

Primljen / Received: 28.9.2014.

Ispravljen / Corrected: 15.1.2015.

Prihvaćen / Accepted: 6.2.2015.

Dostupno online / Available online: 10.5.2015.

Samozbijajući lagani beton na visokim temperaturama

Autori:



Prof.dr.sc. **Sivaraja Muthusamy**, dipl.ing.građ.
Sveučilište za inženjerstvo i tehnologiju N.S.N.
Karur, Indija
m.shivaraj2006@gmail.com



Doc.dr.sc. **Poongodi Kolandasamy**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište za žene Vivekanandha
Tiruchengode, Indija
poongodimurthi@gmail.com

Prethodno priopćenje

Sivaraja Muthusamy, Poongodi Kolandasamy

Samozbijajući lagani beton na visokim temperaturama

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja laganog samozbijajućeg betona s dodatkom kokosovih ljuski krupnom agregatu, pod utjecajem visokih temperatura. Nakon izlaganja betona temperaturi od 800 °C, zabilježene su promjene svojstava betona, poput tlačne čvrstoće i gubitka težine. Istraživanje je provedeno na uzorcima betona s dodatkom kokosovih ljuski u različitim omjerima kao zamjenu za krupni agregat. Za pripremanje mješavina betona upotrijebljeni su pepeo rižinih ljuski i silikatna prašina. Rezultati su pokazali da se svojstva očvrstnalog betona smanjuju na temperaturama većim od 400 °C.

Ključne riječi:

lagani samozbijajući beton, kokosove ljuske, pepeo rižinih ljuski, silikatna prašina, visoka temperatura

Preliminary report

Sivaraja Muthusamy, Poongodi Kolandasamy

Lightweight self-compacting concrete at high temperatures

Results of experimental investigation of the lightweight self-compacting concrete subjected to elevated temperatures, with coconut shells added to coarse aggregate, are presented in this paper. Variations in the concrete properties, such as the compressive strength and weight loss, were observed after the concrete was subjected to the temperature of 800 °C. The investigation was carried out on concrete samples with varying proportions of coconut shells. The rice husk ash and silica fume were used to develop two reference concrete mixtures. The results show that the properties of hardened concrete decrease at temperatures of more than 400 °C.

Key words:

lightweight self-compacting concrete, coconut shells, rice husk ash, silica fume, high temperature

Vorherige Mitteilung

Sivaraja Muthusamy, Poongodi Kolandasamy

Selbstverdichtender Leichtbeton bei hohen Temperaturen

In dieser Arbeit sind Resultate experimenteller Untersuchungen von Leichtbeton mit dem Zusatz von Kokosnussschalen in der groben Gesteinskörnung bei hohen Temperaturen dargestellt. Nachdem der Beton Temperaturen von 800 °C ausgesetzt wurde, sind Veränderungen seiner Eigenschaften, z. B. der Druckfestigkeit und des Gewichts, festgestellt worden. Die Prüfungen umfassen Betonproben mit unterschiedlichen Anteilen zugesetzter Kokosnussschalen, als Ersatz grober Gesteinskörnung. Zur Zubereitung zwei Referenzbetonmischungen wurden Reisschalenasche und Quarzstaub benutzt. Resultate zeigen, dass die Eigenschaften erhärteten Betons bei Temperaturen über 400 °C abklingen.

Schlüsselwörter:

Selbstverdichtender Leichtbeton, Kokosnussschalen, Reisschalenasche, Quarzstaub, hohe Temperaturen

1. Uvod

Agregat čini gotovo 60 % ukupnog volumena betona. Proizvodnja betona zahtijeva veliku količinu prirodnih sirovina. Iz svih krajeva svijeta dolaze prijedlozi da se alternativni materijali primjenjuju umjesto konvencionalnih agregata kako bi se smanjila zaliha prirodnih sirovina. Smatra se kako bi lagani agregat mogao uskoro postati zamjena za krupni agregat. Primjenom betona od laganog agregata smanjuje se veličina konstrukcijskih elemenata zbog niske gustoće [1]. Kokosova ljuska (eng. *Coconut Shell - CS*) organski je materijal dobiven iz poljoprivredne industrije, a prikladna je zamjena za konvencionalni agregat [2, 3]. Indija zauzima jednu četvrtinu svjetske proizvodnje kokosa, a nakon obrade ostaje više od 10 milijuna tona otpada. Agregat od kokosovih ljuski (eng. *Coconut Shell Aggregate - CSA*) je laganiji [3] od konvencionalnog agregata, a gustoća mu je 1750 kg/m³.

U literaturi se navodi da se i ljuske palminih plodova mogu koristiti kao krupni agregat u laganom betonu [4, 5]. Agregat od kokosovih ljuski je, uz ljuske palminih plodova, poznat kako lagani agregat u betonu. Usporedna istraživanja su pokazala da je agregat od kokosovih ljuski bolji nego ljuske palminih plodova s obzirom na čvrstoću i trajnost materijala [6]. Postoji samo nekoliko radova koji su obradili primjenu poljoprivrednog otpada kao laganog agregata u konvencionalnom betonu [7, 8].

Samozbijajući beton (eng. *Self compacting Concrete - SCC*) građevni je materijal budućnosti, a predstavlja jedno od najvećih postignuća u tehnologiji betona u zadnja dva desetljeća. Samozbijajući beton je pouzdan konstrukcijski materijal, nesegregirajući, s visokom tečnošću i trajnošću [9]. Obavlja armature bez ikakvih mehaničkih vibracija potrebnih za ispunjavanje oplate. Radi sprječavanja segregacije samozbijajućeg betona tijekom tečenja, veličina krupnog agregata se uzima između 12 i 16 mm, umjesto 20–25 mm za normalni beton, što smanjuje težinu krupnog agregata. Zaključeno je da su lagani agregati prikladni za pripremu samozbijajućeg betona. Djelovanje agregata od kokosovih ljuski na proizvodnju laganog SCC betona još nije ispitano. Ovdje je pobliže ispitivanje provedeno kako bi se procijenila korisnost agregata od kokosovih ljuski u laganom betonu. Kao dio toga, provedeno je ispitivanje utjecaja visoke temperature na svojstva lakog betona s agregatom od kokosovih ljuski, s obzirom na činjenicu što poljoprivredni otpad izložen visokoj temperaturi brzo izgara. Proučavanje požarnih svojstava betona je neizbježno, a ona uvelike ovise o materijalima od kojih se beton proizvodi. Tanyildizi i Coskun [10] su zaključili da

jedino lagani beton s dodatkom letećeg pepela može izdržati temperature veće od 400 °C.

Tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća betona s dodatkom silikatne prašine se smanjuju pri temperaturi od 200 °C [11]. Ovaj rad opisuje utjecaj visoke temperature na mehanička svojstva samozbijajućeg betona s agregatom od kokosovih ljuski.

