

# Mehanička svojstva samozbijajućeg lakog betona sa dodatkom mljevene opeke nakon izlaganja visokim temperaturama

---

**Beretin, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*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:123:766923>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-21**



*Repository / Repozitorij:*

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



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

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

# **ZAVRŠNI RAD**

**Marko Beretin**

**Split, 2017.**

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

**Mehanička svojstva samozbijajućeg lakog betona sa  
dodatkom mljevene opeke nakon izlaganja visokim  
temperaturama**

**Završni rad**

**Split, 2017.**

***Sažetak:***

Samozbijajući beton je vrsta betona koja teče samo pod utjecajem vlastite težine bez segregacije, tijekom čega se debarira. To je beton koji popunjava oplatu zaobilazeći armaturu, te na kraju zadržava horizontalnu površinu bez potrebe za uporabom vibracijskih uređaja. Neke od karakteristika koje razlikuju samozbijajući beton od običnog su poboljšana fluidnost, visoka čvrstoća u očvrslom stanju, lakša ugradnja i povećana trajnost. Beton je okarakteriziran kao negorivi materijal. Ovisno o temperaturi u betonu pojavljuju se kemijske promjene minerala iz očvrslе cementne paste i agregata. U eksperimentalnom dijelu rada su se testirala i analizirala mehanička svojstva samozbijajućeg lakog betona pod utjecajem visokih temperatura(100, 300,500,700°C), te su prikazani rezultati.

***Ključne riječi:***

Samozbijajući beton, laki beton, mljevena opeka, mehanička svojstva, rezultati ispitivanja.

**Mechanical properties of self-compacting lightweight concrete with the addition of ground brick after exposure to high temperatures**

***Abstract:***

Self compacting concrete is a type of concrete that runs only under the influence of its own weight without segregation, during which air flows freely. It's the type of concrete that fills all voids bypassing the armature, and in the end retains a horizontal surface without the use of vibrating devices. Some of the characteristics that distinguish self-compacting concrete from the regular concrete are improved fluidity, high strength in the hardened state, easier installation and increased durability. Concrete is classified as non-combustible material. Depending on the temperature of the concrete there are chemical changes of minerals from the hardened cement paste and aggregate. In the experimental part of the work the mechanical properties of self-compacting lightweight concrete under the influence of high temperatures(100, 300,500,700°C) were tested and analyzed and after that their results were shown.

***Keywords:***

Self-compacting concrete, lightweight concrete, ground brick, mechanical properties, test results.

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

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ:               **STRUČNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**  
KANDIDAT:           Marko Beretin  
BROJ INDEKSA:      1617  
KATEDRA:           **Katedra za građevinske materijale**  
PREDMET:           Građevinski materijali

**ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD**

Tema: Mehanička svojstva samozbijajućeg laganog betona sa dodatkom mljevene opeke nakon izlaganja visokim temperaturama

Opis zadatka: Zadatak kandidata je da na postojećim uzrocima samozbijajućeg laganog betona sa dodatkom mljevene opeke ispita utjecaj požara na mehanička svojstva takvog betona. Uzorke oblika valjka potrebno je ispitati nakon sušenja na 100°C, te nakon podvrgavanja temperaturama od 300°C, 500°C i 700°C. Na uzorcima se mjeri tlačna čvrstoća, brzina prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti i promjena mase.

U Splitu, 17.10.2016.

Voditelj Završnog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

**SADRŽAJ:**

1 UVOD .....	3
2 SAMOZBIJAJUĆI LAKI BETON.....	5
2.1 Općenito o samozbijajućem betonu .....	5
2.1.1 Povijesni razvoj.....	6
2.1.2 Svojstva samozbijajućeg betona .....	8
2.2 Općenito o lakom betonu .....	9
2.2.1 Podjela.....	9
2.2.2 Svojstva lakih betona .....	10
2.3 Svojstva betona s agregatom od recikliranih materijala.....	11
3 POŽARNA OTPORNOST.....	12
3.1 Djelovanje požara na beton .....	13
3.2 Djelovanje požara na konstrukcije .....	14
4 ISPITIVANJE SAMOZBIJAJUĆEG BETONA.....	16
4.1 Uvod.....	16
4.2 Materijali .....	16
4.2.1 Cement .....	16
4.2.2 Agregat.....	18
4.2.3 Mljevena opeka .....	21
4.2.4 Aditiv FTF.....	21
4.2.5 Sastav betonskih mješavina.....	22
4.3 Rezultati ispitivanja u svježem stanju.....	23
4.3.1 Rezultati rasprostiranja slijeganjem.....	23
4.3.2 Rezultati ispitivanja V-lijevkom.....	23
4.3.3 Rezultati ispitivanja L-posudom.....	24

---

4.3.4 Rezultati ispitivanja J-prstenom.....	25
4.3.5 Mehanička svojstva betona nakon 28 dana.....	25
<b>5 ISPITIVANJE OTPORNOSTI SAMOZBIJAJUĆEG BETONA POD UTJECAJEM</b>	
<b>POŽARA.....</b>	<b>27</b>
5.1 Postupak ispitivanja.....	27
5.2 Rezultati i analiza ispitivanja.....	28
5.2.1 Tlačna čvrstoća.....	28
5.2.2 Dinamički modul elastičnosti.....	31
5.2.3 Promjena mase uzorka.....	35
5.2.4 Analiza rezultata.....	37
<b>6 ZAKLJUČAK.....</b>	<b>40</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>42</b>

## 1 UVOD

Prva inačica betona se koristila još od davnih vremena Egipćana i Rimljana koji su poznavali hidraulička svojstva mješavine pucolana, pečene gline i vapna koje su miješali sa pijeskom i drobljenom opekam dobijajući mort. Kroz godine istraživanja otkrivaju se hidraulička svojstva nekih drugih veziva stoga je 1824.g prvi put proizveden Portland cement. Isaac Johnson je 1845.g pečenjem mješavine gline i vapnenca stvorio Portland cement koji se i danas koristi u širokoj upotrebi.

