

# Utjecaj naglog hlađenja na mehanička svojstva samozbijajućeg betona nakon izlaganja visokim temperaturama

---

**Križić, Bože**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:526874>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Bože Križić**

**UTJECAJ NAGLOG HLAĐENJA NA MEHANIČKA  
SVOJSTVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA NAKON  
IZLAGANJA VISOKIM TEMPERATURAMA**

**Diplomski rad**

**Split, 2018.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU****FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: DODIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA

KANDIDAT: Bože Križić

BROJ INDEKSA: 3030

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali I

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Utjecaj naglog hlađenja na mehanička svojstva samozbijajućeg betona nakon izlaganja visokim temperaturama

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti djelovanje visokih temperatura na mehanička svojstva samozbijajućeg betona. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ispitati utjecaj naglog hlađenja uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama. Uzorke je potrebno ispitati nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C, te naglo hladiti vodom. Dio uzoraka se ispituje odmah nakon hlađenja a dio nakon 24 sata čuvanja uzoraka na sobnoj temperaturi. Na uzorcima se mjeri veličina sile, tlačna čvrstoća, brzina prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti kao i promjena mase. Rezultate je potrebno prikazati, usporediti sa prethodnim ispitivanjima u kojima su se uzorci polagano hladili.

U Splitu, 18.10.2017.

Voditelj diplomskog rada:

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:

Prof.dr.sc. Sandra Juradin

doc. dr. sc. Veljko Srzić

**SADRŽAJ:**

1 UVOD .....	4
2 GLAVNE ZNAČAJKE I KARAKTERISTIKE SAMOZBIJAJUĆEG BETONA .....	4
2.1 Definicija pojma samozbijajućeg betona .....	4
2.2. Glavni sastojci samozbijajućeg betona .....	6
2.3 Svojstva svježeg i očvrslog samozbijajućeg betona .....	8
2.3.1 Svojstva svježeg samozbijajućeg betona .....	8
2.3.2 Svojstva očvrslog samozbijajućeg betona .....	8
2.4 Poteškoće pri izradi i ugradnji samozbijajućeg betona .....	9
3 BETON U POŽARU .....	10
3.1 Ponašanje i postojanost betona u požaru .....	10
4 DOSADAŠNJA ISPITIVANJA .....	12
4.1 Uvod .....	12
4.2 Ispitivanje otpornosti samozbijajućeg laganog betona na visokim temperaturama (Sivaraja Muthusamy, Poongodi Kolandasamy).....	12
4.2.1 Materijali, metode i ispitivanje.....	12
4.2.2. Rezultati i Diskusija .....	14
4.3 Smanjenje mehaničkih svojstava betona nakon požara i njegov utjecaj na rezidualnu nosivost (Neno Torić, Ivica Boko, Sandra Juradin, Goran Baloević) .....	22
4.3.1 Eksperimentalni program .....	23
4.3.2. Analia dobivenih rezultata .....	25
4.4 Preostala tlačna čvrstoća betonske smjese oštećene požarom nakon što je ostavljena na zraku, Okan Karahan .....	30
5 EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA NAGLO HLAĐENOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA NAKON IZLAGANJA VISOKIM TEMPERATURAMA .....	33
5.1 Uvod .....	33
5.2 Sastav betona .....	33
5.3 Metoda ispitivanja .....	35
5.4 Rezultati ispitivanja i diskusija .....	37
6 ZAKLJUČAK .....	50
LITERATURA .....	52

## **Mehanička svojstva naglo hlađenog samozbijajućeg betona nakon izlaganja visokim temperaturama**

### ***Sažetak:***

Samozbijajući beton je materijal visoke sposobnosti tečenja koji bez dodatnog vibriranja popunjava oplatu. Beton općenito je građevinski materijal otporan na požar, a promjene koje se događaju na betonskim uzorcima pri naglom hlađenju nakon izlaganja visokim temperaturama ovise o sastavu betona te o razini temperature. U radu je ispitan utjecaj naglog hlađenja uzoraka betona nakon izlaganja visokim temperaturama. Uzorci betona cilindričnog oblika ispitani su nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C. Nakon izlaganja visokim temperaturama te naglog hlađenja vodom na uzorcima je određena tlačna čvrstoća, brzina prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti kao i promjena mase. Prikazana je usporedba vlastitih laboratorijskih ispitivanja samozbijajućeg betona sa rezultatima diplomskog rada [10].

**Ključne riječi:** *samozbijajući beton, visoka temperatura, naglo hlađenje, tlačna čvrstoća, preostala svojstva*

## **Mechanical properties of sudden cooling self-compacting concrete after exposure to high temperatures**

Self-compacting concrete is a high-flowing material which, without further vibration, fills the coating. Beton is generally a fire-resistant building material, and changes occurring on concrete samples at high temperatures after exposure to high temperatures depend on the composition of concrete and on the temperature level. This paper investigated the effect of sudden cooling of concrete samples after exposure at high temperatures. Cylindrical form concrete samples were tested after drying at 100 ° C and after baking at 300 ° C, 500 ° C and 700 ° C. After exposure to high temperatures and sudden cooling of the water on the samples, compressive strenght was determined, ultrasonic passage velocity, dynamic modulus of elasticity as well as mass change. Comparison of own laboratory testing of self-compacting concrete with the results of final work is presented [10].

**Keywords:** *Self compacting lightweight concrete, high temperature, sudden cooling with water, compressive strength, residual properties*

## 1. UVOD

Razvoj tehnologije betona u nekoliko posljednjih desetljeća bio je usmjeren prvenstveno na svojstva materijala bilo u svježem bilo u očvrslom stanju. Postignuta su znatna poboljšanja u razumijevanju svojstava betona kao što su čvrstoća i trajnost. No, za postizanje zahtjevanih svojstava betona u konstrukciji, važne su i pojedine faze u procesu proizvodnje betona kao što su transport, ugradnja i njega koje čine i veliki udio u ukupnim troškovima izvedbe betonskih konstrukcija. Između ostalog, povećanje produktivnosti odnosno smanjenje troškova i povećanje brzine rada te poboljšanje uvjeta rada uz zadovoljavanje propisanih svojstava betona postali su prioritet u građevinarstvu [1].

Početak razvoja samozbijajućeg betona po prvi puta su evidentirani u Japanu 1983. kao posljedica ubrzanog propadanja armiranog betonskih konstrukcija te nedostatka kvalificirane radne snage za kvalitetno ugrađivanje betona. Problematika trajnosti konstrukcija bio je usko povezan sa korozijom armature u betonu. No, rješenje je stiglo od strane profesora Okamura sa Sveučilišta u Tokiju 1988. godine. On je izradio prvi prototip samozbijajućeg betona koristeći materijale koji su već bili dostupni na tržištu. U pogledu svojstva samozbijajućeg betona mogu se navesti tri stanja: [2]

- u svježem stanju: svojstvo samozbijanja,
- u ranoj starosti: izbjegavanje inicijalnih defekata,
- u očvrslom stanju: otporan na vanjske utjecaje.

U radu će se proučiti djelovanje visokih temperatura na mehanička svojstva betona. U eksperimentalnom dijelu rada ispitat će se utjecaj naglog hlađenja uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama te ih usporediti sa onima koji su pušteni da se prirodno ohlade. Uzorci će se ispitati nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C, te će se naglo hladiti vodom. Na uzorcima se mjeri veličina sile, tlačna čvrstoća, brzina prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti kao i promjena mase. Prikazani rezultati usporediti će se sa prethodnim ispitivanjima te komentirati.

## 2. GLAVNE ZNAČAJKE I KARAKTERISTIKE SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

### 2.1 Definicija pojma samozbijajućeg betona

Definicija samozbijajućeg betona (*self compacting concrete*, SCC) može se sažeti na način da se istakne kako se radi o vrsti betona koji tečenjem u potpunosti popunjava oplatu bez upotrebe vibracijskih uređaja. Razvoj tehnologije samozbijajućeg betona počeo je ispunjenjem sljedećih uvjeta: kontrolom reoloških svojstava betona primjenom kemijskih dodataka, potrebom za održivim tehnologijama te nedostacima u primjeni betona visokih performansi primarno nastalim zbog zbijanja vibracijskim uređajima [1].

Zadnjih nekoliko godina samozbijajući beton se primjenjuje kod lijevanih betonskih konstrukcija zbog toga jer prevladavaju teški uvjeti za rad te kod onih gdje je potrebna upotreba pumpe. Samozbijajući beton dizajniran je na način da zadovolji specifična svojstva koja zahtijevaju visoku deformabilnost te visoku sposobnost tečenja i prolaza. Zbog složenijeg sastava i niske granice popuštanja i viskoznosti osjetljiviji je na promjene od običnog betona. Svježi samozbijajući beton mora imati ista osnovna svojstva kao i obični beton. To znači da se mora lako preoblikovati, a da pri tome ne dolazi do segregacije na bilo kojem nivou veličine zrna. U usporedbi s običnim betonom, kod samozbijajućeg betona obično je manji udio krupnog agregata, manji je vodovezivni omjer te je povećan udio paste i superplastifikatora, a prema potrebi može se upotrijebiti i dodatak za promjenu viskoznosti [2].

Primarni zahtjevi za samozbijajući beton su: [2]

- razred tlačne čvrstoće (HRN EN 206-1),
- razred izloženosti ili granične vrijednosti sustava,
- maksimalni vodocementni omjer,
- minimalna količina cementa,
- najveća veličina zrna agregata,  $D_{max}$ .

Dodatni zahtjevi za samozbijajući beton: [2]

- vrijednost T500 kod rasprostiranja slijeganjem ili V - lijevak
- otpornost segregaciji,
- temperatura svježeg betona, ako se razlikuje od HRN EN 206-1,
- drugi tehnički zahtjevi.



*Slika 2.1. Predgotovljeni element od samozbijajućeg betona [8]*

## **2.2 Glavni sastojci samozbijajućeg betona**

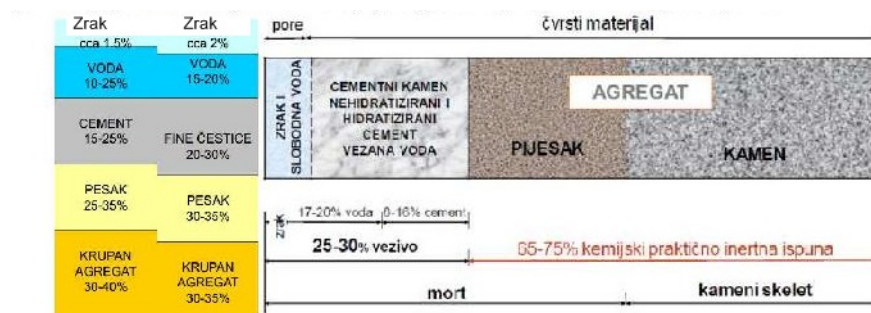
Glavni sastojci samozbijajućeg betona su:

- Cement - hidraulično vezivo koje ima ulogu čvrsto sjediniti krupna i sitna zrna agregata. Koristi se za izradu morta i betona. Proizvodi se iz vapnenca i gline koji se peku u rotacionoj peći na 1400°C gdje nastaje cementni klinker koji se nakon završetka procesa pečenja hladi i skladišti. To je materijal u obliku praha koji pomiješan s vodom, kemijskom reakcijom i fizikalnim procesima, prelazi u očvrslu masu, odnosno cementnu pastu ili cementni kamen.
- Voda - predstavlja vrlo bitan sastojak svake betonske mješavine budući da potiče proces hidratacije cementa. Zauzima od 5 – 10% ukupne mase betona, a omogućuje



uspješno ugrađivanje i završnu obradu betona. Najčešće se za spravljanje betona koristi voda iz gradskih vodovoda koje je pogodna i za piće [2].

- Svojstva betona značajno ovise o količini agregata, budući da agregat čini 70 – 80% mase betona, a najčešće se koriste prirodni riječni šljunak i pijesak. Oblik i granulometrijski sastav agregata utječu na tečenje i sposobnost prolaza te na sadržaj pora u betonu bilo da je beton u svježem ili u očvrslom stanju [2].
- Superplastifikatori - kemijski dodaci koji se koriste za proizvodnju samozbijajućeg betona kod kojih je potrebno zadovoljiti svojstvo tečenja i otpornosti na segregaciju. Također se koristi kod betona vrlo velikih čvrstoća i betona s vrlo malim vodocementnim faktorom pri čemu se omjer vode i cementa može smanjiti do 0,28.
- Modifikatori viskoziteta - aditivi koji se koriste kako bi se smanjila segregacija i osjetljivost betonske mješavine na promjenu sadržaja vlage i prašinih čestica u agregatu. Njihovom upotrebom dobiva se stabilnija i homogenija smjesa.
- Aeranti - aditivi koji se koriste kod samozbijajućeg betona kako bi se osigurala otpornost na mraz. Također, poboljšavaju završnu obradu ravnih površina.
- Pigmenti - aditivi koji utječu na svojstva svježe betonske mješavine zbog čega se prije njihove upotrebe trebaju uraditi prethodne provjere.
- Vlakna - smanjuju sposobnost tečenja i prolaza kroz armaturu te na taj način negativno utječu na samozbijajući beton kod kojih se koriste čelična i polimerna vlakna. Prije upotrebe neophodna je provjera tipa, dužine i količine vlakana za postizanje zahtijevanih svojstava svježeg i očvrsllog betona [2].



Slika 2.2. Omjer zastupljenosti sastojaka samozbijajućeg betona [9]

## 2.3 Svojstva svježeg i očvrslog samozbijajućeg betona

Kod samozbijajućeg betona najvažnije su njegove karakteristike u svježem stanju. Dakle, ključne karakteristike svježeg SCC su: sposobnost tečenja, viskoznost (izražena brzinom tečenja), sposobnost zaobilaženja prepreka i otpornost segregaciji. Tečenje i viskoznost osnovni su faktori sposobnosti popunjavanja oplata samozbijajućeg betona [2].

### 2.3.1 Svojstva svježeg samozbijajućeg betona

Tečenje samozbijajućeg betona postiže se korištenjem visokog udjela vodom reduciranih smjesa. Za mjerenje tečenja koristi se metoda rasprostiranja slijeganjem kojom se opisuje tečenje betona bez prepreka. Upotrebljava se za provjeru konzistencije betona. Dodatne se informacije dobivaju vizualnim pregledom i mjerenjem vrijednosti T500. Taj se zahtjev može ispuniti upotrebom veziva s visokim sadržajem najsitnijih čestica. Za postizavanje visoke sposobnosti tečenja i istodobno stabilnosti, pastu se dodaju čestice sitnije od cementa. Viskoznost predstavlja otpor materijala prema tečenju. Određuje se reometrom ili empirijskim postupcima od kojih je preporučeno ispitivanje s pomoću V - lijevka. Beton male viskoznosti imat će vrlo brzo početno tečenje, ali će nakon kratkog vremena doći do potpunog zaustavljanja tečenja. Velika viskoznost imat će za posljedicu dulje tečenje betona. Sposobnost zaobilaženja prepreka predstavlja sposobnost svježe betonske mase da prolazi kroz gusto postavljenu armaturu i u potpunosti ispunjava oplatu, bez segregacije. Određuje se L - kutijom, a mogu se primijeniti i metode: U - kutija, J - prsten i Kajimaina kutija. Otpornost segregaciji predstavlja postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu. Pojava segregacije može biti izražena u visokim betonskim elementima. Otpornost segregaciji definira se samo za veće razrede slijeganja rasprostiranjem (SF) ili za više razrede viskoznosti (VS/VF) [2].

### 2.3.2. Svojstva očvrslog samozbijajućeg betona

Tlačna čvrstoća predstavlja osnovnu karakteristiku očvrslog betona. Definira se kao prosječno naprezanje u uzorku izloženog centričnom opterećenju pri sili loma.

Samozbijajući beton sa istim vodocementnim faktorom imat će veću čvrstoću u usporedbi s običnim betonom zbog jače veze između agregata i očvrslje paste. Metode ispitivanja vlačne čvrstoće su ispitivanje direktnim centričnim zatezanjem, cijepanjem te savijanjem. Samozbijajući beton se može projektirati tako da zadovolji bilo koju propisanu klasu čvrstoće pri pritisku, dok vlačna čvrstoća može da bude i veća zbog bolje mikrostrukture i manje ukupne poroznosti. Budući da agregat čini veći dio obujma betona, vrsta i količina agregata te njegov modul elastičnosti imaju značajan utjecaj na modul elastičnosti betona. Povećanje obujma paste bi moglo uzrokovati smanjenje ovog parametra. Kako samozbijajući betona često ima veći sadržaj u odnosu na obični beton, dolazimo do zaključka da je modul elastičnosti nešto nižih vrijednosti (do 20%) kod samozbijajućeg nego kod običnog betona [2].

