Primljen / Received: 5.4.2018.
Ispravljen / Corrected: 18.1.2019.
Prihvaćen / Accepted: 23.12.2019.
Dostupno online / Available online: 10.7.2020.

Eksperimentalno istraživanje čvrstoće laganog geopolimernog betona s dodatkom ekološki prihvatljivih materijala

Autori:

Dr.sc. **Nithya Swaminathan**, dipl.ing.građ.
Measi akademija arhitekture
Odjel za arhitekturu
nithya@measiarch.net
Autor za korespodenciju

Prof.dr.sc. **N.S. Elangovan**, dipl.ing.građ.
Tehničko veleučilište Jeruzalem
Zavod za građevinarstvo
nselangovaan@gmail.com

Dr.sc. **Jayaprithika Anandan**, dipl.ing.građ.
Tehnološki institut Vellore
Zavod za građevinarstvo
prithika_anand@yahoo.co.in

Stručni rad

Nithya Swaminathan, N.S. Elangovan, Jayaprithika Anandan

Eksperimentalno istraživanje čvrstoće laganog geopolimernog betona s dodatkom ekološki prihvatljivih materijala

Razlike između svojstava betona s laganim agregatom i normalnog uobičajenog betona za odabrane ekvivalentne omjere u mješavinama, onemogućile su šire korištenje betona s laganim agregatom u građevinarstvu. Dosadašnja su istraživanja pokazala da primjena proizvedenog pijeska, kamene prašine, zgure iz visokih peći, gline, letećeg pepela itd., kao djelomične zamjene cementnog materijala, te primjena proizvedenog pijeska kao zamjene za sitni agregat, dovodi do porasta čvrstoće u odnosu na čvrstoću betona s uobičajenim agregatom. Ljuske kokosovog oraha koriste se kao zamjena za uobičajeni krupni agregat, kako bi se proizveo beton s laganim agregatom.

Ključne riječi:
ljuske kokosovog oraha, lagani beton, zgura visokih peći (GGBS), geopolimer

Professional paper

Nithya Swaminathan, N.S. Elangovan, Jayaprithika Anandan

Experimental study on the strength of lightweight geopolymer concrete with eco-friendly material

The differences in properties between the lightweight aggregate concrete and normal conventional concrete at the selected equivalent mix ratios have forbidden the former from being used widely in construction industry. Studies have shown that the use of GGBS as a partial replacement of cementitious material, and M-sand as a replacement of fine aggregate, results in an increased strength in geopolymer normal weight concrete. In this study, Coconut shell is used as a replacement of conventional coarse aggregate to produce lightweight geopolymer coconut shell green concrete.

Key words:
coconut shell, lightweight concrete, GGBS, geopolymer

Fachbericht

Nithya Swaminathan, N.S. Elangovan, Jayaprithika Anandan

Experimentelle Untersuchung der Festigkeit von leichtem Geopolymerbeton unter Zusatz von umweltfreundlichen Materialien

Die Unterschiede zwischen den Eigenschaften von Beton mit leichtem Aggregaten und normalem üblichen Beton für ausgewählte äquivalente Verhältnisse in Mischungen verhinderten die breitere Verwendung von Beton mit leichtem Aggregat im Bauwesen. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung von produziertem Sand, Steinstaub, Hochofenschlacke, Ton, Flugasche usw. sowie der teilweise Ersatz von Zementmaterial, wie auch die Verwendung von produziertem Sand als Ersatz für feines Aggregat zu einer Erhöhung der Festigkeit im Verhältnis auf die Betonfestigkeit mit üblichem Aggregat führt. Kokosnussschalen werden als Ersatz für übliches grobes Aggregat verwendet, um Beton mit feinem Aggregat herzustellen.

Schlüsselwörter:
Kokosnussschalen, Leichtbeton, Hochofenschlacke (GGBS), Geopolymer

1. Uvod

Sve veća potražnja za betonom u građevinskoj industriji, koja koristi uobičajeni agregat, dovela je do znatnog smanjenja količina dostupnog prirodnog kamena, zbog čega raste potreba za pronalaskom odgovarajućih materijala kojim bi se zamijenio prirodni kameni materijal [1, 2]. Diljem svijeta se kao zamjena za prirodni kameni agregat u građevinarstvu upotrebljavaju mnogi prirodno dostupni materijali poput plovučca, troske i vulkanskog otpada, te mnogi industrijski nusproizvodi kao što su primjerice zgura iz visokih peći, vermikulit, klinker itd. Uspješno se kao lagani agregat može koristiti i poljoprivredni otpad, poput ljusaka kokosovog oraha, koji je organskog porijekla [3-5].

Indija je treća u svijetu po proizvodnji kokosovih oraha : oni se u toj zemlji uzgajaju na površini od 1,78 milijuna hektara, a godišnje se proizvede otprilike 7562 milijuna kokosovih oraha [3-7]. Indija sudjeluje s više od jedne četvrtine u ukupnoj svjetskoj proizvodnji kokosovog ulja [8]. Proizvodnja kokosovih oraha prikazana je u tablici 1.

Tako velika proizvodnja kao posljedicu ima i goleme probleme s odlaganjem krutog otpada. S druge strane, taj lako dostupan otpad mogao bi se koristiti kao materijal u građevinskoj industriji [3, 7, 10-12]. S tim u vezi, Kambli i dr. [13] tvrde da ljuske kokosovih oraha imaju povoljna svojstva te da se mogu koristiti za proizvodnju novih kompozitnih materijala. Primjena poljoprivrednog otpada za proizvodnju betona svakako bi mogla pridonijeti održivosti okoliša i to kroz smanjenje korištenja uobičajenog agregata proizvodnjom "zelenog betona". Međutim, komercijalno uporabe nekonvencionalnog agregata u betonskoj industriji još nije započelo [3]. Budući da odlaganje ljusaka kokosovih oraha predstavlja vrlo ozbiljan problem, sve više se razmatra primjena tog otpadnog materijala u građevinarstvu.

Iskorištavanjem riječnog pijeska ugrožava se stabilnost riječnih obala, a ta praksa dovodi i do znatnih ekoloških problema, kao što su poplave i smanjenje razine podzemnih voda [14]. Proizvedeni pijesak zapravo je industrijski proizveden umjetni pijesak, a po svojoj teksturi i obliku sličan je riječnom pijesku. Materijal koji se u Indiji koristi kao zamjena za riječni pijesak naziva se M-pijeskom, a po rasporedu pora i čvrstoći jednak je riječnom pijesku.