2. Materijali i metode

2.1. Materijali

Obični portland cement (eng. *Ordinary Portland Cement - OPC*) marke 43 upotrijebljen je u ovom istraživanju. Pepeo rižinih ljuski (eng. *Rice husk ash - RHA*) mineralna je organska primjesa koja se primjenjuje za pripremu prve referentne betonske mješavine, a kombinacijom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine (eng. *silica fume - SF*) priprema se druga referentna betonska mješavina. Specifična težina cementa iznosi 3,15, pepela rižinih ljuski je 2,92, a silikatne prašine 2,28.

Finoća cementa iznosi 2950 cm²/g, pepela rižinih ljuski je 3170 cm²/g, a silikatne prašine 21650 cm²/g. Kemijski sastav cementa i drugih mineralnih primjesa je procijenjen mikroanalizom X-zrakama, a prikazan je u tablici 1.

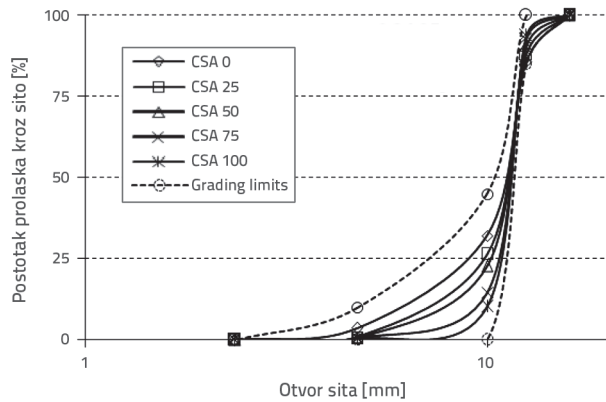
Za sitni agregat upotrijebljen je pijesak s lokalne rijeke Cauvery, modula finoće 2,67, koji pripada graničnoj zoni II, prema normama IS IS:383-1978 [12], a njegova specifična težina iznosi 2,71.

Plavi granit, zrna veličine 12 mm primijenjen je za krupni agregat. Modul finoće agregata bio je 7,19, a specifična težina 2,78. Izmjerena gustoća krupnog agregata iznosila je 2172 kg/m³. Kokosove ljuske su prikupljene s lokalnog polja i sušene na suncu mjesec dana, nakon čega su drobljene. Oprane frakcije kokosovih ljuski potom su sušene na sobnoj temperaturi još mjesec dana. Oblik frakcije suhe kokosove ljuske je parabolican i ljuskast, površina je konkavna i konveksna, a rubovi su oštri i šiljasti.

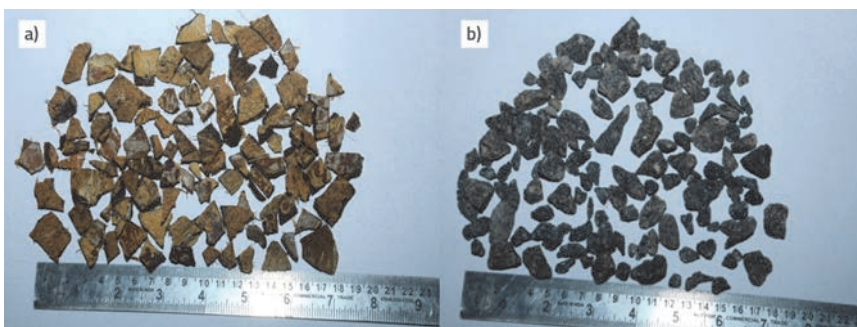
Veličina frakcija je između 3 i 5 mm. Slika 1. prikazuje rezultate raspodjele veličine čestica krupnog agregata (od 5 mm do 12 mm) te zamjenski agregat od kokosovih ljuski u različitim omjerima (25 %, 50 %, 75 % i 100 %); a pripada dobro graduiranim agregatima. Gustoća kokosovih ljuski je 1683 kg/m³, a specifična težina iznosi 1,71. Polikarboksilni superplastifikator (eng. *Superplasticizer - SP*) specifične težine 1,07 primijenjen je da bi se postigla željena obradljivost betona. Slike 2.a i 2.b prikazuju agregat od kokosovih ljuski i konvencionalne agregate od granita korištene u eksperimentalnom ispitivanju.

Tablica 1. Kemijski sastav cementa i mineralnih primjesa

Kemijski sastav Materijali	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	Gubitak mase žarenjem [%]
Cement	22,40	5,20	3,80	61,60	1,70	1,40
Pepeo rižinih ljuski	91,85	0,31	0,26	0,78	0,55	3,49
Silikatna prašina	87,10	0,78	2,10	0,90	1,40	1,09



Slika 1. Granulometrijske krivulje agregata (CSA - agregat od kokosovih ljuski)



Slika 2. Krupni agregati: a) agregat od kokosovih ljuski; b) agregat od granita

2.2. Sastav mješavine

U ovom istraživanju ispitane su dvije vrste betonskih mješavina s ukupnim udjelom praha od 450 kg/m³, odnosno 550 kg/m³. Cement, pepeo rižinih ljuski i silikatna prašina sortirani su za pripremu prve, odnosno druge referentne mješavine betona. Pepeo rižinih ljuski upotrijebljen je kao zamjena za cement za pripremu prve referentne mješavine, a superplastifikator je dodan u drugu mješavinu s promijenjenim udjelom pepela rižinih ljuski i cementa, s obzirom na tlačnu čvrstoću.

Nakon nekoliko pokušaja s predloženom modificiranom metodom projektiranja sastava mješavine za pripremu laganog samozbijajućeg betona, koju su predložili Su i Miao [13] te Choi i suradnici [14], određene su konačne kombinacije sastojaka mješavina SCC450 i SCC550.

Sastav kontrolne mješavine je prikazan u tablici 2. Suhe frakcije kokosovih ljuski granulometrijskog sastava u omjeru 25 %, 50 %, 75 % i 100 % upotrijebljene su umjesto konvencionalnog agregata. Vodovezivni omjer je određen na temelju zapreminske mase praškastih materijala u mješavini. Tablica 3 prikazuje udjele sastojaka u mješavinama s agregatom od kokosovih ljuski.