Najkorišteniji materijal na svijetu je upravo beton. Kroz stoljeće njegove upotrebe, beton pokriva oko 70 % potreba u građenju i postao je sinonim za modernu i urbanu gradnju. Današnji urbani razvoj u svim područjima života ljudi prati i razvoj u građevinarstvu koji nameće nove zahtjeve. Beton ima zahtjevna svojstva kao materijal, stoga su transport, ugradnja i njega važne faze u procesu proizvodnje upravo zbog toga jer čine velike troškove u izvedbi betonskih konstrukcija. Povećanje produktivnosti tj. smanjenje troškova, povećanje i poboljšanje uvjeta rada, uz zadovoljavanje propisanih svojstava betona su postali prioritet u građevinarstvu. Postoje mnogi zahtjevi koje obični beton nije mogao ostvariti pa su pokrenuta istraživanja na području dobivanja novih, boljih građevinskih materijala.

Nakon istraživanja novih netradicionalnih izvora sirovina u kombinaciji s tradicionalnim izvorima uz zadovoljavanje načela održivosti, omogućeno je stvaranje novih vrijednosti kroz novi materijal. U praksi je potvrđeno da novih značajnijih inovacijskih tehnologija nema tj. radi se o poboljšanjima primjene postojećih tehnologija. Inovativne tehnologije i primjena odnose se uglavnom na manjeviše klasične ili već isprobane nove materijale, ali na inovativan način, koji rezultira poboljšanjem ponašanja u konkretnoj primjeni. Za razliku od inovativnih materijala, primjena je uglavnom obuhvaćena normama za određene materijale.

Godišnje količine otpada u EU iznose otprilike 180 milijuna tona koje su nastale rušenjem u zemljama članicama(1,3kg dnevno po osobi). Razlike u količini otpada se razlikuju po državama tako da Njemačka i Nizozemska proizvode 1,9kg po osobi, dok Irska i grčka primjerice proizvode 0,5kg po osobi. U budućnosti se se planira izvesti rekilaža upotrebljenog agregata što bi bio velik korak dalje u tehnološkom i ekološkom pogledu koji ujedino rezultira ka cilju održivog razvoja.



Kako se održivi razvoj donosi na države članice EU tako se odnosi i na Hrvatsku. Trend recikliranih materijala se odnosi na sva područja djelatnosti pa tako i u građevinarstvu, stoga je potrebno uvesti recikliranje građevinskog otpada u proizvodni proces.

U Hrvatskoj se građevinski otpad još uvijek nekontrolirano odlaže što ukazuje da ne postoji kvalitetna evidencija izvora, količina i tokova građevinskog otpada iako postoji zakonski okvir. Sustav poticanja ugradnje recikliranih materijala još uvijek nije razrađen. Ovisno o vrsti građevinskih radova (rušenje objekta, izgradnja novog) postoje vrste građevinskog otpada.

Trenutni stupanj reciklaže građevinskog otpada ne prelazi 7%, a iz građevinskog se otpada izdvoji oko 11% sekundarnih sirovina. Neovisno o podacima koji se prijavljuju Agenciji za zaštitu okoliša, zaključak je da se većina građevinskog otpada odlaže na odlagališta otpada, a najčešće se radi o nekontroliranom odlaganju građevinskog otpada na divlja odlagališta otpada. U pojedinim jedinicama lokalne samouprave više od 80% otpada odloženog na divlja odlagališta čini građevinski otpad. [1]

## 2 SAMOZBIJAJUĆI LAKI BETON

### 2.1 Općenito o samozbijajućem betonu

Vrsta betona koja teče samo pod utjecajem vlastite težine bez segregacije, tijekom čega se deaerira (nema zarobljenih mjehurića zraka) i u potpunosti popunjava oplatu zaobilazeći armaturu, te na kraju zadržava horizontalnu površinu bez uporabe vibracijskih uređaja naziva se samozbijajući beton (eng. Self compacting concrete, SCC). Neke od karakteristika koje razlikuju samozbijajući beton od običnog su poboljšana fluidnost, visoka čvrstoća u očvrslom stanju, lakša ugradnja i povećana trajnost. Samozbijajući beton i obični vibrirani beton imaju iste osnovne komponente (agregat, cement, voda, aditivi), ali za razliku od običnog betona kod samozbijajućeg betona obično je manji udio krupnog agregata, manji je vodovezivni omjer, povećan je udio paste te je povećan udio superplastifikatora, a po potrebi može se upotrijebiti i dodatak za promjenu viskoznosti. Viskoznost i fluidnost betonske mješavine postiže se pažljivim odabirom cementa i dodataka, uz ograničavanje omjera vode i sitnih čestica, te dodavanjem dodataka za promjenu viskoznosti i superplastifikatora. Za smanjivanje utjecaja varijacije vlažnosti ili raspodjele zrna u ukupnom sastavu agregata koriste se dodaci za promjenu viskoznosti, a beton je tada manje osjetljiv na male varijacije u omjeru sastojaka. Često su u upotrebi inertni i pucolanski, odnosno hidraulični dodaci. Preporučuje se upotreba najvećeg zrna  $D_{max}=12-20$  mm.

Praksa je pokazala da upotreba samozbijajućeg betona ima veliku korist u ekonomskom, socijalnom i ekološkom pogledu. Neki od glavnih razloga za primjenu samozbijajućeg betona su brža izgradnja, osiguranje zbijanja betona posebno na mjestima konstrukcije, gdje je vibriranje otežano te eliminacija buke vibriranja. Samozbijajući beton ponekad se koristi u izradi konstrukcije s gustom armaturom i brojnim preprekama. Isto tako je pogodan kod sanacije pojedinih konstrukcija kada se na postojećoj konstrukciji dodaje sloj novog betona kojim se zamjenjuje dotrajali vanjski sloj ili povećanja nosivosti konstrukcije.