Za proizvodnju jedne tone cementa potrebne su dvije tone sirovina poput vapnenca i škriljca, a tijekom te proizvodnje dolazi do znatnih emisija CO_2, dušikovog oksida i zrakom prenosivih čestica koje su štetne za zdravlje ljudi. Danas se u cementnoj industriji provode brojna unapređenja proizvodnog procesa te se u tom smislu koriste mnogi sustavi za smanjenje emisije CO_2. Kalcinacija se u cementnoj industriji smatra ključnim procesom. Međutim, iskorištavanje vapnenca ima značajan utjecaj na okoliš. Osim toga, visoka emisija prašine također pridonosi značajnom utjecaju na okoliš, budući da cementna industrija koristi milijune tona suhog materijala. Usvajanje procesa upravljanja otpadom uključuje i korištenje otpadnih nusproizvoda, čime se bitno umanjuje štetan utjecaj na okoliš. Jedan od takvih nusproizvoda je i mljevena granulirana zgura iz visokih peći.

U sklopu ovog eksperimentalnog rada nastojalo se potpuno zamijeniti konvencionalni beton laganim betonom s dodatkom kokosovih ljusaka, čija je gustoća znatno niža od gustoće standardnog betona. Pritom je mljevena granulirana zgura iz visokih peći (eng. *ground granulated blast furnace slag* - GGBS) korištena kao vezivo, proizvedeni pijesak (M-pijesak) kao sitni agregat te kokosove ljuske (eng. *coconut shell* - CS) kao krupni agregat. Prema normi ASTM C330/C330M-14 [15], agregat se smatra laganim kada mu je volumenska masa manja od 880 kg/m³ u slučaju krupnog agregata tj. manja od 1120 kg/m³ za sitni agregat [16]. Također, nastojalo se proizvesti lagani geopolimerni GGBS beton s kokosovim ljuskama. Na taj se način proizvode anorganski polimerni kompoziti, koji bi potencijalno mogli predstavljati značajnu komponentu okolišno održive gradnje u kojoj bi ostvarena čvrstoća odgovarala čvrstoći uobičajenog betona. U okviru eksperimentalnih istraživanja predstavljenih u ovom radu provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće, odnosa naprezanje-deformacija te modula elastičnosti.

2. Materijali i sastav betona

2.1. Kokosove ljuske kao krupni agregat

Kokosove ljuske korištene u ovom istraživanju dobivene su iz uljare smještene blizu Erodea u indijskoj saveznoj državi Tamilnadu. Ljuske su mehanički drobljene u manje komade, prosijane i razdvojene radi ispitivanja svojstava. Prosijane i razdvojene kokosove ljuske prikazane su na slici 1. Njihova svojstva iskazana su u tablici 2.

Tablica 1. Proizvodnja kokosovih oraha

Država	Proizvodnja kokosovih oraha u 2014. [u metričkim tonama]	Postotak svjetske proizvodnje [%]
Indonezija	18300.000	35,8
Filipini	15353.200	30,0
Indija	11930.000	23,3
Brazil	2890.286	5,66
Šri Lanka	2513.000	4,9
Izvor: *The daily records* (*Latest news around the globe* 2018) [4, 9]		

Tablica 3. Kemijski sastav [%] materijala dobiven XPS analizom (rendgenskom fotoelektronskom spektroskopijom)

Kemijski sastav	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	SO_3	P_2O_5	K_2O	MnO	Fe_2O_3	LOI
Kokosove ljuske	63,11	20,7	5,75	1,89	0,6	2,75	0,05	0,15	0,2	2,5	2,3

Slika 1. Prosijane, razdvojene, netretirane i hladnom vodom isprane kokosove ljuske

Tablica 2. Svojstva kokosovih ljuski

Svojstva	Kokosove ljuske
Volumenska masa (rasutih i na zraku osušenih ljusaka) [kg/m³]	695
Udio šupljina [%]	38
Udio vlage [%]	10,02
Specifična težina	1,15
Vrijednost drobljenja [%]	1,59
Udarna vrijednost [%]	8,15
Debljina ljuske [mm]	8 - 10
Modul finoće [%]	6,11

Kokosove ljuske ne mogu se usitniti u određene veličine ili oblike. Stoga se mehaničkim uređajima nasumično usitnjavaju na male komade. Usitnjene ljuske prosijavaju se pomoću standardnog sita za krupni agregat prema normi IS2386-Prvi dio [25]. Dvije veličine kokosovih ljuski su odabrane kako bi se postigla odgovarajuća granulometrija. Da bi se postigla gusta i kruta struktura čestica, primijenjena je metoda gustoće zapunjavanja. Pomoću te metode ljuske se doziraju i prilagođavaju kako bi se postigla gustoća pri kojoj manje kokosove ljuske popunjavaju prostor između većih ljusaka, što je i ispitano određivanjem volumenske mase. Gustoća zapunjavanja prosijanih kokosovih ljusaka izračunana je na način prikazan u izrazu (1) :

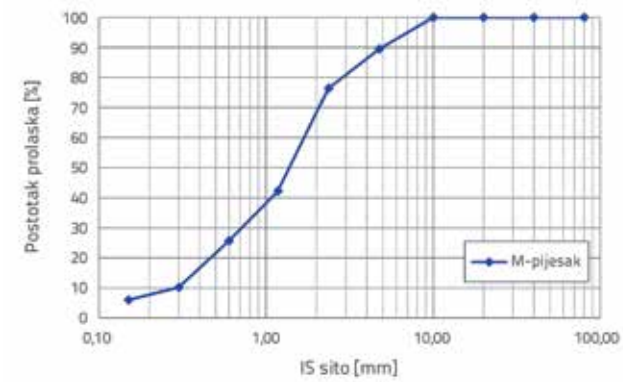
$$\text{Gustoća zapunjavanja} = \frac{\text{volumenska masa}}{\text{specifična težina kokosovih ljusaka}} \quad (1)$$

Optimalna gustoća zapunjavanja prikazana je na slici 2. Najveći stupanj zapunjavanja, kod kojeg se postiže najmanji postotak šupljina za postizanje tražene gustoće, prikazan je na slici 2. Na toj se slici vidi da je najveća volumenska masa postignuta za prolazak 60 % kokosovih ljusaka kroz sito od 10 mm i 40 % ljusaka kroz sito od 12,5 mm, što rezultira s najmanjim postotkom šupljina te je zahvaljujući tome u mješavinu potrebno dodati manje cementa i vode. Kemijski sastav kokosovih ljusaka prikazan je u tablici 3. Postotak metalnih oksida u kokosovim ljuskama je niži i djelovat će kao materijal ispune (filer) nakon očvršćivanja [26, 27].

