ispunjavaju pore između agregata. Na SEM slikama se vidi da mješavina sa 40 % bakrene zgre i 0,4 % PP vlakana ima gušću strukturu u odnosu na mješavinu s drugačijim postocima zamjene i dodatka.



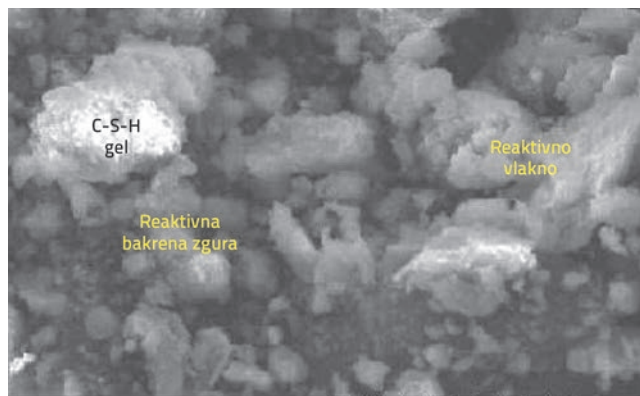
Slika 6. Kontrolni beton (CS11)



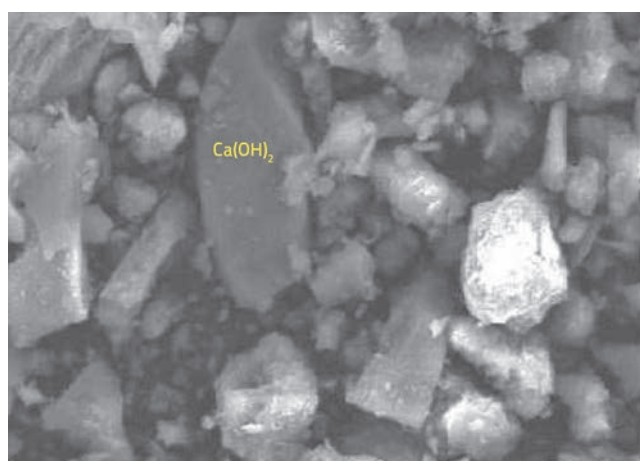
Slika 7. Bakrena zgura 20 %, PP vlakna 0,2 % (CS21)



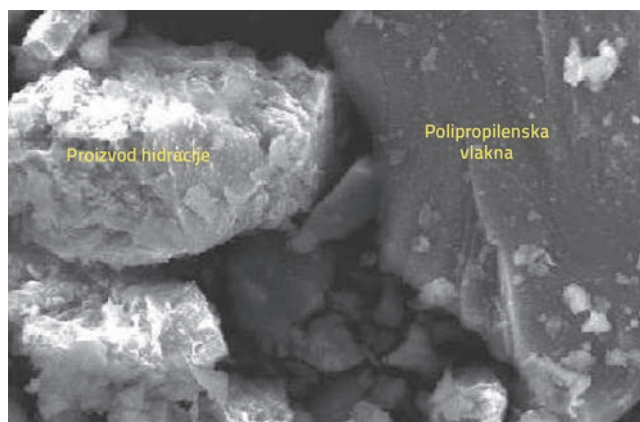
Slika 8. Bakrena zgura 20 %, PP vlakna 0,4 % (CS22)



Slika 9. Bakrena zguza 20 %, PP vlakna 0,8 % (CS24)



Slika 10. Bakrena zguza 40 %, PP vlakna 0,4 % (CS32)



Slika 11. Bakrena zguza 80 %, PP vlakna 0,4 % (CS42)

3.2. Tlačna čvrstoća

Tablica 6. obuhvaća vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka pri 7 i 28 dana starosti, te vlačnu čvrstoću uzoraka cijepanjem ispitani pri