Danas pogoni za proizvodnju samozbijajućeg betona i betonare imaju iste zahtjeve kao i tradicionalna proizvodnja betona, te je transport na veće udaljenosti moguć je samo automikserima. Samozbijajući beton je zbog svojih sastojaka osjetljiviji od običnog betona te je potrebno redovito kontrolirati sastavne materijale, a isto tako i količinu doziranja tih materijala u proizvodnji. Vrlo je važno da se kod preuzimanja betona na gradilištu upotpuni dokumentacija o proizvodnji s detaljima važnim za krajnjeg korisnika. [1]

### 2.1.1 Povijesni razvoj

Osnovni razlog zbog kojih su započeta intenzivna i vrlo ozbiljna istraživanja na planu dobivanja samozbijajućih betonskih mješavina bila su velik problem s trajnošću armiranobetonskih konstrukcija i velik nedostatak kvalificirane radne snage za kvalitetno ugrađivanje betona.

Smatra se da je zbog uočenih problema u trajnosti armiranobetonskih konstrukcija u kasnim 80-ima u Japanu razvijen samozbijajući beton. Na uzetim uzorcima betona iz konstrukcije uočene su pojave segregacije na makrorazini, a na mikrorazini uočena je potpuna dezintegracija strukture.

Među prvim metodama za projektiranje sastava samozbijajućeg betona bila su istraživanja provedena na Sveučilištu u Tokyou, a razvili su je Okamura i Ozawa. Metoda je određivala uporabu japanskih materijala za izradu betona s cementom male topline hidratacije i velikim sadržajem dikalcijeva silikata (C2S). Sljedeći su osnovni principi projektiranja sastava prema ovoj metodi:

- Volumen krupnog agregata u betonu je 50 %
- Sve čestice agregata veće od 0,09 mm smatraju se agregatom, a manje od 0,09 mm vezivom
- Vodovezivni omjer i količina superplastifikatora određuju se ispitivanjem morta pomoću V-lijevka
- Preporučuje se vrijednost rasprostiranja slijeganjem 650 mm te se prema tome prilagođava udio superplastifikatora

Temeljem ove metode nastale su mnogobrojne druge modificirane metode koje se mogu primijeniti za širi raspon materijala.

Ova vrsta betona prvi put je korištena u izgradnji zgrada 1990. godine a najznačajnija izgradnja je most Shin-kiba Ohaski u Japanu 1991. godine. Nakon toga samozbijajući beton počeo se koristiti i u Europi: izgradnja podvodnog cestovnog tunela u Švedskoj (slika 2.1).



Slika 2.1 Podvodni most u Švedskoj [4]

### 2.1.2 Svojstva samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton mora zadovoljavati zahtjeve dane Europskim smjericama poput:

- Razreda tlačne čvrstoće
- Maksimalne veličine zrna agregata  $D_{max}$
- Razreda izloženosti ili granične vrijednosti sastava:
- Maksimalni vodocementni faktor
- Minimalna količina cementa
- Dodatni zahtjevi za samozbijajući beton
- Vrijednost T500 (rasprostiranje slijeganjem) ili V-lijevak
- Ispitivanje L kutijom
- Otpornost segregaciji

Karakteristike samozbijajućeg betona u svježem stanju su:

- Tečenje
- Viskoznost
- Sposobnost zaobilaženja prepreka
- Otpornost segregaciji

## 2.2 Općenito o lakom betonu

Laki betoni najčešće imaju gustoću 600 – 1500 kg/m<sup>3</sup>. Smanjenje gustoće se postiže u odnosu na obični beton:

- upotrebom agregata s velikim sadržajem pora
- stvaranjem međuprostora između krupnih zrna agregata
- stvaranjem pora u mortu

Laki beton ima manju čvrstoću i otpornost na habanje u odnosu na normalni beton zbog povećanog sadržaja pora, ali ima više drugih prednosti kao što su izolacijska svojstva i manja volumna masa. Trajnost lakih betona može biti ista kao i kod običnog betona. Da bi se postigla zahtijevna kakvoća laki betoni su skuplji, a proizvodnja, transport i sama ugradnja zahtijevaju više pažnje. U cjelini, prednosti lakog betona ipak nadmašuju spomenute nedostatke.

### 2.2.1 Podjela

Laki betoni se dijele ovisno o načinu postizanja manje volumne mase na:

- lake betone od jednakoizotopnog agregata
- ćelijaste betone (plinobetoni, pjenobetoni) (slika 2.2)
- lakoagregatne betone (ekspandirana pečena glina, ekspandirana granulirana zgura, ekspandirani perlit ili vermikulit, ekspandirani polimerni materijal) (slika 2.3)



Slika 2.2 Pjenobeton [5]



Slika 2.3 Vermikulit [5]

### 2.2.2 Svojstva lakih betona

U odnosu na običan beton, laki betoni su krtiji, te imaju manji modul elastičnosti sve do sloma ponašaju se gotovo linearno elastično. Kakvoća lakih betona varira više nego kod običnih betona. Za  $1\text{ m}^3$  lakog betona količine cementa su i do 70% veće od onih potrebnih za  $1\text{ m}^3$  običnog betona.

Laki beton je dobar izolator topline samo ako je dovoljno suh. Povećanjem vlažnosti povećava se njegova vodljivost. O čvrstoći betona također ovise i izolacijska svojstva lakog betona. Što je manja čvrstoća lakog betona, bolja su njegova izolacijska svojstva i obratno. Beton ili mort s agregatom od perlita, vermikulita ili ekspaniranog polimernog materijala ima najbolja toplinsko – izolacijska svojstva. Gustoća mu iznosi  $300 - 600\text{ kg/m}^3$ , a čvrstoća najčešće manje od 1 MPa.