Slika 2. Gustoća zapunjavanja-kokosove ljuske

2.2. Proizvedeni pijesak (M-pijesak) kao sitni agregat

M-pijesak se tretira i proizvodi u kontroliranom okruženju bez otpadaka, minerala i nadzrna, čime se postiže ekološki prihvatljiv i kvalitetan proizvod. Sitni agregatni pijesak klasificira se u zone I, II, III & IV prema normi IS : 383-2019 [28]. Granulometrijska krivulja M-pijeska prikazana je na slici 3., a svojstva M-pijeska iskazana su u tablici 4.



Slika 3. Granulometrijska krivulja M-pijeska

Tablica 4. Svojstva M-pijeska

Svojstva	Kokosove ljuske
Volumenska masa [kg/m³]	1520
Volumenska masa u suhom i rastresitom stanju [kg/m³]	1500
Povećanje obujma [%]	42
Specifična težina	2,60
Granulometrijska analiza	Zone II
Modul finoće [%]	2,91
Adsorpcija vode [%]	2,25

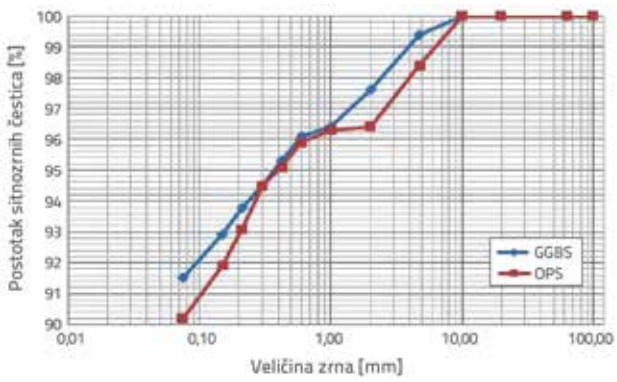
2.3. Obični portlandski cement (OPC), mljevena granulirana zgura iz visokih peći (GGBS) i geopolimer kao alkalno aktivirano vezivo

Kao vezivo se upotrebljava obični portlandski cement koji ispunjava zahtjeve iz indijske norme IS 8112-2013 [29]. Svojstva običnog portlandskog cementa prikazana su u tablici 5.

Tablica 5. Svojstva OPC-a

Fizikalna ispitivanja OPC-a	Rezultati ispitivanja	IS:8112-2013
Vrijeme početnog vezivanja [min]	46	> 30
Vrijeme konačnog vezivanja [min]	243	< 600
Normalna konzistencija [%]	33	-
Finoća [%]	4,0	< 10
Specifična težina	3,10	-

Svojstva mljevene granulirane zgure iz visokih peći (GGBS-a) slična su svojstvima cementa. Radi se o staklastom, nemetalnom, srebrnobijelom, zrnatom materijalu koji sadrži veliku količinu silikata i aluminata kalcija, slično kao i cement. Veličina čestica GGBS-a gotovo potpuno je jednaka veličini čestica cementa, kao što se može vidjeti na slici 4.



Slika 4. Granulometrija GGBS- i OPC-a

GGBS, često pomiješan portlandskim cementom kao sitno punilo, poboljšava gustoću, trajnost i obradivost betona, jednako kao i njegovu otpornost na alkalnosilikatne reakcije. Svojstva GGBS-a prikazana su u tablici 6. Osim toga, valja napomenuti da je veličina čestica vrlo značajno svojstvo, a služi za karakteriziranje praškastih čestica u masi. Ono utječe na svojstva kao što su specifična površina, gustoća zapunjavanja, čvrstoća kompakta, vlačna čvrstoća i svojstva tečenja u svježem stanju. Stoga, nužno je analizirati granulometrijski sastav praškastih materijala. Granulometrijski sastav OPC-a i GGBS-a prikazan je na slici 4.

Tablica 6. Svojstva GGBS-a (mljevene granulirane zgure iz visokih peći)

Osnovni podaci	GGBS
Kemijski sastav	
Silicijev dioksid (SiO_2) [%]	29,61
Aluminijev oksid (Al_2O_3) [%]	17,25
Željezni oksid (Fe_2O_3) [%]	0,58
Kalcijev oksid (CaO) [%]	35,46
Magnezijev oksid (MgO) [%]	5,65
Sumporni trioksid (SO_3) [%]	1,72
Fizikalna svojstva	
Specifična težina	2,65
Finoća [kg/m²]	390

2.4. Superplastifikator

U ovom je radu korišten visokovrijedni plastifikator CERAPLAST 300 na bazi naftalena. Preporuča se kao sredstvo za povećanje obradivosti i postizanje potrebne čvrstoće betona prema IS 9103-1999 [30].

2.5. Udio kokosovih ljusaka u laganom betonu s kokosovim ljuskama

Projektiranje sastava betona je postupak u kojem se odabire odgovarajući postotak cementa (C), sitnog agregata (FA), laganog krupnog agregata od kokosovih ljusaka (LWCSA) i vode, kako bi se postigao beton zadovoljavajuće čvrstoće. Uobičajeni sastav koji se koristi za konvencionalni beton ne može se primijeniti za lagani beton (WC) [10, 11, 17]. Zato je uvijek bolje definirati sastav LWC-a na bazi probnih mješavina [10, 18-22]. Smatra se da je najbolja mješavina postignuta kada se ostvari odgovarajuća ravnoteža između ekonomičnosti i zahtijevanih svojstava betona [18].

Sastavi mješavina korišteni u raznim istraživanjima o betonu s kokosovim ljuskama prikazani se u tablici 7. Treba napomenuti da su svi prikazani LWCSA imali visok udio cementa i manji udio agregata, budući da na čvrstoću betona utječe agregat koji se može koristiti u nosivim konstrukcijama. Na temelju podataka iz literature [18, 20] može se zaključiti da se čvrstoća smanjuje s porastom udjela kokosovih ljusaka. Osim toga, na obradivost bitno utječu vezivo i vodocementni omjer.