Tablica 2. Sastav mješavine samozbijajućeg betona

Oznaka mješavine		Sastav [kg/m ³]					v/c	Superplastifikator [kg/m ³]
		Cement	Pepeo rižinih ljuski (RHA)	Silikatna prašina (SF)	Pijesak	Krupni agregat (CA)		
SCC450 (1 : 1.89 : 2.09)	Prva (B450)	330	120	-	850	940	0,35	2,61
	Druga (B450)	318	100	32			0,37	2,68
SCC550 (1 : 1.47 : 1.56)	Prva (T550)	400	150	-	810	860	0,33	2,61
	Druga (T550)	385	125	40			0,35	2,68

Tablica 3. Sastav mješavine laganog samozbijajućeg betona

Mješavina	Zamjena za cement (C) [kg/m ³]	Pijesak (FA) [kg/m ³]	Krupni agregat (CA) [kg/m ³]		Agregat od kokosovih ljuski (CSA) [kg/m ³]		Omjer (C : FA : CA : CSA)
			%	Wt.	%	Wt.	
SCC450	450	850	100	940	0	0	1 : 1,89 : 2,09 : 0
			75	705	25	90,5	1 : 1,89 : 1,57 : 0,2
			50	470	50	181	1 : 1,89 : 1,04 : 0,4
			25	235	75	271,5	1 : 1,89 : 0,52 : 0,6
			0	0	100	362	1 : 1,89 : 0 : 0,8
SCC550	550	810	100	860	0	0	1 : 1,47 : 1,56 : 0
			75	645	25	131	1 : 1,47 : 1,17 : 0,24
			50	430	50	262	1 : 1,47 : 0,78 : 0,48
			25	215	75	393	1 : 1,47 : 0,39 : 0,71
			0	0	100	524	1 : 1,47 : 0 : 0,95

Tablica 4. Vrijednosti rasprostiranja slijeganjem i gustoće samozbijajućeg betona

Oznaka mješavine		Ispitivanje	Udio kokosovih ljuski u krupnom agregatu				
			0 [%]	25 [%]	50 [%]	75 [%]	100 [%]
LWSCC450	Prva (B450)	Rasprostiranje [mm]	680	705	736	758	780
		Gustoća [kg/m ³]	2270	2050	1925	1840	1765
	Druga (T450)	Rasprostiranje [mm]	700	725	748	765	795
		Gustoća [kg/m ³]	2220	2025	1890	1810	1735
LWSCC550	Prva (B550)	Rasprostiranje [mm]	705	715	735	760	785
		Gustoća [kg/m ³]	2305	2070	1950	1845	1775
	Druga (T550)	Rasprostiranje [mm]	720	735	745	770	795
		Gustoća [kg/m ³]	2265	2030	1910	1825	1740

2.3. Ispitivanje

Test rasprostiranja slijeganjem je proveden kako bi se odredili promjeri betonske mješavine D1 i D2 u dva smjera, okomito jedan prema drugom, sukladno normi EN 12350-8 [15]. Ispitivanje V-lijevkom je provedeno prema normi EN 12350-9 [16], kako bi se procijenila sposobnost tečenja laganog samozbijajućeg betona, mjerenjem vremena tečenja betona kroz V-lijevak, pod utjecajem vlastite težine. Za procjenu sposobnosti prolaska betona, prema normi EN 12350 – 10 [17] provedeno je ispitivanje L-kutijom. Koeficijent blokiranja tečenja pokazao je sposobnost zaobilazanja prepreka (kroz gustu armaturu i usku oplatu). Kad je taj koeficijent veći od 0,8, tada samozbijajući beton ima dobru sposobnost prolaska. Gustoća betona je izmjerena u uzorcima koji su njegovani 28 dana, prema Arhimedovom zakonu, mjerenjem mase zasićenih uzoraka u vodi i na zraku, te mjerenjem mase u suhom stanju (uzorci su izloženi temperaturi od 105 °C dok nije ostvarena stalna težina). Na betonskim kockama dimenzija 100 x 100 x 100 mm određen je utjecaj promjene temperature na tlačnu čvrstoću. Tlačna čvrstoća je određena u tlačnoj preši kapaciteta 2000 kN, prema propisu IS: 516-1959 [18]. Čvrstoća je određena dijeljenjem vrijednosti opterećenja pri kojima se pojavljuju pukotine s površinom uzorka, a uzet je u obzir prosječan rezultat triju ispitanih uzoraka.

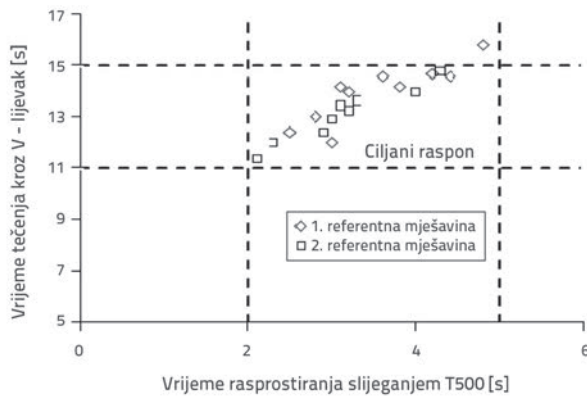
Uzorci su njegovani u vodi 28 dana, a potom izloženi temperaturama od 100 °C, 200 °C, 400 °C i 800 °C, u električnoj pećnici s prirastom temperature od 2,5 °C po minuti. Kad je postignuta ciljana temperatura, uzorci su zadržani na istoj temperaturi sljedećih sat vremena, kako bi se postiglo ravnotežno toplinsko stanje. Nakon toga su ostavljeni da se hlade pri sobnoj temperaturi. Ohlađenim uzorcima ispitana je tlačna čvrstoća. Promjena mase uzoraka je određena pomoću razlike između početne mase prije zagrijavanja uzoraka (w_i) i konačne mase uzoraka nakon hlađenja (w_n), s obzirom na početnu masu uzoraka s točnošću od 0,01 g [19].

3. Rezultati i diskusija

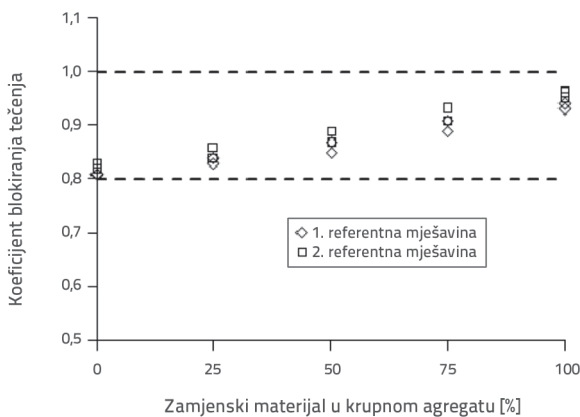
3.1. Utjecaj agregata od kokosovih ljuski na svojstva svježeg betona

Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem provedeno je kako bi se odredila homogenost i obradljivost laganog samozbijajućeg betona. Rezultati su prikazani u tablici 4. Svaka mješavina betona čije je rasprostiranje slijeganjem manje od 500 mm (prosječan promjer betonskog kruga) vrlo je viskozna i ima malu sposobnost tečenja. Vrijednost rasprostiranja slijeganjem koja iznosi 500 do 600 mm pokazuje da mješavina mijenja viskoznost i razvija fluidnost. Kada fluidnost dosegne 600 mm, viskoznost je tada optimalna, a mješavina teče slobodno pod utjecajem vlastite težine [15]. Kao što je prikazano na tablici 4., vrijednost rasprostiranja slijeganjem je iznosila 650 mm i 800 mm, što je u rasponu ciljanih vrijednosti. Vrijednosti kontrolne mješavine betona (bez dodatka kokosovih ljuski) iznosile su 680 mm za mješavinu B450, 700 mm za mješavinu T450, 705 mm za mješavinu B550 te 720 mm za mješavinu T550. Zaključeno je da se povećanjem udjela kokosovih ljuski u konvencionalnom agregatu povećava i vrijednost rasprostiranja slijeganjem. Vrijednost rasprostiranja slijeganjem agregata koji sadrži samo kokosove ljuske iznosila je 780 mm za prvu referentnu mješavinu betona s dodatkom pepela rižinih ljuski, 795 mm za drugu referentnu mješavinu s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine (B450 i T450), a za mješavine B550 i T550 vrijednosti su bile izvan prihvatljivih za samozbijajući beton. Ispitivanjem V-lijevkom određena je sposobnost tečenja betona u svježem stanju i vrijeme potrebno da samozbijajući beton teče kroz V-lijevak pod utjecajem vlastite težine. Ciljane vrijednosti vremena iznose od 11 do 15 sekundi [16]. Odnos vremena potrebnog za rasprostiranje slijeganjem od 500 mm i tečenja kroz V-lijevak do postizanja otpornosti na segregaciju prikazan je na slici 3. Rezultati su bili unutar traženih vrijednosti, što znači da betonske mješavine imaju dobru viskoznost i otpornost na segregaciju, osim kontrolne mješavine s ukupnim

udjelom praha 450 kg/m³. Isprekidana linija na slici 4. označava kritičnu vrijednost koeficijenta blokiranja tečenja (H2/H1), a područje H2/H1 > 0,8 naziva se zona slobodnog tečenja [17]. Rezultati koeficijenta blokiranja tečenja prikazani su na slici 4., a agregat od kokosovih ljuski ispunio je sve zahtjeve za samozbijajući beton, s obzirom na ispitivanje L-kutijom. Dakle, lagani samozbijajući beton s agregatom od kokosovih ljuski imaju dobru sposobnost punjenja i tečenja te dobru otpornost na segregaciju.



Slika 3. Odnos vremena potrebnog za rasprostiranje slijeganjem od 500 mm i tečenja kroz V-lijevak



Slika 4. Koeficijent blokiranja tečenja laganog samozbijajućeg betona

3.2. Utjecaj kokosovih ljuski na gustoću betona

Gustoća uzoraka njegovanih 28 dana prikazana je u tablici 4. Gustoća samozbijajućeg betona se smanjivala s porastom udjela kokosovih ljuski u krupnom agregatu. Gustoća mješavine B450 bez dodatka kokosovih ljuski, nakon 28 dana njegovanja iznosi 2060 kg/m³, a za mješavinu B550 je 2090 kg/m³. Gustoća mješavina T450 i T550 bez dodatka kokosovih ljuski iznosi 2005 kg/m³, odnosno 2025 kg/m³. Prema propisima ASTM C 330 [20], težina laganog betona ne bi trebala prelaziti 1850 kg/m³ u suhom stanju, a obično ta vrijednost iznosi od 1400 kg/m³ do 1850 kg/m³. U mješavini B450, u kojoj udio kokosovih ljuski u agregatu iznosi 75 %, odnosno 100 %, gustoća se smanjuje ispod praga za lagani

beton i iznosila je 1840 kg/m³, odnosno 1765 kg/m³. U drugoj referentnoj mješavini T450 gustoća je smanjena na 1810 kg/m³. U mješavini LWSCC550, gustoća B550 je smanjena na 1845 kg/m³ i 1775 kg/m³ kod dodatka kokosovih ljuski u omjeru 75 % i 100 %. U mješavini T550, gustoća laganog samozbijajućeg betona je smanjena do 1825 kg/m³, odnosno 1740 kg/m³. Rezultati dobiveni iz prve i druge referentne mješavine samozbijajućeg betona sa 75-postotnim udjelom kokosovih ljuski uspoređeni su s rezultatima koje su dobili drugi istraživači [2, 6]. Rezultati pokazuju da veći postotak kokosovih ljuski u samozbijajućem betonu ima značajan utjecaj na smanjenje gustoće betona i može dovesti do smanjivanja mase konstrukcijskih elemenata, što podrazumijeva i manje troškove izgradnje.

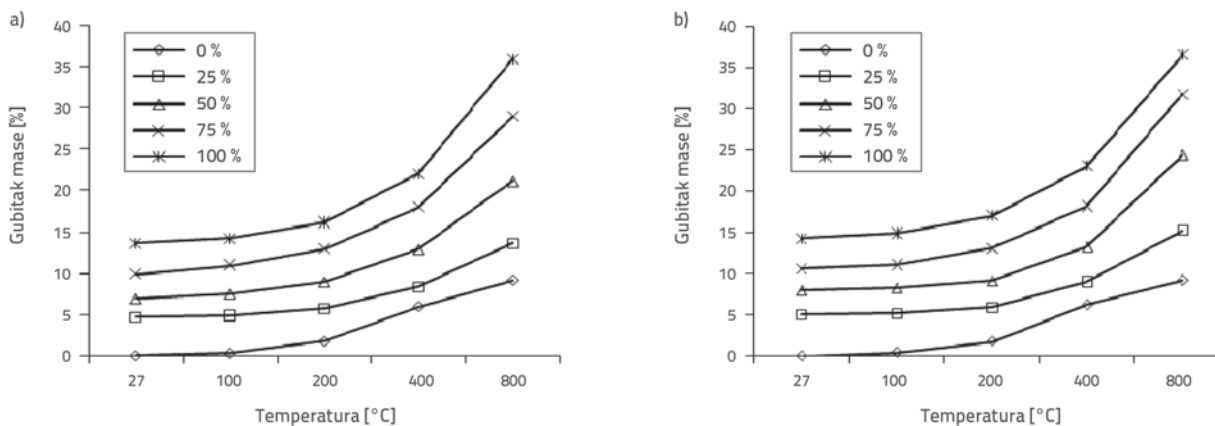
3.3. Utjecaj visoke temperature na gubitak mase

Gubici mase svih uzoraka koji sadrže agregat od kokosovih ljuski izračunani su s obzirom na masu kontrolne mješavine betona (bez dodatka kokosovih ljuski), a rezultati su prikazani na slikama 5 i 6.