28 dana starosti. Ciljana srednja čvrstoća betona je označena s f_{ck}' :

$$f_{ck}' = f_{ck} + 1,65s$$

gdje je

f_{ck}' - ciljana srednja čvrstoća nakon 28 dana starosti uzorka [N/mm^2]

f_{ck} - karakteristična tlačna čvrstoća nakon 28 dana starosti uzorka [N/mm^2]

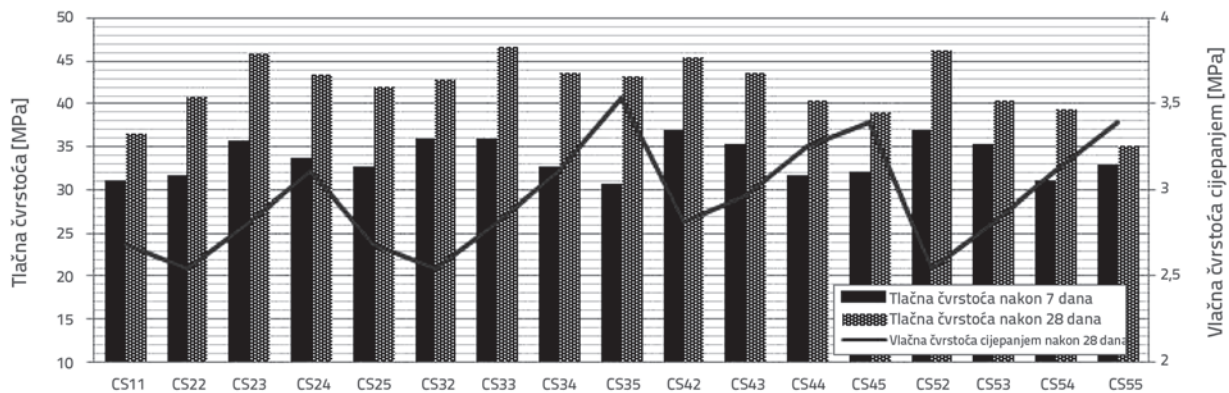
s - standardna devijacija [N/mm^2].

Veličina standardne devijacije za beton razreda C25/30 uzeta je kao 5 MPa prema normi IS10262-2009.

Općenito, veći udio zgre smanjuje ranu čvrstoću betona, ali dovodi do povećanja njegove konačne čvrstoće. Iz dobivenih rezultata se može zaključiti da mješavina s 40 % bakrene zgre postiže visoku ranu čvrstoću (38,26 MPa) pri 7 dana starosti, što odgovara 90 % ciljane vrijednosti srednje čvrstoće betona kada se kombinira s dodatkom PP vlakana. Mješavina CS33 je postigla čvrstoću od 46,67 MPa nakon 28 dana, što je za 22,1 % veća vrijednost od ciljane srednje čvrstoće. Veće vrijednosti čvrstoće betona s bakrenom zgurom ostvarene su zbog dobre kohezije između agregata i cementne paste. Kombinacija bakrene zgre i PP vlakana dovodi do ravnomjerne raspodjele vlakana, što rezultira smanjenjem pora u betonu.

No, velika količina PP vlakana rezultira lošijom kvalitetom betona. Optimalni udio PP vlakana u betonu dobiven je ispitivanjem tlačne čvrstoće i on iznosi 0,4 %. Osim toga, potrebno je uložiti veliki trud kako bi se dobila homogena mješavina bez pojave segregacije i stvaranja gnijezda PP vlakana. PP vlakna se ponašaju kao armatura između cementa i agregata. Budući da je zbog vlakana beton glađi i duktilniji, u prisutnim modovima sloma uzoraka nije zabilježeno ljuštenje betona. Osim toga, PP vlakna sprječavaju širenje pukotina na površini betona. Kada se kombiniraju s bakrenom zgurom, postiže se dobra završna obrada površine. U mješavini s udjelom do 50 % bakrene zgre i 0,4 % PP vlakana, uz prisutnu slobodnu vodu, dobiva se neporozni beton dobre obradljivosti s ravnomjernom raspodjelom čestica, lak za ugradnju, zbijanje i završnu obradu. Međutim, veća količina slobodne vode smanjuje tlačnu čvrstoću betona.