## 2.4 Poteškoće pri izradi i ugradnji samozbijajućeg betona

Uzimajući u obzir osnovne principe projektiranja sastava samozbijajućeg betona, izbjegavaju se neželjene pojave segregacije i izdvajanja vode. No, upotreba kemijskih dodataka u samozbijajućem betonu može dovesti do ranog gubitka obradljivosti u kombinaciji s produženim vremenom vezivanja. To razdoblje je kritično, jer može doći do hidrostatskog tlaka u sustavu pora neočvrsnulog betona [2]. Većina kemijskih dodataka za samozbijajući beton uvlači više zraka u betonsku mješavinu nego što je poželjno. Iz tog razloga dodaci mogu imati ukomponiranu komponentu otpjenjivača koji su katalizatori pa u određenoj mjeri reduciraju formiranje pora. Također se razmatra tlak betona na oplatu. Oplata mora biti dimenzionirana tako da može podnijeti hidrostatski tlak betona. Pojedinih je istraživanjima utvrđeno da je pritisak na oplatu približno jednak hidrostatskom tlaku svježeg betona, premda su neki autori izmjerili puno manje vrijednosti [1].



*Slika 2.3. Samozbijajući beton tokom ugradnje [9]*

### 3 BETON U POŽARU

Ispitivanja su pokazala da požarna postojanost betona ovisi o nizu parametara, a najutjecajniji su: [4]

- sadržaj vlage u betonu
- brzina porasta temperature u požaru i najveća temperatura
- gustoća i čvrstoća betonske strukture
- volumen pora u betonu te presjek pora
- mineralni sastav agregata
- količina, vrsta i položaj armature
- oblik i dimenzije građevinskog elementa
- tlačne napetosti u betonskom elementu.

U požaru betoni već u temperaturnom području između 100 i 200°C izgube velik dio čvrstoće. Betoni s čeličnim vlaknima se ne ponašaju puno bolje, iako vlakna sprječavaju otpadanje djelomično odbijenih dijelova [4].

#### 3.1 Ponašanje i postojanost betona u požaru

Beton, zajedno sa svojim komponentama, prema normi HRN EN 13501-1, spada u najviši razred otpornosti prema djelovanju požara –A1. Pri tipičnom požaru, temperature dosežu oko 500°C unutar 10 minuta, i 950°C za 1 sat pa beton mora imati dovoljnu otpornost kako bi podnio nagli porast temperature kao i najveću temperaturu kojoj je izložen. Brz porast temperature tijekom požara uzrokuje porast tlaka energije u porama betona i može uzrokovati eksplozivno ljuštenje betonske površine. Do te pojave dolazi najčešće tijekom prvih 30 minuta izlaganja visokoj temperaturi. Beton nastavlja s degradacijom formacijom kontinuiranih pukotina. Tijekom požara pri uobičajenim temperaturama od oko 900°C samo vanjski slojevi betonskih elemenata postaju drastično vrući dok unutarnji slojevi ostaju hladniji i tako štite armaturu. Beton koji je bio izložen djelovanju visoke temperature mijenja boju, smanjuje se tlačna čvrstoća u zavisnosti od kemijskog sastava upotrijebljenog cementa i agregata, no uzrok sloma konstrukcije vjerojatno će se pripisati gubitku nosivosti armature [4].

Razaranje strukture betona na visokim temperaturama je posljedica različitih mehanizama razaranja, koji su međusobno zavisni. Sljedeće pojave utječu na razaranje strukture betona:

- stvaranje tlaka vode,
- kemijske promjene,
- slom armature (pad nosivosti armature),
- promjene dimenzija uslijed povišene temperature.

Kemijske promjene, mala požarna otpornost armature, kao i deformacije poprečnog presjeka pri djelovanju požara su povezani mehanizmi koji dovode do „kolapsa“ konstrukcije [4]. Kad se beton zagrijava od površine prema unutrašnjosti, već se pri temperaturi od 100°C počinje uparivati vlaga u betonu, ali i kristalna voda u agregatnim zrnima. Vodena para ima znatan nadtlak i pokušava „pobjeći“ iz betona kroz pukotine i pore u betonu. Dobro zgusnut i neraspuknuti beton ima premalo pora da bi se nadtlak vodene pare kroz njih brzo oslobađao, pritom se s porastom temperature u unutrašnjosti uparuje i dodatna količina vode. Što je kvalitetniji beton (što je niži njegov vodocementni odnos), manje je u njemu kapilarnih pora i one nisu međusobno povezane. Tako s trajanjem požara porni tlak u unutrašnjosti betona stalno raste, nekad rastu i tlačne napetosti u najviše zagrijanim rubnim zonama betona zbog podizanja temperature. Kad napetost nadvlada čvrstoću dolazi do rušenja strukture materijala. Da bi se spriječila opasnost eksplozijskog otpadanja betonskih dijelova, u betonu bi trebalo biti malo vlage (po mogućnosti ispod 2 posto), te osigurati strukturu pora koja će omogućiti brže oslobađanje nastalog pornog nadtlaka, bar do mjere da nadtlak nikad ne prekorači vlačnu čvrstoću betona. Za postojanost pri daljnjem podizanju temperature (sada iznad 200°C, kad se izgubi utjecaj vode u betonu) važna je i vrsta agregata. Neugodni su gipsani kameni, limonit i liskunski škriljevac, ali i vapnenac koji iznad 900°C prelazi u vapno uz oslobađanje ugljikova dioksida [3].

## 4. DOSADAŠNJA ISPITIVANJA

### 4.1. Uvod

U radu će se prikazati dosadašnja istraživanja i ispitivanja samozbijajućeg laganog betona na visokim temperaturama te smanjenje mehaničkih svojstava betona nakon požara i njegov utjecaj na rezidualnu nosivost.

### 4.2 Ispitivanje otpornosti samozbijajućeg laganog betona na visokim temperaturama (Sivaraja Muthusamy, Poongodi Kolandasamy)

#### 4.2.1 Materijali, metode i ispitivanje

U ovom istraživanju korišten je obični portland cement (eng. *Ordinary Portland Cement* - OPC) marke 43. 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 cm<sup>2</sup>/g, pepela rižinih ljuski 3170cm<sup>2</sup>/g, a silikatne prašine 21 650 cm<sup>2</sup>/g. 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, a njegova specifična težina iznosi 2,71. Kao krupni agregat korišten je plavi granit, zrna veličine 12 mm. Modul finoće agregata bio je 7,19, a specifična težina 2,78. Izmjerena gustoća krupnog agregata iznosila je 2172 kg/m<sup>3</sup>. Kokosove ljuske dostavljene su 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 paraboličan i ljuskast, površina je konkavna i konveksna, a rubovi su oštri i šiljasti. Veličina frakcija je između 3 i 5 mm. U ovom istraživanju ispitane su dvije vrste betonskih mješavina s ukupnim udjelom praha od 450 kg/m<sup>3</sup>, odnosno 550 kg/m<sup>3</sup>. 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 kod pripreme prve referentne mješavine, a superplastifikator je dodan u drugu mješavinu s promijenjenim udjelom pepela rižinih ljuski i cementa [5].

Nakon nekoliko pokušaja s predloženom modificiranom metodom projektiranja sastava mješavine za pripremu laganog samozbijajućeg betona, koju su predložili Su i Miao te Choi i suradnici, određene su konačne kombinacije sastojaka mješavina SCC450 i SCC550. Suhe frakcije kokosovih ljuski upotrijebljene su u omjeru 25 %, 50 %, 75 % i 100 % u odnosu na krupni agregat. Vodovezivni omjer određen je na temelju zapreminske mase praškastih materijala u mješavini [5].

Test rasprostiranja slijeganjem proveden je kako bi se odredili promjeri betonske mješavine D1 i D2 u dva okomita smjera, sukladno normi EN 12350-8. Ispitivanje V-lijevkom provedeno je prema normi EN 12350-9, 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, provedeno je ispitivanje L-kutijom. Koeficijent blokiranja tečenja pokazao je sposobnost zaobilaznja prepreka (kroz gustu armaturu i usku oplatu). Ukoliko je taj koeficijent veći od 0,8, samozbijajući beton ima dobru sposobnost prolaska. Gustoća betona izmjerena je 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 mm x 100 mm x 100 mm određen je utjecaj promjene temperature na tlačnu čvrstoću. Tlačna čvrstoća ispitana je u tlačnoj preši kapaciteta 2000 kN, prema propisu IS: 516-1959. Čvrstoća je određena dijeljenjem vrijednosti opterećenja, pri kojim 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 podvrgnuti temperaturama od 100 °C, 200 °C, 400 °C i 800 °C, u električnoj pećnici s prirastom temperature od 2,5°C po minuti. Kada je postignuta ciljana temperatura, uzorci su zadržani na istoj temperaturi sljedećih sat vremena, kako bi se postiglo ravnotežno toplinsko stanje unutar strukture uzoraka. Nakon toga ostavljeni su da se hlade pri sobnoj temperaturi. Ohlađenim uzorcima ispitana je tlačna čvrstoća. Promjena mase uzoraka određena je pomoću razlike između početne mase prije zagrijavanja uzoraka ( $w_i$ ) i konačne mase uzoraka nakon hlađenja ( $w_h$ ), s obzirom na početnu masu uzoraka s točnošću od 0,01 g. [5].

#### 4.2.2. Rezultati i Diskusija

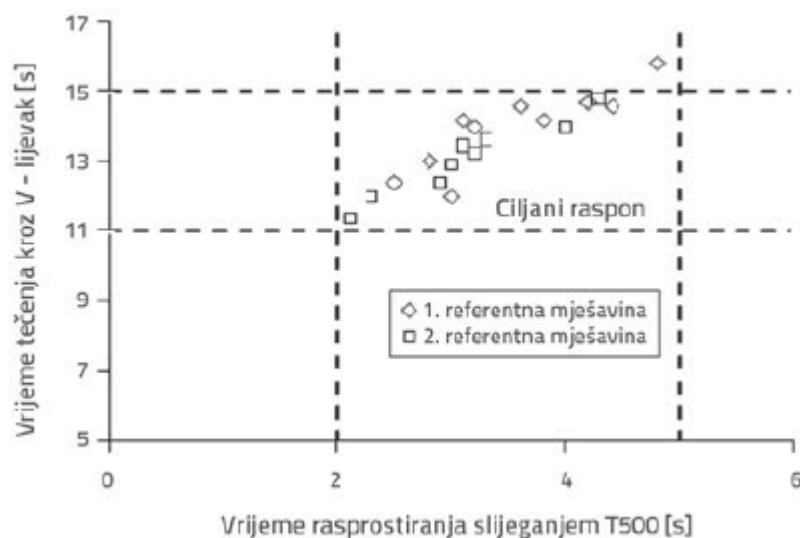
Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem provedeno je kako bi se odredila homogenost i obradivost laganog samozbijajućeg betona. Rezultati su prikazani u Tablici 4.1.

Tablica 4.1. Vrijednosti rasprostiranja slijeganjem i gustoće samozbijajućeg betona [6]

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 <sup>3</sup> ]	2270	2050	1925	1840	1765
	Druga (T450)	Rasprostiranje [mm]	700	725	748	765	795
		Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	2220	2025	1890	1810	1735
LWSCC550	Prva (B550)	Rasprostiranje [mm]	705	715	735	760	785
		Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	2305	2070	1950	1845	1775
	Druga (T550)	Rasprostiranje [mm]	720	735	745	770	795
		Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	2265	2030	1910	1825	1740

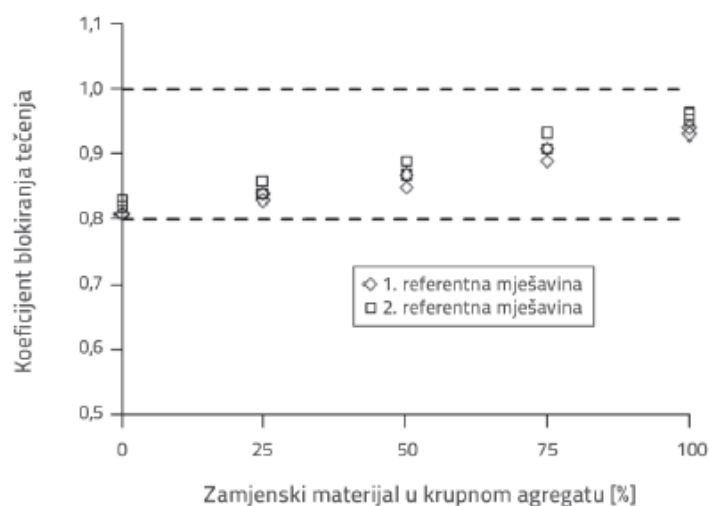
Svaka mješavina betona čije je rasprostiranje slijeganjem manje od 500 mm (prosječan promjer betonskog kruga) ima malu sposobnost tečenja. Vrijednost rasprostiranja slijeganjem koja iznosi 500 do 600 mm pokazuje da mješavina mijenja viskoznost i razvija fluidnost. Kada fluidnost dosegne 600 mm, viskoznost je optimalna, a mješavina teče slobodno pod utjecajem vlastite težine. Kao što je prikazano u Tablici 4.1., vrijednost rasprostiranja slijeganjem iznosila je 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 sastavu betona 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. Optimalne vrijednosti vremena su u interval od 11 do 15 sekundi. Odnos vremena potrebnog za rasprostiranje slijeganjem od 500 mm i tečenja kroz V-lijevak do postizanja otpornosti na segregaciju prikazan je na Slici 4.1. [5].





Slika 4.1. Odnos vremena potrebnog za rasprostiranje slijeganjem od 500 mm i tečenja kroz V-lijevak [6]

Rezultati su bili unutar traženih vrijednosti, što znači da sve betonske mješavine imaju dobru viskoznost i otpornost na segregaciju, osim kontrolne mješavine s ukupnim udjelom praha  $450 \text{ kg/m}^3$ . Isprekidana linija na Slici 4.2. označava kritičnu vrijednost koeficijenta blokiranja tečenja ( $H_2/H_1$ ), a područje  $H_2/H_1 > 0,8$  naziva se zona slobodnog tečenja. 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 tečenja te dobru otpornost na segregaciju [5].

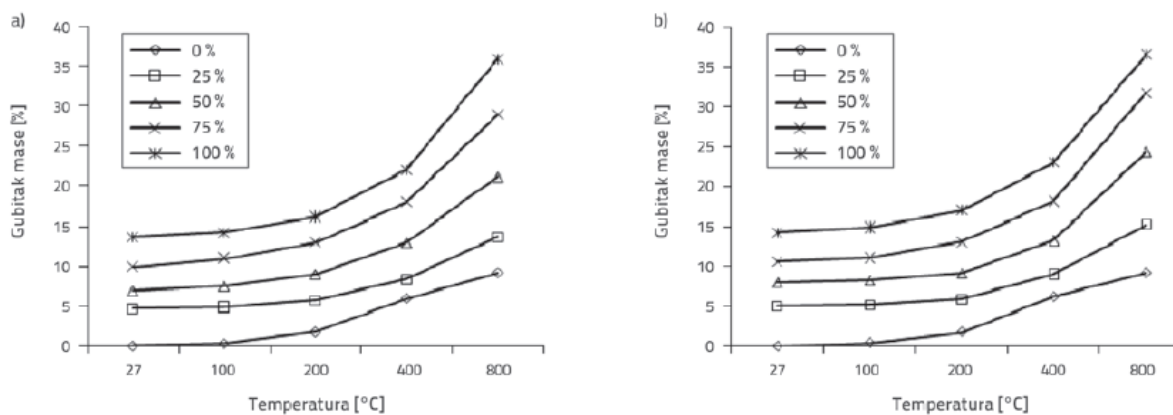


Slika 4.2. Koeficijent blokiranja tečenja laganog samozbijajućeg betona [6]

Gustoća uzoraka njegovanih 28 dana prikazana je u Tablici 4.2. Gustoća samozbijajućeg betona smanjivala se s porastom udjela kokosovih ljuski u krupnom agregatu. Gustoća mješavine B450 bez dodatka kokosovih ljuski, nakon 28 dana njegovanja iznosi  $2060 \text{ kg/m}^3$ , a mješavine B550 iznosi  $2090 \text{ kg/m}^3$ . Gustoća mješavina T450 i T550 bez dodatka kokosovih ljuski iznosi  $2005 \text{ kg/m}^3$ , odnosno  $2025 \text{ kg/m}^3$ . Prema propisima ASTM C 330, težina laganog betona ne bi trebala prelaziti  $1850 \text{ kg/m}^3$  u suhom stanju, a obično ta vrijednost iznosi od  $1400 \text{ kg/m}^3$  do  $1850 \text{ kg/m}^3$ . U mješavini B450, u kojoj udio kokosovih ljuski u agregatu iznosi 75 %, odnosno 100 %, gustoća se smanjila ispod praga za lagani beton i iznosila je  $1840 \text{ kg/m}^3$ , odnosno  $1765 \text{ kg/m}^3$ . U drugoj referentnoj mješavini T450 gustoća je smanjena na  $1810 \text{ kg/m}^3$ . U mješavini LWSCC550, gustoća B550 je smanjena na  $1845 \text{ kg/m}^3$  i  $1775 \text{ kg/m}^3$  kod dodatka kokosovih ljuski u omjeru 75 % i 100 %. U mješavini T550, gustoća laganog samozbijajućeg betona je smanjena do  $1825 \text{ kg/m}^3$ , odnosno  $1740 \text{ kg/m}^3$ . 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. 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 [5].

