

Primljen / Received: 23.11.2016.

Ispravljen / Corrected: 10.4.2017.

Prihvaćen / Accepted: 22.5.2017.

Dostupno online / Available online: 10.12.2017.

Karakteristike trajnosti betona s bakrenom zgurom i s dodatkom letećeg pepela

Autori:

Doc.dr.sc. **Sumathy Raju**, dipl.ing.građ.Fakultet za inženjerstvo i tehnologiju Alagappa Chettiar Karaikudi, Tamil Nadu, Indija
sr.sumathy5@gmail.comDoc.dr.sc. **Brindha Dharmar**, dipl.ing.građ.Fakultet za inženjerstvo Thiagarajar Madurai, Tamil Nadu, Indija
dbrindha@yahoo.co.in

Stručni rad

Sumathy Raju, Brindha Dharmar

Karakteristike trajnosti betona s bakrenom zgurom i s dodatkom letećeg pepela

U radu se razmatra trajnost kombinacije letećeg pepela (FA) i bakrene zgre (CS) u betonu. Provedeno je eksperimentalno istraživanje o pokazateljima trajnosti kao što su upijanje vode do zasićenja, poroznost, koeficijent upijanja vode, sorptivnost, brzi pokus prodiranja kloridovih iona te pokus alkalnosti (pH). Ispitana je i mikrostruktura betona te je obavljena kvantitativna analiza nakon 90 dana pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa i energijski razlučujuće rendgenske spektrometrije. Dobiveni rezultati pokazuju da se primjenom kombinacije FA i CS poboljšavaju svojstva betona.

Ključne riječi:

beton s bakrenom zgurom, leteći pepeo, upijanje vode, poroznost, prodiranje kloridovih iona

Professional paper

Sumathy Raju, Brindha Dharmar

Durability characteristics of copper slag concrete with fly ash

The durability of the combination of Fly Ash (FA) and Copper Slag (CS) in concrete is studied in the paper. Experimental study was conducted to determine durability properties such as saturated water absorption, porosity, coefficient of water absorption, sorptivity, rapid chloride ion penetration test, and Alkalinity (pH) test. The microstructure of concrete was tested and quantitative analysis was carried out at the age of 90 days by the scanning electron microscope and energy dispersive X-ray. The results show that concrete properties are improved by the combined use of FA and CS.

Key words:

copper slag concrete, fly ash, water absorption, porosity, chloride ion penetration

Fachbericht

Sumathy Raju, Brindha Dharmar

Merkmale der Beständigkeit von Beton mit Kupferschlacke und Flugasche

In der Arbeit wird die Beständigkeit der Kombination von Flugasche (FA) und Kupferschlacke (CS) im Beton untersucht. Es wurde eine experimentelle Untersuchung der Parameter wie Wasseraufnahme bis zur Sättigung, Porosität, Koeffizient der Wasseraufnahme, Sorptivität, Schnelltest der Eindringung von Chloridionen und ein Alkalinitätstest (pH) durchgeführt. Es wurde die Mikrostruktur des Betons geprüft und eine quantitative Auswertung nach 90 Tagen anhand eines Elektronenmikroskops und einer energieauflösenden Röntgenspektrometrie durchgeführt.

Schlüsselwörter:

Beton mit Kupferschlacke, Flugasche, Wasseraufnahme, Porosität, Eindringung von Chloridionen

1. Uvod

Svaka betonska konstrukcija trebala bi se moći koristiti u skladu s odgovarajućim zahtjevima nosivosti i uporabljivosti unutar zadanog ili tradicionalno očekivanog trajanja takve konstrukcije. Osim toga, beton koji se koristi u takvim konstrukcijama treba biti otporan na štetne procese kojima je izložen. Beton koji posjeduje te karakteristike smatra se trajnim betonom [1]. Beton se već više generacija smatra najznačajnijim građevnim materijalom. Betonske se konstrukcije tako grade u vrlo zagađenim urbanim i industrijskim područjima, u agresivnim morskim uvjetima, u nepovoljnim uvjetima u podzemlju, u priobalnim područjima, te u mnogim drugim nepovoljnim uvjetima. Na popravak i održavanje betona troše se znatna sredstva, pa se stoga s pravom očekuje da on bude otporan na razne procese koji dovode do propadanja. Nakon isparavanja suvišne vode iz betona, u betonskom elementu ostaju šupljine tj. dolazi do pojave kapilara koje su izravno odgovorne za poroznost i propusnost betona. Proizvodi hidratacije sastoje se od CSH gela, kristala etringita i monosullečeg pepelata, te od povezanih gel pora, kapilarnih pora i šupljina sa zahvaćenim i zarobljenim zrakom. Ti letećeg pepelaktori uzrokuju poroznost betona. Obujam vlage koja može proći kroz beton ovisi o propusnosti betona. Propusnost cementne paste se također mijenja ovisno o starosti betona ili o stupnju hidratacije. Beton može biti gotovo nepropustan uz pravilan odabir sastojaka, pravilno doziranje mješavine te uz primjenu odgovarajućih građevinskih postupaka [2]. Iako trajnost u velikoj mjeri ovisi o tlačnoj čvrstoći, nije potpuno točno da je za dobivanje trajnog betona u svim slučajevima nužan jaki agregat [3]. Dakle, trajnost betona ovisi o okolnim uvjetima, a također i o prolasku vode i plina kroz beton. Prikladna zbijenost čestica u betonu samo sprečava prodiranje vode i drugih kemikalija. Na trajnost betona najviše utječu tri letećeg pepelaktora: voda kojom se prenose čisti ili agresivni ioni, ugljični dioksid, i kisik. Oni se mogu pronositi kroz beton na razne načine, ali svi transporti ponajviše ovise o strukturi hidratizirane cementne paste. Do kretanja raznih fluida kroz beton ne dolazi samo protokom kroz porozni sustav već i difuznim i sorptivnim djelovanjem. Dakle, najvažnije pitanje je zapravo propusnost betona [4]. Sorptivnost ili kapilarni unos je prijenos tekućina kroz porozno kruto tijelo zbog površinske napetosti koja djeluje na kapilare, viskoznosti, gustoće, površinske napetosti same tekućine te strukture pora [5]. Beton je čvrst i žilav ali i porozan materijal pa je stoga u interakciji sa svojom okolinom. Sorptivnost betona je vrijednost koja označava nezasićeni tok fluida u betonu [6]. Korištenjem letećeg pepela (eng. *fly ash* - Letećeg pepela) u betonu poboljšavaju se svojstva trajnosti jer se smanjuje propusnost uz istovremeno poboljšanje mikrostrukture betona [3]. Stoga beton s dodatkom letećeg pepela ne samo da ima bolja svojstva već i pridonosi manjem onečišćenju okoliša. Do sada su objavljene brojne studije o korištenju letećeg pepela kao dodatka cementu te o primjeni bakrene zgure (eng. *Copper Slag* - CS) kao zamjene za sitnozrnati agregat. Beton u kojem je 25 % cementa zamijenjeno letećim pepelom pokazuje niže vrijednosti upijanja vode do zasićenja, sorptivnosti i difuzije klorida, u usporedbi s kontrolnim