Tablica 7. Sažeti prikaz različitih sasatva betona

Autori	Vodocementni omjer	Mješavina C : FA : LWCSA	Napomene
Kalyanapu VenkateswaraRao i dr. [18]	0,45	1 : 1.09 : 0.35 1 : 1.09 : 0.27	10 % zamjene kokosovim ljuskama 20 % zamjene kokosovim ljuskama
Amarnath Yerramalaa Ramachandrudu [20]	0,6	1 : 2.5 : 0.39 1 : 2.5 : 0.585 1 : 2.5 : 0.78	10 % zamjene kokosovim ljuskama 15 % zamjene kokosovim ljuskama 20 % zamjene kokosovim ljuskama Količina cementa je konstantna i iznosi 300 kg/m^3
K. Gunasekaran i dr. [21] K. Gunasekaran i dr. [22]	0,42	1 : 1.47 : 0.65	100 % zamjene kokosovim ljuskama pri čemu je količina cementa konstantna i iznosi 510 kg/m^3
K. Gunasekaran i dr. [10]	0,42	1 : 1.47 : 0.65	100 % zamjene kokosovim ljuskama pri čemu je količina cementa konstantna i iznosi 510 kg/m^3
K. Gunasekaran i dr. [19]	0,42	1 : 1.47 : 0.65	100 % zamjene kokosovim ljuskama pri čemu je količina cementa konstantna i iznosi 510 kg/m^3
A. Jaya prithika i dr. [17, 23]	0,35 0,35 0,35	1 : 1.73 : 0.48 1 : 1.75 : 0.49 1 : 1.77 : 0.49	Cement je zamijenjen GGBS-om, FA je zamijenjen M-pijeskom Dodan je i superplastifikator kako bi se poboljšala obradivost
M. Santhosh Kumar i dr. [24]	0,28	1 : 0.5 : 0.55	GGBS 50 % i SF 15 % uz količinu cementnog veziva od 825 kg/m^3

2.6. Sastav laganog betona s kokosovim ljuskama

Sastav betona s kokosovim ljuskama izrađen je u skladu s normom ACI 211.2-98 [31] koja se odnosi na lagani beton. Izrađeno je nekoliko probnih mješavina, a u analizi je odabrana mješavina u kojoj su vrijednosti čvrstoće bile bliže gornjoj granici [17, 23]. Konačni udjeli sastojaka probne mješavine bili su 1 : 1,80 : 0,50 s 1 % superplastifikatora. Za odabranu su mješavinu ispitani različiti vodocementni omjeri, i to na bazi tri uzorka za svaki omjer, nakon čega je usvojena prosječna vrijednost, kao što je prikazano u tablici 9. U početku je ugrađeno ukupno 18 kocaka dimenzija 100 mm × 100 mm × 100 mm kako bi se optimizirao sadržaj mješavine. Svi su uzorci ugrađeni u dva sloja te su temeljito zbijeni pomoću šipke za nabijanje u skladu s uvjetima iz norme IS : 516 [32]. Nakon ugradnje, uzorci su prekriveni plastičnom folijom i ostavljeni u kalupu 24 sata. Nakon toga, kocke su izvađene iz kalupa i njegovane u vremenu od 28 dana [33].

2.6.1. Sastav probnih mješavina

Sastav probnih mješavina pripremljen je primjenom težinske metode opisane u normi ACI 211.2-98 [31].

Prvi korak : Odabir veličine slijeganja
Prema normi ACI 211.2-98, točka 3.2.2.1
Za slijeganje je pretpostavljena početna vrijednost 2 inča,
tj. 50,80 mm. (2)

Drugi korak : Odabir najveće veličine zrna laganog agregata
Veličina zrna agregata koji prolazi kroz sita 10 mm-4,75 mm i 12,5 mm-10 mm odabrana je pomoću metode za određivanje gustoće zapunjavanja. Analizom odabranih uzoraka dobivena je prosječna vrijednost od 9,3125 mm.
Prema normi ACI 211.2-98, točka 3.2.2.1
Uzimajući u obzir vrijednost od 3/8 inča dobiva se
0,375 × 25,4 = 9,525 mm. (3)

Treći korak : Određivanje udjela vode za miješanje i udjela zraka
Procjena se temelji na jednadžbama (2) i (3) iz tablice 3.2.2.2 prikazane u normi ACI 211.2-98. Za vrijednost slijeganja od 50 mm i veličinu agregata od 9,525 mm, udio vode iznosi = 350 funti po kubnom jardu (lb/yd^3), tj. 350 × 1.09^3/2.2 = 206 kg/m^3.
Dakle, količine vode je : 206 kg/m^3 (4)

Četvrti korak : Odabir vodocementnog omjera (w/c)
Prema normi ACI 211.2-98, točka 3.2.2.3(a).
Potrebna čvrstoća betona = 6000 psi,
tj. 6000 × 9.81/ (2.2 × (25.4)2) = 41,46 N/mm^2
Za tlačnu čvrstoću od 41,46 N/mm^2,
w/c = 0,41 (za beton bez uvučenog zraka) (5)

Peti korak : Proračun količine cementa
Prema jednadžbi (4) i jednadžbi (5), količina vode = 206 kg/m^3 dok je w/c = 0.41
Dakle, količina cementa izračunava se :
206/0,41 = 502,4 kg/m^3. (6)

Šesti korak : Procjena količine laganog krupnog agregata
Prema normi ACI 211.2-98, točka 3.2.2.4
Za veličinu agregata 9,525 iz jednadžbe (3), te modul finoće pijeska 2,91 (tablica 4.).
Za modul finoće pijeska od 2,91, vrijednost 0,531 predstavlja obujam krupnog agregata po jedinici obujma. Korišten je i iznos volumenske mase iz tablice 2. (695 kg/m^3) te iznos količine vode iz tablice 2. (10,02 %).

Budući da je suha volumenska masa = volumenska masa - količina vode = 695 - (695 × 0,1002) = 625,36 kg/m³, iz toga proizlazi da se obujam krupnog agregata po jedinici obujma izračunava kako slijedi :
625,36 × 0,531 = 332,068 kg/m³ betona.
Dakle, obujam krupnozrnatog agregata iznosi 332,068 kg/m³.