Poznato je da vlakna doprinose vlačnoj čvrstoći [19, 30]. Maksimalna vlačna čvrstoća od 3,537 N/mm^2 izmjerena je u uzorku CS35, što je za 31,58 % veće od čvrstoće kontrolnog uzorka. Za svaki ispitani postotak zamjene bakrenom zgurom, PP vlakna u omjeru od 0,8 % ostvarila su najveću vlačnu čvrstoću. Porast vlačne čvrstoće u rasponu je između 16 i 32 % u usporedbi s kontrolnom mješavinom. Pri udjelima PP vlakana iznad 0,6 % primijećene su poteškoće u rukovanju. Stoga, može se zaključiti da količine PP vlakana do 0,4 % osigurava zadovoljavajuće mehaničko ponašanje kada se kombinira s bakrenom zgurom.



Slika 12. Varijacije tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem betona

Tablica 6. Svojstva svježeg i očvrstnalog betona

Oznaka mješavine	Bakrena zguza [%]	PP vlakna [%VF]	Konzistencija slijeganjem [mm]	Gustoća [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [MPa]		Vlačna čvrstoća [MPa]
					nakon 7 dana	nakon 28 dana	nakon 28 dana
CS11	0	0	40	2520,07	31,11	36,59	2,68
CS22	20	0,2	35	2574,976	31,70	40,76	2,54
CS23		0,4	20	2571,636	35,71	45,91	2,82
CS24		0,6	21	2568,296	33,78	43,43	3,11
CS25		0,8	20	2564,966	32,59	41,91	2,68
CS32		0,2	32	2631,025	35,85	42,81	2,54
CS33	40	0,4	40	2627,572	36,00	46,67	2,82
CS34		0,6	47	2624,12	32,74	43,70	3,11
CS35		0,8	22	2620,678	30,67	43,11	3,53
CS42		0,2	32	2687,073	36,89	45,48	2,82
CS43	60	0,4	42	2683,508	35,26	43,70	2,97
CS44		0,6	47	2679,944	31,70	40,30	3,25
CS45		0,8	45	2676,389	32,15	38,96	3,39
CS52	80	0,2	90	2743,122	36,89	46,22	2,54
CS53		0,4	91	2739,445	35,26	40,44	2,82
CS54		0,6	82	2735,768	31,11	39,41	3,11
CS55		0,8	60	2732,101	32,89	35,11	3,39

3.3. Ponašanje armiranobetonskih greda izloženih savijanju

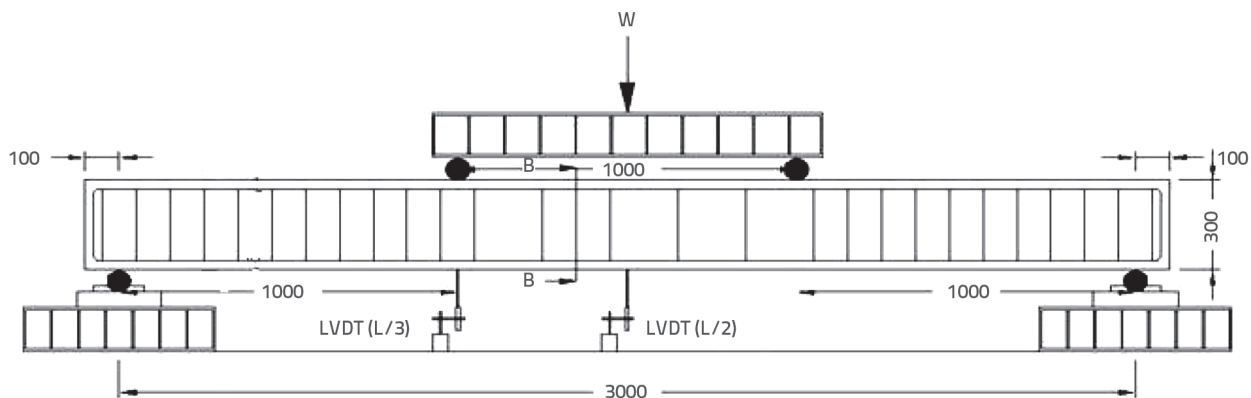
3.3.1. Početne pukotine i oblici pukotina