Gubici mase svih uzoraka koji sadrže agregat od kokosovih ljuski izračunati su s obzirom na masu kontrolne mješavine betona (bez dodatka kokosovih ljuski), a rezultati su prikazani na Slikama 4.3. i 4.4. Gubitak mase nije promatran na svim uzorcima referentnih mješavina (LWSCC450 i LWSCC550) prije izlaganja uzoraka temperaturi od  $100^\circ\text{C}$ , a razlog tomu je prisutnost vode u mikroporama matrice. Smanjenje mase betonskog uzorka promatrano je na temperaturama višim od  $100^\circ\text{C}$ , što može biti povezano s činjenicom da voda isparava pri visokim temperaturama. Stopa gubitka mase se povećava znatno na temperaturi od  $200^\circ\text{C}$ , a nakon  $400^\circ\text{C}$  gubitak se smanjuje jer nema više vode u uzorcima. Razlog tomu je smanjenje količine  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  u drugoj referentnoj mješavini betona budući da prisutnost silikatne prašine povećava stopu sekundarne hidratacije. U istraživanju koje je proveo Sancak i suradnici, 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 [5].

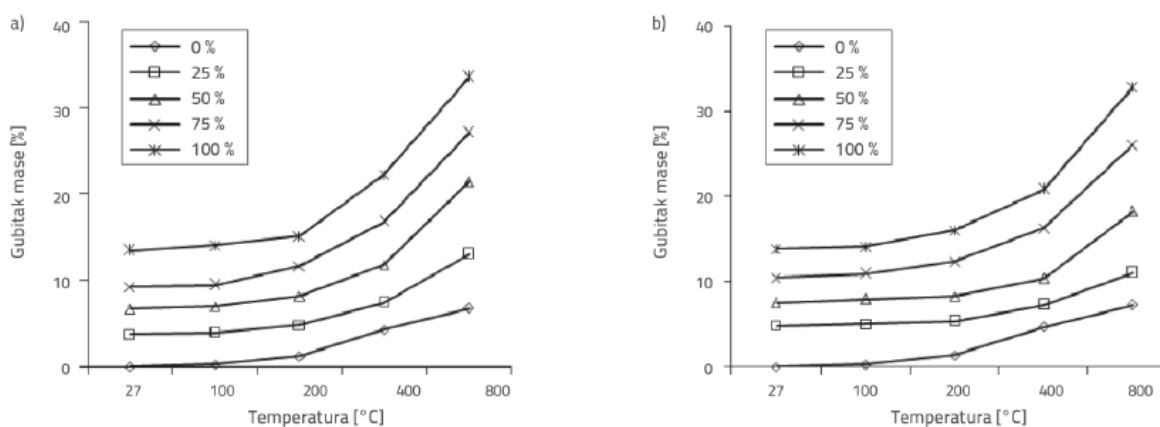
Manji gubitak mase u uzorcima LWSCC450 i LWSCC550 izmjeren je na temperaturi od 200°C, a uzrok može biti manja toplinska provodljivost miješanog betona i slabije isparavanje vode u betonu. Kapilarne pore i mikropore laganog betona su ispunjene gustom cementnom pastom s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine. Slika 4.3. i Slika 4.4. prikazuju smanjenje težina laganog samozbijajućeg betona na temperaturi većoj od 200°C. [5].



Slika 4.3. 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) [6]



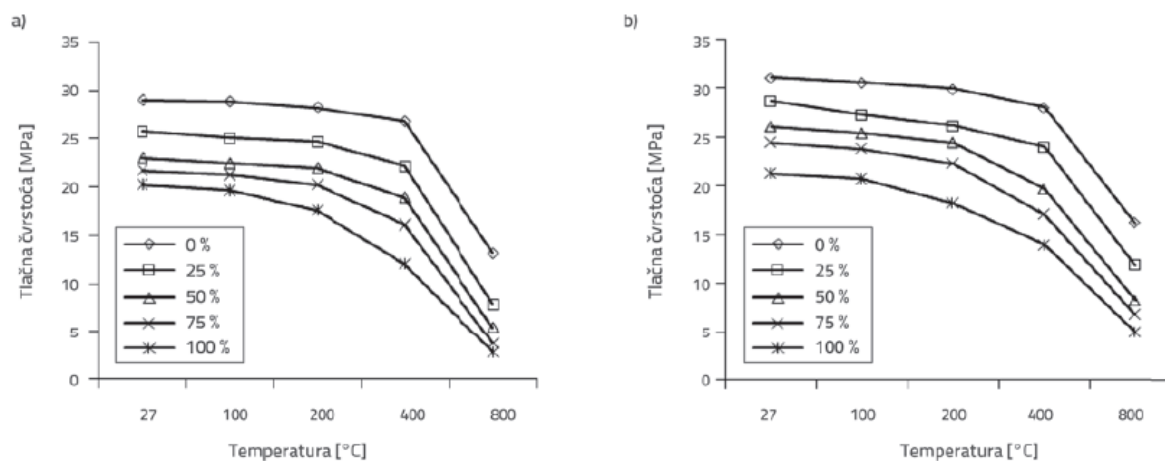
Slika 4.4. Gubitak mase u mješavini LWSCC550 izložene visokim temperaturama:

a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski (RHA);

b) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine (RHA + SF) [6]

Razlog tomu može biti agregat od kokosovih ljuski u betonu. Različite stope gubitka mase ovise o omjeru udjela kokosovih ljuski u sastavu betona izloženog visokim temperaturama. Zbog njegove homogenosti, mikrostruktura laganog betona nalazi se pod utjecajem visokih toplinskih naprezanja koji uzorkuju povećanje stope gubitka mase na temperaturi većoj od 400 °C, u usporedbi s kontrolnom mješavinom betona [5].

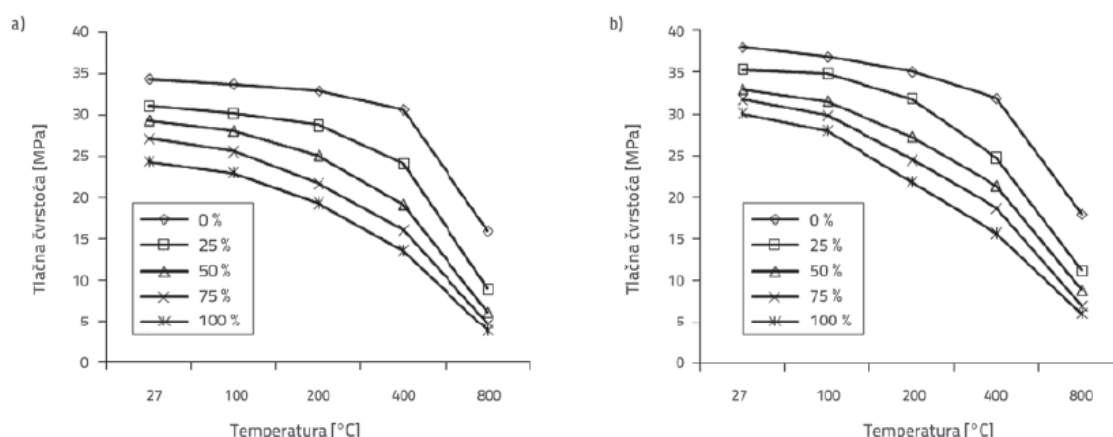
Promjene tlačne čvrstoće uzoraka izloženih visokim temperaturama prikazane su na Slikama 4.5. i 4.6. Rezultati pokazuju da je čvrstoća s obzirom na sobnu temperaturu (27°C) bila veća u običnom betonu (bez dodatka kokosovih ljuski), a dodatak kokosovih ljuski, kao djelomična zamjena za krupni agregat smanjuje tlačnu čvrstoću u svim mješavinama. Početna čvrstoća se neznatno promijenila. Na Slici 4.5. i 4.6. prikazani su i rezultati tlačne čvrstoće uzoraka koji su izloženi temperaturi od 100°C, 200°C, 400°C i 800 °C. [5].



Slika 4.5. Tlačna čvrstoća laganog samozbijajućeg betona izloženog visokim temperaturama (udio praha = 450 kg/m<sup>3</sup>):

a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski;

b) mješavina betona s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine [6]



Slika 4.6. Tlačna čvrstoća laganog samozbijajućeg betona izloženog visokim temperaturama (udio praha = 550 kg/m<sup>3</sup>):

a) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski;

b) betonska mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine [6]

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 dehidracijom uzoraka izloženih visokim temperaturama. Promjene u tlačnoj čvrstoći betona pokazuju da visoka temperatura utječe na komponente u betonu, kao i udio vlage, stupanj zagrijavanja, dehidracija te neusklađenost topline između agregata i cementne paste. Tlačna čvrstoća nakon zagrijavanja na različitim temperaturama izražava se omjerom  $fT/fi$ , gdje je  $fT$  čvrstoća nakon zagrijavanja na  $T$  °C, a  $fi$  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 4.2. Dodavanje kokosovih ljuski betonskom sastavu, smanjuje se tlačna čvrstoća betona. U Tablici 4.2. minimalni gubitak tlačne čvrstoće zabilježen je u obje kontrolne mješavine izložene temperaturi do 400°C. [5].

Tablica 4.2. Relativna tlačna čvrstoća [6]

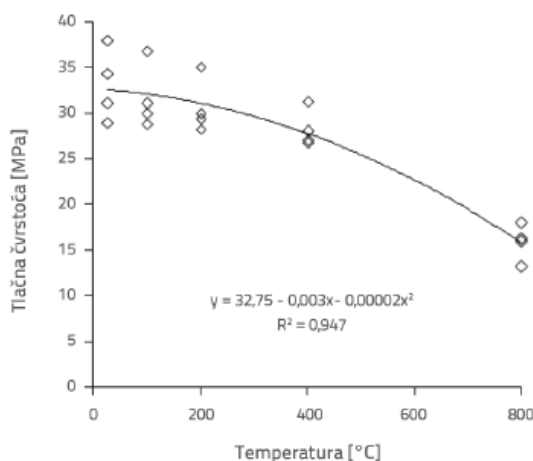
Udio praha [kg/m <sup>3</sup> ]	Udio kokosovih ljuski u agregatu [%]	Mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski					Mješavina s dodatkom pepela rižinih ljuski i silikatne prašine				
		27 [°C]	100 [°C]	200 [°C]	400 [°C]	800 [°C]	27 [°C]	100 [°C]	200 [°C]	400 [°C]	800 [°C]
450	0	1	0,99	0,97	0,92	0,46	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

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 čvrstoća smanjena je za 3 % s obzirom na tlačnu čvrstoću mješavine LWSCC450. Smanjenje od 10 % i 6 % zabilježeno je u mješavini LWSCC550. Slični rezultati dobiveni su u mješavini betona gdje je udio kokosovih ljuski u krupnom agregatu 25 %. Stopa smanjenja čvrstoće zbog djelomične zamjene krupnog agregata s kokosovim ljuskama (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 veza i povećava pojavu pukotina pri visokim temperaturama [5].

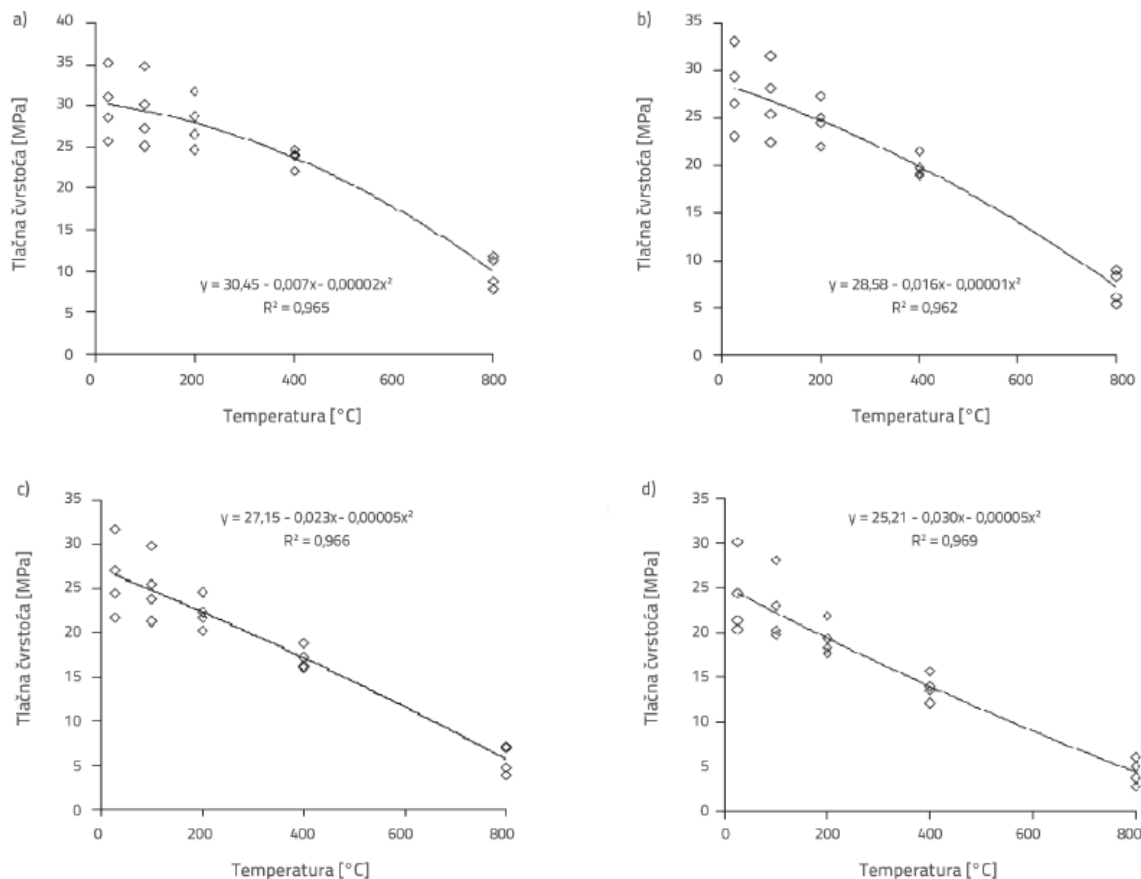
Na 400 °C, zabilježeno je, 52 % smanjenje u mješavini betona s dodatkom pepela rižinih ljuski i kokosovih ljuski LWSCC450, dok je smanjenje 61 % i 54 % zabilježeno u mješavini LWSCC550. Rezultati ispitivanja pokazuju da je smanjenje tlačne čvrstoće betona nastalo zbog upotrebe silikatne prašine. Prisutnost 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 napreznja. Pri temperaturi od 800°C sve mješavine bile su dehidrirane i njihova su svojstva oslabljena [5].

U radu je određena veza između tlačne čvrstoće i temperature samozbijajućeg betona s dodatkom kokosovih ljuski. Primijenjena je nelinearna regresijska analiza kako bi se ustanovio model između eksperimentalno dobivene tlačne čvrstoće i temperature. Tanyildizi i Coskun 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 4.7. prikazuje odnos između tlačne čvrstoće i temperature kontrolnog uzorka samozbijajućeg betona [5].



Slika 4.7. Odnos tlačne čvrstoće i visokih temperatura u kontrolnom uzorku [6]

Pomoću regresijske analize izračunat je visoki koeficijent korelacije ( $R = 0,947$ ), što ukazuje na dobro odabranu jednadžbu korelacije. Na slikama 4.8.a) i 4.8.b) prikazan je odnos tlačne čvrstoće s obzirom na temperaturu laganog samozbijajućeg betona s dodatkom kokosovih ljuski [5].



Slika 4.8. 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 [6]

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 prikazane su u Tablici 4.3. te imaju visoki koeficijent 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 udiom kokosovih ljuski u krupnom agregatu 100 % kokosovih ljuski, te 5,3 % za mješavinu bez dodatka kokosovih ljuski [5].

Tablica 4.3. Statistički modeli tlačne čvrstoće laganog samozbijajućeg betona u odnosu na temperaturu [6]

Broj	Zamjena u krupnom agregatu (udio kokosovih ljuski u mješavini) [%]	Jednadžba regresije	Koeficijent (R <sup>2</sup> )
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

Rezultati eksperimentalnog ispitivanja pokazali su 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 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 Ca(OH)<sub>2</sub> 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 bilo je veće u uzorku prve referentne betonske mješavine nego u uzorku druge. 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 [5].