betonskim mješavinama. Poroznost raste s povećanjem udjela a smanjuje se s povećanjem finoće letećeg pepela. Prethodne studije pokazuju da se dodavanjem letećeg pepela bitno smanjuje sorptivnost i prodor iona klorida nakon 28 dana, te da se te vrijednosti dodatno smanjuju nakon 6 mjeseci [7-9].

Beton u kojem je 40 % pijeska zamijenjeno bakrenom zguram odlikuje se višom čvrstoćom u usporedbi s kontrolnim betonom [10, 11]. Karakteristike trajnosti kao što su vodoupojnost i propusnost kontinuirano se smanjuju s povećanjem udjela bakrene zgure [12]. Međutim, ovdje treba napomenuti da do sada nije objavljen veći broj istraživanja o letećem pepelu i bakrenoj zguri kao dodacima za beton. Imajući to na umu, ovo eksperimentalno istraživanje bavi se svojstvima prijenosa kroz beton koji sadrži leteći pepeo i bakrenu zguru. Osim toga, u radu se prikazuje i analiza mikrostrukture te kvantitativna analiza primjenom postupaka pretražnog elektronskog mikroskopa (eng. *Scanning Electron Microscope* - SEM) i energijski razlučujuće rendgenske spektrometrije (eng. *Energy Dispersive X-ray analysis* - EDAX). Preliminarno ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je na kockama nakon 7, 28, 56 i 90 dana. Čvrstoća betona raste usporedno s trajanjem njege. Nakon 90 dana čvrstoća varira od 43,22 N/mm² do 59,11 N/mm². Uz to, kada se sitnozrnati agregat u potpunosti zamijeni bakrenom zguram, analizirani se beton ponaša bolje od kontrolnog betona.

2. Eksperimentalno istraživanje

2.1. Materijali

U eksperimentalnom je istraživanju korišten obični portland cement (OPC) Chettinad, odnosno cement klase 43 koji udovoljava zahtjevima norme IS8112 (prvi dio), 2013 [13]. Osnovna svojstva tog cementa prikazana su u tablici 1. Korišten je leteći pepeo s niskim udjelom kalcija (klase F) relativne gustoće 2,18 iz termoelektrane Salem (Tamil Nadu, Indija), koji udovoljava zahtjevima norme IS3812 (prvi dio), 2003 [14]. Sitnozrnati agregat prvo je prosijan na situ veličine otvora 4,75 mm kako bi se odstranila zrna veća od toga. Kao krupnozrnati agregat korišten je drobljeni plavi granit maksimalne veličine 20 mm. Bakrena zgura korištena u ovom istraživanju dobivena je iz tvrtke Sterlite Industries India Limite (SIL); Tuticorin i Tamil Nadu.

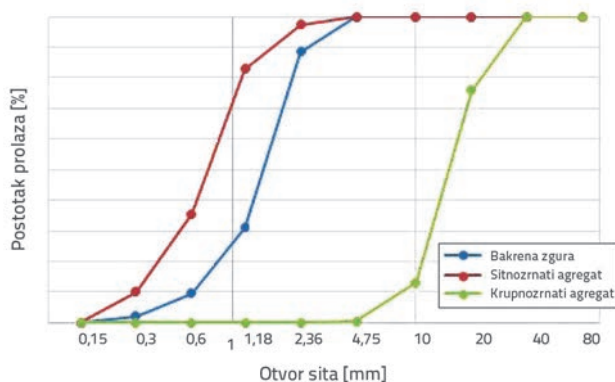
Tablica 1. Svojstva cementa (OPC klase 43) i izrađenog morta

Cement	Relativna gustoća	3,05
	Standardna konzistencija [%]	36
	Početno vrijeme vezivanja [min]	95
	Konačno vrijeme vezivanja [min]	420
Mort	Tlačna čvrstoća morta nakon 7 dana [N/mm ²]	21,06
	Tlačna čvrstoća morta nakon 28 dana [N/mm ²]	26,08

Svojstva sitnozrnatog agregata, bakrene zgre i krupnozrnatog agregata prikazana su u tablici 2. [15]. Relativna gustoća i gustoća bakrene zgre iznose redom 3,52 i 1750 kg/m³. Ta svojstva pokazuju da se gustoća bakrene zgre razlikuje od gustoće sitnozrnatog agregata. Isto tako, bakrena zgura ima viši modul zrnatosti (3,68). Iz rezultata se može zaključiti da je bakrena zgura krupnija od sitnozrnatog agregata. Osim toga, provedena su i ispitivanja granulometrije za sitnozrnati agregat, bakrenu zguru i krupnozrnati agregat. Pripadajuće granulometrijske krivulje prikazane su na slici 1. Za beton se obično koristi pitka voda pa je tako i u ovom slučaju za miješanje i njegu upotrebljena pitka voda dostupna na mjestu ispitivanja.