Četiri armiranobetonske grede su izložene savijanju u četiri točke (slika 13.) kako bi se odredila sila loma, progib u sredini raspona, progib u trećini raspona i oblici pukotina. Sve ispitne grede su prikazane na slici 14. Izgled pukotina se može vidjeti na slikama 15. do 18. Udio PP vlakana u svim gredama je iznosio 0,4 %. Greda s 20 % bakrene zguze počela je popuštati pri opterećenju od 37 kN, što je veća vrijednost u odnosu na vrijednosti dobivene

ispitivanjem ostalih greda. Širenje pukotina u vlačnoj zoni se povećavalo od dna prema vrhu grede. Pukotine su zadržale pravocrtno napredovanje prema tlačnoj zoni.

U usporedbi s kontrolnom gredom (CS11), opterećenje pri kojem su se pojavile početne pukotine u gredama CS23, CS33, CS43 bilo je veće za 71,42 %, 28,57 % i 14,28 %.

Krti lom uslijed savijanja je uočen na gornjoj površini kontrolne grede, dok u gredama s dodatkom bakrene zguze takav lom nije zabilježen. Djelomični lom odlamanjem može se vidjeti na gornjem dijelu kontrolne grede, a upućuje na odvajanje betona i tlačne armature. Lom odlamanjem je bio značajan, a posmične pukotine su uočene i izvan zone savijanja u kontrolnoj gredi.



Slika 13. Postav opterećenja za savijanje u četiri točke, dimenzije u mm

Tablica 7. Vrijednosti opterećenja pri lomu, progiba i krutosti

Oznaka grede	Opterećenje [kN]		Progib [mm]		Početna krutost [kN/mm]	Gračna krutost [kN/mm]	Energija indeks duktilnosti (P_u/P_x)	Pomak indeks duktilnosti (Δ_u/Δ_x)
	Pri popuštanju	Gračno	Pri popuštanju	Pri gračnom opterećenju				
CS11	55,44	69,3	8,65	90,45	6,41	0,77	1,25	10,46
CS23	50,82	74,54	4,67	120,2	10,88	0,62	1,47	25,74
CS33	60,06	78,54	10,75	145,3	5,59	0,54	1,31	13,52
CS43	50,82	70,84	6,66	135,2	7,63	0,52	1,39	20,3

Na uzorcima s PP vlaknima i bakrenom zgurom nisu uočeni nikakvi znakovi posmičnog loma ispod točki opterećenja, niti u području minimalne posmične armature.



Slika 16. Oblik pukotina i vrsta loma armiranobetonske grede s dodatkom 20 % bakrene zguře i 0,4 % PP vlakana



Slika 14. Armiranobetonske grede nakon ispitivanja



Slika 17. Oblik pukotina i vrsta loma armiranobetonske grede s dodatkom 40 % bakrene zguře i 0,4 % PP vlakana



Slika 15. Oblik pukotina i vrsta loma kontrolne grede (CS11)