Beton s agregatom od ekspandirane pečene gline ili zgure, te s agregatom prirodnog porijekla postiže najveću čvrstoću. Takav beton koristi se za izradu lakih nosivih konstrukcija, a može djelovati i kao toplinska izolacija. Koeficijent toplinske vodljivosti mu je do 4 puta manji u odnosu na obični beton. Jednozrnati beton pokazao se jednako pogodan za izradu konstrukcija, njegova gustoća iznosi  $1200 - 2000\text{ kg/m}^3$ , a čvrstoća na pritisak može postići vrijednosti iznad 15 MPa.

Jednozrnati beton od lakog agregata, pjenobeton i plinobeton postižu znatno manje čvrstoće. Čvrstoća na pritisak iznosi  $3,5 - 10\text{ MPa}$ , a gustoća se kreće u granicama od  $600 - 1200\text{ kg/m}^3$ . Ovakvi betoni imaju bolja toplinsko – izolacijska svojstva od prije opisanog betona za lake nosive konstrukcije.

U konstrukcijama u kojima je potrebna mala zapreminska masa i toplinska vodljivost koristi se lagani beton. U upotrebi je kod izrade ravnoga krova, kao podloga za hidroizolaciju, sanaciju starih i dotrajalih objekata, toplinsku izolaciju potkrovlja, zaštitu instalacija kao podložni beton, plivajući podovi itd.

### **2.3 Svojstva betona s agregatom od recikliranih materijala**

Kako agresivna okolina potiče odnosno pospješuje propadanje betona, trajnosti betona se posvećuje sve više pozornosti kako kod nas tako i u svijetu. Zbog toga se već pri projektiranju koristi koncept po kojemu konstrukcija treba iskazivati odgovarajuću sigurnost, uporabljivost i nosivost tijekom svog životnog vijeka. Poznajemo li okolinu kojoj je objekt izložen te mehanizme mogućih procesa propadanja možemo predvidjeti i trajnost betona. Možemo očekivati da će i projektiranje trajnosti betona biti uspješno ako su granični uvjeti poznati i dobro određeni.

Sposobnost materijala da se suprotstavi različitim djelovanjima iz okoliša kojem je sam taj materijal izložen je trajnost materijala. Životni vijek konstruktivnih i nekonstruktivnih materijala ovisi o njihovoj izdržljivosti u uvjetima u kojima su izloženi različitim kemijskim, mehaničkim, fizičkim i biološkim procesima razaranja.

Trajnost ovisi o više parametara kao što su sastav i struktura materijala s jedne strane i utjecaj okoliša kojima je izložen s druge strane, te ga nije moguće kvantificirati i kao takvog staviti u proračun. Važni parametri koji utječu na trajnost materijala, u slučaju betona osim sastava i strukture su i svojstva poroznosti, apsorpcije, te propusnosti za fluide i plinove. [1]

Najvažniji čimbenici za trajnost betona su:

- Apsorpcija vode
- Smrzavanje i odmrzavanje
- Otpornost na habanje
- Toplinska provodljivost
- Otpornost na požar



### 3 OTPORNOST NA POŽAR

Ovisno o temperaturi u betonu pojavljuju se kemijske promjene minerala iz očvrsele cementne paste i agregata. Do dehidracije kalcij-hidroksida u očvrstloj cementnoj pasti dolazi od 400°C na više prema sljedećoj reakciji:  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ .

Raspadanje cementne paste uzrokuje smanjenje čvrstoće cementne paste, što dovodi do potpunog kolapsa betona. Proces razaranja dodatno ubrzava voda koja je oslobođena u obliku vodene pare. Učinak požara na konstrukciju ovisi o upotrijebljenim materijalima pri izvođenju konstrukcije, a beton pokazuje najbolje ponašanje pri povišenim temperaturama. Kako je agregat dominantni materijal u betonu, on u velikoj mjeri određuje ponašanje betona u slučaju izloženosti požaru. Beton ima najbolju požarnu otpornost od svih građevinskih materijala, ne gori, te ne oslobađa toksične plinove i ima izuzetno malu toplinsku provodljivost.

Tema brojnih znanstvenih i stručnih radova je ispitivanje tlačne čvrstoće betona na povišenim temperaturama budući da je za beton nosivost na tlak mjerodavna. Uočeno je da s porastom temperature tlačna čvrstoća betona pada, a kod temperatura od 300 – 360°C počinje naglo opadanje čvrstoće. Do 300°C beton ima prihvatljivo ponašanje, ali ni preko te temperature ne nastupa lom konstrukcije. Beton koji je izložen djelovanju visoke temperature mijenja boju, smanjuje se tlačna čvrstoća u zavisnosti od kemijskog sastava upotrijebljenog cementa i agregata, no uzrok sloma konstrukcije može se pripisati gubitku nosivosti armature. Razaranje strukture betona na visokim temperaturama posljedica je različitih mehanizama razaranja, koji su međusobno zavisni. Na razaranje strukture betona utječu sljedeće pojave:

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

Mehanizmi koji dovode do "kolapsa" konstrukcije su kemijske promjene, mala požarna otpornost armature, kao i deformacije poprečnog presjeka pri djelovanju požara. U betonu izloženom djelovanju požara na visokim temperaturama dolazi do kemijskih promjena na cementnoj pasti, a voda u porama betona prelazi u vodenu paru na temperaturi od 100°C.

Kada pritisak vodene pare prekorači vrijednost koju može podnijeti struktura betona počinje ljuštenje konstrukcije.