Tablica 2. Svojstva sitnozrnatog i krupnozrnatog agregata

Svojstvo \ Agregat	Riječni pijesak	Bakrena zgura	Krupnozrnati agregat
Relativna gustoća	2,5	3,52	2,7
Modul zrnatosti	2,74	3,68	7,61
Nasipna gustoća [kg/m ³]	1420	1750	1380
Koeficijent pora	0,77	0,8	0,95
Granulometrijska zona	II	-	Maks. veličina 20 mm



Slika 1. Granulometrijski sastav bakrene zgre, sitnozrnatog agregata i krupnozrnatog agregata

2.2. Udjeli u mješavinama

Betonska mješavina udovoljava zahtjevima norme IS 10262-2009 [16], a pojedinačni udjeli prikazani su u tablici 3. U ovom istraživanju upotrebljen je beton klase (C 25/30). U označavanju betonske mješavine korištena je oznaka M30. M je oznaka mješavine a broj nakon oznake je zadana tlačna čvrstoća kocke veličine 150 mm nakon 28 dana, izraženo u N/mm². Korišten je cement u

konstantnoj količini (380 kg/m³) te konstantni vodocementni letećeg pepelaktor (0,4). Pripremljene su 24 mješavine. Cement je djelomično zamijenjen letećim pepelom (od 0 % do 30 %, u težinskim intervalima po 10 %), a sitnozrnati agregat bakrenom zgurum (od 0 % do 100 %, u intervalima obujma po 20 %).

2.3. Izrada uzoraka za ispitivanje

Priprema betona za izradu uzoraka provedena je u laboratorijskoj bubanjskoj miješalici. Izrađene su kocke veličine 100 mm x 100 mm x 100 mm kako bi se odredilo upijanje vode do zasićenja, poroznost, koeficijent upijanja vode i sorptivnost. Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata, nakon čega su njegovani u vodi 90 dana. Za potrebe ispitivanja prodora kloridovih iona korišteni su standardni valjkasti uzorci promjera 100 mm i duljine 50 mm. Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata, nakon čega su njegovani u vodi 90 dana. Za ispitivanje alkalnosti korišten je prah koji je izuzet iz uzoraka nakon 90 dana njege.

3. Eksperimentalna ispitivanja

Trajnost betona ovisi o okolnim uvjetima i o kretanju vode i plinova koji ulaze i prolaze kroz beton. Za beton koji sadrži dodatne cementne materijale poput letećeg pepela trebalo je predvidjeti 56-90 dana njege u svrhu razvijanje potencijalnih svojstava. Osnovni cilj ovog istraživanja bio je analiza mikrostrukturnih svojstava kao što su upijanje vode do zasićenja (eng. *Saturated Water Absorption - SWA*), poroznost, koeficijent apsorpcije, sorptivnost i prodor kloridovih iona te pH-vrijednosti.

3.1. Vodoupojnost do zasićenja (SWA)

Pokus vodoupojnosti proveden je u skladu s normom ASTM C1642-13 [17]. Nakon 90 dana njege, uzorak je sušen u pećnici ne manje od 24 sata pri temperaturi od 110°C, kao što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Betonske kocke u pećnici

Tablica 3. Sastav betonskih mješavina korištenih u ispitivanju (oznaka M30)

Zadana tlačna čvrstoća [N/mm ²]	Cement [kg/m ³]	Sitnozrnati agregat [kg/m ³]	Krupnozrnati agregat [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Vodocementni faktor
30	380	596	1281	152	0,4

Nakon vađenja uzorka iz pećnice, uzorak je hlađen pri sobnoj temperaturi kako bi se odredila njegova težina. Uzorak se smatra suhim kada dva uzastopna mjerenja mase pokažu slične rezultate. Nakon toga su uzorci uronjeni u vodu do konstantne mase. Upijanje nakon uranjanja u [%] dano je izrazom (1):

$$[(B-A)/A] \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

gdje je:

A - masa uzorka osušenog u pećnici, [g]

B - masa uzorka suhe površine nakon uranjanja, [g].

3.2. Poroznost

Poroznost je udio pora u ukupnom obujmu betona, a obično se izražava kao postotak. Za određivanje poroznosti primjenjuje se formula dana izrazom (2):

$$[(A-B)/V] \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

gdje je:

A - masa osušenog uzorka, [g]

B - masa uzorka suhe površine nakon uranjanja, [g]

V - obujam uzorka.

Obujam šupljina određuje se kao obujam vode koja ispari tijekom sušenja na 105 °C do konstantne mase.

3.3. Pokus sorptivnosti

Sorptivnost je određena nakon 90 dana u skladu s normom ASTM C1585-13 [18]. Ta se metoda ispitivanja primjenjuje za određivanje brzine upijanja (sorptivnosti) vode mjerenjem povećanja mase uzorka zbog apsorpcije vode u vremenu, pri čemu voda djeluje na samo jednu površinu uzorka. Ta površina uzorka uranja se u vodu, a voda dopire do nezasićenog betona kapilarnim upijanjem tijekom početnog kontakta s vodom. Pokusom se određuje brzina kapilarne apsorpcije na uzorcima oblika kocke dimenzija 100 mm koje su postavljene na male oslonce tako da jsu kocke samo 2-5 mm uronjene u vodu. Pokus je prikazan na slici 3.



Slika 3. Prikaz provedbe pokusa

Promatra se porast mase u vremenu:

$$i = St^{0.5} \quad (3)$$

gdje je:

i - povećanje mase u g/mm² (do povećanja mase dolazi zbog upijanja vode, 1 g jednak je 1 mm³, pa se ta vrijednost može izraziti u mm),

t - vrijeme u kojem se određuje masa, izraženo u minutama,

S - sorptivnost u mm/min^{0.5}.

Prodor vode po jedinici površine zahvaćene vodom prikazuje se ovisno o kvadratnom korijenu vremena izlaganja utjecaju vode. Podaci dobiveni ispitivanjem obično su iskazani kao pravac koji prolazi kroz ishodište. Kosina tog pravca predstavlja brzinu kretanja vode kroz kapilare, koja se naziva sorptivnost.

3.4. Koeficijent upijanja vode

Koeficijent upijanja se izračunava pomoću izraza (4), prema [19]:

$$ka = (Q/A)^2 \times (1/t) \quad (4)$$

gdje je:

Q - količina vode koju upije uzorak osušen u sušnici u jedinici vremena, t = 60 minute

A - ukupna površina betonskog uzorka na koju djeluje voda.

Niža vrijednost ka označava viši stupanj vodonepropusnosti betona.

3.5. Brzi pokus prodora kloridnih iona

Propusnost klorida mjeri se nakon 90 dana u skladu s normom ASTM C1202-12 [20]. U okviru ove metode prati se količina električne energije koja prolazi kroz uzorak oblika valjka duljine 50 mm i promjera 100 mm tijekom šest sati. Razlika u potencijalu od 60V istosmjerne struje održava se na kraju uzorka. Jedna strana ćelije uranja se u 3-postotnu otopinu natrijevog klorida (NaCl) i spaja s negativnim spojem kako je prikazano na slici 4.