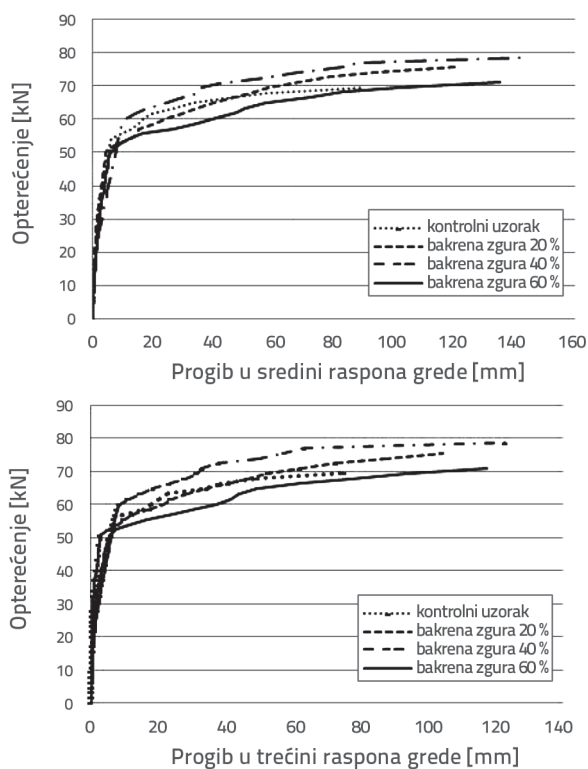
Slika 18. Oblik pukotina i vrsta loma armiranobetonske grede s dodatkom 60 % bakrene zguře i 0,4 % PP vlakana

3.3.2. Ponašanje s obzirom na progib - opterećenje

Krivulja progib - opterećenje je linearna u početku a zatim postupno s povećanjem opterećenja postaje nelinearna.

Transformacija u nelinearnost je nastupila zbog niske krutosti armiranobetonske grede uzrokovane lomom betona u vlačnoj zoni. Proračunane vrijednosti krutosti i indeksa duktilnosti su prikazane u tablici 7. Prvi razvoj pukotina se dogodio zbog loma betona. Daljnje povećanje opterećenja je uzrokovalo povećanje i otvaranje pukotina na dnu grede te je nelinearni odgovor postao dominantan. Kada je armatura na dnu grede dosegla područje popuštanja, krivulja je zadobila ravniji oblik. Uslijed graničnog opterećenja dolazi do drobljenja betona s gornje strane grede u tlačnoj zoni, a progib u sredini raspona se značajno povećava sa smanjenjem opterećenja.

Do loma svih greda došlo je prije nego što su popucale armaturne šipke. Ponašanje s obzirom na progib - opterećenje betona s bakrenom zgurom u usporedbi s kontrolnim uzorkom prikazano je na slici 19.



Slika 19. Ponašanje s obzirom na progib - opterećenje: u sredini raspona grede (gore), u trećini raspona grede (dolje)

Analogno tome, granična nosivost greda CS23, CS33 i CS43 porasla je za 7,56 %, 13,33 % i 2,22 %. Vrijednost progiba na gredi CS23 za primijenjeno opterećenje je najmanja u odnosu na ostale uzorke s različitim udjelima bakrene zgre i PP vlakana. Dodatno, svi uzorci s dodatkom bakrene zgre zadovoljavaju kriterij uporabljivosti prema kojem progib mora ostati unutar dopuštenih granica uslijed djelovanja korisnog opterećenja.

Najveće povećanje graničnog opterećenja od 13 % zabilježeno je u slučaju grede CS33. Grede ojačane vlaknima imale su veći indeks duktilnosti u odnosu na kontrolnu gredu. Dodatak bakrene zgre nije direktno utjecao na duktilnost uzoraka. S druge strane, bakrena zgra je ispunila manje otvore u matrici vlakana i poboljšala veze među vlaknima. Budući da dodatak vlakana povećava krutost, greda CS23 je pokazala 70 % veću početnu krutost nego kontrolni uzorak. Međutim, s povećanjem udjela bakrene zgre smanjuje se granična krutost betona.