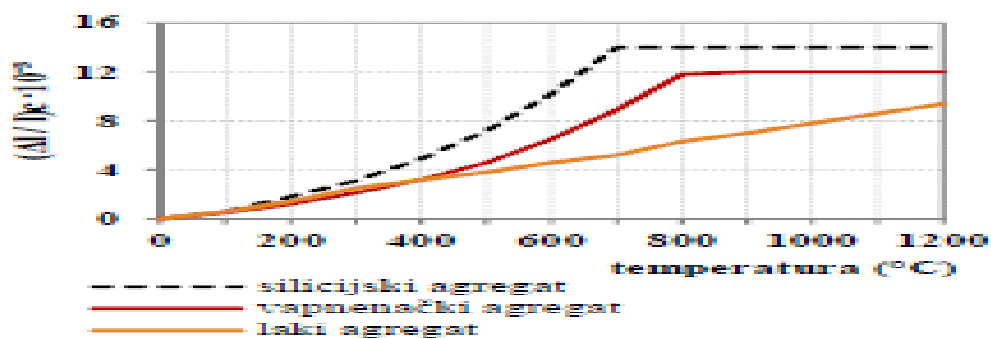
Agregat, koji sadrži vapnenac, se raspada, pri čemu oslobođeni  $\text{CO}_2$  izlazi iz betona kao plin. Ukoliko je put za izlazak plina spriječen, stvara se tlak koji uzrokuje raspadanje strukture betona. Armaturni čelik ne mijenja ponašanje do temperature od  $200^\circ\text{C}$ , ali već na temperaturama većim od  $600^\circ\text{C}$  nosivost armature je manja od 70%. Zbog togaje ograničena vrijednost temperature kojoj čelik smije biti izložen. U praksi male gubitke možemo tolerirati, tako da se granična vrijednost temperature kreće u području od  $250^\circ\text{C}$  -  $300^\circ\text{C}$ .

Beton, kao i većina materijala, uslijed promjene temperature mijenja dimenzije. [1]

### 3.1 Djelovanje požara na beton

Pri djelovanju požara bitno je uzeti u obzir svojstva gradiva ovisna o temperaturi. U ovom su poglavlju prikazani zahtjevi propisanoj normi HRN EN 1992-1-2:1995+AC:1996, koji se postavljaju na beton u slučaju izlaganja požaru. Dane su veličine za umanjeње karakteristične tlačne čvrstoće betona pri djelovanju požara na beton i ostali zahtjevi koje je potrebno poštivati pri projektiranju armiranobetonskih konstrukcija u požarnim situacijama.

Do promjene toplinskih svojstva betona dolazi sa porastom temperature. Ukupno toplinsko produljenje betona  $\Delta l/l$  (slika 3.1) računajući od  $20^\circ\text{C}$  može se odrediti prema jednadžbama propisanim normom HRN ENV 1992-1-2:2004.



Slika 3.1 Ukupno toplinsko produljenje betona [1]

Pukotine su sastavni dio betona na kojeg djeluje požar. Kod naglog povećavanja ili smanjivanja temperature betona dolazi do pojave pukotina. Npr. uslijed procesa naglog hlađenja betona u slučaju požara dolazi do naglog stezanja dijelova površine betona pri čemu nastaju pukotine. Također, nakon izlaganja betona visokoj temperaturi već od 100°C zbog različitog istezanja agregata i cementne paste dolazi do formiranja mikropukotina po površini elementa. Pojava pukotina omogućuje prolaz visokih temperatura u unutrašnjost betona te daljnje oštećenje betona. Beton i armatura se zbog izloženosti visokim temperaturama počinju različito istezati. Armatura se isteže brže od betona te dolazi do stvaranja dodatnih vlačnih naprezanja u blizini armature i do pojave pukotina. [1]

### **3.2 Djelovanje požara na konstrukcije**

Cilj požarne zaštite je ograničenje rizika djelovanja požara na osobe i društvo, susjednu imovinu a, gdje se to zahtijeva, za imovinu izravno izloženu požaru. U slučaju izbivanja požara građevina mora biti projektirana na način da:

- nosivost građevine ostane sačuvana tijekom određenog vremena,
- ograničeni su nastanak i širenje požara i dima unutar građevine,
- ograničeno je širenje požara na susjedne građevine,
- korisnici mogu napustiti zgradu ili da je na drugi način moguće njihovo spašavanje,
- sigurnost spasilačkih ekipa uzeta je u obzir.

Zahtjevi, prema normi HRN ENV 1992-1-2:2004, koji se postavljaju za ponašanje konstrukcije u požaru sljedeći su:

- ako se zahtijeva da konstrukcije imaju mehaničku otpornost u uvjetima požara, one se moraju proračunati i izvoditi tako da zadrže svoju nosivu funkciju za vrijeme mjerodavne izloženosti požaru – kriterij "R",

- ako se zahtijeva podjela na požarne odjeljke, elementi koji čine odjeljak, uključujući spojeve, proračunavaju se i izvode tako da zadrže svoju razdjelnu funkciju tijekom mjerodavne izloženosti požaru tj.:
- da ne nastupi gubitak cjelovitosti uzrokovan pukotinama, rupama ili drugim otvorima koji su dostatno veliki da dopuste prodor požara putem vrućih plinova ili plamena – kriterij "E",
- da ne nastupi gubitak izolacijske sposobnosti uzrokovan temperaturom koja premašuje temperaturu zapaljenja na neizloženoj površini – kriterij "I".

Proračun na požarno djelovanje podrazumijeva sljedeće korake:

- izbor odgovarajuće proračunske situacije,
- određivanje odgovarajućeg proračunskog požara,
- proračun razvoja temperature u konstrukcijskim elementima,
- proračun mehaničkog ponašanja konstrukcije izložene požaru.

## 4 ISPITIVANJE SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

### 4.1 Uvod

Cilj eksperimentalnog rada je ispitivanje mehaničkih svojstava betona nakon djelovanja požara pri različitim temperaturama. Ispitivana su svojstva uzoraka nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C, a zatim su prikazani rezultati. Mjerena je tlačna čvrstoća, masa te brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorke mješavine. Za eksperimentalni dio rada korišteni su cilindrični betonski uzorci od samozbijajućeg betona sa dodatkom mljevene opeke, stari dvije godine. Valjci su izrađeni u okviru diplomskog rada Katarine Grbeše [2], a sastav mješavine, rezultati ispitivanja u svježem i očvrslom stanju preuzeti su iz diplomskog rada [2].