Slika 4. Brzi pokus prodora kloridnih iona

Ukupan prolazak električnog naboja u kulonima predstavlja stupanj otpornosti uzorka na prodor kloridnih iona.

Tablica 4. Rezultati dobiveni ispitivanjem trajnosti i alkalnosti

Udio letećeg pepela (FA) i bakrene zgre (CS)		Upijanje vode do zasićenja	Poroznost [%]	Koeficijent upijanja $\ln \times 10^{-14}$ [mm/s]	Sorptivnost $\times 10^{-4}$ [mm/min ^{-0,5}]	Brzi pokus prodora klorida [C]	pH vrijednost
FA0	CS50	4,1	11	1,15	1	112,5	12,5
FA0	CS20	3,6	9	0,42	1	300,7	11
FA0	CS40	3,8	10	1,15	2	200,5	11,3
FA0	CS60	3,5	8,5	1,67	1	580	11,3
FA0	CS80	3,3	8	2,26	1	197,1	11,5
FA0	CS100	3	8	0,74	0,6	249,3	11,6
FA10	CS50	4,2	11	0,42	1	200,7	11
FA10	CS20	3,9	10	0,42	1	378,9	11,1
FA10	CS40	4,2	11	0,74	2	200,7	11,1
FA10	CS60	3,7	10	0,74	1	801,9	11,1
FA10	CS80	3,2	9	0,42	1	102,6	11,1
FA10	CS100	2,4	7	0,42	1	194,4	11,1
FA20	CS50	4	10	0,74	1	264,6	10,5
FA20	CS20	3,6	9	0,74	2	128,7	10,6
FA20	CS40	3,8	10	0,42	2	261,9	10,5
FA20	CS60	3,3	9	0,18	1	587,7	10,5
FA20	CS80	3,2	9	0,42	1	283,5	10,7
FA20	CS100	2,8	8	0,42	1	195,3	10,8
FA30	CS50	4,6	11	0,42	1	267,3	10,2
FA30	CS20	4,2	11	0,74	2	184,5	10,8
FA30	CS40	5,6	14	0,74	2	151,2	10,9
FA30	CS60	4,2	12	0,42	2	302,4	11
FA30	CS80	3,2	9	0,42	1	101,7	11,7
FA30	CS100	3,2	9	0,42	1	249,3	10,5

Oznaka udjela letećeg pepela (FA) i bakrene zgre (CS) u mješavini: FA10 (10 % udjela letećeg pepela, CS20 (20 % udjela bakrene zgre)

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (5)$$

gdje je:

- Q - električni naboj (u kulonima)
- I_0 - električna energija (u amperima) odmah nakon uključivanja napona
- I_t - električna energija (u amperima) jednu minutu nakon uključivanja napona.



Slika 5. Pokus alkalnosti

3.6. Pokus alkalnosti

Deset grama drobljenog uzorka uzeto je s dvadeset i četiri mješavine nakon 90 dana i taj je prah pomiješan s 50 ml destilirane vode. Zatim je mješavina dobro izmiješana. Nakon stajanja od 72 sata, u mješavinu je uronjen mjerač vrijednosti pH. Provedba pokusa je prikazana na slici 5., a pH-vrijednosti otopine iskazane su u tablici 4.

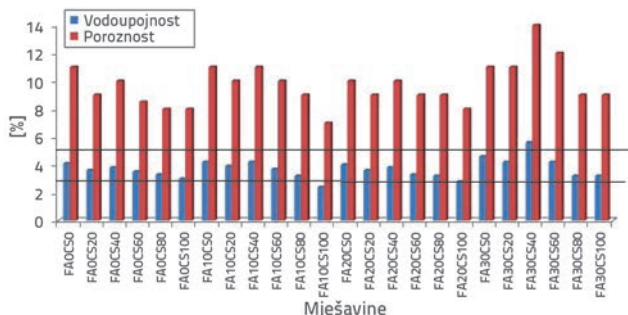
4. Rezultati i rasprava

Nakon 90 dana njege u vodi, određena su svojstva trajnosti kao što su vodoupojnost do zasićenja (SWA), poroznost, koeficijent apsorpcije, sorptivnost i prodor kloridnih iona pomoću brzog pokusa prodora klorida (eng. *Rapid Chloride ion Penetration Test - RCPT*). Proveden je i pokus alkalnosti (pH). Rezultati provedenih ispitivanja prikazani su u tablici 4.

4.1. Vodoupojnost do zasićenja, poroznost i koeficijent upijanja vode

Vrijednosti vodoupojnosti i poroznosti prikazane su na slici 6. Te su vrijednosti više kada u betonu nema bakrene zgre. Dakle, efekt punjenja betona se smanjuje ako nema bakrene zgre te stoga raste udio pora u cementnoj pasti. Vrijednosti vodoupojnosti i poroznosti rastu kada se 40 % pijeska zamijeni bakrenom zgurom. Osim toga, vrijednosti se kontinuirano smanjuju kada se 100 % pijeska zamijeni bakrenom zgurom. Kod stopostotne zamjene prirodnog pijeska bakrenom zgurom,

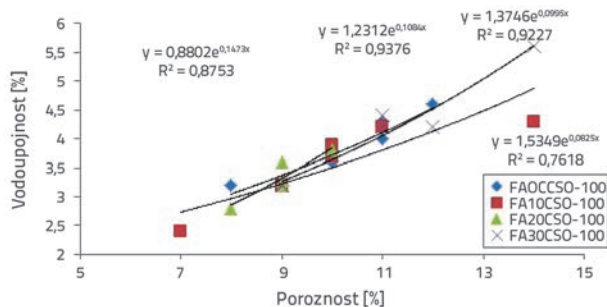
vrijednosti vodoupojnosti iznose 3 %, 2,4 %, 2,8 % i 3,2 % za 0 %, 10 %, 20 %, i 30 % udjela letećeg pepela. Te su vrijednosti za 27 %, 41 %, 32 % i 22 % manje u odnosu na kontrolni beton. Osim toga, prosječne vrijednosti poroznosti betona iznose 8 %, 7 %, 8 %, i 9 % za 0 %, 10 %, 20 % i 30 % udjela letećeg pepela. U usporedbi s kontrolnim betonom, te su vrijednosti niže za 27 %, 36 %, 36 % i 18 %. Općenito, vrijednosti vodoupojnosti i poroznosti smanjuju se kada se 80 % i 100 % pijeska zamijeni bakrenom zgurinom, a tek kada se 0-30 % cementa zamijeni letećim pepelom. Ti eksperimentalni rezultati pokazuju da se brzina upijanja vode povećava linearno s povećanjem poroznosti betona.