#### 4.3 Smanjenje mehaničkih svojstava betona nakon požara i njegov utjecaj na rezidualnu nosivost (Neno Torić, Ivica Boko, Sandra Juradin, Goran Baloević)

Prikazani su rezultati eksperimentalnog određivanja preostalih mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće nakon požara. Ispitivano je: tlačna i vlačna čvrstoća te tangenti i sekantni modul elastičnosti. Ispitivanja su se provodila zagrijavanjem betonskih uzoraka na ciljanoj visokoj temperaturi. Osim mehaničkih svojstava betona prikazana su i preostala svojstva nakon hlađenja uzoraka. Rezultati su uspoređivani s vrijednostima navedenih svojstava danih u EN1992-1-2 i EN1994-1-2. [4].



### 4.3.1 Eksperimentalni program

Eksperimentalni program uključuje određivanje sljedećih svojstava betona: tlačna čvrstoća, krivulje naprezanje-deformacija i dinamičkog modula elastičnosti.

Dimenzije uzoraka doneseni su u skladu s preporukama RILEM odbora za ispitivanje tlačne čvrstoće. Korišten je 3000 kN FORM TEST stroj za obavljanje tlačnog ispitivanja. Da bi se odredio dijagram naprezanja u uzorku, postavljeno je An LVDT snimanje na ispitivanje strojeva; dok se porast tlaka unutar uređaja prati pomoću tlačnog transduktora SENSE STK131. Oba uređaja su spojeni na National Instruments prikupljanje podataka kartice USB 6255. Grijanje primjeraka je provedena pomoću programabilne NABERTHERM L9/11 /P330 peći [4].

Porast temperature u uzorcima tijekom faze grijanja zabilježen je s jednim NiCr termo postavljen u sredini uzorka tijekom oblikovanja. Termoelement spojen je u NI prikupljanje podataka kartice USB 6255 [4].

U radu se ispituju 4 različite mješavine LWC u svježem i očvrslom stanju. Namjera istraživanja je ispitati količinu veziva i vrste dodataka kao varijable koje utječu na smanjenje mehaničkih svojstava laganog betona. U svim mješavina je korišten isti cement, superplastifikator i agregat, dok su dodaci promijenjeni. Koristi se Portland cementa tipa CEM I 42,5 R koji je u skladu sa zahtjevima HRN EN 197-1, ima specifičnu težinu od 3,14 kg/dm<sup>3</sup>. Superplastifikator je tekući PCE sa specifičnom težinom od 1,06 kg/dm<sup>3</sup>. Kao lagani agregat koristi se laki granulirani proizvod proizveden ekspanzijom prirodne gline. Betonske smjese sadržavaju dvije frakcije, sitni laki agregat 0-2 mm i krupni laki agregat 4-8 mm. Granulometrija agregata u mješavinama je 70% grubog i 30% finog laganog agregata. Mješavine LWC1 , LWC2 i LWC4 su s istom količinom veziva od 470 kg/m<sup>3</sup>. LWC1 je pripremljen samo sa cementom, LWC2 s cementom i silicijom i LWC4 s cementom i metakaolinom . Karakteristike mješavine dane su u Tablici 4.4. [4].

Tablica 4.4 Karakteristike mješavina [7]

tip dodatka	specifična površina prema	specifična težina
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	(g/cm <sup>3</sup> )
silica fume	> 15000	2.3
metakaolin	ca 24000	2.6

Mješavina LWC3 pripremljena je s najmanjim iznosom cementa i najvišim vodocementnim omjerom. Omjeri pripremljene mješavine prikazani su u Tablici 4.5. [4].

Tablica 4.5 Omjeri mješavina za LWC [7]

sastojci betona (kg)	LWC1	LWC2	LWC3	LWC4
cement	470	420	350	420
w/c	0.40	0.42	0.50	0.45
water	188	177	175	190
silica fume	-	-	-	50
metakaolin	-	50	-	-
superplasticizer	4.7	4.7	3.5	4.7
FLA 0-2 mm	321	302	341	301
CLA 4-8 mm	750	727	819	723

Rezultati ispitivanja svježeg betona dani su u Tablici 4.6. Slijeganje, sadržaj zraka i jedinične težine svježeg betona su određene u skladu s EN 12350-2, EN 12350-7 i EN 12350-6. [4].

Tablica 4.7 Rezultati ispitivanja svježih mješavina betona [7]

mješavina	slijeganje (mm)	zrak (%)	jedinična težina (kg/m <sup>3</sup> )
LWC1	245	2.7	1915.2
LWC2	250	4.0	1859.0
LWC3	35	4.0	1841.4
LWC4	185	6.0	1810.9

Njegovanje i uvjeti skladištenja prije zagrijavanja usvojeni su od preporuka RILEM. Uzorci su držani u kalupu jedan dan, a zatim premješteni u sobu za skladištenje s temperaturom od 20±3°C i relativnoj vlažnosti od 95 %, u trajanju od 6 dana. Nakon toga, uzorci su premješteni u komoru sa temperaturom od 20±3°C i relativnoj vlažnosti od 50% do ispitivanja. Program testiranja je započeo kada su uzorci bili tri mjeseca starosti. Prije ciklusa grijanja, uzorci su držani na temperaturi od 100±5°C u sušioniku u periodu od 24 sata, kako bi ispario sadržaj vlage [4].

Mehanička svojstva uzoraka utvrđena su grijanjem do 200°, 400° i 600°C te su izračunata kao srednja vrijednost rezultata dobivenih iz tri testirana uzorka. Grijanje se sastoji od zagrijavanja uzoraka s brzinama zagrijavanja između 1-2.5°C/min do ciljane temperature. Nakon postizanja željene temperature, uzorci su držani na toj temperaturi 2,5 sata. Nakon toga, uzorci su se polako ohladili na sobnu temperaturu. Neki su ispitani odmah nakon hlađenja na sobnu temperaturu (početna hlađenje). Kako bi istražili daljnje smanjenje čvrstoće betona, uzorci su testirani 48 i 96 sati nakon početnog hlađenja. Uzorci testirani 48 i 96 sati nakon hlađenja pohranjeni su u laboratorijskim uvjetima (temperaturi od 20± 3°C i relativnoj vlažnosti od 30 %). Tlačna ispitivanja su provedena na uzorcima sa stopom prirasta opterećenja od 0,5 MPa/s. [4].

#### 4.3.2. Analiza dobivenih rezultata

U sljedećem poglavlju prikazani su rezultati smanjenja nakon požara. Tablica 4.8. prikazuje rezultate tlačne čvrstoće na četiri mješavine na sobnoj temperaturi [4].

Tablica 4.8 Tlačna čvrstoća na sobnoj temperaturi [7]

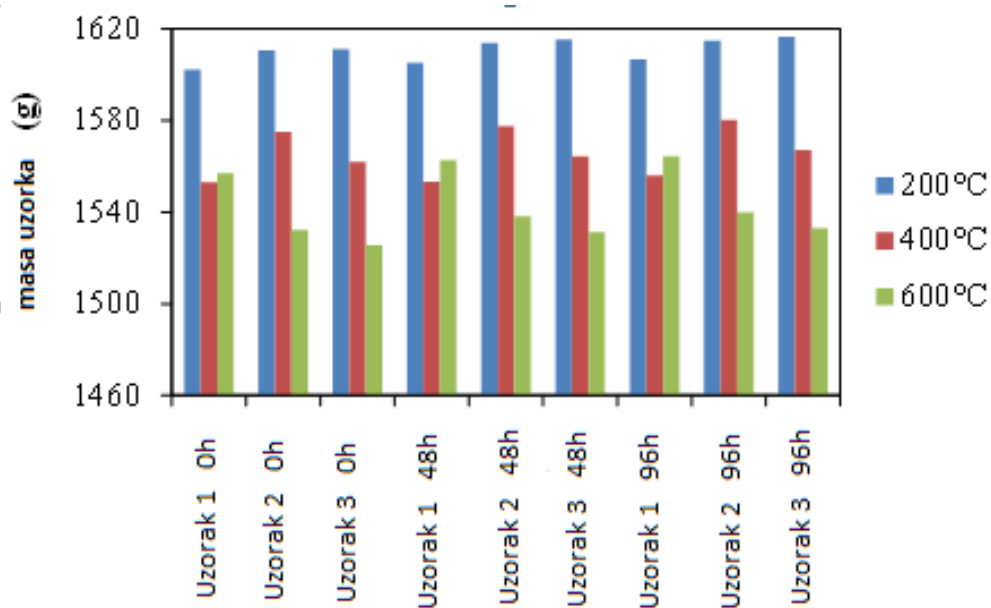
tlačna čvrstoća (3 mjeseca)	$f_{c,20}$ (MPa) LWC1	$f_{c,20}$ (MPa) LWC2	$f_{c,20}$ (MPa) LWC3	$f_{c,20}$ (MPa) LWC4
uzorak 1	52.9	54.4	53.4	55.7
uzorak 2	48.2	51.5	52.6	55.1
uzorak 3	49.5	53.9	54.3	53.9
prosječno	50.2	53.2	53.5	54.9
St.dev.	2.4	1.6	0.9	0.9

Tablica 4.9. prikazuje rezultate smanjenja tlačne čvrstoće nakon požara nakon izlaganja uzoraka na temperaturi od 400° C za sva četiri mješavine [4].

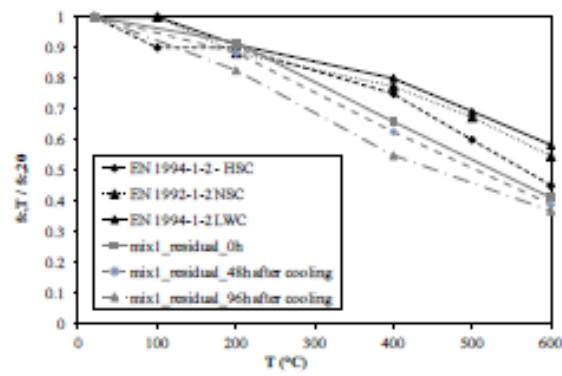
Tablica 4.9 Smanjenje tlačne čvrstoće nakon početnog hlađenja [7]

vrijeme testiranja nakon hlađenja (h)	$f_{c,400}/f_{c,20}$ LWC1	$f_{c,400}/f_{c,20}$ LWC2	$f_{c,400}/f_{c,20}$ LWC3	$f_{c,400}/f_{c,20}$ LWC4
0	0.66	0.58	0.74	0.66
48	0.63	0.46	0.67	0.54
96	0.55	0.41	0.59	0.50

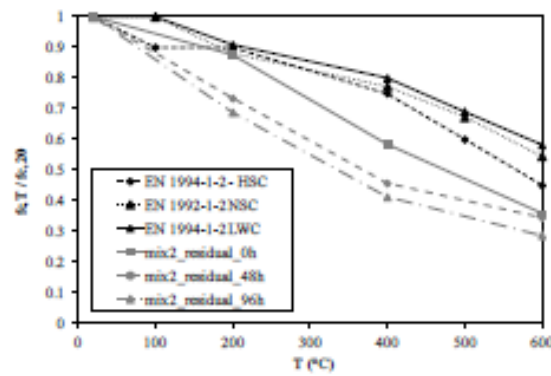
Slika 4.10. prikazuje smanjenje tlačne čvrstoće mješavina neposredno nakon hlađenja i 48 i 96 sati nakon hlađenja. Rezultati su uspoređeni s faktorima za smanjenje uzetih iz Eurocode 2 i Eurokodu 4 za beton visoke čvrstoće, beton normalne težine i lagani beton. Čimbenici smanjenja od Eurokodova su umanjene za 10%, jer su originalne vrijednosti smanjenje od Eurokodova za vruće čvrstoće i općenito su veće u odnosu na početnu rezidualna čvrstoću. Slika 4.9 prikazuje promjenu mase uzoraka uzetih iz LWC mix3 omjerima u razdoblju do 96 sata nakon hlađenja na tri razine temperature [4].



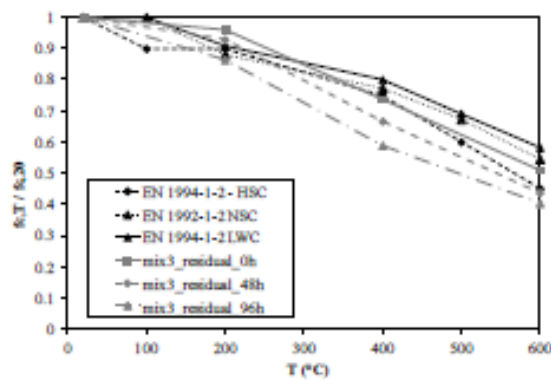
Slika 4.9 Promjena mase uzoraka tijekom 96 sati nakon hlađenja [7]



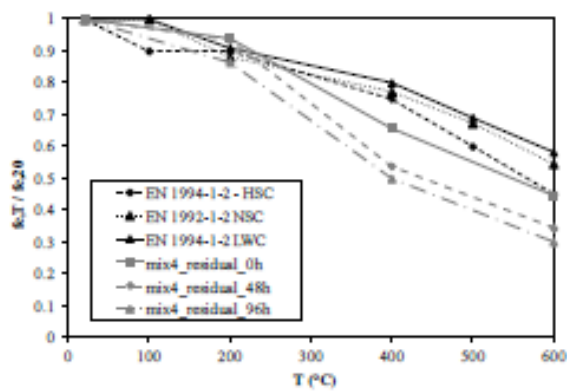
(a) LWC1



(b) LWC2



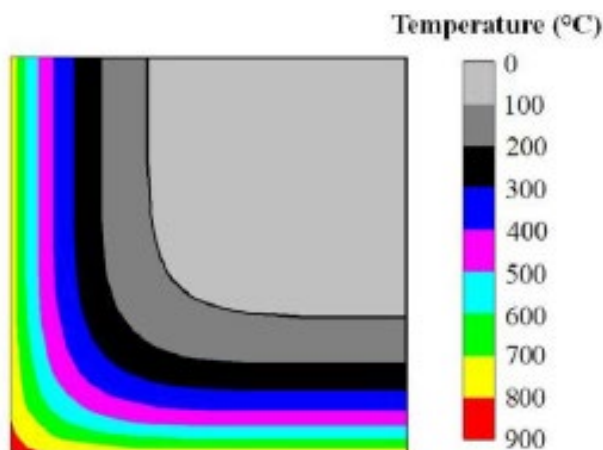
(c) LWC3



(d) LWC4

Slika 4.10 Rezultati ispitivanja-smanjenje tlačne čvrstoće nakon požara [7]

Kako bi se prikazao utjecaj smanjenja čvrstoće nakon požara LWC na rezidualni kapacitet nosivosti, izabran je numerički primjer požara na betonski stup pravokutnog presjeka 30/30 cm. Temperatura izokroni iz Eurocode 2 za stup izložen 30 minuta ISO vatri sa sve četiri strane je korištena kao prikaz izloženosti vatri, kao što je prikazano na slici 4.11. [4].



Slika 4.11 Temperaturno polje u četvrtini stupa nakon 30 minuta ISO požara [7]

Nakon izlaganja 30 minuta ISO vatri i hlađenje stupa na sobnu temperaturu, otpor aksijalnog opterećenja ovog presjeka određen je u odnosu na maksimalnu temperaturama u presjeku . Rezidualna nosivost je izračunata odmah nakon hlađenja pomoću faktora zaostale redukcije čvrstoće iz prikazanog eksperimenta. Analogno, nakon požara nosivost je procijenjena pomoću faktora redukcije poslije požara na određeno vrijeme nakon hlađenja .Tablica 4.10. prikazuje rezultate dobivene numeričkom analizom aksijalnog otpor stupa pomoću različitih razina smanjenja nakon požara za tlačne čvrstoće LWC [4].