4. Zaključak

U ovom radu je ispitan i analiziran utjecaj kombinacije bakrene zgre i PP vlakana na konzistenciju slijeganjem, gustoću, tlačnu čvrstoću i vlačnu čvrstoću cijepanjem te nosivost armiranobetonske grede te svojstva mikrostrukture betona. Kombinacijom tih materijala postiže se bolja obradljivost betona zbog toga što zgra ima svojstvo niske apsorpcije vode. Negativni utjecaji bakrene zgre poput segregacije, izdvajanje vode u betonu i površinsko raspucavanje su umanjeni dodatkom PP vlakana i superplastifikatora. Nepovoljan utjecaj veće količine slobodne vode u betonu s bakrenom zgurom može se suzbiti dodavanjem PP vlakana. Međutim, veća količina PP vlakana smanjuje obradljivost betona i zahtijeva veću količinu vode, što uzrokuje smanjenje tlačne čvrstoće. U pokušaju postizanja boljeg ponašanja takvog betona, pozornost treba usmjeriti na odabir dodatka PP vlakana do 0,4 %. Istraživanje je pokazalo da bakrena zgra pomiješana s PP vlaknima postiže veće rane čvrstoće (90 %-tna vrijednost ciljane srednje čvrstoće je ostvarena pri 7 dana starosti uzorka). Čak niti uzorak s 80 % zamjene bakrenom zgurom nije pokazao nikakvo smanjenje čvrstoće nakon 28 dana starosti u usporedbi s kontrolnom mješavinom.

Svojstva mikrostrukture su pokazala da je gusto pakiranje čestica u strukturi betona rezultat pucolanske reakcije bakrene zgre u betonu. Eksperimentalni rezultati armiranobetonskih greda su pokazali da je lom betona u vlačnoj zoni, koji se odnosi na opterećenje pri pojavi prvih pukotina, odgođen u svim gredama s bakrenom zgurom u usporedbi s kontrolnom gredom. Mehanička svojstva, svojstva mikrostrukture i ponašanje pri savijanju pokazuju da uloga bakrene zgre u održivom betonu ne može biti zanemarena u budućim primjenama. Zaključno, bakrena zgra u postotku zamjene do 40 %, zajedno s polipropilenskim vlaknima u omjeru do 0,4 %, može se koristiti za pripremu betona bez nepovoljnih utjecaja na njegova svojstva. Postotak zamjene u betonu može se povećati primjenom odgovarajuće kombinacije dodataka.

Zahvala

Autori zahvaljuju na financijskoj potpori osiguranoj kroz *Tehnički program za unaprjeđenje kvalitete obrazovanja TEQIP-II*, koji ostvaruje Nacionalni odbor za provedbu projekta (Ministarstvo za razvoj ljudskih potencijala Indije zaduženo za implementaciju projekata Svjetske banke u tehničkom obrazovanju).