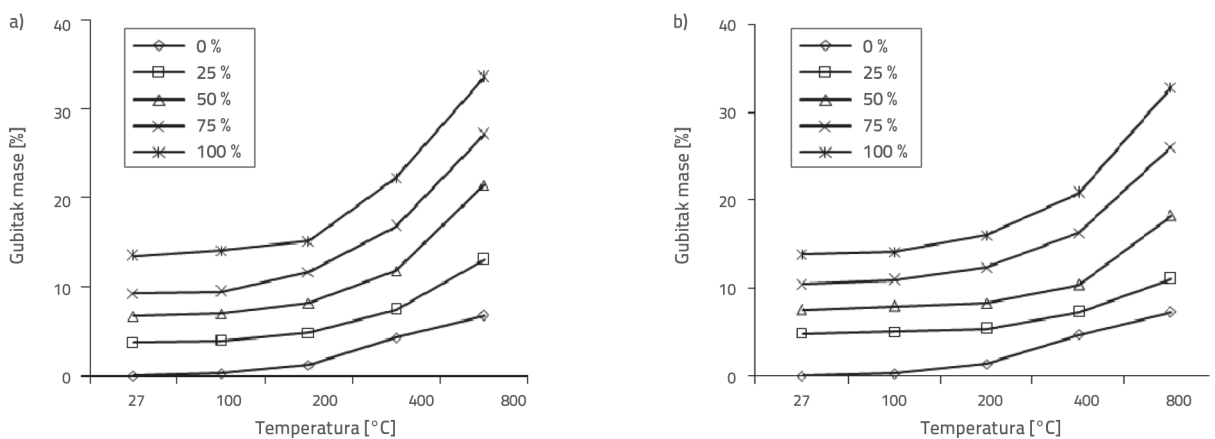
Gubitak mase nije promatran na svim uzorcima referentnih mješavina (LWSCC450 i LWSCC550) prije izlaganja uzoraka temperaturi od 100 °C, a razlog tomu je prisutnost vode u mikroporama matrice. Smanjenje mase kontrolnog betonskog uzorka je promatrano na temperaturama višim od 100 °C, što može biti povezano s činjenicom da voda isparava pri visokim temperaturama. Stopa gubitka mase se povećava znatno na temperaturi od 200 °C, a nakon 400 °C gubitak se smanjuje jer nema više vode u uzorcima.

Usporedbom slika 5.a i 5.b, zaključeno je da je gubitak mase u referentnoj mješavini s dodatkom silikatne prašine veći nego u mješavini s dodatkom pepela rižinih ljuski LWSCC450. Slični rezultati su zapaženi u mješavini LWSCC550 na slikama 6.a i 6.b. Razlog bi mogao biti smanjenje količine Ca(OH)₂ u drugoj referentnoj mješavini betona budući da prisutnost silikatne prašine povećava stopu sekundarne hidratacije. U istraživanju koje je proveo Sancak i suradnici [19], dodavanjem 10 % silikatne prašine u laganom betonu povećava se gubitak mase za razliku od običnog betona stvaranjem dodatne C-S-H veze. Dodatak silikatne prašine omogućuje smanjenje pora u betonu, što može rezultirati povećanjem tlaka u porama.

Na slikama 5. i 6. vidi se da nema značajne promjene u stopi gubitka mase na temperaturi većoj od 100 °C u betonskoj mješavini s dodatkom kokosovih ljuski (u svim omjerima). Manji gubitak mase u uzorcima LWSCC450 i LWSCC550 izmjeren je na temperaturi od 200 °C, a uzrok može biti manja toplinska provodljivost miješanog betona i slabije isparavanje vode u betonu. Kapilarne pore i mikropore laganog betona su ispunjene gustom cementnom pastom s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine. Slike 5. i 6. prikazuju da se težina laganog samozbijajućeg betona smanjuje na temperaturi većoj od 200 °C.



Slika 5. Gubitak mase mješavine LWSCC450 izložene visokim temperaturama: a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski (RHA); b) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine (RHA + SF)



Slika 6. Gubitak mase u mješavini LWSCC550 izložene visokim temperaturama: a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski (RHA); b) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine (RHA + SF)

Razlog tomu može biti agregat od kokosovih ljuski u betonu. Različite stope gubitka mase ovise o omjeru udjela kokosovih ljuski u krupnom agregatu izloženog visokim temperaturama zbog izgaranja agregata. Zbog homogenosti laganog betona, njegova mikrostruktura je pod utjecajem visokih toplinskih naprezanja koji uzorkuju povećanje stope gubitka mase na temperaturi većoj od 400 °C, u usporedbi s kontrolnom mješavinom betona.

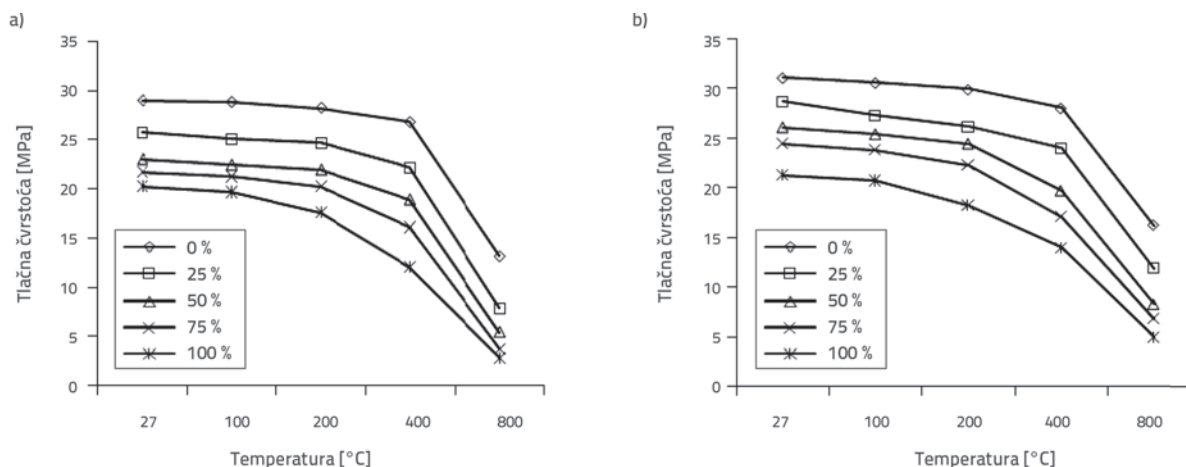
3.4. Utjecaj visoke temperature na tlačnu čvrstoću betona

Promjene tlačne čvrstoće uzoraka izloženih visokim temperaturama prikazane su na slikama 7. i 8. Rezultati pokazuju da je čvrstoća s obzirom na sobnu temperaturu (27 °C) bila veća u kontrolnom betonu (bez dodatka kokosovih ljuski), a dodatak kokosovih ljuski, kao djelomična zamjena za krupni agregat smanjuje tlačnu čvrstoću u svim mješavinama. Početna čvrstoća se neznatno promijenila, s obzirom na vrstu veziva, na temperaturi većoj od 100 °C. Na slici 7. i 8. prikazani