Tablica 4.10 Smanjenja tlačne čvrstoće nakon požara za stupove izložene 30 min ISO vatri [7]

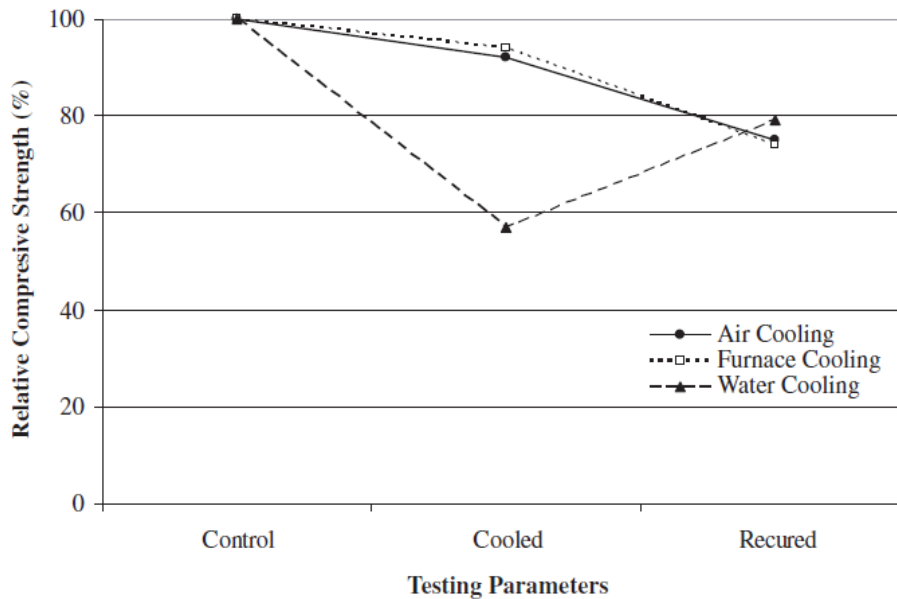
$N_{\bar{a},Rd}$ (kN)	LWC1	LWC2	LWC3	LWC4
rezidualno	3180.3	3250.0	3551.4	3528.1
48h nakon hlađenja	3069.2	3014.4	3419.9	3321.4
96h nakon hlađenja	3012.2	2914.3	3266.0	3230.9

Usporedbom između Eurokod 2 faktora redukcije za LWC i čimbenika smanjenja dobivenih testiranjem mješavine ukazuje da su čimbenici smanjenja za mješavina 3 i 4 blizu prijedloga Eurokoda 2. Neka razlika postoji, ali se može pripisati činjenici da su čimbenici smanjenja dana u Eurocode 2 određena za MGB s različitim vrsta agregata od onog koji se koristili u ovom istraživanju. Međutim, faktor smanjenja rezultata za analizirani MGB ističu da se betonske smjese koje sadrže ekspandirane gline mogu smatrati pouzdanim građevnim proizvodom s odgovarajućom požarnom otpornošću do 600° C. Razina smanjenja tlačne čvrstoće nakon požara treba se razlikovati ovisno o sastavu mješavine. MGB mješavina 3 ima najveću otpornost na vatru svih mješavina. Osim toga, mješavina 3 ima najniže faktora redukcije za tlačne čvrstoće nakon požara. Oba od tih svojstava mogu se pripisati proporcijama mješavine. Rezultati pokazuju da mješavina s najnižom količinom veziva koja uključuje sve čestice manje od 0,125 mm, ima najnižu razinu faktora redukcije nakon požara. Preostale tri mješavine imaju veću količinu veziva. Razine smanjenja rezidualnog kapaciteta su prikazane u tablici 4.8 gdje nakon požara smanjenje kapaciteta nosivosti iznosi do 7% za 48 sati, a 10% za 96 sati nakon inicijalnog hlađenja. Može se primijetiti da izračunata razina smanjenja nakon požara nije zanemariva za konkretne članove izložene sve četiri strane. Razina smanjenja nakon požara bi mogla biti čak i veća od 10%, ako se betonski element izloži vatri kroz period duži od 30 minuta. To ukazuje na činjenicu da smanjenje mehaničkih svojstava betona nakon požara treba uzeti u obzir u procjeni rezidualnog kapaciteta nosivosti betonskih konstrukcija. Važno je napomenuti da su uvjeti skladištenja nakon hlađenja korišteni u istraživanju bili odabrani na način da ne mogu utjecati na vlagu, što je poznato da doprinese gubitku čvrstoće nakon hlađenja. Budući da je došlo do vrlo malog stupanja apsorpcije vlage tijekom razdoblja skladištenja, nakon početne hlađenja dobitak mase uzorka bio je zanemariv [4].

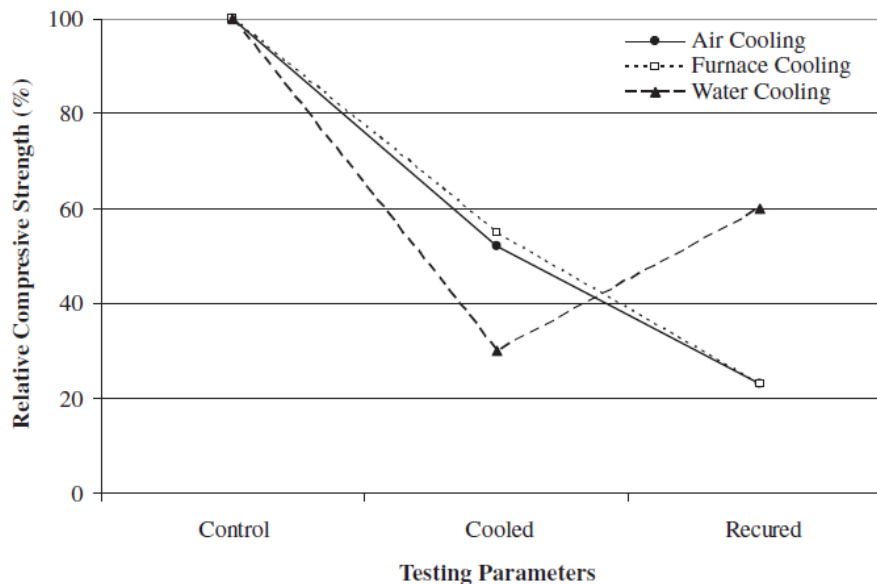
Rasprava o rezultatima ističe da učinak kratkotrajnog smanjenja tlačne čvrstoće laganih betona u stvarnim elementima koji su oštećeni požarom može imati značajan utjecaj na kapacitet nosivosti nakon požara. Daljnje istraživanje ovih pitanja će obuhvatiti analizu smanjenja mehaničkih svojstava nakon požara u dužem vremenskom periodu nakon hlađenja, tako da se maksimalno smanjenje nosivosti koje bi moglo nastati u betonskim konstrukcijama nakon hlađenja može procijeniti. Osim toga, hvatanje realnijih rubnim uvjetima vlage koja se mogu pojaviti u betonskim konstrukcijama, utjecaj uvjeta skladištenja, tj. apsorpcija vlage na smanjenje čvrstoće, također se planiraju u nekim budućim istraživanjima [4].

#### 4.4. Preostala tlačna čvrstoća betoske smjese oštećene požarom nakon što je ostavljena na zraku, Okan Karahan [13]

Svakako još treba spomenuti istraživanje koje je proveo Karahan 2010. godine gdje je cilj istraživanja bio istražiti učinke režima hlađenja u zraku, peći i vodi. Nakon što su izorci bili izloženi temperaturama od 400, 600, 800 i 1000° C. Nakon hlađenja, uzorci su bili ostavljeni još 7 dana na zraku. Rezultati ispitivanja prikazani su na slici 4. 11.

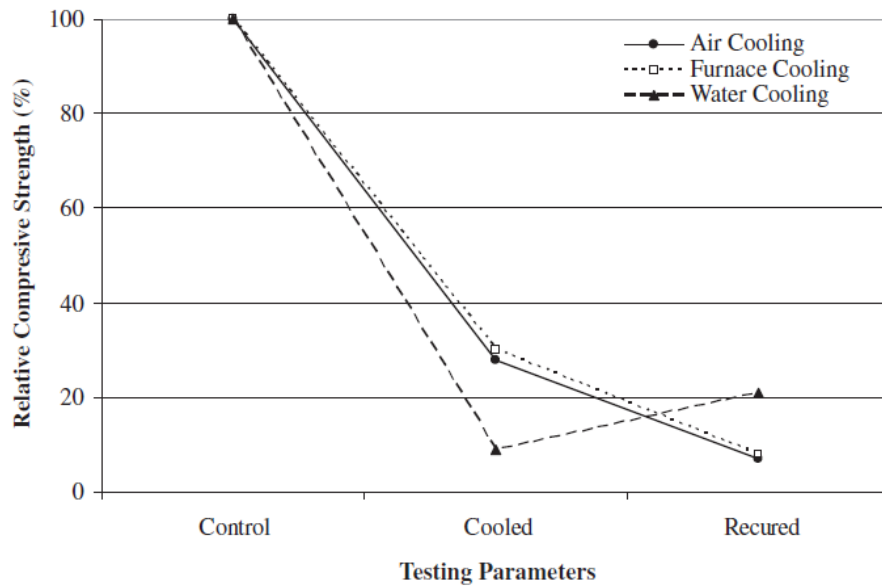


a) Rezultati ispitivanja nakon 400 °C

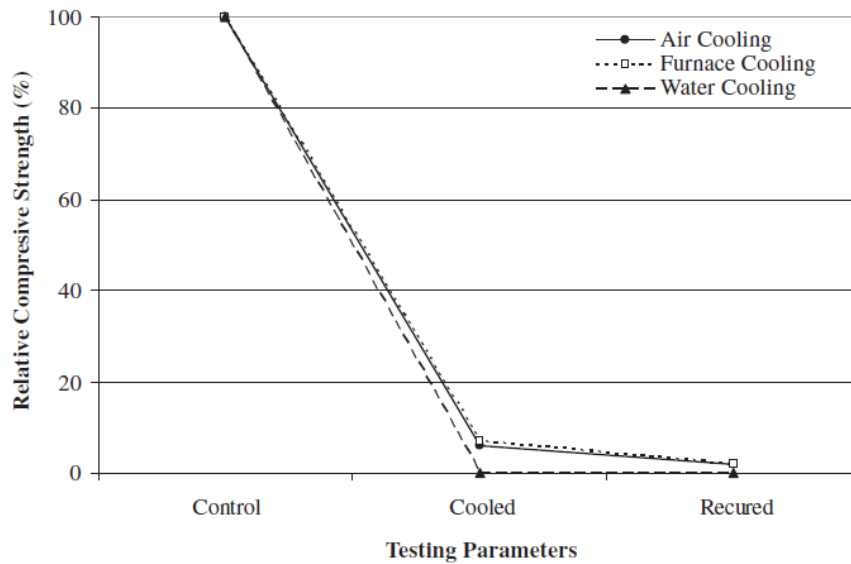


b) Rezultati ispitivanja nakon 600 °C





c) Rezultati ispitivanja nakon 800 °C



a) Rezultati ispitivanja nakon 1000 °C

b)

Slika 4.12. Rezultati relativnih čvrstoća nakon ispitivanja [13]

Dobijeni su sljedeći zaključci: [13]

1. Kako se temperatura povećavala od 400 do 1000 °C, tako se drastično smanjivala tlačna čvrstoća u usporedbi s referentnom vrijednošću betona/morta.

2. Najveće smanjenje tlačne čvrstoće dogodilo se, kako se očekivalo, na 1000° C bez obzira na režim hlađenja. Na 1000 °C se čvrstoća potpuno izgubi, posebno za uzorke koji su naglo hlađeni vodom.
3. Naglo hlađenje vodom uzrokovalo je značajno smanjenje tlačne čvrstoće u usporedbi s ostalim usporenim režimima hlađenja (zrak i peć) bez naknadnog ostavljanja na zraku.
4. Kod režima hlađenja zrakom i peći, sedam dana čuvanja na zraku pokazalo je daljnje smanjenje čvrstoće od 19 do 76% ovisno o temperaturi izloženosti.
5. Uzorci hlađeni u vodi i ostavljeni na zraku 7 dana pokazali su značajan dobitak čvrstoće približno 39, 100 i 130% za povišene temperature 400, 600 i 800° C.
6. SEM snimke uzoraka nakon naglog hlađenja vodom i snimke uzoraka ostavljenih na zraku pokazuju da se pojavljuju pukotine u mikrostrukturi cementne paste zbog naglog hlađenja vodom. Te pukotine su uzrokovale smanjenje tlačne čvrstoće.

## **5 EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA NAGLO HLAĐENOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA NAKON IZLAGANJA VISOKIM TEMPERATURAMA**

### **5.1 Uvod**

Zadatak ovog rada je opisati kako naglo hlađenje betona nakon izlaganja visokim temperaturama utječe na njegove mehaničke osobine (dinamički modul elastičnosti, čvrstoću) i napraviti paralelu sa rezultatima koji su u radu [10] dobiveni sa prirodno ohlađenim betonom nakon izlaganja visokim temperaturama. Ispitni uzorci su istog sastava i napravljeni su u isto vrijeme. Beton nakon što je izložen na tri različite temperature (300, 500, 700 °C) prisilno se hladi vodom i dio ispituje odmah nakon hlađenja, a dio nakon 24 sata, dok se u slučaju koji služi kao usporedba [10], beton se nakon izlaganja istim temperaturama postepeno hladi na temperaturu ispod 40 °C i tek onda ispituje. U ovoj seriji su ispitana su 24 uzorka, po 6 uzoraka ide na određenu temperaturu, s time što se po 3 uzorka ispituju odmah nakon hlađenja vodom, a 3 dan nakon hlađenja.

### **5.2 Sastav betona**

Za eksperimentalni dio rada korišteni su cilindrični betonski uzorci od samozbijajućeg betona sa dodatkom mljevene opeke, stari tri godine. Cement korišten u pripravi mješavine je CEM I 42.5 R, portlandski cement s udjelom 95-100 % klinkera. Potvrda o sukladnosti prema zahtjevima HRN EN 197-1, HRN EN 197-2, BAS EN 197-1 i BAS EN 197-2. Proizvođač cementa je Dalmacijacement, Hrvatska. [10] [11]

Upotrebljen je lagani agregat liapor frakcija 0-2 mm i 4-8 mm. To je ekspandirana pečena glina koja se peče na temperaturama od 1100 – 1200 °C. pri čemu sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju.

Lagani agregat je odabran zato jer je otporan na vatru koristi se pri izradi vatrobetona [10] [11].

Za pripremu betona koristio se filer od mljevene opeke, frakcije  $< 0,125$  mm, gustoća  $2,00$  g/cm<sup>3</sup>. [10] [11] Kao aditiv korišten je superplastifikator Readyplast FTF

U tablici 5.1 prikazan je sastav ispitnog betona za količinu od  $1$  m<sup>3</sup>. Vodocementni faktor je  $0,5$ , a aditiv je dodan u količini od  $1,2$  % mase cementa.

Tablica 5.1. Mješavina betona, količine za  $1$  m<sup>3</sup>

Oznaka mješavine	cement	voda	Mljevena opeka	Aditiv FTF	Lagani agregat	
			<0.125mm		0-2	4-8
	kg	kg	kg	kg	kg	kg
SCC1	400	200,0	65,0	4,8	498,2	513,3

Betonu je u svježem stanju ispitana obradivost, rezultati su prikazani u tablici 5.2. i na slici 5.1.

Tablica 5.2. Izmjereni rezultati obradivosti ispitnog betona [10, 11]

Razastiranje		T500		V lijevak		J-ring		L-box	
d (mm)	klasa	(s)	klasa	(s)	klasa	PJ	klasa	PA	klasa
725	SF3	1.16	VS1	6.96	VF1	15	-	0.95	PA1



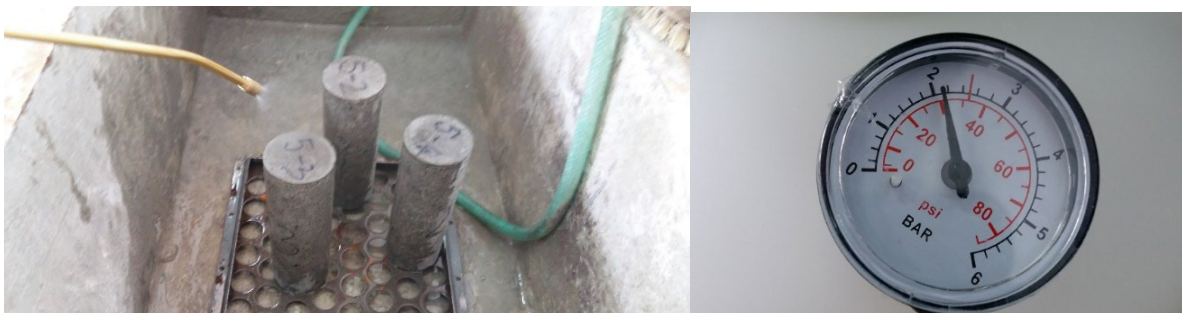
Slika 5.1. Ispitivanje obradivosti u L-box i J-ring [10, 11]

### 5.3 Metoda ispitivanja

#### 1. Režim zagrijavanja uzoraka

Potrebno se ispitivanje obavlja u serijama od 3 uzorka. Uzorci su cilindričnog oblika dimenzija  $\varnothing 75/225$  mm. Navedene dimenzije su u skladu s preporukama RILEM odbora za ispitivanje tlačne čvrstoće. Uzorci su sušeni 24 sata na temperaturi od  $100^{\circ}\text{C}$ , te prvo zagrijavani na  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  i  $700^{\circ}\text{C}$ , a zatim pečeni na temperaturi od  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  i  $700^{\circ}\text{C}$ .