Sedmi korak : Procjena količine sitnog agregata
Količina sitnog agregata izračunava se na temelju specifične težine i gustoće drugog sastava, kao što je to prikazano u tablici 8.

Tablica 8. Sastav mješavina

Sastav	Masa u suhom stanju (sušeno u sušioniku) [kg/m³]	Zasićeni površinski suhi agregat [kg/m³]
Voda	206	206
Cement	502	502
Krupni agregat	332,068	431,6
Sitni agregat	766,20	815,64

Osmi korak : Probni omjeri mješavine

voda : cement : sitni agregat : krupni agregat
206 kg/m³ : 502 kg/m³ : 815,64 kg/m³ : 431,6 kg/m³
1 : 1,62 : 0,85

Tablica 9. Početne probne mješavine s različitim vodocementnim omjerima

Sadržaj cementa [kg/m³]	Vodocementni omjer	Gustoća u očvrsnulom stanju [kg/m³]	Tlačna čvrstoća [MPa]
400	0,60	1946	9,78
400	0,55	2109	10,09
400	0,50	2060	11,54
400	0,45	1978	12,45
400	0,40	2005	17,56
400	0,35	2019	22,45

Vrijednosti gustoće, udjela zraka i slijeganja izmjerena su za svaku mješavinu svježeg betona. Gustoća svježeg betona varirala je od 1946 kg/m³ do 2109 kg/m³ (tablica 9.). Izmjereno slijeganje variralo je od 55 mm do 62 mm, što daje srednju obradivost koja ulazi u raspon vrijednosti za obradiv beton. Udio zraka u mješavini varirao je od 6,2 do 8 %, što je relativno visoka vrijednost, ali je ipak unutar raspona od 4 do 8 % prema normi ACI 213R-87 [34]. Tako visoke vrijednosti udjela zraka uglavnom proizlaze iz teksture krupnog agregata korištenog u mješavini koja sprječava dobro zbijanje i time omogućuje visok udio zraka.

3. Eksperimentalna ispitivanja i analiza rezultata

U okviru eksperimentalnog istraživanja provedena je usporedna analiza ponašanja CSC betona s OPC-om, GGBS-om, M-pijeskom i geopolimerom. Promatrana su tri scenarija kako bi se usporedio utjecaj OPC-a, GGBS-a i na geopolimeru baziranog GGBS-a na beton s kokosovim ljuskama, a cilj analize bio je izrada laganog betona s kokosovim ljuskama visoke čvrstoće.

3.1. Materijali, sastav mješavine i njegovanje CSC-a

Predviđena su tri scenarija za određivanje tlačne čvrstoće. U svakom je scenariju probna mješavina bila konstantna (omjer 1 : 1,80 : 0,50), kao što je i navedeno u tablici 9., pri čemu je korišten vodovezivni omjer 0,35, a udio plastifikatora iznosio je 1,0 % prema normi IS 9103-1999 [30]. Za metodologije 1, 2 i 3 ugrađeno je ukupno 18 kocaka dimenzija 100 mm × 100 mm × 100 mm. Osim toga, za metodologiju 3 dodatno su ugrađena tri uzorka oblika valjka (dimenzija 150 mm × 300 mm) u skladu s normom IS 516 [27]. Ugrađeni uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata te su njegovani prekriveni polietilenskim folijama kako bi se spriječilo površinsko sušenje uzoraka, a sve u skladu s normom ASTM C 1761-13B [28].

3.2. Metodologija 1

U okviru metodologije 1, kao vezivo je korišten obični portlandski cement u skladu s indijskom normom IS 8112-2013 [29], dok su M-pijesak i CS korišteni kao zamjena za sitni tj. krupni agregat (slika 5.). Ispitane su tri mješavine, M11, M12 i M13, te je njihova prosječna vrijednost usvojena kao tlačna čvrstoća. Vrijednosti tlačne čvrstoće pojedinih mješavina prikazane su u tablici 10. Prosječna tlačna čvrstoća triju mješavina iznosila je 19,50 N/mm².

Slika 5. Korišteni materijali prema metodologiji 1

Tablica 10. Tlačna čvrstoća za metodologiju 1

Mješavina	Jedinična težina betona W [kg/m³]	Dodatak OPC-a [%]	Tlačna čvrstoća [MPa]
M11	2005	100	18.30
M12	2013	100	19.90
M13	2020	100	20.30

Tablica 11. Tlačna čvrstoća za metodologiju 2

Mješavina	Jedinična težina betona [kg/m³]	Zamjena OPC-a GGBS-om [%]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Prosječna tlačna čvrstoća [MPa]
M21	1987	25	18,50	18,433
M22	2017	25	17,50	
M23	1945	25	19,30	
M31	1949	50	14,60	14,167
M32	2055	50	14,00	
M33	2091	50	13,90	
M41	2013	75	12,56	12,22
M42	1994	75	10,70	
M43	2056	75	13,40	
M51	1994	100	10,20	11,43
M52	2034	100	11,80	
M53	2029	100	12,30	

3.3. Metodologija 2

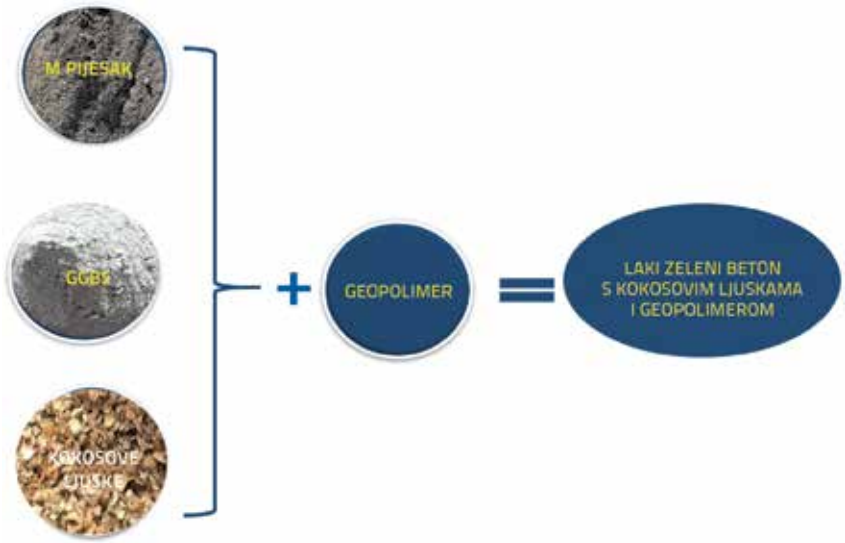
U metodologiji 2 korišten je obični portlandski cement koji udovoljava zahtjevima indijske norme IS 8112-2013 [29]. Ta se metodologija bazira na djelomičnoj zamjeni cementa (25 %, 50 %, 75 % i 100 %) s GGBS-om kao vezivom, te na primjeni M-pijeska i CS-a kao zamjene sitnog tj. krupnog agregata, (slika 6.). Tri mješavine ispitane su za svaki postotak zamjene GGBS-a te je za svaki udio određena prosječna tlačna čvrstoća, kao što se vidi u tablici 11.