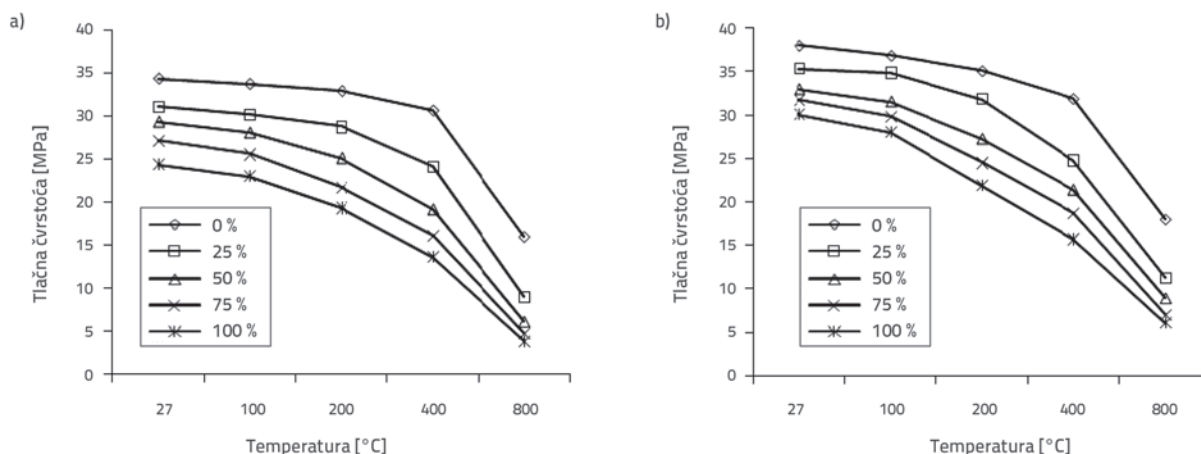
su i rezultati tlačne čvrstoće uzoraka koji su izloženi temperaturi od 100, 200, 400 i 800 °C. Rezultati ispitivanja pokazuju da svaki raspon temperature ima drugačiji utjecaj na gubitak mase. Smanjenje tlačne čvrstoće može se povezati s isparavanjem vode u mikroporama i dehidraciji uzoraka [19, 21] izloženih visokim temperaturama. Promjene u tlačnoj čvrstoći betona pokazuju da visoka temperatura utječe na sastojke u betonu, kao i na okolišne faktore kao što su temperatura, udio vlage, stupanj zagrijavanja, dehidracija, neusklađenost topline između agregata i cementne paste [22, 23]. Tlačna čvrstoća [24] nakon zagrijavanja na različitim temperaturama izražava se omjerom f_T/f_r , gdje je f_T čvrstoća nakon zagrijavanja na T °C, a f_r je početna čvrstoća na sobnoj temperaturi. Tlačna čvrstoća svih uzoraka nakon zagrijavanja na 100 °C, 200 °C, 400 °C i 800 °C prikazana je u tablici 5. Na slikama 7. i 8., stopa smanjenja tlačne čvrstoće u kontrolnom uzorku betona je manja nego u uzorku s dodatkom kokosovih ljuski. Drugim riječima, dodavanje kokosovih ljuski krupnom agregatu smanjuje tlačnu čvrstoću betona. U tablici 5. minimalni gubitak tlačne čvrstoće je zabilježen u obje kontrolne mješavine izložene temperaturi do 400 °C.

Tablica 5. Relativna tlačna čvrstoća

Udio praha [kg/m ³]	Udio kokosovih ljuski u agregatu [%]	Mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski					Mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine				
		27 [°C]	100 [°C]	200 [°C]	400 [°C]	800 [°C]	27 [°C]	100 [°C]	200 [°C]	400 [°C]	800 [°C]
450	0	1	0,99	0,97	0,92	0,46	1,07	1,05	1,03	0,97	0,56
	25	0,89	0,87	0,85	0,76	0,27	0,99	0,94	0,90	0,83	0,41
	50	0,79	0,77	0,76	0,65	0,19	0,90	0,88	0,84	0,68	0,29
	75	0,75	0,73	0,70	0,55	0,13	0,84	0,82	0,77	0,59	0,24
	100	0,70	0,68	0,61	0,42	0,10	0,73	0,71	0,63	0,48	0,17
550	0	1	0,98	0,96	0,90	0,47	1,11	1,07	1,02	0,94	0,52
	25	0,90	0,88	0,84	0,70	0,26	1,03	1,01	0,93	0,82	0,33
	50	0,85	0,82	0,73	0,56	0,18	0,96	0,92	0,79	0,62	0,26
	75	0,79	0,74	0,63	0,47	0,14	0,92	0,87	0,71	0,55	0,21
	100	0,71	0,67	0,56	0,39	0,11	0,88	0,82	0,64	0,46	0,18



Slika 7. Tlačna čvrstoća laganog samozbijajućeg betona izloženog visokim temperaturama (udio praha = 450 kg/m³): a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski; b) mješavina betona s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine



Slika 8. Tlačna čvrstoća laganog samozbijajućeg betona izloženog visokim temperaturama (udio praha = 550 kg/m³): a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski; b) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine

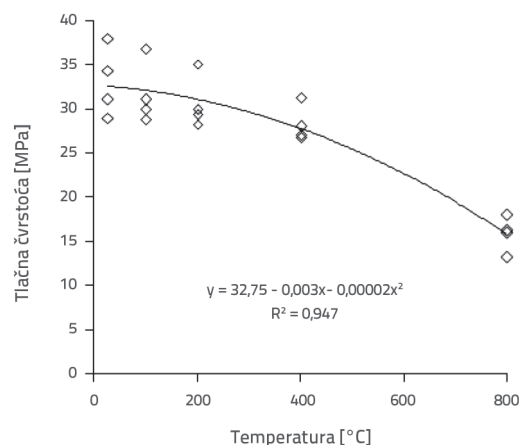
Pri temperaturi od 400 °C, u mješavini s dodatkom pepela rižinih ljuski tlačna je čvrstoća smanjena za 8 %, a u mješavini s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine tlačna je čvrstoća smanjena 3 % s obzirom na tlačnu čvrstoću mješavine LWSCC450. Smanjenje od 10 i 6 % zabilježeno je u mješavini LWSCC550. Slični rezultati su dobiveni u mješavini betona s 25 % kokosovih ljuski u krupnom agregatu.