Brzina zagrijavanja uzoraka je  $1-2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  do željene temperature, što bi značilo sa postupak zagrijavanja za temperature od  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  i  $700^{\circ}\text{C}$  traje 3, 5 odnosno 7 sati. Nakon postizanja ciljane temperature, uzorci su držani na toj temperaturi u vremenu od 2,5 sata. Nakon toga, uzorci su izvađeni iz električne peći te naglo hlađeni vodom kao što je prikazano na Slici 5.2.a). Hlađenje vodom se provodilo pomoću prskalice za vodu pri konstantnom tlaku od oko 2.2 bar u cijelom vremenu hlađenja uzoraka (Slika 5.2. b)). Mjerenja mase, dimenzija i dinamičkog modula elastičnosti provedena su za svaki uzorak prije sušenja, poslije sušenja i nakon pečenja kada se uzorak naglo ohladio vodom na maksimalnu temperaturu od  $40^{\circ}\text{C}$ , odnosno kad je ostavljen kroz 24 sata na sobnu temperaturu. Nakon faze hlađenja uzorci su ispitivani u hidrauličkoj preši s stopom prirasta opterećenja od  $1,6 \text{ kN/s}$ . [5]



Slika 5.2. a) Hlađenje uzoraka vodom; b) vrijednost tlaka u pumpi[5]

#### 2. Mjerenje brzine ultrazvuka (uređaj za mjerenje ultrazvučnih valova)

Za potrebe određivanja dinamičkog modula elastičnosti svim uzorcima mjerila se brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorak. Prednost ove metode je što je nerazorna, pa je moguće isti uzorak pratiti u svim fazama ispitivanja.

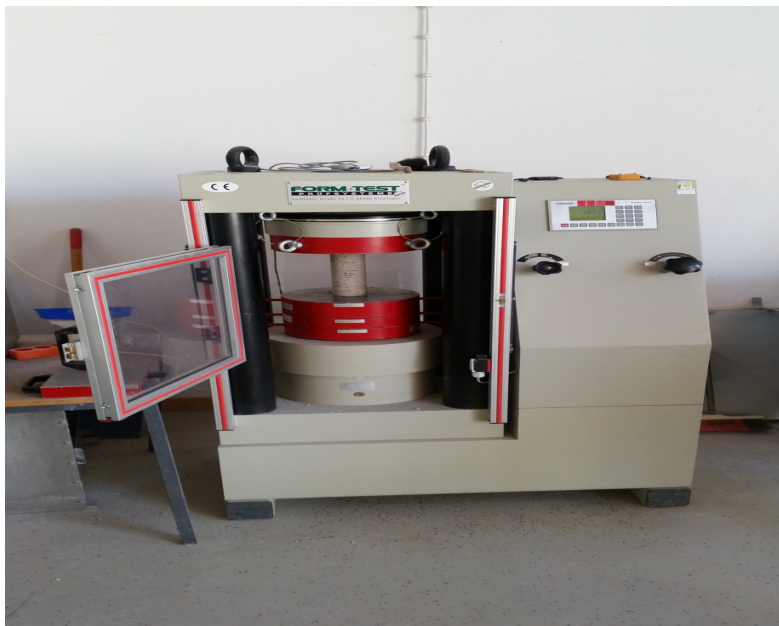
Pomoću uređaja prikazanog na slici 5.2. na svakom uzorku se izmjere 3 vremena prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak, te odredi brzina ultrazvuka. Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12504-4.



*Slika 5.2 Uređaj za mjerenje ultrazvučnih valova [5]*

### 3. Uređaj za mjerenje tlačne čvrstoće

U preši slika 5.3. ispituje se tlačna čvrstoća betona prema normi HRN EN 12390-3.



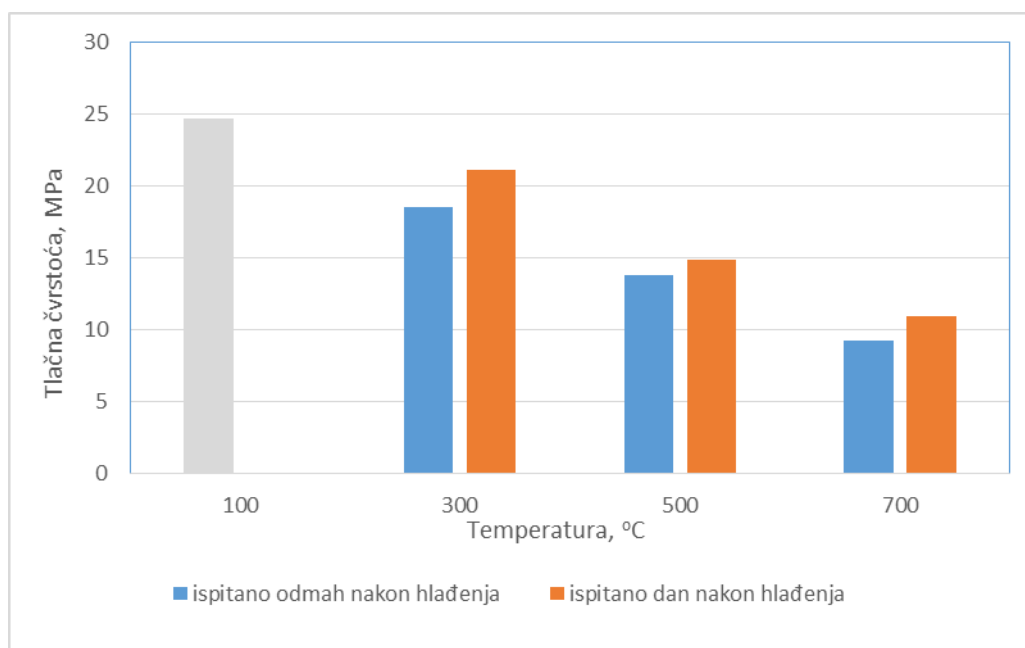
*Slika 5.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće [10]*

## 5.4 Rezultati ispitivanja i diskusija

### 1. TLAČNE ČVRSTOĆE

Na grafu 5.1 prikazani su rezultati dobiveni mjerenjem čvrstoće nakon izlaganja uzoraka određenim temperaturama.

Graf 5.1. – Grafički prikaz tlačne čvrstoće nakon svih mjerenja



Iz grafičkog prikaza tlačnih čvrstoća uočeno je da se tlačna čvrstoća dobivena na uzorcima nakon izlaganja na višim temperaturama od 300, 500 i 700 °C smanjuje u odnosu na čvrstoću uzoraka nakon sušenja na 100°C. Može se uočiti da su vrijednosti čvrstoća dobivene odmah nakon vađenja iz peći i naglog hlađenja, slika 5.4., manje nego na uzorcima ostavljenim 24 sata nakon naglog hlađenja. Rezultati čvrstoće nakon izlaganja uzoraka na 300 °C i odmah ohlađenih u odnosu na referentnu čvrstoću dobivenu nakon sušenja na 100°C manji su za 24.9 % dok kod uzoraka koji se ostave 24 sata na sobnoj temperaturi pad čvrstoće je za 14.6%. Kod 500 °C pad čvrstoće je 44.2 i 39.9 % dok je kod 700 °C čvrstoća ispitana odmah ima samo 37.4 % vrijednosti referentne čvrstoće, a nakon 24 sata 44.3 %.





Slika 5.4 Uzorci u peći i u fazi hlađenja vodom[5]



Slika 5.5. Utjecaj njegovanja i vlažnosti uzoraka betona na rezultate tlačne čvrstoće[12]

Stupanj vlažnosti ispitnih uzoraka je jako važan za rezultate ispitivanja. Osušimo li se beton prije samog ispitivanja tj. ostane li beton prije ispitivanja bez vlage, struktura unutar betona se promjeni i pojave se kapilarne sile koje uzrokuju skupljanje betona, tako da se unutar strukture betona stvori tlak. Posljedica toga je povećanje čvrstoće betona, slika 5.5. Beton dan nakon vlaženja, još nije izgubio vodu u kapilarama pa je moguće da su veće vrijednosti čvrstoće uzrokovane ovom pojavom.

Na nekim uzorcima je uočena pojava segregacije, što isto tako može utjecati na dobivene rezultate, Slika 5.6.





Slika 5.6. Segregacija betona prilikom ugradnje [slike iz laboratorija]

## **2. DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI**

Uzorci su kao što je navedeno u prijašnjem poglavlju oblika valjka sa bazom promjera 75 mm i visine 225 mm starosti tri godine. Dinamički modul elastičnosti izračunamo pomoću sljedećeg izraza

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

gdje je:

$v$  - brzina ultrazvučnog vala [m/s]

$\rho$  - gustoća betona [kg/m<sup>3</sup>]

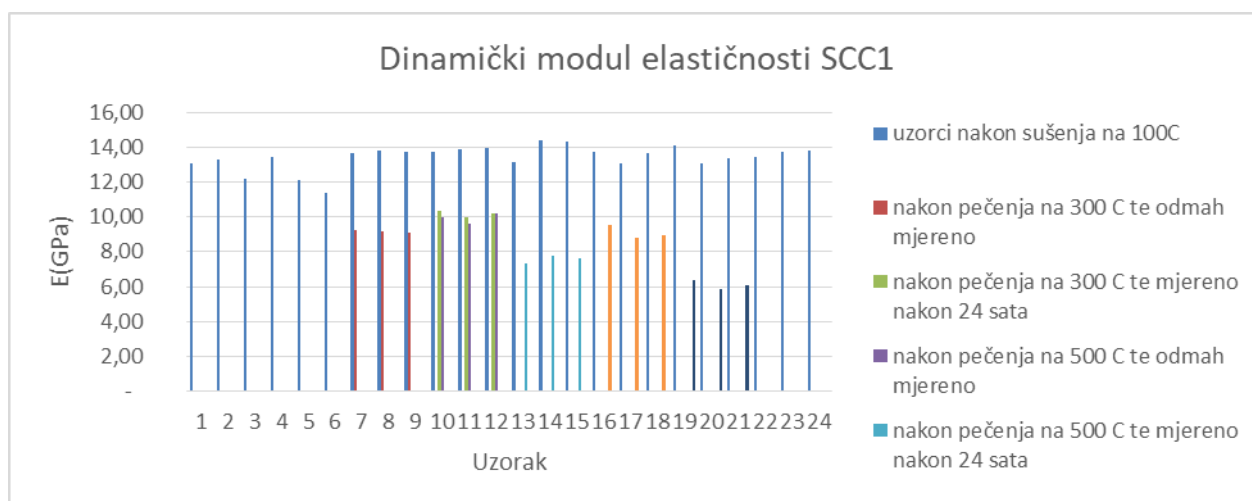
$\mu$  - poissonov koeficijent [ $\mu = 0.2$ ]

Pri izračunu dinamičkog modula elastičnosti koristio se Poissonov koeficijent 0.2. On ovisi o vodocementnom faktoru a varira između 0.25 (vlažni beton) - 0.15 (suhi beton). U tablici 5.1. su prikazani rezultati mjerenja. Uzorci 1-6 su ispitani nakon sušenja na 100 °C, uzorci 7, 8 i 9 su nakon izlaganja 300 °C naglo ohlađeni i ispitani odmah, a 10, 11 i 12 nakon 24 sata od naglog hlađenja, uzorci 13, 14 i 15 su nakon izlaganja 500 °C naglo ohlađeni i ispitani odmah, a 16, 17 i 18 nakon 24 sata od naglog hlađenja, uzorci 19, 20 i 21 su nakon izlaganja 700 °C naglo ohlađeni i ispitani odmah, a 22, 23 i 24 nakon 24 sata od naglog hlađenja.

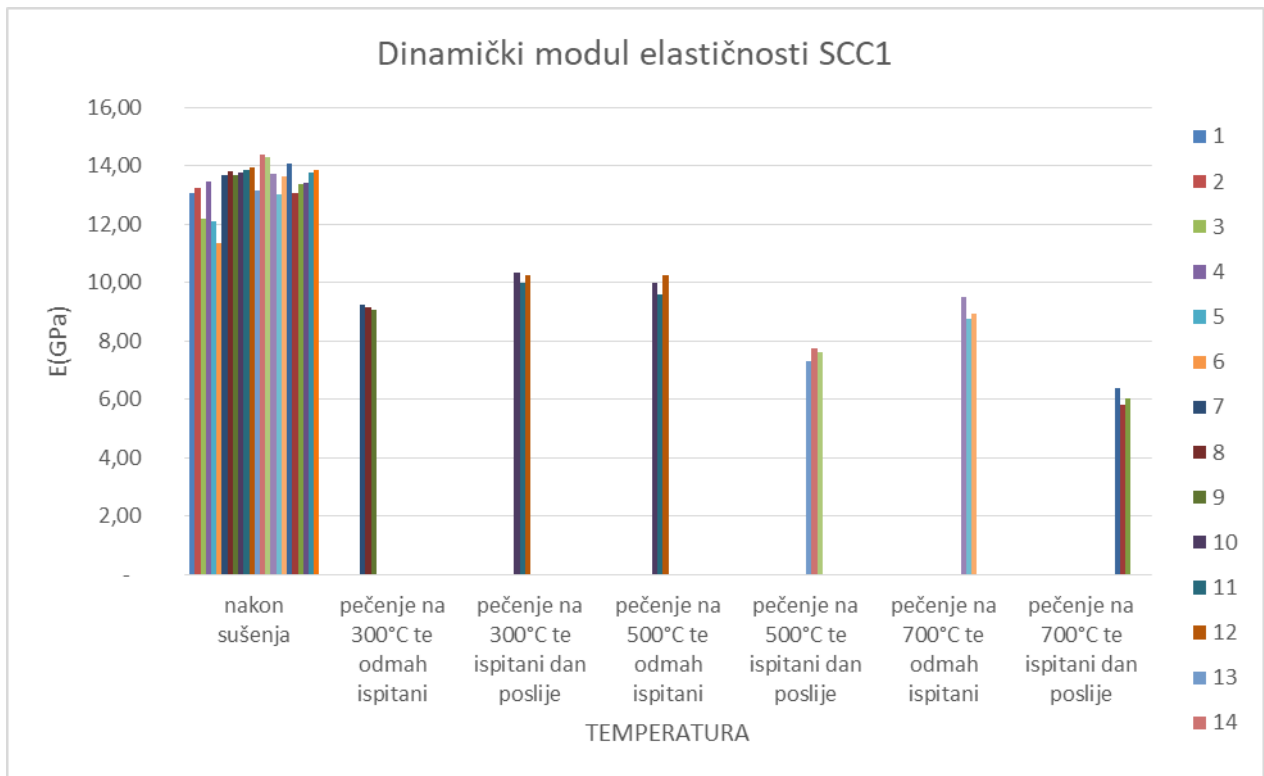
Tablica 5.1. - Modul Elastičnosti

DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI					
SCC1			Nakon pečenja		
UZORAK	Prije sušenja	Nakon sušenja	300 °C	500 °C	700 c
1	15,28	13,08			
2	15,51	13,26			
3	15,11	12,18			
4	15,86	13,46			
5	15,12	12,12			
6	14,37	11,37			
7	15,22	13,68	9,24		
8	15,07	13,80	9,15		
9	15,30	13,70	9,08		
10	15,03	13,77	10,34		
11	15,33	13,87	9,24		
12	15,54	13,95	10,24		
13	15,25	13,15		9,97	
14	15,29	14,37		9,58	
15	15,49	14,30		10,24	
16	15,78	13,73		7,31	
17	15,10	13,04		7,77	
18	15,79	13,65		7,60	
19	16,03	14,10			9,51
20	15,21	13,06			8,77
21	15,42	13,39			8,96
22	14,84	13,41			6,38
23	15,01	13,76			5,83
24	14,73	13,84			6,04

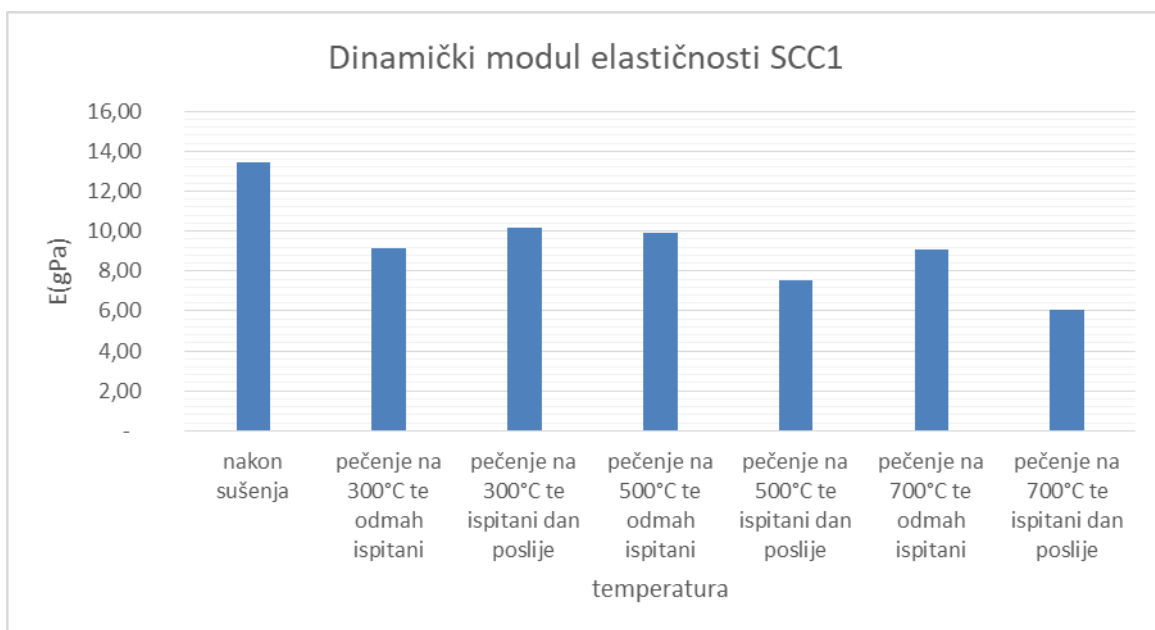
Graf 5.2. – Dinamički modul elastičnosti svih uzoraka po temperaturama



Graf 5.3. – Dinamički modul elastičnosti skupine uzoraka po temperaturama



Graf 5.4. – Dinamički modul elastičnosti prosječnih vrijednosti svih uzoraka po temperaturama



Različiti čimbenici imaju značajne utjecaje na rezultate ispitivanja brzine ultrazvuka. Pečenje uzoraka na temperaturu između od 300°C uzrokuje smanjenje dinamičkog modula elastičnosti. Mjereći dan nakon hlađenja dinamički modul elastičnosti se poveća dok je kod pečenja na 500°C i 700 °C te polijevanja i trenutnog ispitivanja izmjerena veća vrijednost brzine ultrazvuka što znači da je i dinamički modul elastičnosti imao veću vrijednost, u odnosu na onu koja je mjerena dan nakon polijevanja . Vlažnost uzorka ima značajan utjecaj na brzinu ultrazvuka. Brzina ultrazvuka je oko 5% veća kroz vlažan beton nego kroz suhi beton, dok visoke temperature koje su prisutne kod požara mogu izazvati mikro pukotine koje utječu na brzinu ultrazvuka. Postoji mogućnost da je ta pojava utjecala na rezultate kod temperature pečenja na 500°C i 700°C .