### 4.2 Materijali

#### 4.2.1 Cement

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.

#### Karakteristike cementa:

- vrlo visoka rana i konačna čvrstoća
- kratak period početka vezivanja
- optimalna obradivost
- znatan razvoj topline hidratacije

Preporuke za primjenu:

- svi betoni s visokim zahtevima za početnom mehaničkom otpornošću
- izgradnja zahtjevnih inženjerskih konstrukcija i infrastrukturnih objekata od betona visokih marki
- izgradnja javnih objekata
- predgotovljeni i montažni elementi
- prednapregnute konstrukcije
- mlazni beton i injektiranje

Osobito je prikladan za:

- betonske radove pri niskim temperaturama
- izgradnju objekata gdje se traže brzo skidanje oplata, manipulacija elementima ili opterećenje konstrukcije u ranoj dobi
- izradu vodonepropusnih betona te onih otpornih na mraz i soli za odmrzavanje

Cement treba transportirati u sredstvima koja ga štite od utjecaja vlage. Transportna sredstva prije punjenja cementom moraju biti očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa. Skladištiti u betonskim ili čeličnim silosima koji štite cement od vanjskih utjecaja, posebice od utjecaja vlage. Pri skladištenju u silos osigurati da ne dolazi do miješanja cementa s drugim proizvodima. Uz pravilan transport i skladištenje, cement je potrebno upotrijebiti najkasnije 6 mjeseci nakon isporuke.

TIPIČNA SVOJSTVA		ZAHTJEV NORME
Gubitak žarenjem	2,5 ± 0,5%	≤ 5,0
Netopivi ostatak	0,25 ± 0,10%	≤ 5,0
% SO <sub>3</sub>	3,0 ± 0,2%	≤ 4,0
Kloridi	0,01%	≤ 0,1
Vrijeme vezivanja* (početak)	175 ± 25 min	≥ 60
Rana čvrstoća (2 dana)	30 ± 2 MPa	≥ 20
Normirana čvrstoća (28 dana)	55 ± 2 MPa	≥ 42,5; ≤ 62,5;
TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K) + gips (G)	96-100%	95-100
Ostalo	0-4%	0-5

\*pri temperaturi od 20°C

Tablica 4.1 Tipična svojstva cementa 42.5 R [3]

#### 4.2.2 Agregat

Agregat je liapor frakcija 0-2 mm i 4-8 mm.

Prirodno čista i oko 180 mil. godina stara Lias-glina je kvalitetna sirovina za Liapor proizvode. U Liapor proizvodnom procesu prirodna sirovina gline se melje, miješa i oblikuje u kuglice koje su nakon toga podvrgnute tehnološkom procesu pečenja na temperaturi od 1100 – 1200 °C. Pri tome sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju. U tehnički usavršenom procesu vrlo točno se kontroliraju specifična težina, veličina i tvrdoća kuglice. Tako nastaju kuglice sa zatvorenom strukturom pora, porozne na zrak, potrebne čvrstoće, s visokim svojstvima kao toplinski izolator i istovremeno kao akumulator topline. Liapor proizvodi su nezapaljiv i negoriv građevni materijal, koji se prema standardu DIN 4102 svrstava u najviši požarni razred A1, s neograničenim vijekom trajanja.

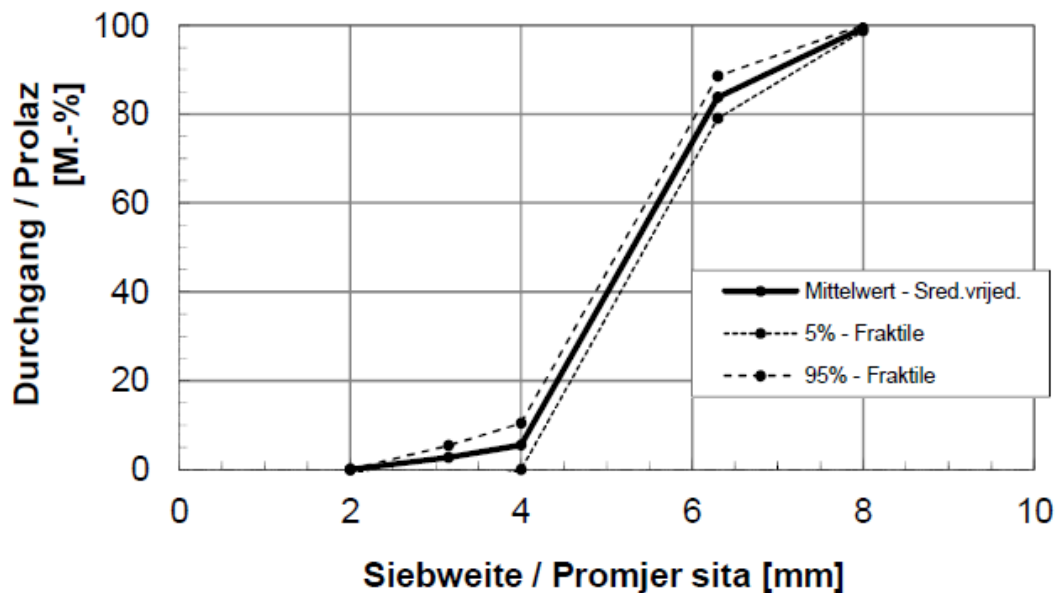
Zbog kemijsko – mineraloškog sastava Liapor sirove gline i zadanih uvjeta u proizvodnji, liapor kuglice imaju laganu kamenu jezgru. Liapor kuglice su također otporne na vatru,

smrzavanje, upijanje vode, lužine i kiseline te na pritisak. Liapor lagani agregati upotrebljavaju se izradu nearmiranih i armiranih laganih betona, kao i za izradu prednapetih laganih betona. Liapor lagani betoni otvaraju arhitektima i projektantima iznenađujuće konstruktivne mogućnosti kod projektiranja i izvedbe vitkih, ekonomično dimenzioniranih, a ipak čvrsto nosivih građevinskih elemenata.