LITERATURA

- [1] Thyelim, T., Chu, J.: Assessment of the use of spent copper slag for land reclamation, *Waste Management & Research*, 24 (2006), pp. 67-73, <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X06061769>
- [2] Al-Jabri, K.S., Hisada, M., Al-Oraimi, S.K., Al-Saidy, A.H.: Copper slag as sand replacement for high performance concrete, *Cement & Concrete Composites*, 31 (2009) 7, pp. 483-488, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.007>
- [3] Shi, C., Meyer, C., Behnood, A.: Utilization of copper slag in cement and concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (2008) 10, pp. 1115-1120, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.008>
- [4] Gorai, B., Jana, R.K., Chand, P.: Characteristics and utilisation of copper slag-a review, *Resources, Conservation and Recycling*, 39 (2003) 4, pp. 299-313, [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00171-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00171-4)
- [5] Supekar, N.: Utilization of copper slag for cement manufacture construction management and review, (Sterlite Industries(I) Ltd, Tuticorin, 2007.
- [6] Shi, C., Qian, J.: High performance cementing materials from industrial slags-a review, *Resources, Conservation and Recycling*, 29 (2000) 3, pp. 195-207, [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00060-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00060-9)
- [7] Marku, J., Vaso, K.: Optimization of copper slag waste content in blended cement production, *Zastita Materijala*, 51 (2010) 2, pp. 77-80.
- [8] Al-Jabri, K.S., Hisada, M., Al-Saidy, A.H., Al-Oraimi, S.K.: Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 23 (2009) 6, pp. 2132-2140, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.013>
- [9] Mobasher, B., Devaguptapu, R., Arino, A.M.: Effect of copper slag on the hydration of blended cementitious mixtures paper presented at ASCE, *Materials engineering conference on Materials for the new millennium*, Arizona (1996), pp.1677-1686.
- [10] Arino, A.M., Mobasher, B.: Effect of Ground Copper slag on strength and Toughness of Cementitious Mixes, *ACI materials journal*, 96 (1999), pp. 68-74.
- [11] Pazhani, K., Jeyaraj, R.: Study on durability of high performance concrete with industrial waste, *Applied Technologies & Innovations*, 2 (2010) 2, pp. 19-28.
- [12] Reddy, S., Kumar, K.M.: Utilisation of Copper slag as a Partial Replacement of fine aggregate in concrete, *International Journal of Mechanical Engineering and Computer Application*, 1 (2013) 7, pp.140-144.
- [13] Kayathri, K., Vigneshkumar, C., Rani, G.M., Karthick, K.: Effect of Copper slag, Fly Ash and Granite Powder as a Partial Replacement in Fine aggregate, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3 (2014) 5, pp. 439-443.
- [14] Sakthieswaran, N., Ganesan, K.: Flexural performance of concrete beams containing Fly-ash, Silica fume, Copper slag, and Fibres, *Australian Journal of Basic and applied Sciences*, 7 (2013) 8, pp. 886-891.
- [15] Madheswaran, C.K., Ambily, P.S., Dattatreya, J.K., Rajamane, N.P.: Studies on use of Copper slag as Replacement Material for River Sand in building Constructions, *Journal of the Institution of Engineers India: Series A*, 95 (2014) 3, pp.169-177.
- [16] IS 8112:2013-Standard specification for Ordinary Portland Cement 43 grade.
- [17] ASTM C 618-92a, Standard specification for Fly Ash and raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement Concrete, ASTM standards, 2012.
- [18] Najimi, M., Pourkhorshidi, S.J.: Durability of copper slag contained concrete exposed to sulfate attack, *Construction and Building materials*, 25 (2011) 4, pp.1895-1905.
- [19] Bagherzadeh, R., Pakravan, H.R., Sadeghi, A.H., Latifi, M., Merati, A.A.: An Investigation on Adding Polypropylene Fibers to Reinforce Lightweight Cement Composites (LWC), *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7 (2012) 4, pp. 13-21.
- [20] ASTM C1116-type III -Standard for polypropylene fibre.
- [21] IS 383-1970, Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [22] IS: 10262-2009, recommended guidelines for concrete mix design, Bureau of Indian Standards (BIS), New Delhi, India.
- [23] IS 9103:1999, Specification for admixtures for concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [24] IS 7320:1974, Specification for concrete slump test, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [25] IS: 516-1959, Methods of tests for strength of concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [26] IS 5816: Method of test splitting tensile strength of concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [27] IS: 456 - 2000, Code of practice for Plain and Reinforced Concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [28] Al-Jabri, K.S.: Copper slag as fine aggregate for high performance concrete, *High Performance Structures and Materials III*, 85(2006), pp. 381-389, <http://dx.doi.org/10.2495/HPSM06037>
- [29] Shetty, M.S.: Concrete Technology, 6th edition, S. Chand & Company Ltd, New Delhi, 2005.
- [30] Ramujee, K.: Strength properties of polypropylene fibre reinforced concrete, *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 2 (2013) 8, pp. 3409-3413.