### 3. PROMJENA MASE

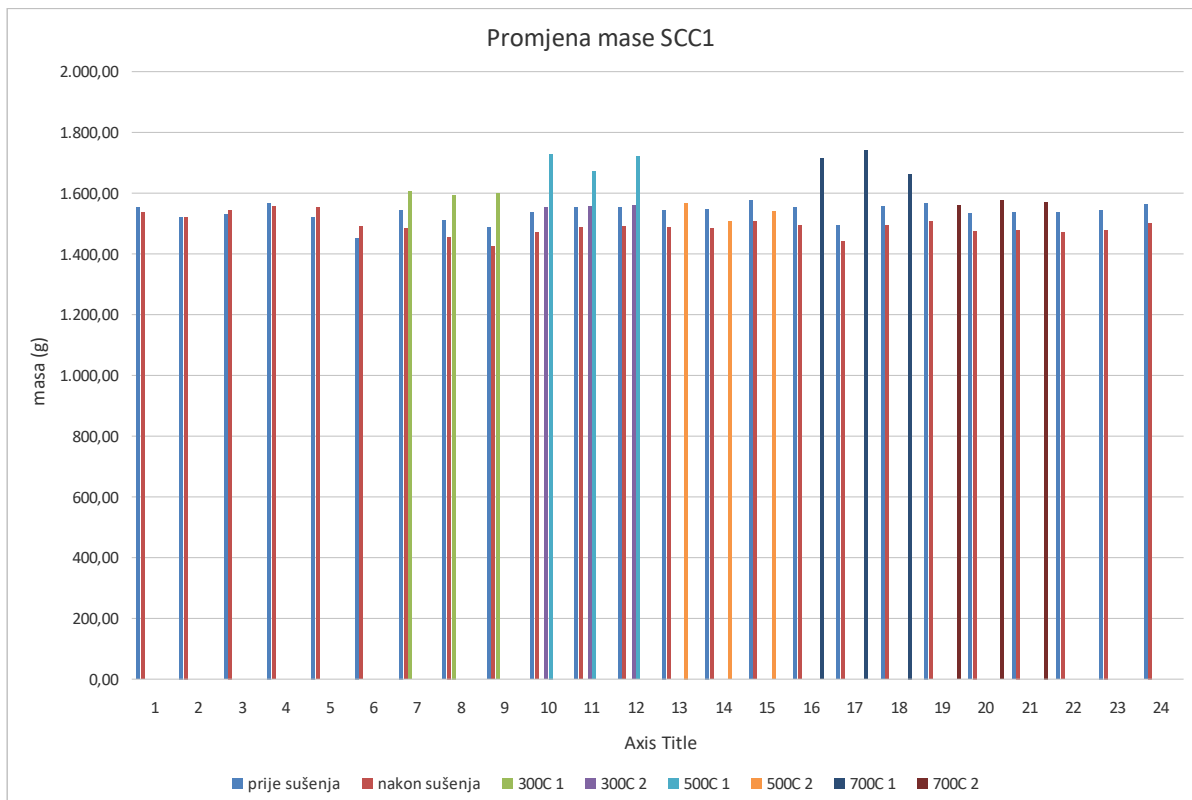
U tablici 5.2. i na grafu 5.5. prikazana je promjena mase uzoraka tijekom ispitivanja.

Tablica 5.2. – Masa uzorka

MASA UZORKA (g)									
SCC1					Nakon pečenja				
UZORAK	Prije sušenja	Nakon sušenja			300 °C	500 °C		700 °C	
1	1.553,50	1.538,70	14,80	0,95					
2	1.523,70	1.524,00	0,30	0,02					
3	1.529,50	1.547,70	18,20	1,19					
4	1.569,40	1.557,60	11,80	0,75					
5	1.522,20	1.553,40	31,20	2,05					
6	1.454,80	1.490,70	35,90	2,47					
7	1.546,90	1.484,10	62,80	4,06	1.609,50	1.552,60			
8	1.513,10	1.457,20	55,90	3,69	1.594,40	1.556,80			
9	1.487,30	1.428,80	58,50	3,93	1.600,20	1.560,10			
10	1.537,10	1.474,80	62,30	4,05					
11	1.552,90	1.488,60	64,30	4,14					
12	1.553,20	1.491,30	61,90	3,99					
13	1.547,60	1.487,60	60,00	3,88			1.729,70	1.571,10	
14	1.548,60	1.484,00	64,60	4,17			1.672,80	1.509,30	
15	1.575,60	1.509,20	66,40	4,21			1.722,90	1.544,20	
16	1.555,60	1.496,10	59,50	3,82					
17	1.497,20	1.440,50	56,70	3,79					
18	1.557,80	1.495,70	62,10	3,99					
19	1.569,60	1.506,90	62,70	3,99					1.714,60
20	1.535,20	1.478,00	57,20	3,73					1.560,10
21	1.539,90	1.479,60	60,30	3,92					1.743,80
22	1.537,20	1.474,20	63,00	4,10					1.578,20
23	1.544,60	1.481,80	62,80	4,07					1.666,30
24	1.566,20	1.503,10	63,10	4,03					1.573,90
	1.538,28	1.494,73	43,55	2,81	1.601,37	1.556,50	1.708,47	1.541,53	1.708,23
									1.570,73

Promjena mase uzoraka događa se uslijed gubitka slobodne vode iz pora tijekom sušenja na 100°C. Izlaganju uzoraka temperaturama iznad 100°C, a potom polijevanje vodom događa se pojava povećanja mase uzorka koja je veća mjereći odmah nakon polijevanja, nego mjereći dan poslije. Iz grafa 5.7. vidi se porast mase kod uzoraka pečenih na temperaturi od 500°C i 700°C koja je 14% u odnosu na masu koja je mjerena nakon sušenja na 100 C°.

Graf 5.5. – Promjena mase svih uzoraka po temperaturama



- 1- Nakon hlađenja odmah ispitano
- 2- Nakon hlađenja ,ostavljeno 24 sata pa ispitano

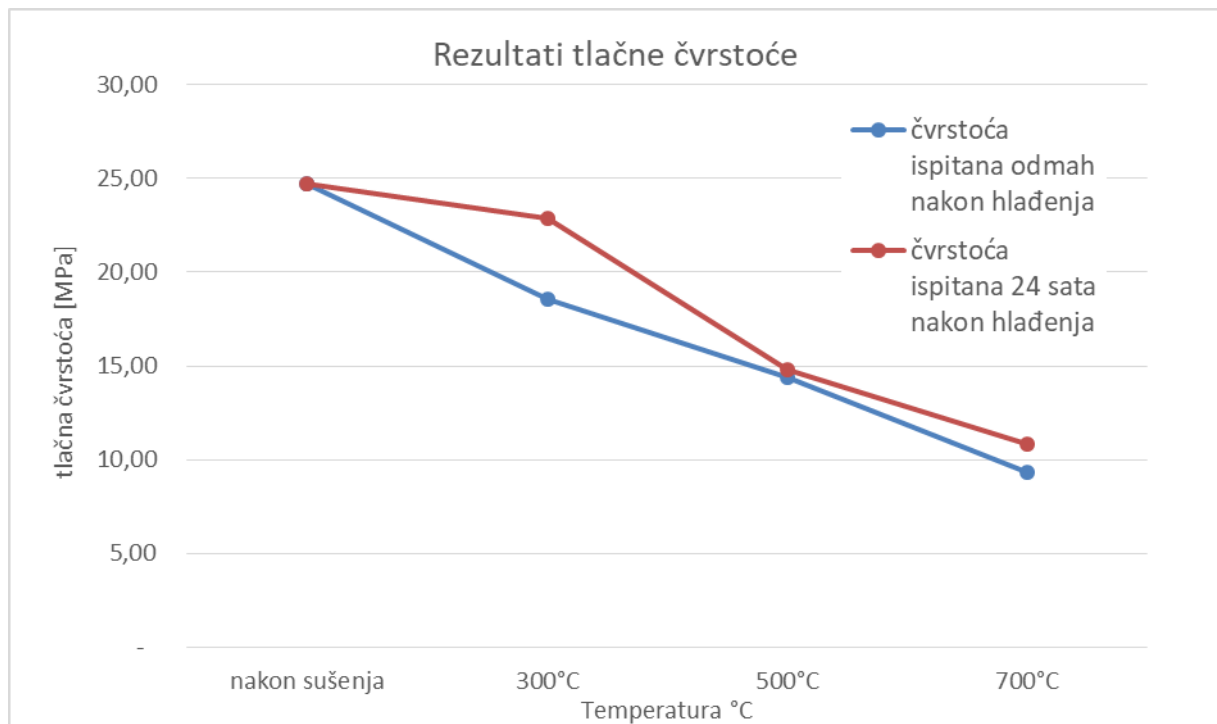
## 5.5 Analiza rezultata

U analizi rezultata biti će prikazani rezultati ovog ispitivanja, kao i prethodnog ispitivanja u kojem su ispitni uzorci postepeno ohlađeni na temperaturu nižu od 40 °C.

### 1. REZULTATI TLAČNIH ČVRSTOĆA NAKON PEČENJA NA RAZLIČITE TEMPERATURE

Graf 5.6. prikazuje tlačne čvrstoće na različitim temperaturama mjerene odmah nakon hlađenja i mjerene dan nakon hlađenja

Graf 5.6. – Rezultati tlačne čvrstoće

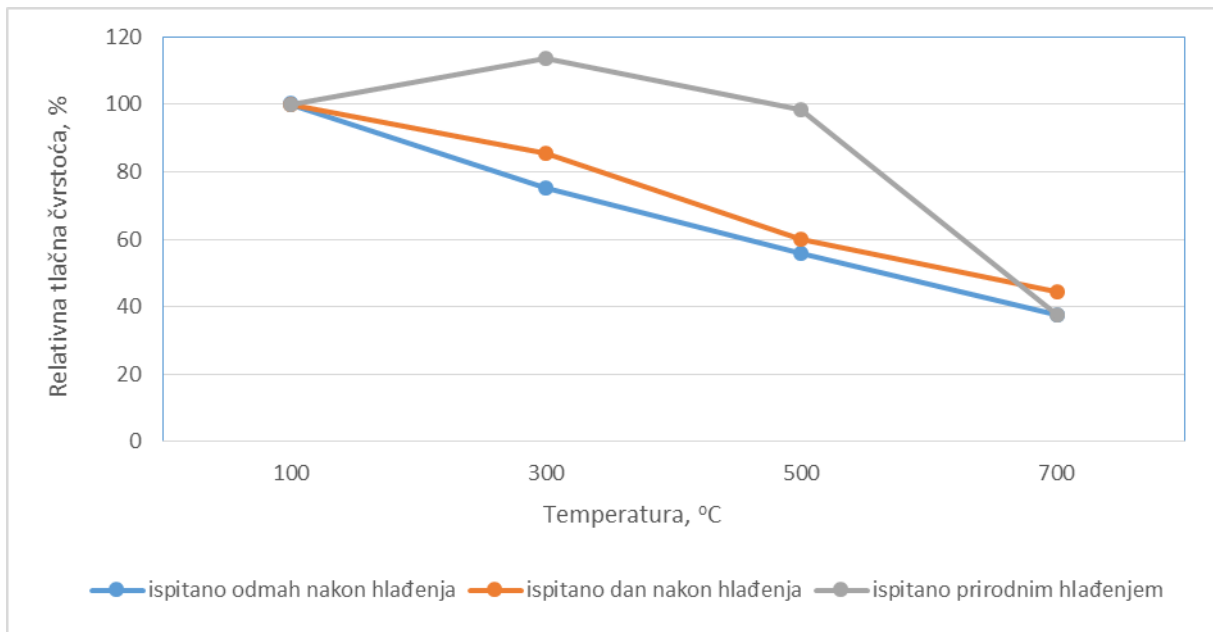


Rezultati ispitivanja na različite temperature:

Na grafu 5.6 vidljiv je pad čvrstoće uzoraka nakon izlaganja visokim temperaturama i hlađenja. Razlika između mjerenja čvrstoće odmah i nakon 24 sata naviše je uočljiva kod uzoraka koji su grijani na temperaturi od 300°C. S obzirom da se postupak hlađenja uzoraka odvijao dok uzorci ne bi postigli 40 °C, sigurno je za ovu temperaturu bila potrebna manja količina vode.

Dobiveni rezultati u skladu su sa rezultatima dobivenim u radu [13]. Očito i ovdje naglo hlađenje vodom uzorkuje pojavu pukotina u mikrostrukтури betona, što uzorkuje smanjenje tlačne čvrstoće.

Graf 5.7. Promjena čvrstoće u odnosu na [10]

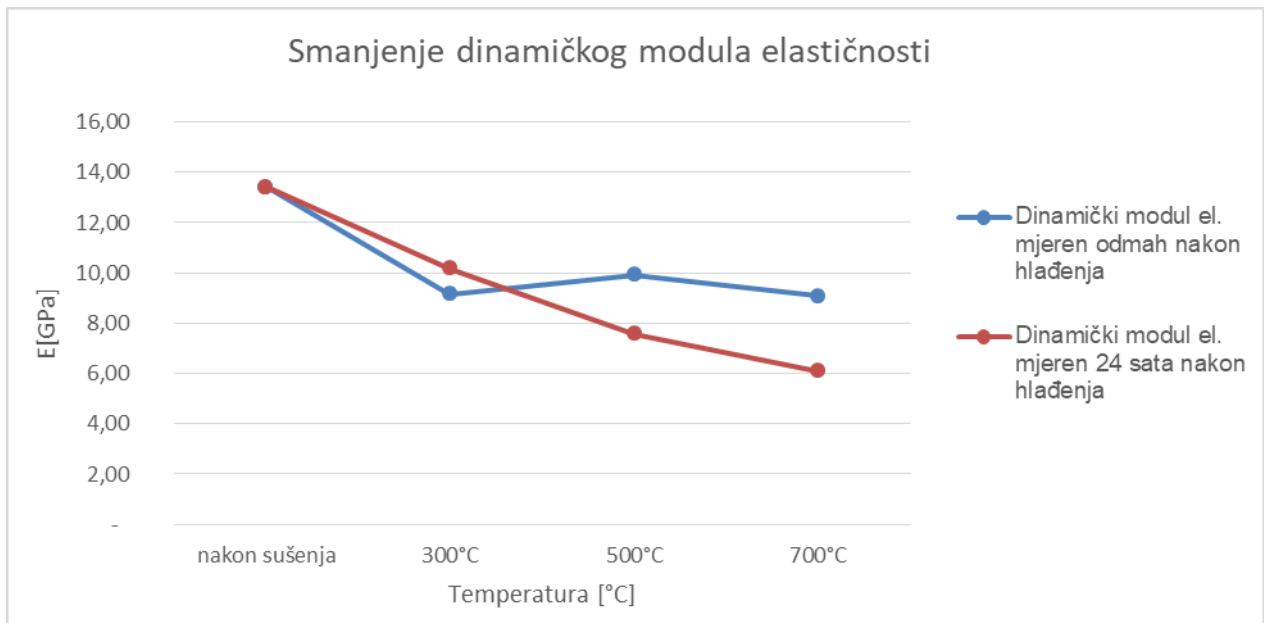


Na grafu 5.7 dane su vrijednosti relativne čvrstoće u odnosu na referentnu temperaturu (100 °C) Prema grafu vrijednosti koje su dobivene razlikuju se od ispitivanja ispitivanja [10] za temperature od 300°C, 500°C, dok je vrijednost za 700°C približno ista. Najveća vrijednost temperature je najzanimljivija jer temperatura požara doseže tu i veće vrijednosti temperature, a kako je vidljivo prema grafu bez obzira na način hlađenja uzoraka, čvrstoća opada na 40 % referentne vrijednosti.