Slika 6. Vodoupojnost i poroznost

Prema [7], ako je vrijednost vodoupojnosti niža od 3 %, smatra se da se radi o "dobrom" betonu. Ako vrijednost vodoupojnosti varira od 3 % do 5 %, smatra se da je beton "prosječan", a ako je vrijednost viša od 5 %, smatra se da se radi o "neodgovarajućem" betonu. U ovom su istraživanju postignute vrijednosti vodoupojnosti od 2,4 % i 2,8 % za mješavinu FA10CS80 i mješavinu FA20CS80, pa se može reći da se ovdje radi o dobrom betonu. Sve ostale mješavine osim FA30CS40 kategorizirane su kao prosječni betoni. To upozorava na nedostatak gel pora zbog hidratacije, pa su stoga kapilarne pore međusobno povezane. Čak se ni potpunom hidratacijom ne bi dobilo dovoljno gela za zapunjavanje svih kapilara. Viša vrijednost Vodoupojnosti predstavlja veću količinu pora i intenzivniju cirkulaciju vode pa stoga i veći stupanj promjene volumena.

Regresijska analiza (tehnik korekcije krivulje) provedena je kako bi se ocijenio utjecaj bakrene zgre i letećeg pepela na vodoupojnost i poroznost. Uočeno je postojanje dobre korelacije između vodoupojnosti i poroznosti, kao što se to može vidjeti na slici 7.

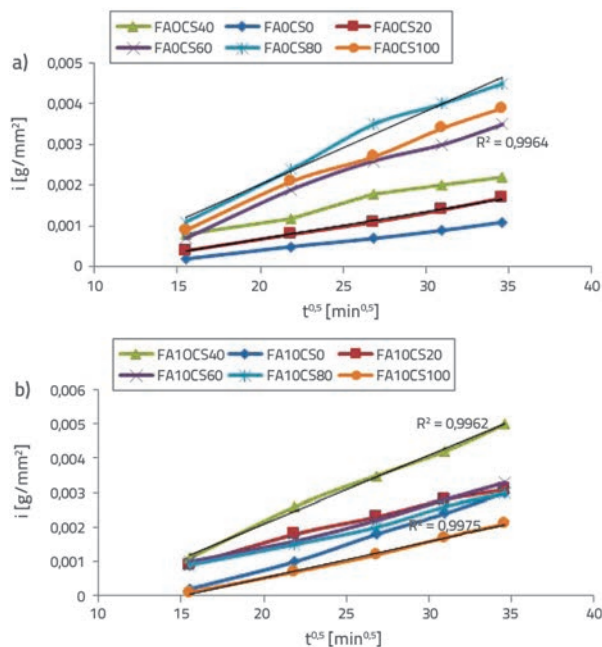


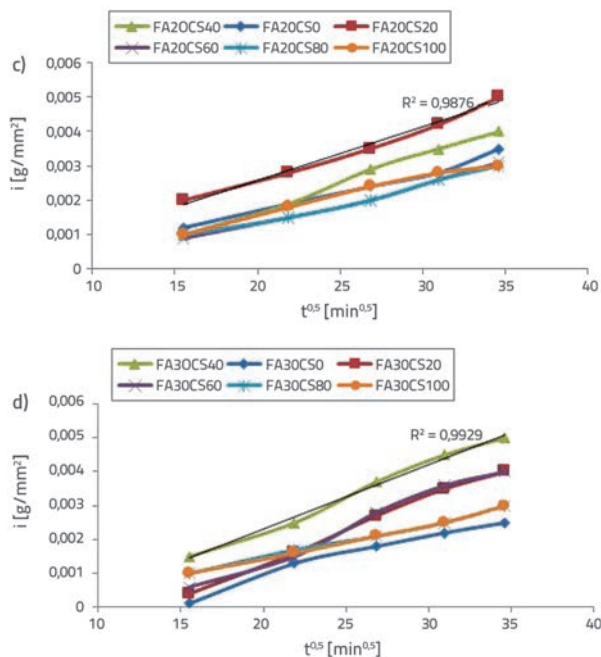
Slika 7. Variranje SWA u odnosu na stupanj poroznosti

Eksperimentalni podaci dobro odgovaraju eksponencijalnoj jednadžbi. Indeks korelacije (R^2) varira od 0,76 do 0,93. On iskazuje veličinu varijacije u ovisnoj varijabli poput poroznosti koja se objašnjava neovisnom varijablom poput vodoupojnosti. Stoga se može reći da se ekonomičan beton niske vodoupojnosti može postići uz pravilan odabir omjera cementa, letećeg pepela i bakrene zgre. Koeficijent vodoupojnosti betona pada s $0,18 \times 10^{-14}$ na $2,26 \times 10^{-14}$ mm/s kada se cement zamjenjuje s 0 % letećeg pepela, a pijesak s 80 % bakrene zgre, pri čemu je najviša vrijednost $2,26 \times 10^{-14}$ mm/s. To je za 96 % više u odnosu na kontrolni beton. Koeficijent vodoupojnosti niži je kod betona koji sadrži kombinaciju bakrene zgre i letećeg pepela. Ta kombinacija omogućuje postizanje dobre zbijenosti čestica. Osim toga, letećeg pepela troši proizvod hidratacije kao što je višak $Ca(OH)_2$, a beton prima i dodatni C-S-H gel. Dakle, količina krutih tvari u pasti povećava se s povećanjem vremena hidratacije, pa se stoga gusta pasta dobiva u zrelom stanju. Kapilare su blokirane gelom i segmentirane. Stoga se one pretvaraju u kapilarne pore te se ispunjavaju gel porama. Posljedično, kapilarne pore se odvajaju pa se i smanjuje protok vode kroz pore. S druge strane, kapilarne se pore smanjuju s napredovanjem hidratacijskog procesa.