Na slikama se može vidjeti da vrijednosti tlačne čvrstoće naglo opadaju na temperaturi većoj od 400 °C. Stopa smanjenja čvrstoće zbog djelomične zamjene kokosovih ljuski u krupnom agregatu (u omjerima 25 %, 50 % i 75 %) povećava se na temperaturi većoj od 200 °C, a u uzorku sa 100-postotnim udjelom kokosovih ljuski u agregatu smanjuje se na temperaturi većoj od 100 °C. Slaba mikrostruktura betonske matrice zbog visokih temperatura stvara nepoželjnu konfiguraciju C-S-H gela i povećava pojavu pukotina pri visokim temperaturama. Na 400 °C, smanjenje tlačne čvrstoće je zabilježeno na mješavini s dodatkom pepela rižinih ljuski i kokosovih ljuski, te 52 % smanjenje u mješavini betona s dodatkom pepela rižinih ljuski i kokosovih ljuski LWSCC450, dok je smanjenje 61 % i 54 % zabilježeno u mješavini LWSCC550. Rezultati ispitivanja pokazuju da je smanjenje tlačne čvrstoće betona nastalo zbog upotrebe silikatne prašine koja je formirala trombonitni gel kao ishod pucolanske reakcije $\text{Ca}(\text{OH})_2$ u običnom portland cementu s reaktivnim silicijem [25, 26]. Prisutnost kokosovih ljuski u agregatu uzrokuje značajna oštećenja svih mješavina pri temperaturi iznad 400 °C u usporedbi s referentnom mješavinom, zbog povećanog nastajanja mikropukotina i visokih toplinskih naprezanja. Na temperaturi od 800 °C sve su mješavine bile dehidrirane i njihova su svojstva oslabljena.

3.5. Statističko modeliranje

Statistički odnos između tlačne čvrstoće i temperature samozbijajućeg betona s dodatkom kokosovih ljuski predložen je u ovom eksperimentalnom ispitivanju kako bi se odredile tlačne čvrstoće svih projektiranih betonskih mješavina. Primijenjena je nelinearna regresijska analiza kako bi se ustanovio model između eksperimentalno dobivene tlačne

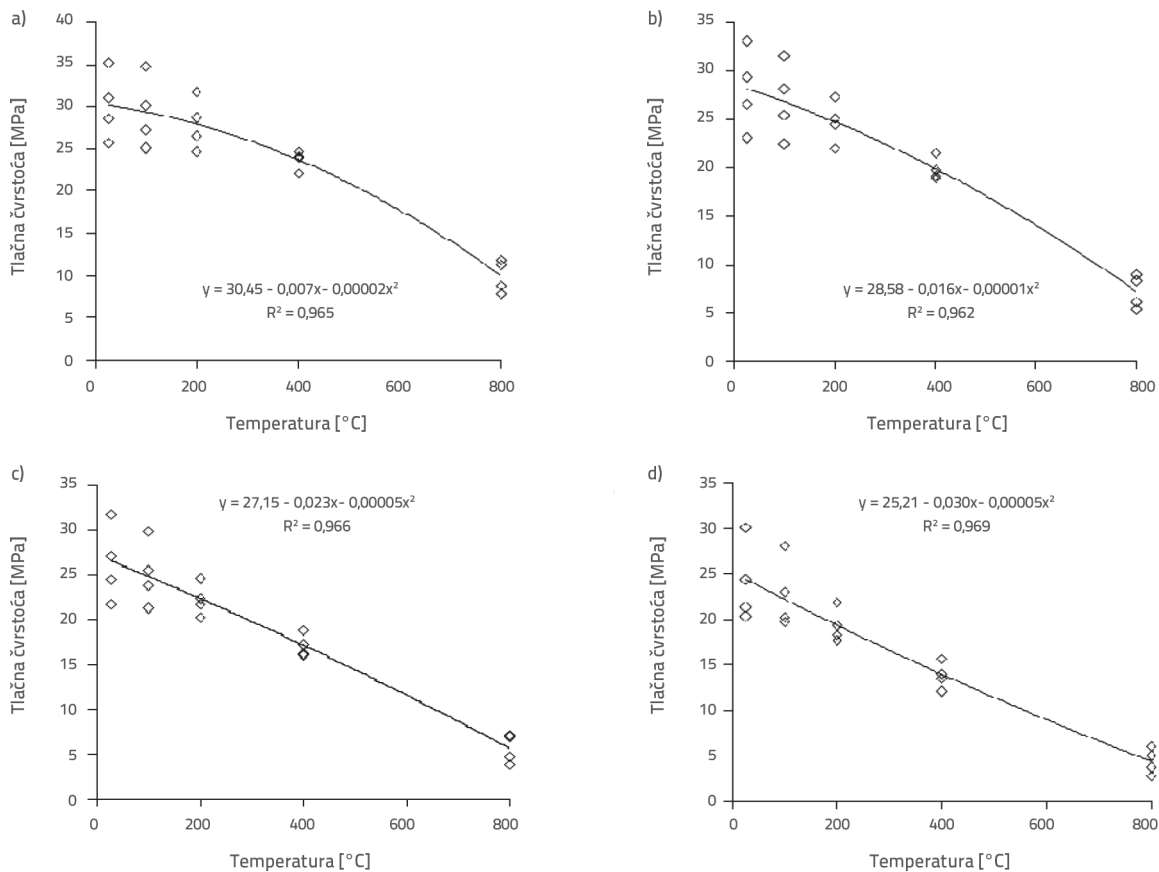
čvrstoće i temperature. Tanyildizi i Coskun [10] odredili su nelinearnu vezu između tlačne i vlačne čvrstoće i temperature kako bi mogli predvidjeti mehanička svojstva laganog samozbijajućeg betona s dodatkom letećeg pepela. Slika 9. prikazuje odnos između tlačne čvrstoće i temperature kontrolnog uzorka samozbijajućeg betona. Pomoću regresijske analize je izračunan visoki koeficijent korelacije ($R^2 = 0,947$), opravdavajući na taj način primijenjenu jednadžbu. Na slikama 10.a i 10.b prikazan je odnos tlačne čvrstoće s obzirom na temperaturu laganog samozbijajućeg betona s dodatkom kokosovih ljuski. Krivulja koja prikazuje odnos između tlačne čvrstoće i temperature mijenja oblik s povećanjem udjela kokosovih ljuski od 0 % do 100 % zbog slabe mikrostrukture betonske matrice koja pokazuje da se povećanjem omjera kokosovih ljuski u krupnom agregatu smanjuje toplinska otpornost laganog samozbijajućeg betona. Mješavine s dodatkom kokosovih ljuski u svim omjerima su prikazane u tablici 6. s visokim koeficijentom korelacije (0,947 do 0,969). Taj koeficijent pokazuje da je jednadžba dobivena iz regresijske analize primijenjena za određivanje tlačne čvrstoće bez eksperimentiranja s minimalnim devijacijama koje iznose 3,1 % u mješavini sa 100 % kokosovih ljuski u samozbijajućem betonu te 5,3 % za mješavinu bez dodatka kokosovih ljuski.