## 2. DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI

Na grafu 5.18. prikazani su rezultati dinamičkog modula elastičnosti za ovo ispitivanje, a na grafu 5.9. rezultati dinamičkog modula elastičnosti ovog i prethodnog ispitivanja.

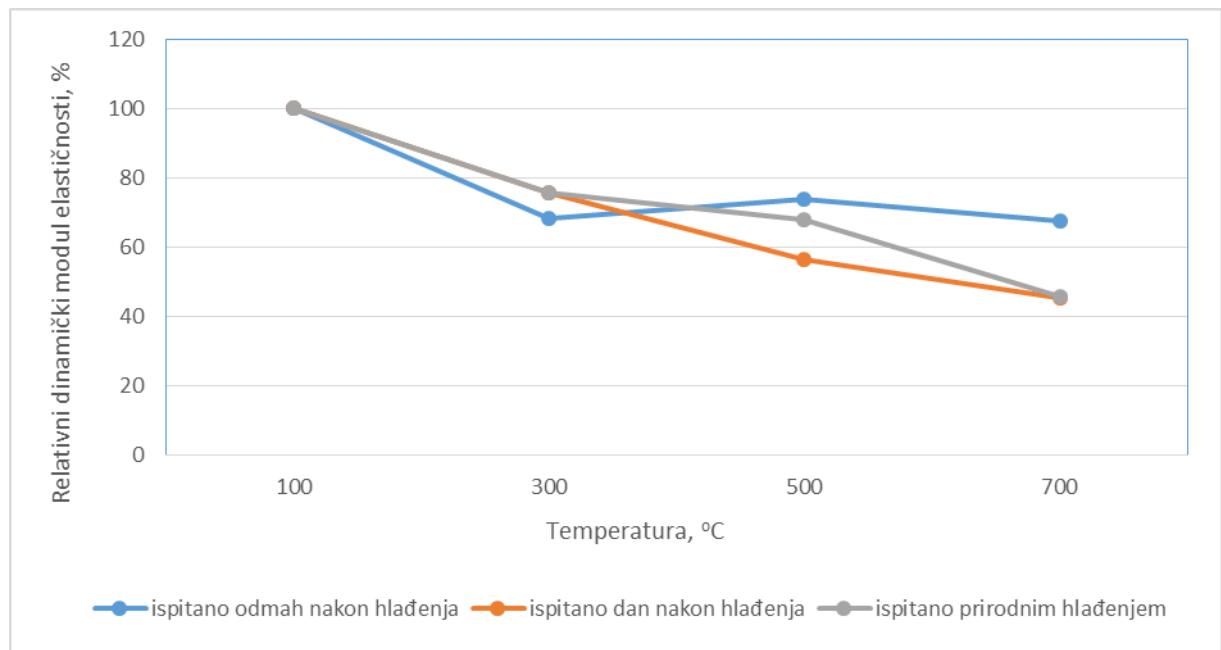
Graf 5.8. – Smanjenje dinamičkog modula elastičnosti



- Dinamički modul elastičnosti nakon temperature pečenja od 300°C te hlađenja vodom i odmah nakon toga ispitan se smanjuje za 32% u odnosu na početni modul elastičnosti (nakon sušenja na 100°C), dok mjerenjem dan poslije padne za dodatnih 24%,
- Dinamički modul elastičnosti nakon temperature pečenja od 500°C te hlađenja vodom i odmah nakon toga ispitan se smanjuje za 26% u odnosu na početni modul elastičnosti (nakon sušenja na 100°C), dok mjerenjem dan poslije padne za dodatnih 22%,
- Dinamički modul elastičnosti nakon temperature pečenja od 300°C te hlađenja vodom i odmah nakon toga ispitan se smanjuje za 44% u odnosu na početni modul elastičnosti (nakon sušenja na 100°C), dok mjerenjem dan poslije padne za dodatnih 9%,



Graf 5.9. – Smanjenje dinamičkog modula elastičnosti, usporedba sa [10]

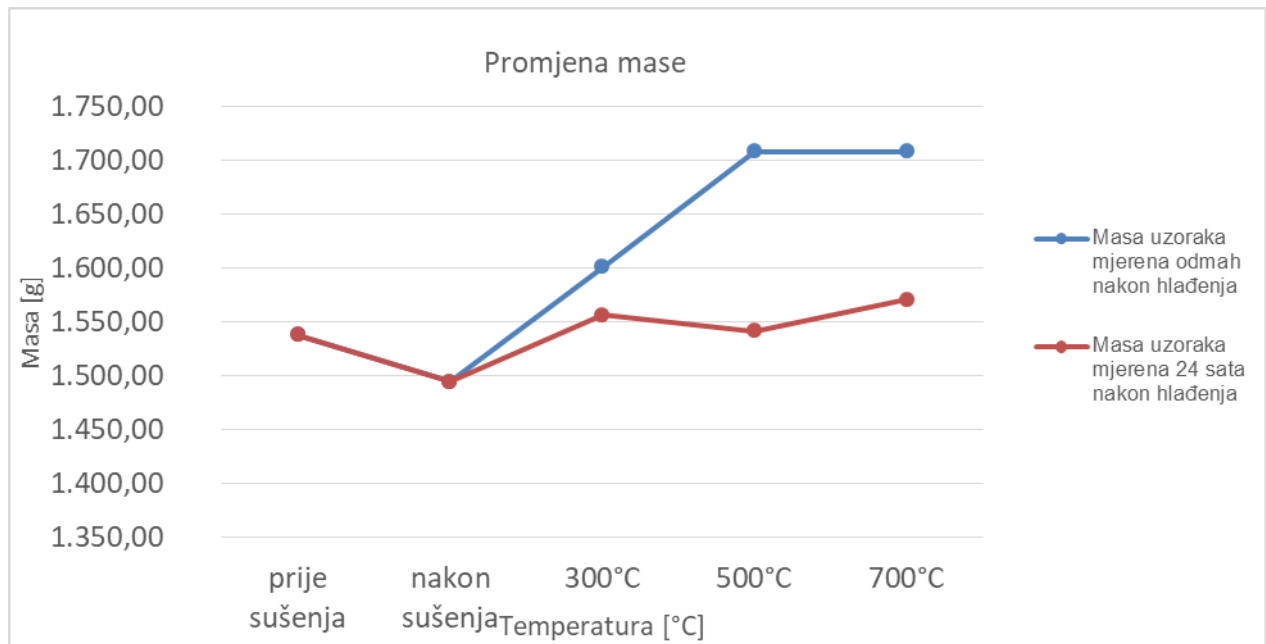


Dinamički modul elastičnosti na najvećoj temperaturi je pao za 55%, što je slično vrijednosti izmjerenoj kod [10] gdje je pao za 60%, što znači da je za temperaturu od 700°C pad dinamičkog modula elastičnosti približan za prirodno i za prisilno hlađenje.

### 3. REZULTATI MJERENJA MASE UZORKA

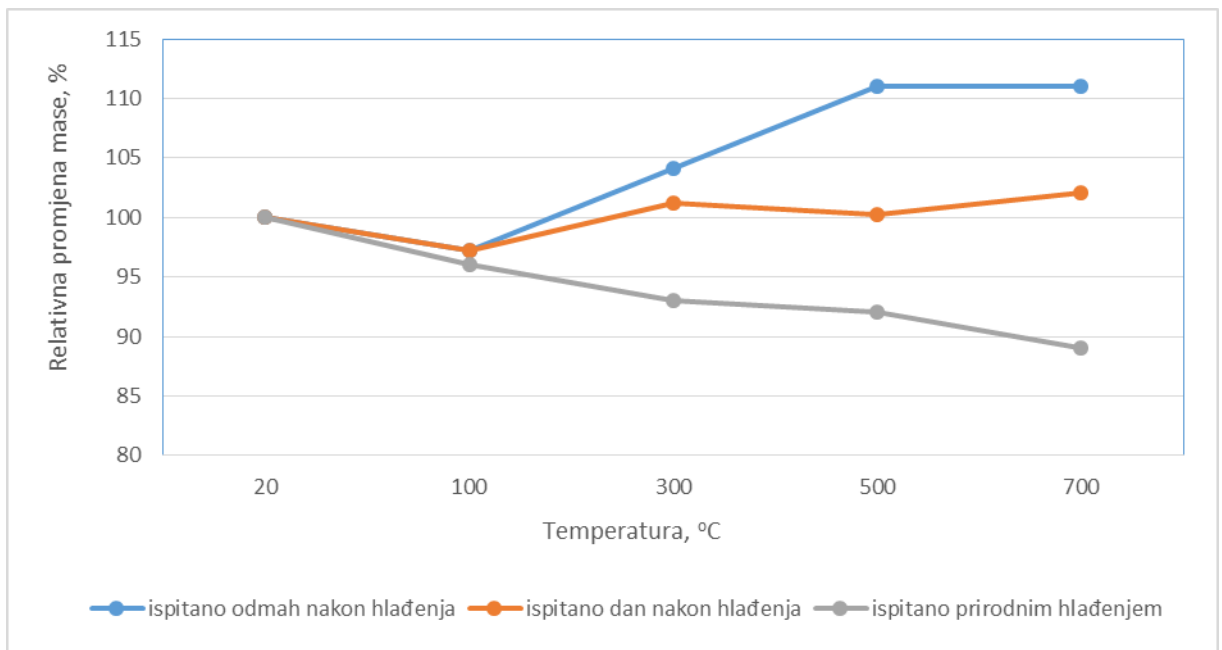
Na grafu 5.10. prikazani su rezultati ovog ispitivanja a na grafu 5.11. zbirni rezultati ovog i prethodnog ispitivanja.

Graf 5.10. – Grafički prikaz promjene mase odmah nakon hlađenja i nakon 24 sata



- Mase uzoraka nakon temperature pečenja od 300°C te hlađenje vodom i odmah nakon toga ispitana povećala za 7% se u odnosu na masu uzorka nakon sušenja na 100°C,
- Mase uzoraka nakon temperature pečenja od 500°C te hlađenja vodom i odmah nakon toga ispitana povećala za 14% se u odnosu na masu uzorka nakon sušenja na 100°C,
- Mase uzoraka nakon temperature pečenja od 700°C te hlađenja vodom i odmah nakon toga ispitana povećala za 14% se u odnosu na masu uzorka nakon sušenja na 100°C.

Graf 5.11. - Grafički prikaz promjene mase, usporedba sa [10]



Uspoređujući ispitivanje prisilnim hlađenjem u usporedbi sa prirodnim hlađenjem [10] gdje su mase uzoraka bile smanjene za 4%-11%, u ovom ispitivanju pokazalo se da su mase povećane za 4%-7% u odnosu na početnu masu uzorka sušenog na 100°C, što je posljedica upijanja vode.

## 7. ZAKLJUČAK

Najkorišteniji građevinski materijal današnjice u svijetu je beton. Povoljne karakteristike betona su zaslužne za takav status betona u gradnji. Obični vibrirani beton kao i samozbijajući beton sastoje se od identičnih osnovnih komponenti (agregat, cement, voda, aditivi). Samozbijajući beton ima manji udio krupnog agregata, manji vodovezivni omjer dok je povećan udio paste i superplastifikatora. Samozbijajući beton je manje gustoće što se postiže upotrebom agregata s velikim sadržajem pora, stvaranjem međuprostora između krupnih zrna, stvaranjem pora u mortu.

Samozbijajući beton ima bolju fluidnost od običnog betona, doseže visoku čvrstoću u očvrslom stanju, lakša ugradnja i povećana trajnost. (SCC Self compacting concrete).

Samozbijajući beton je vrsta betona koja teče pod utjecajem vlastite težine bez segregacije, beton zaobilazi armaturu, popuni oplatu bez mjehurića zarobljenog zraka.

Potreba za ovakvim betonom se pokazala zbog pada kvalitete radne snage i njegova uporaba će biti sve češća u budućnosti.

U ovom istraživanju promatrana je jednom njegovom karakteristikom, a to je promjene svojstava samozbijajućeg betona koji je izložen visokim temperaturama. Ispitano je koliko visoke temperature utječu na rezidualne karakteristike kao što su tlačna čvrstoća, dinamički modul elastičnosti i masa betona uslijed zagrijavanja i naglog hlađenja.

U eksperimentalnom dijelu ispitivana su svojstva uzoraka nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C, potom su prisilno hlađeni i ispitivani neposredno nakon hlađenja i s odmakom od jednog dana. Karakteristike koje su mjerene su tlačna čvrstoća, masa te brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorke mješavine. Za eksperimentalni dio rada korišteni su betonski uzorci oblika cilindra samozbijajućeg betona sa dodatkom mljevene opeke, koji su stari tri godine identičnog sastava betona kao kod [10]. Osim usporedbe mehaničkih svojstava mjerenih neposredno poslije hlađenja i onih mjerenih dan poslije, zadatak je bio usporediti vrijednosti sa onima kod [10] kod čijeg ispitivanja su uzorci prirodno ohlađeni.

Temeljem dobivenih rezultata može se zaključiti:

- Naglim hlađenjem betona dobiju se manje čvrstoće nego sporim hlađenjem. Nešto su bolji rezultati čvrstoća kod uzoraka ostavljenih 24 sata na zraku. Nije definirano koliko pojava sušenja utječe na to povećanje čvrstoće

- Za uzorke izložene najvišim temperaturama od 700 °C u oba ispitivanja dobivena je gotovo jednaka vrijednost.
- Dinamički modul elastičnosti prisilno hlađenih uzoraka i ispitanih dan nakon hlađenja i polagano hlađenih uzoraka je gotovo isti. Uzorci naglo hlađeni i odmah ispitani imaju nešto višu vrijednost koja može biti uzrokovana sa vlažnosti uzoraka
- Vlažnost uzoraka utjecala je i na rezultate ispitivanja promjene mase uzoraka, uzorci prirodno hlađeni imaju veći gubitak mase na višim temperaturama. Uzorci naglo hlađeni imaju veću masu jer je količina vode potrebna za hlađenje uzoraka na višim temperaturama veća.

**LITERATURA:**

- [1] Štirmer, N., Banjad Pečur, I., Sastav samozbijajućeg betona, GRAĐEVINAR 61 (2009) 4, 321-329
- [2] Strinić, Ž., Diplomski rad: Samozbijajući beton s opekarskim lomom, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek 2016.
- [3] Vrančić, T., Poboljšanje požarne postojanosti betona dodavanjem vlakana, GRAĐEVINAR 57 (2005)
- [4] Pavlić, M., Mehanička svojstva samozbijajućeg laganog betona nakon izlaganja visokim temperaturama, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2016.
- [5] Kokan, T., Mehanička svojstva naglo hlađenog samozbijajućeg betona nakon izlaganja visokim temperaturama, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2017.
- [6] Sivaraja Muthusamy, Poongodi Kolandasamy: *Lightweight self-compacting concrete of high temperatures*; GRAĐEVINAR 67 (2015) 4, 329-338, 2014.
- [7] Neno Torić, Ivica Boko, Sandra Juradin and Goran Baloević: Post-fire reduction of concrete's mechanical properties and its impact on residual load capacity; 8th International Conference on Structures in Fire Shanghai, China, June 11-13, 2014
- [8] Građevinski fakultet Osijek, Predavanja, Samozbijajući beton, Osijek, šk. god. 2017/2018.
- [9] Šabić, H., Samozbijajući beton, 11th International Scientific Conference on Production Engineering Development and Modernization of Production, Rim, 2017.

- [10] Beretin, M., Mehanička svojstva samozbijajućeg lakog betona sa dodatkom mljevene opeke nakon izlaganja visokim temperaturama, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2017.
- [11] Grbeša, K., Utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrstlog SCLCa; Diplomski rad, Granevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2014.
- [12] Ukrainczyk, V., Beton - struktura, svojstva, tehnologija, Alcor, Zagreb, 1994.
- [13] Karahan, O., Residual compressive strength of fire-damaged mortar after post-fire-air-curing, *Fire Mater.* 2011; 35:561–567 - Published online 2 December 2010 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/fam.1074