4.2. Sorptivnost

Sorptivnost je brzina jednosmjernog kretanja vode djelovanjem kapilarnog usisa. Vrijednosti sorptivnosti svih mješavina variraju od $0,6 \times 10^{-4}$ do 2×10^{-4} mm/(min)^{0.5}. Niže vrijednosti su povoljnije. Te vrijednosti pokazuju da voda prodire vrlo sporo. Osim toga, iz rezultata se vidi da beton oznake FA0CS100 ima veću otpornost na prodor vode kapilarnim usisom, u odnosu na beton koji sadrži leteći pepeo i bakrenu zguru Slika 8. sadrži tipične prikaze kumulativne apsorpcije vode ovisno o kvadratnom korijenu vremena za sve dvadeset i četiri betonske mješavine.



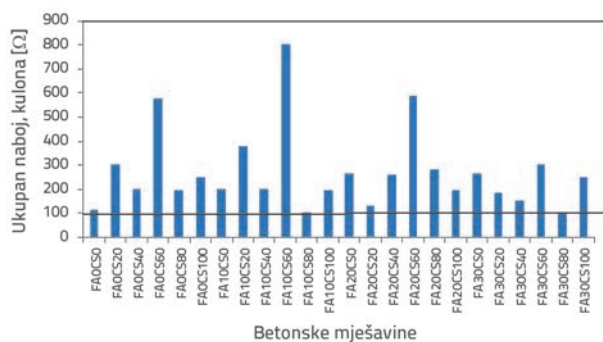


Slika 8. Kumulativna vodoupojnost za beton koji sadrži leteći pepeo i bakrenu zgurom

Ta vremenska komponenta je dovela do uspostavljanja linearnih odnosa (podudarnost najmanjih kvadrata) iz kojih je izveden korelacijski indeks koeficijenta određivanja (R^2) veći od 0,99. Vodoupojnost površine betona ovisi o mnogim letećeg pepelatorima kao što su omjeri u mješavini, zamjenski cementni materijali, trajanje njege te stupanj hidratacije ili starost.

4.3. Brzi pokus prodiranja klorida

Ovaj pokus proveden je za sve mješavine tijekom najviše šest sati. Postignuti rezultati prikazani su na slici 9. Ti su rezultati uspoređeni s uvjetima iz norme ASTM [1202] [20].



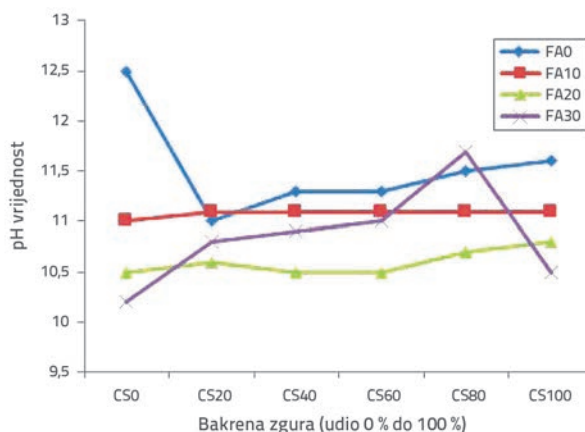
Slika 9. Propusnost klorida

U normi ASTM [1202-12] se navodi da se mogućnost prodiranja kloridnih iona u beton temelji na ukupnom električnom naboju koji prelazi na beton, izraženo u kulonima. Ako taj naboj iznosi <100 kulona, smatra se da je mogućnost prodiranja kloridnih

iona "zanemariva". Naboj u rasponu od 100 do 1000 kulona upućuje na "vrlo nisku" mogućnost, a naboj od 1000 do 2000 kulona na "nisku" mogućnost. Naboj od 2000 do 4000 upućuje na "srednju" mogućnost prodiranja, a naboj veći od 4000 kulona označava "visoku" mogućnost prodiranja. Iz rezultata se može zaključiti da je za prodor kloridnih iona kod svih mješavina betona zabilježena vrijednost manja od 1000 kulona. Ukupni naboji za slučaj korištenja zamjenskog letećeg pepela u količini od 10 % i 30 % bili su vrlo niski, tj. postignute su vrijednosti od 102,6 kulona, tj. 101,7 kulona kada je 80 % sitnozrnatog agregate zamijenjeno Bakrenom zgurom. Iz tih se rezultata može zaključiti da su kombiniranjem ta dva otpadna materijala postignuti dobri rezultati, te da je tako smanjena poroznost betona. Smanjen je prodor klorida pa je tako spriječena korozija. Letećeg pepela je dodan kao zamjena za cement. Leteći pepeo reagira sa Ca(OH)_2 u hidratiziranoj cementnoj pasti i tako nastaju složeni spojevi koji umanjuju propusnost i poboljšavaju trajnost, uz poboljšanu ekonomičnost mješavine.