Slika 9. Odnos tlačne čvrstoće i visokih temperatura u kontrolnom uzorku

Tablica 6. Statistički modeli tlačne čvrstoće laganog samozbijajućeg betona u odnosu na temperaturu

Broj	Zamjena u krupnom agregatu (udio kokosovih ljuski u mješavini) [%]	Jednadžba regresije	Koeficijent (R^2)
1	0	$y = 32,75 - 0,003x - 0,00002x^2$	0,947
2	25	$y = 30,45 - 0,007x - 0,00002x^2$	0,965
3	50	$y = 28,58 - 0,016x - 0,00001x^2$	0,962
4	75	$y = 27,15 - 0,023x - 0,000005x^2$	0,966
5	100	$y = 25,21 - 0,030x - 0,000005x^2$	0,969



Slika 10. Odnos između tlačne čvrstoće i različitih temperatura u laganom samozbijajućem betonu: a) 25 %-tna zamjena u krupnom agregatu; b) 50 %-tna zamjena u krupnom agregatu; c) 75 %-tna zamjena u krupnom agregatu; d) 100 %-tna zamjena u krupnom agregatu

4. Zaključak

Rezultati eksperimentalnog ispitivanja su pokazali da gubitak mase nije zabilježen na svim uzorcima dviju referentnih betonskih mješavina (LWSCC450 i LWSCC550) na temperaturi do 100 °C.

Lagani samozbijajući beton s 50-postotnim udjelom kokosovih ljuski u krupnom agregatu nije osjetljiv na temperature do 400 °C, ali daljnjim povećanjem postotnog udjela kokosa u agregatu (više od 50 %), povećava se gubitak mase. Primjenom silikatne prašine u laganom betonu (u omjeru 10 %), povećava se gubitak mase zbog smanjenja količine $\text{Ca}(\text{OH})_2$ u betonu, ali na to ne

utječe agregat s dodatkom kokosovih ljuski. Tlačna čvrstoća mješavine betona s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine bila je veća nego čvrstoća mješavine s dodatkom pepela rižinih ljuski (LWSCC450 i LWSCC550), a smanjenje tlačne čvrstoće je bilo veće u uzorku prve referentne betonske mješavine nego u uzorku druge mješavine. Stopa smanjenja tlačne čvrstoće bila je veća u mješavinama sa 75 % i 100 % udjela kokosovih ljuski u agregatu izloženih na temperaturi od 200 °C, a sve mješavine koje su izložene temperaturi od 800 °C dehidrirane su i oštećene. Statistički modeli za određivanje tlačne čvrstoće laganog samozbijajućeg betona s obzirom na temperaturu imaju vrlo visok koeficijent korelacije.

LITERATURA

- [1] Topcu, I.B.: Semi-light weight concretes produced by Volcanic slags, *Cement and Concrete Research* 29(1997)1, pp.15-21.
- [2] Gunasekaran, K., Kumar, P.S.: Lightweight concrete using coconut shell as aggregate, *Proceedings of International conference on Advances in Concrete and Construction, ICACC-2008*, pp. 450-459.
- [3] Gunasekaran, K., Kumar, P.S., Lakshmiathy, M.: Mechanical and bond properties of coconut shell concrete, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 1, pp. 92-98.
- [4] Basri, H.B., Manna, M.A., Zain, M.F.M.: Concrete using waste oil palm shells as aggregate, *Cement and concrete Research*, 29 (1999) 4, pp. 619-622.

- [5] Teo, D.C.L., Mannan, M.A., Kurian, V.J., Ganapathy, C.: Lightweight concrete made from Oil Palm Shell (OPS): Structural bond and durability properties, *Building and Environment*, 42(2007), pp. 2614-2621., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.013>
- [6] Olanipekun, E.A., Olusola, K.O., Ata, O.: A comparative study of concrete properties using coconut shell and palm kernel shell as coarse aggregates, *Building and Environment*, 41(2006), pp. 297-301., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.029>
- [7] Okafor, F.O.: Palm kernel shell as a lightweight aggregate for concrete, *Cement and Concrete Research*, 18 (1988), pp. 901-910., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90026-9](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(88)90026-9)
- [8] Alegaram, U.J., Mahmud, H., Jumaat, Md, Z.: Comparison of mechanical and bond properties of oil palm kernel shell concrete with normal weight concrete, *International Journal of the Physical Sciences*, 5 (2010) 8, pp. 1231-1239.
- [9] Ratchayut, K., Somnuk, T.: Properties of Self-compacting concrete incorporating bottom ash as a partial replacement of fine aggregate, *Science Asia* 34(2008), pp.87-98., doi: <http://dx.doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2008.34.087>
- [10] Tanyildizi, H., Coskun, A.: The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, 22(2008), pp. 2269-2275., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.033>
- [11] Tanyildizi, H., Coskun, A.: Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperature, *Construction and Building Materials*, 22(2008), pp. 2124-2129., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.017>
- [12] IS: 383-1978 Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete.
- [13] Su, N., Miao, B.: A new method for mix design of medium strength concrete with low cement content, *Cement and Concrete Composites*, 25 (2003), pp. 215-222., doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00013-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00013-6)
- [14] Choi, Y.W., Kim, V.J., Shin, H.C., Moon, H.Y.: An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 9, pp. 1595-1602.
- [15] EN 12350 – 8:2010 Testing fresh concrete: Self-compacting concrete – Slump-flow test.
- [16] EN 12350 - 9 EN 12350 – 10:2010 Testing fresh concrete: Self-compacting concrete – the V-funnel test.
- [17] EN 12350 – 10 EN 12350 – 10:2010 Testing fresh concrete: Self-compacting concrete – L-box test.
- [18] IS: 516-1959 Method of test for strength of concrete.
- [19] Sancak, E., Sari, Y. D., Simsek, O.: Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and superplasticizer, *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008), pp. 715-721., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.004>
- [20] ASTM C330: Standard specification for light weight aggregates for structural concrete.
- [21] Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y. L.: Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 25(2003)1, pp. 83-89.
- [22] Sakr, K., Hakim, E.E.: Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties, *Cement and Concrete Research*, 35(2005)3, pp. 590-596.
- [23] Chan, Y.N., Luo, X., Sun, W.: Compressive strength and pore structure of high performance concrete after exposure to high temperature up to 800°C, *Cement and Concrete Research*, 30(2000)2, pp. 247-51.
- [24] Chan, Y.N., Peng, G., Fand Anson, M.: Residual strength and pore structure of high strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 21(1999)1, pp. 23-27.
- [25] Savya, A., Manita, P., Sideris, K.K.: Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and silicious aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 27(2005), pp. 239-248., doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.013>
- [26] Morsy, M.S., Aalsayed, S.H., Aqel, M.: Effect of elevated temperature on Mechanical properties and microstructure of silica flour concrete, *International journal of Civil & Environmental Engineering (IJCEE-IJENS)*, 10(2010), pp. 1-6.