Slika 6. Korišteni materijali prema metodologiji 2

Iz tablice 11. vidljivo je da je vrijednost slična onoj iz metodologije 1 postignuta samo kod 25-postotne zamjene GGBS-om. Tome je razlog vjerojatno pločasta struktura kokosovih ljusaka i njihovo svojstvo vezivanja.

3.4. Metodologija 3

U ovoj je metodologiji korišten geopolimer (anorgansko vezivo) u kombinaciji s GGBS-om, M-pijeskom i kokosovim ljuskama, kao što prikazuje slika 7. Otac geopolimera dr. Joseph Davidovits [35] definirao je sedamdesetih godina prošlog stoljeća geopolimerizaciju kao proces koji uključuje kemijsku reakciju koja se javlja između materijala Al-Si, a pritom nastaje jaka alkalna otopina što dovodi do formiranja trodimenzionalnih polimerskih struktura sastavljenih od veza Si-O-Al. Davidovits je 1978. godine utvrdio da spoj Al-Si dobro polimerizira s alkalnom otopinom [35]. Godine 1988. Davidovits je otkrio da je beton korišten u antičkim građevinama alkalno aktivirano aluminatno silikatno vezivo, pa je takav beton nazvao geopolimernim betonom. To je dovelo do ideje o zamjeni cementa i razvoju "geopolimernog betona". Geopolimerna se veziva koriste zajedno s agregatom u izradi geopolimernih betona koji su idealno rješenje za postizanje vrlo visokih ranih čvrstoća u odnosu na konvencionalni beton [36]. Čvrstoća geopolimera ovisi o karakteristikama izvornih materijala [37]. Sljedeći su parametri odabrani za razvoj geopolimernog betona na bazi GGBS-a. U prikazanoj mješavini, alkalna mješavina

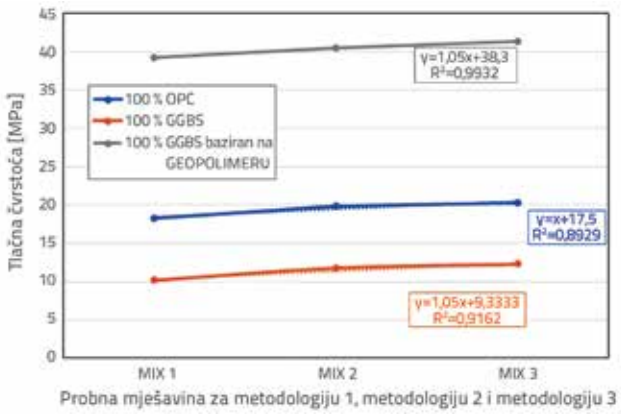


Slika 7. Korišteni materijali prema metodologiji 3

Tablica 12. Tlačna čvrstoća za metodologiju 3

Mješavina	Jedinična težina betona W [kg/m³]	GGBS kao vezivo [%]	Tlačna čvrstoća [MPa]
M61	2078	100	39,30
M62	2013	100	40,50
M63	2043	100	41,40

je pripremljena povezivanjem otopina natrijevog silikata (Na_2SiO_3) i natrijevog hidroksida (NaOH) čiji molarni broj iznosi 10. Molekularna težina natrijevog hidroksida je 40. Kako bi se pripremila otopina natrijevog hidroksida s molarnim brojem 10 (10M), izmjereno je 400 g pločica natrijevog hidroksida koje su zatim polagano dodavane destiliranoj vodi kako bi se formiralo 1000 ml otopine. Otopina natrijevog silikata pripremljena je u laboratoriju 24 sata prije ugradnje u težinskom omjeru od 1 : 2,5. Tlačna čvrstoća geopolimernog betona na bazi GGBS-a prikazana je u tablici 12. Prosječna vrijednost iznosi 40,40 N/mm², što znači da se radi o laganom betonu visoke čvrstoće.



Slika 8. Usporedba tlačnih čvrstoća probnih mješavina

4. Rezultati i analize

4.1. Usporedba tlačnih čvrstoća triju metodologija

Tlačna čvrstoća određena je ispitivanjem kocaka prema normi IS 516-1959 [32]. Na slici 8. se može vidjeti da se željena čvrstoća od 40 MPa može postići za odabrani molarni broj i omjer uz primjenu geopolimera. Čvrstoća postignuta u okviru metodologije 3 bila je za više od 51 % tj. 54 % veća u usporedbi s čvrstoćama iz metodologijama 1 i 2. Glavni razlog takvog povećanja čvrstoće je reakcija polimera i veza polimera s vezivnim materijalima. Usporedbom svih triju metodologija korištenih u ispitivanju, može se zaključiti da se pomoću metodologije 3 postiže zeleni beton baziran s potpunim korištenjem održivih materijala. Stoga je sastav mješavine u metodologiji 3 primijenjen u analizi modula elastičnosti i odnosu naprezanje-deformacija prema odgovarajućim ACI normama.