5. Pokus alkalnosti

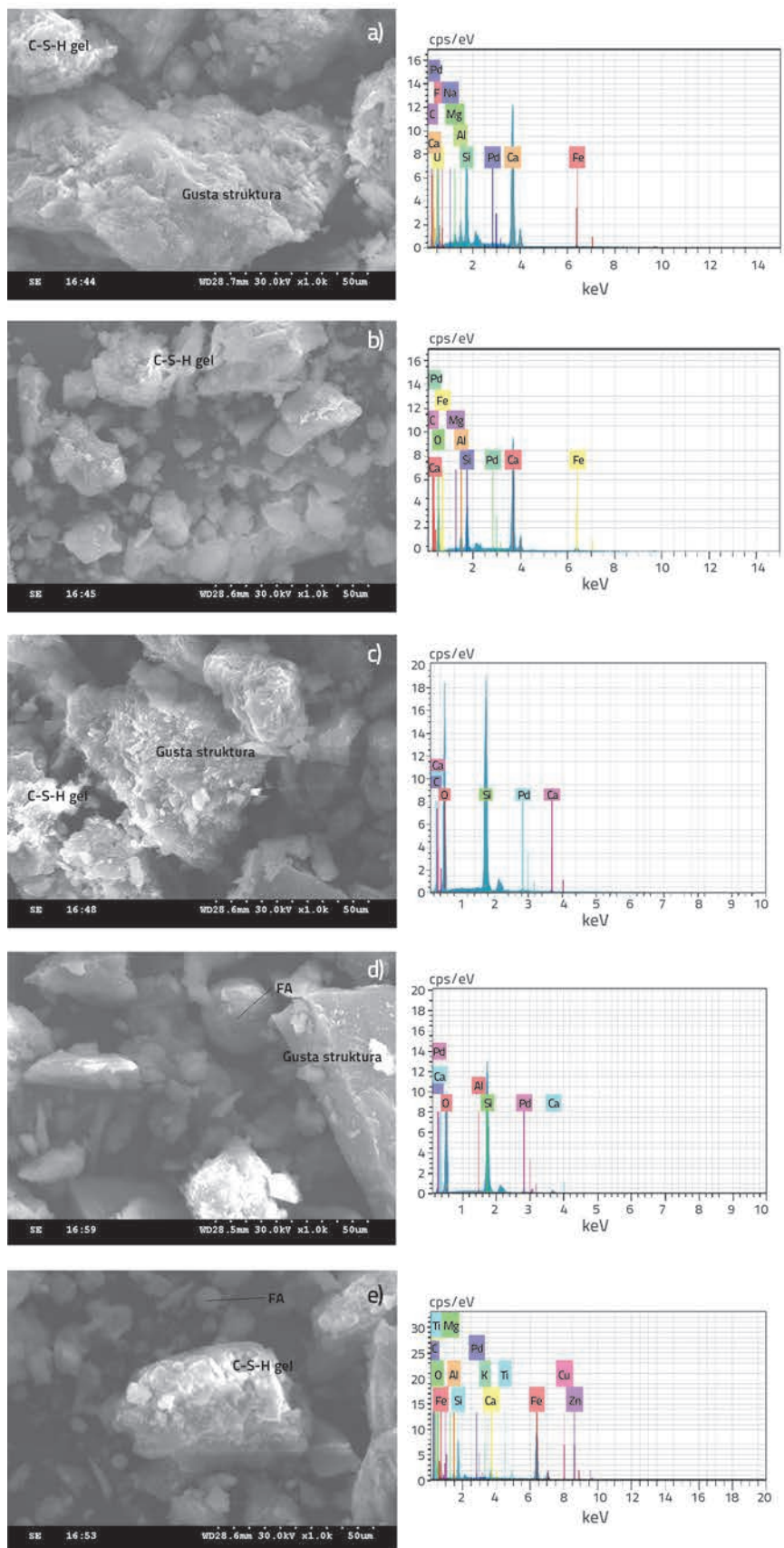
Vrijednosti pH svih mješavina prikazane su na slici 10. Te vrijednosti variraju od 10,2 do 12,5. Rezultati pokazuju da se pH-vrijednost svih mješavina smanjuje zbog velike potrošnje slobodnog vapna (Ca(OH)_2) u betonu. Kao jedina prednost može se navesti da Ca(OH)_2 – koji je po svojoj prirodi alkalni – održava u betonu vrijednost pH otprilike 13, čime se sprečava korozija armature. Međutim, višak kalcijevog hidroksida reagira sa sulfatima prisutnima u tlu ili vodi pa tako nastaje kalcijev sulfat, koji zatim reagira sa C_3A i uzrokuje propadanje betona. Preporučuje se upotreba veznih materijala kao što su leteći pepeo, silikatna prašina i drugi pucolanski materijali kako bi se smanjila količina Ca(OH)_2 u betonu, te zaobišli loši utjecaji toga spoja pretvaranjem u cementni proizvod [4]. Vrijednost pH pucolanskog betona mnogo je niža nego kod običnog betona jer u betonskoj mješavini nema slobodnog vapna, što nije povoljno za otpornost armature na koroziju [21].



Slika 10. Vrijednosti pH za beton koji sadrži leteći pepeo i bakrenu zgurom

6. Analiza mikrostrukture

Kako bi se odredila struktura betona koji sadrži leteći pepeo i bakrenu zguru, provedena je analiza mikrostrukture. Za izradu mikrografova primijenjena je pretražna elektronska mikroskopija (eng. *Scanning Electron Microscope* - SEM), a energijski razlučujuća rendgenska spektroskopija (EDAX) primijenjena je za kvantitativnu analizu. Rezultati dobiveni analizom EDAX (eng. *Energy Dispersive X-ray* - EDAX) iskazani su kao atomski postotak svakog elementa. Prema eksperimentalnim rezultatima, beton u kojem je 80 % i 100 % sitnozrnatog agregata zamijenjeno Bakrenom zgurom ponaša se bolje u usporedbi s ostalim betonima. Analize SEM i EDAX provedene su za kontrolni beton, minimalnu vodoupojnost i poroznost uzoraka nakon 90 dana. Na slici 11. nalazimo SEM prikaz i tipične EDAX spektre za analizu uzoraka FA0CS0, FA0CS80, FA10CS80, FA20CS80 i FA30CS80. Iz tih se rezultata vidi da su u svim uzorcima osnovne komponente Si, Ca i Al. Ostali elementi kao što su Na, Mg, Ti, Fe i Pd pronađeni su u mnogo manjim količinama. Nisu uočene bitne razlike u mikrostrukтури pojedinačnih mješavina, a u svim je uzorcima nađen znatan hidratacijski proizvod. Na slici 11.a, koja se odnosi na kontrolni beton (FA0CS0), možemo uočiti da je hidratizirana cementna pasta prisutna isključivo kao gusta struktura. Analiza EDAX pokazuje da je Si (36,02 %) jedini glavni element ove komponente. Na slikama 11.b i 11.c, koje se odnose na FA0CS80 i FA10CS80, nema neizreagiranih čestica letećeg pepela, iglastog etringita niti viška $Ca(OH)_2$. Iz tih se rezultata vidi da se kroz pucolansku reakciju $Ca(OH)_2$ pretvara u sekundarni C-S-H gel, te tako formira kontinuiranu veznu matricu. Taj je spoj amorfan i vlaknast, pa stoga ima veliku površinu što dovodi do pojave diskontinuirane porne strukture. Dakle, mikrostruktura se bitno mijenja uvođenjem letećeg pepela i bakrene zgure. Na slikama 11.d i 11.e, koje se odnose na FA20CS80 i FA30CS80, možemo uočiti da ima malo nehidratiziranog letećeg pepela i hidratacijskih proizvoda. Također



Slika 11. Prikazi SEM i EDAX za: a) FA0CS0; b) FA0CS80; c) FA10CS80; d) FA20CS80; e) FA30CS80

možemo uočiti da je većinu letećeg pepela potrošio višak vapna, te da neizreagirani leteći pepeo djeluje kao mikropunilo. Beton dakle postaje gušći i trajnost mu se povećava. Općenito, niti na jednom prikazu nema iglastog etringita ni pločastog $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Iz toga se može zaključiti da se propusnost betona smanjuje uz primjenu optimalnog udjela pucolanskih materijala. Rafiniranost pora javlja se zbog konverzije kalcijevog hidroksida u sekundarni C-S-H gel uslijed pucolanskog djelovanja.