Pokusne mješavine sadrže:

- Liapor F9 – 5 4 – 8,
- Liapor K 0 – 2.

Prikaz granulometrijske krivulje i svojstva Liapora frakcije 4 – 8mm:



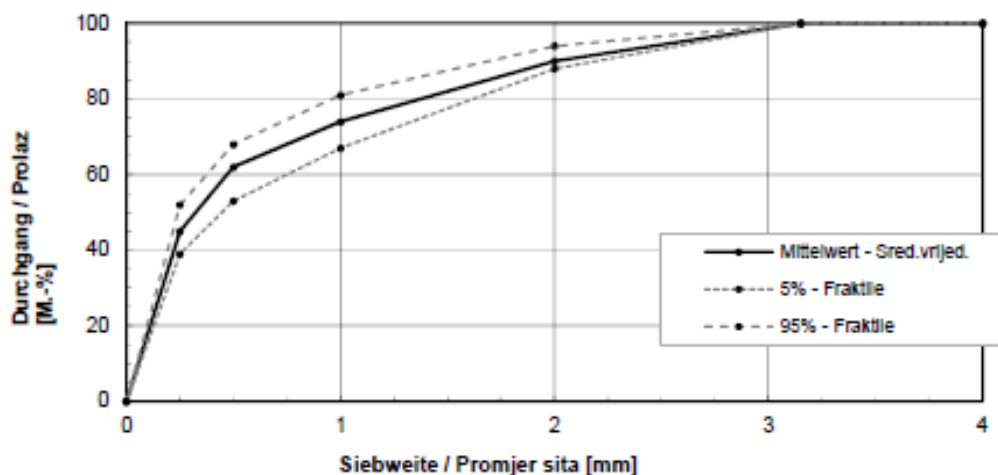
Slika 4.2 Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 4 – 8 mm [3]



Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Okruglo	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	4 - 8	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 1,0	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	950 ± 25	kg/m <sup>3</sup>
	Specifična gustoća	1700 ± 50	kg/m <sup>3</sup>
	Upijanje vode w <sub>30</sub> (30 min)	8 ± 4	M.-%
	Upijanje vode w <sub>60</sub> (60 min)	9 ± 4	M.-%
	Tvrdoća zrna (rasuto)	> 17,0	MPa
	Postojanost na smrzavanje	< 4,0	M.-%
	Kemijske osobine	Kloridi	< 0,07
Sumporni spojevi SO <sub>3</sub>		< 0,4	M.-%
Ukupni sumpor		< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO <sub>2</sub>	53 ± 5	%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18 ± 5	%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15 ± 5	%
	CaO	6 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

Tablica 4.3 Svojstva Liapora frakcije 4 – 8 mm [3]

Prikaz granulometrijske krivulje i svojstva Liapora frakcije 0 – 2mm:



Slika 4.4 Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 0 – 2 mm [3]

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Lomljeno	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	0 - 2	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 30	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	800 ± 15	kg/m <sup>3</sup>
	Specifična gustoća	1770 ± 10	kg/m <sup>3</sup>
	Upijanje vode w <sub>BVK</sub>	25 - 35	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,02	M.-%
	Sumporni spojevi SO <sub>3</sub>	< 0,8	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO <sub>2</sub>	55 ± 5	%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24 ± 5	%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 ± 5	%
	CaO	5 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

Tablica 4.5 Svojstva Liapora frakcije 0 – 2 mm [3]

#### 4.2.3 Mljevena opeka

Mljevena opeka je nastala mljevenjem opeke u mlinu sa kuglama. Dobiveni materijal je podijeljen u 2 frakcije: < 0,125 mm i > 0,125 mm. U ovom radu frakcija < 0,125 mm se koristila kao filer. Gustoća joj je 2,00 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.2.4 Aditiv FTF

Zapis tehničkih podataka za Readyplast FTF1. Superplastifikator prema ONORM EN 934-2 / T3.1, T3.2.

Područje primjene i svojstva [3]

Readyplast FTF1 je superplastifikator za primarnu upotrebu u rasponu predgotovljenog betona. Optimizirana svojstva nude sljedeće prednosti za standard betona visokih performansi i samozbijajuće betone:

- protok se održava u periodu od 30 do 60 minuta
- optimizirana obradivost s ekstremnim tokom W/B-omjeri
- visoko početno tečenje s niskim doziranjem
- ekstremno visoka rana čvrstoća
- homogenost svježeg betona, također s visokim doziranjem

<b>Kemijski znak</b>	<b>Polycarboxylatether</b>
<b>Forma</b>	Tekuća
<b>Boja</b>	Narančasta
<b>Gustoća (20<sup>0</sup>C)</b>	1,07±0,02 g/cm <sup>3</sup>
<b>pH vrijednost</b>	3,0-5,0
<b>Udio klorida</b>	≤ 0,1%

Tablica 4.6 Specifikacija proizvoda [3]

<b>Preporučeno doziranje</b>	<b>0,2-1,0% ukupnog veziva</b>
<b>Maksimalno doziranje</b>	1,2% ukupnog veziva

4.7 Tablica doziranja [3]

<b>Opće</b>	<b>Zaštićeno od zamrzavanja. Sve vrste spremnika trebale bi biti zatvorene na suhom mjestu.</b>
<b>Temperatura skladištenja</b>	5-45 °C
<b>Stabilnost skladištenja</b>	Barem 6 mjeseci
<b>Više detalja</b>	Nakon 6 mjeseci skladištenja preporučena je homogenizacija, na primjer miješanjem proizvoda.