4.2. Odnos naprezanje-deformacija geopolimernog betona s GGBS-om i kokosovim ljuskama

Sastav mješavina korišten u metodologiji 3 primijenjen je za izradu triju uzoraka oblika valjka (promjer 150 mm i dužina 300 mm). Naprezanje i deformacija tih uzoraka ispitani su pomoću ekstenzometra i kompresometra. Kompresometar je korišten za uspostavu karakteristika naprezanje-deformacija valjkastih uzoraka pri tlaku, a ekstenzometar za određivanje statičkog modula elastičnosti valjkastih uzoraka pri tlaku. Modul elastičnosti određen je prema normi ASTMC 469-02 [38] i ACI 318 [41].

$$E = (S1-S2) / (\varepsilon_2-0{,}000050) \quad (7)$$

gdje je :

E - sekantni modul elastičnosti [MPa]

S1 - naprezanje u iznosu od 40 % graničnog opterećenja [MPa]

S2 - naprezanje koje odgovara uzdužnoj deformaciji od 50×10^{-6} [MPa]

ε_2 - uzdužna deformacija uzrokovana naprezanjem S2.

Sva tri uzorka opterećena su do vrijednosti 40 % graničnog opterećenja prema postupku prikazanom u normi ASTM C 469-02 [38]. Odgovarajući rezultati iskazani su u tablici 13. 80 % čvrstoće kocke uzeto je kao čvrstoća valjka budući da norma

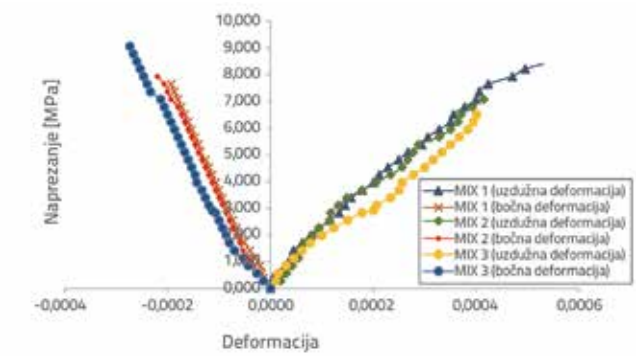
Tablica 13. Modul elastičnosti, gustoća i tlačna čvrstoća (metodologija 3)

Probne mješavine	Gustoća kocke prije ispitivanja [kg/m³]	Postotak od GGBS-a	Tlačna čvrstoća kocke [MPa]	Eksperimentalni modul elastičnosti [MPa]	Modul elastičnosti prema normi ACI [MPa]
M61	2,078	100	39,3	7040,22	20030,92
M62	2,013	100	40,5	7193,71	19386,89
M63	2,043	100	41,4	7390,02	20040,22

ACI definira tlačnu čvrstoću na valjcima, dok je tlačna čvrstoća na kockama određena prema normi IS 516-1959 [32]. Odnos između naprezanja i deformacija uzoraka prikazan je na slici 9. Dijagram naprezanje-deformacije ima oblik parabole, s maksimalnom deformacijom od 0,0004.

$$\text{Modul elastičnosti prema normi ACI} = (w_c^{1.5} \cdot 0{,}043 \cdot \sqrt{f'c}) \qquad (8)$$

gdje je :
w_c - težina kocke u kg/m³,
$f'c$ - $(0{,}8 \cdot f_{ck})$ je karakteristična tlačna čvrstoća [MPa].



Slika 9. Krivulja naprezanje-deformacija pri 40-postotnom graničnom opterećenju betona s kokosovim ljuskama

Statičkim modulom elastičnosti opisuje se krutost ispitanog materijala. Eksperimentalni modul elastičnosti, koji varira između 7,00 i 7,30 GPa, prikazan je u tablici 13. Uočeno je iznimno odstupanje modula elastičnosti prema formuli iz ACI norme u odnosu na eksperimentalne rezultate, što poazuje manju krutost kokosovih ljusaka.

5. Zaključak

- Lokalno dostupni nusproizvodi i poljoprivredni otpadni materijali, kao što su mljevena granulirana zgura iz visokih peći (GGBS), proizvedeni pijesak (M-pijesak) i kokosove ljuske (CS), mogli bi se upotrebljavati za proizvodnju održivih građevnih materijala.
- Geopolimerni beton u kojem se GGBS koristi kao vezivo odlikuje se većom čvrstoćom od konvencionalnog betona s kokosovim ljuskama te betona s GGBS-om i kokosovim ljuskama.
- Potpunom zamjenom običnog betona i geopolimerskog veziva, moguće je postići lagani CSC beton visoke čvrstoće s prosječnom tlačnom čvrstoćom od 40 MPa.
- Primijenjen je sastav 1 : 1,80 : 0,50, pri čemu je postotak kokosovih ljusaka bio vrlo nizak jer GGBS reagira s natrijevim silikatom i natrijevim hidroksidom te time formira gel koji učinkovito povezuje sitni i krupni agregat. Udio kokosovih ljusaka može se povećati kako bi se postigla željena čvrstoća.
- Modul elastičnosti dobiven eksperimentalnim ispitivanjima varira od 7,0 do 7,3 GPa. Ovo smanjenje modula elastičnosti uzrokovano je manjom krutošću kokosovih ljusaka u mješavini.
- Budući da je geopolimerni beton u fazi razvoja, odgovarajuće smjernice Ureda za indijske norme još nisu razrađene.

Zahvala

Autori ovim putem zahvaljuju Upravi sveučilišta SRM na podršci pri izradi ovog rada. Zahvaljujemo također svima koji su izravno ili neizravno sudjelovali u provedbi istraživanja. Također, zahvaljujemo i Centru za nanotehnološka istraživanja pri SRM sveučilištu na pomoći u provedbi mikroanaliza.

LITERATURA

[1] Rishikesh, A.K., Milind, V.M.: A review paper on Recycled Materials in Concrete Pavement, International Journal of Research in Engineering, Science and Technologies, 1 (2015) 8, pp. 186-194.

[2] Vitkar, S., Khan, S.M.R., Shaikh Pashumiya, R., Toke, M.: Assessment of suitability coconut shell as a filler in stone mastic asphalt, international journal of engineering sciences & management, 7 (2017) 1, pp. 304-308.

[3] Damodhara Reddy, B., Aruna Jyothy, S., Shaikm F.: Experimental Analysis of the Use of Coconut Shell as Coarse Aggregate, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 10 (2014) 6, pp. 6-13.

[4] Kanojia, A., Jain, S.K.: Performance of Coconut Shell as Coarse Aggregate in Concrete, A Review, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2 (2015) 4.