7. Zaključak

Sljedeći se zaključci mogu izvesti na temelju eksperimentalnog istraživanja obavljenog u okviru ovog rada:

- Na temelju pokusa vodoupojnosti i poroznosti ustanovljeno je da se beton, u kojem je sitnozrnati agregat u potpunosti zamijenjen bakrenom zgurum te u kojem je 10 i 20 posto cementa zamijenjeno letećim pepelom, smatra pogodnim za primjenu u raznim nepovoljnim uvjetima okoline. Istovremeno, beton koji sadrži 30 % letećeg pepela i 40 % bakrene zgre kao zamjenu za pijesak smatra se nepovoljnim betonom jer mu je vrijednost vodoupojnosti viša (> 5 %)
- U početku su vrijednosti koeficijenta vodoupojnosti više bez letećeg pepela i kada se bakrena zgura koristi kao zamjena za 80 % sitnozrnatog agregata. U konačnici se na temelju rezultata vodoupojnosti može zaključiti da je ova mješavina dobra te da se takva betonska konstrukcija uspješno može suprotstaviti štetnom djelovanju vode.

- Jednosmjerni tok vode (sorptivnost) u betonu s 30 % letećeg pepela i sa 100 % bakrene zgre sličan je kao i kod kontrolnog betona. Ta se mješavina smatra ekonomičnom.
- Pokusom RCPT provedenim u skladu s normom ASTM [C1202-12] ustanovljeno je da je prodor kloridnih iona vrlo slab te da se ova mješavina može koristiti na područjima uz more.
- Vrijednosti pH svih mješavina variraju od 10,5 do 11,7, osim u slučaju kontrolnog betona. To nije pogodno za otpornost betona na koroziju zbog veće potrošnje viška vapna u betonu.
- Na prikazima SEM i EDAX može se uočiti da se trajnost betona povećava kada se kao dodaci zajedno koriste leteći pepeo i bakrena zgura. Uočeno je tek nekoliko nehidratiziranih čestica letećeg pepela. To znači da $\text{Ca}(\text{OH})_2$ troši leteći pepeo, te da tako beton dobiva dodatni C-S-H gel. Na taj se način reducira struktura pora i formira gusta struktura.
- Ispitivanja trajnosti provedena u ovom radu dokazuju da kombinacija bakrene zgre i letećeg pepela pridonosi većoj trajnosti, te da su betonske konstrukcije s tim dodacima financijski isplative.

Zahvala

Autori zahvaljuju Fakultetu za inženjerstvo i tehnologiju Alagappa Chettiar, tvrtki Sterlite Industries d.o.o (Indija), tvrtki Tuticorin, Indija, te termoelektrani Salem, Indija, na sredstvima koja su osigurali u vezi s izradom ovog rada.

LITERATURA

- [1] Neville, A.: Properties of concrete, 4th edition, Longman, London, 1995.
- [2] Gambhir, M.L.: Concrete technology-Theory and practice, 4th edition, Tata Mcgraw hill education, Newdelhi, 2009.
- [3] Santhakumar, A.R.: Concrete technology, Ninth impression, Oxford, Newdelhi, 2012.
- [4] Shetty, M.S.: Concrete technology-Theory and practice, S. Chand, Pune, 1982.
- [5] Sososro, M.: Transport of organic fluids through concrete, Materials and structures, 31 (1998), pp 162-169, <https://doi.org/10.1007/BF02480390>
- [6] Hall, C.: Water sorptivity of mortars and concretes- a review, Magazine of concrete research, 41 (1989) 147, pp. 51-61, <https://doi.org/10.1680/mac.1989.41.147.51>
- [7] Amarnath, Y., Ganeshbabu, K.: Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete, Cement and Concrete composites, 33 (2011), pp. 1057-1062, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.010>
- [8] Nath, P., Sarker, P.: Effect of Fly ash on the durability properties of high strength concrete, The twelfth East Asia-pacific conference on structural engineering and construction, Procedia Engineering, 14 (2011), pp. 1149-1156, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144>
- [9] Sabir, B.B., Wild, S., Farrel, M.O.: A water sorptivity for mortar and concrete, Materials and Structures, 31 (1998), pp 568-574, <https://doi.org/10.1007/BF02481540>
- [10] Wu, W., Zhang, W., Ma, G.: Optimum content of copper slag as fine aggregate in high strength concrete, Materials and design, 31 (2010), pp. 2878-2883, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.037>
- [11] Khalifa, J., Al, S., Hisada, M., Salem, K., Al, O.A., Al-Saidy, H.: Copper slag as sand replacement for high performance concrete, Cement and concrete composites, 31 (2009), pp. 483-488, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.007>
- [12] Palani, T. Jaya, K.P., Muthumani, K.: Studies on copper slag substitution for sand in high strength concrete, Journal of structural engineering, 41 (2014) 4, pp.293-306.
- [13] IS8112 (part1):2013 Ordinary Portland Cement 43 grade, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [14] IS3812 (part1):2003 Pulverized Fuel Ash-Specification part1 for use as pozzalana in cement, cement mortar and concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [15] IS383-1970 Specification for Coarse and Fine Aggregates from natural sources for Concrete. Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [16] IS10262-2009 Concrete Mix Proportioning-Guidelines, Bureau of Indian Standards, New Delhi.

- [17] ASTM C642-13 Standard test method for Density, Absorption, and voids in Hardened concrete.
- [18] ASTM C1585-13 Standard test method for Measurement of rate of Absorption of water by hydraulic cement concretes.
- [19] Peter, J.A., Neelamegam, M., Dattatreya, J.K., Rajamane, N.P., Gopalakrishnan, S.: Utilization of Fly ash as cement replacement material to produce high performance concrete, SERC, CSIR Campus, Taramani. Chennai, Fly ash utilization for value added product, pp 38-49.
- [20] ASTM C1202-12 Standard Test method for- Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.
- [21] Varghese, P.C.: Limit state design of reinforced concrete, second edition, PHI learning Private limited, Delhi 2013.