[5] Shraddha, D., Hitali, F., Pradeep, D., Varpe, S.: Sustainable Concrete by Partially Replacing Coarse Aggregate Using Coconut Shell, Journal on Today's Ideas-Tomorrow's Technologies, 2 (2014) 1, pp. 1-14.

[6] Palak Patel, N.K., Shraddha, A., Vaniya, R.: Experiments on Replacement of Coconut Shell as Coarse Aggregate in Concrete, Review, IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development, 3 (2015) 2, pp. 866 -867.

[7] Anbazhagan, A., Gopinath, L.: Lightweight Concrete Using Coconut Shell, SSRG International Journal of Civil Engineering - (ICETM-2017), Special Issue (2017), pp. 73-75.

[8] Anwar, A., Ahmad, S., Ahmed, S.A.: Performance of Waste Coconut Shell as Partial Replacement of Natural Coarse Aggregate in concrete, International Journal of Scientific & Engineering Research, 7 (2016) 8, pp.1082-1089.

[9] AOSTAT data, 2014 (last accessed by Top 5 of Anything, January 2014), www.theconcreteportal.com/cons_rel.html.

[10] Gunasekaran, K, Kumar, P.S.: Lightweight concrete using coconut shell as aggregate, Proceedings of the ICACC-2008, International conference on advances in concrete and construction, Hyderabad, India, pp. 450 - 459, February 2008.

[11] Vijina, V.V., Varghese, A., Angitha, N., Aswathy, S., Mohan, K., Shighil, C.: Study on Self Compacting Concrete by Partial Replacement of Coarse Aggregate with Crushed Coconut Shell, International Journal of Research in Advent Technology (E-ISSN, 2321-9637) Special Issue International Conference on Technological Advancements in Structures and Construction "TASC- 15", 10-11 June 2015.

[12] Kambli, P.S., Mathapati, S.R.: Application of Coconut Shell as Coarse Aggregate in Concrete, A Technical Review, Journal of Engineering Research and Applications, 4 (2014) 3, pp.498-501.

[13] Osei, D.Y.: Experimental assessment on coconut shells as aggregate in concrete, International Journal of Engineering Science Invention, 2 (2013) 5, pp. 7-11.

[14] Kabir, S.M.A., Johnson Alengaram, U., Jumaat, M.Z., Sumiani, Y., Sharmin, A., Iftekhair I.B.: Performance evaluation and some durability characteristics of environmental friendly palm oil clinker based geopolymer concrete, Journal of Cleaner Production, pp. 477-492, 2017.

[15] ASTM C330 / C330M-14: Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete.

[16] ASTM C 1761-13b: Standard Specification for Lightweight Aggregate for internal Curing of Concrete.

[17] Prithika, A.J., Sekar, S.K.: Mechanical and fracture characteristics of Eco-friendly concrete produced using coconut shell, ground granulated blast furnace slag and manufactured sand., Construction and Building Materials, 103 (2016), pp. 1-7.

[18] Kalyanapu Venkateswara R., Swaroop, A.H.L., Kodanda Rama P.R., Bharath, C.N.:Study on strength properties of coconut shell concrete, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 6 (2015) 3, pp. 42-61.

[19] Gunasekaran, K., Praksah Chandar, S., Annadurai, R., Satyanarayanan, K.S.: Augmentation of mechanical and bond strength of coconut shell concrete using quarry dust, European Journal of Environmental and Civil Engineering, February 2016.

[20] Amarnath, Y., Ramachandrudu, C.: Properties of Concrete with Coconut Shells as Aggregate Replacement, International Journal of Engineering Inventions, 1 (2012) 6, pp. 21-31.

[21] Gunasekaran, K., Annadurai, R., Kumar, P.S.: Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete, Construction and building materials, 28 (2012) 1, pp. 208-215.

[22] Gunasekaran, K., Kumar, P.S., Lakshmipathy, M.: Mechanical and bond properties of coconut shell concrete, Construction and Building Materials, 1 (2011), pp. 92-98.

[23] Jayaprithika, A., Sekar, S.K.: Stress-strain characteristics and flexural behaviour of reinforced Eco-friendly coconut shell concrete, Construction and Building Materials, 117 (2016), pp. 244-250.

[24] Santhosh Kumar, M., Prasath, V. R., Kumar, P.S., Gunasekaran, K.: Study on mechanical properties of high strength concrete using coconut shell as coarse aggregate, International journal of Chemical Science, 14 (2016) S1, pp. 248-256.

[25] IS 2386-3 (1963), Methods of test for aggregates for concrete.

[26] Madakson, P.B., Yawas, D.S., Apasi, A.: Characterization of Coconut Shell Ash for Potential Utilization in Metal Matrix Composites for Automotive Applications, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 4 (2012) 3.

[27] Leman, A.S., Shahidan, S., Senin, M.S., Izzati, N., Hannan, R.R.: A Preliminary Study On Chemical and Physical Properties Of Coconut Shell Powder As A Filler In Concrete, IOP Conf. Series, Materials Science and Engineering, 160 (2016), pp. 12-59.

[28] IS383-2016: Coarse and Fine Aggregate for Concrete -Specification.

[29] IS8112-2013: Ordinary Portland cement, 43 Grade - Specification.

[30] IS9103-1999: Concrete admixtures - specification

[31] ACI 211.2-98: Standard practice for selecting proportions for Structural Lightweight Concrete.

[32] IS516-1959: Indian Standard method of test for strength of concrete.

[33] ASTM C 1761-13: Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete.

[34] ACI 213R-87: Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete.

[35] Davidovits, J.: 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs, Geopolymer Institute 02100 Saint-Quentin, France, Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia-1.

[36] Sarker, S., Hossain, M.A., Debnath, O.C., Tabassum, N., Islam, M.S.: Strength behaviour of Slag(GGBS) based Geopolymer Concrete in Chlorine Environment, Proceedings of 3rd International Conference on Advances in Civil Engineering, 21-23 December 2016, CUET, Chittagong, Bangladesh.

[37] Vijaya Rangan, B., Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J.: Studies on Fly Ash-based Geopolymer Concrete, Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions.

[38] ASTM C 469-02: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM standards.

[39] IS 456, 2000: Indian Standard Plain and Reinforced Concrete-Code of Practice, BIS, New Delhi, 2000, p. 2000.

[40] ACI 213-R-03: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete.

[41] ACI 318-95: Building code requirement for structural concrete