4.8 Tablica skladištenja [3]

#### 4.2.5 Sastav betonskih mješavina

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

Tablica 4.9 Sastav mješavine [2]

### 4.3 Rezultati ispitivanja u svježem stanju

#### 4.3.1 Rezultati rasprostiranja slijeganjem

Rezultati ispitivanja slump-flow prikazani su u tablici 4.10 i na slici 4.11.

Oznaka uzorka	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	SF [mm]	$T_{500}$ [s]	Razred SF	Razred VS
SCC1	770	762.5	725	1.16	SF3	VS1

Tablica 4.10 slijeganje [2]



Slika 4.11 Rasprostiranje uzorka [2]

Na slici 4.11 je vidljivo da je mješavina imala izlučivanje vode na rubovima, kao i zadržavanje agregata u sredini.

#### 4.3.2 Rezultati ispitivanja V-lijevkom

U tablici 4.12 su prikazani rezultati mjerenja u V lijevku i prema dobivenim rezultatima mješavina spada u razred VF1.

Oznaka uzorka	Vrijeme prolaska kroz V-lijevak, tv [s]
SCC1	6,96

Tablica 4.12 Vrijeme prolaska kroz V-lijevak [2]

### 4.3.3 Rezultati ispitivanja L-posudom

U tablici 4.13 su prikazani rezultati mjerenja s L posudom i prema dobivenim rezultatima mješavina spada u razred PA1 (slika 4.14).

Oznaka uzorka	$\Delta H_{11}$ [mm]	$\Delta H_{12}$ [mm]	$\Delta H_{13}$ [mm]	$\Delta H_{1sr}$ [mm]	$\Delta H_{21}$ [mm]	$\Delta H_{22}$ [mm]	$\Delta H_{23}$ [mm]	$\Delta H_{2sr}$ [mm]	$H_1=600-$ $\Delta H_{1sr}$ [mm]	$H_2=150-$ $\Delta H_{2sr}$ [mm]	$PA=H_2/H_1$ [mm]
SCC1	500	510	505	505	60	60	60	60	95	90	0,95

Tablica 4.13 Ispitivanje L-posudom [2]



Slika 4.14 L-posuda [2]

#### 4.3.4 Rezultati ispitivanja J-prstenom

U tablici 4.15 su prikazani rezultati mjerenja sa J prstenom (slika 4.16).

Oznaka uzorka	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	$SF_j$ [mm]	$T_{500j}$ [s]	$\Delta h_0$ [mm]	$\Delta h_{x1}$ [mm]	$\Delta h_{x2}$ [mm]	$\Delta h_{y1}$ [mm]	$\Delta h_{y2}$ [mm]	PJ
SCC1	750	700	725	2,15	115	130	130	130	130	15

Tablica 4.15 Ispitivanje J-prstenom [2]



Slika 4.16 J-prsten [2]

#### 4.3.5 Mehanička svojstva betona nakon 28 dana

U tablici 4.17 je prikazan sadržaj pora uzorka.

Oznaka uzorka	Sadržaj pora [%]
SCC1	4

Tablica 4.17 Sadržaj pora [2]

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavina nakon 7 i 28 dana

Oznaka uzorka	Starost od 7 dana		Starost od 28 dana	
	Masa [g]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Masa [g]	Tlačna čvrstoća [MPa]
<b>SCC1</b>	6125,50	26,26	6056,25	32,13

Tablica 4.18 Tlačna čvrstoća nakon 7/28 dana [2]

Brzina ultrazvučnog vala (m/s)		SCC1
	<b>nakon 7 dana</b>	3469,09
	<b>nakon 28 dana</b>	3588,23

Tablica 4.19 Brzina ultrazvuka [2]

Gustoća betona u očvrslom stanju (kg/m <sup>3</sup> )		SCC1
	<b>nakon 7 dana</b>	1784,09
	<b>nakon 28 dana</b>	1806,06

Tablica 4.20 Gustoća betona [2]

Dinamički modul elastičnosti [GPa]	SCC1	
	<b>nakon 7 dana</b>	19,33
	<b>nakon 28 dana</b>	20,93

Tablica 4.21 Din. modul elastičnosti [2]

## **5 ISPITIVANJE OTPORNOSTI SAMOZBIJAJUĆEG BETONA POD UTJECAJEM POŽARA**

U sklopu istraživanja koja su prikazana u ovom radu ispitana su mehanička svojstva samozbijajućeg betona sa dodacima mljevene opeke starosti dvije godine (24 uzorka). Nakon zagrijavanja uzoraka visokim temperaturama (100, 300, 500, 700°C) i hlađenja na sobnu temperaturu provelo se mjerenje brzine ultrazvuka na svakom uzorku i mjerenje mase pojedinog uzorka. Nakon toga uzorci su se opterećivali do loma u hidrauličnoj preši.

### **5.1 Postupak ispitivanja**

Usvojena eksperimentalna procedura zahtijeva da se ispitivanje obavlja u serijama od 3 uzorka i to na cilindričnim uzorcima cca. Ø75/225 mm. Dimenzije uzoraka izvedene su po preporukama RILEM odbora za ispitivanje tlačne čvrstoće. Ispitivanje se vršilo za temperature od 100°C, 300°C, 500°C i 700°C. Za mješavinu su korištena 24 uzorka oblika valjka. Sva 24 uzoraka su sušena u sušioniku na 100°C, 6 je pečeno na temperaturu od 300°C, 6 uzoraka na 500°C i 6 uzoraka na 700°C za svaku mješavinu. Svaki uzorak se mjerio prije sušenja, nakon sušenja i nakon pečenja kada se ohladio na sobnu temperaturu ili minimalno na 40°C. Nakon postizanja željene temperature, uzorci su držani na toj temperaturi 2,5 sata. Nakon toga, uzorci su se polako ohladili na sobnu temperaturu te su ispitani neposredno nakon hlađenja na sobnu temperaturu. Tlačna ispitivanja su provedena na uzorcima sa stopom prirasta opterećenja od cca. 0,5 MPa/s.





Slika 5.1 Peć

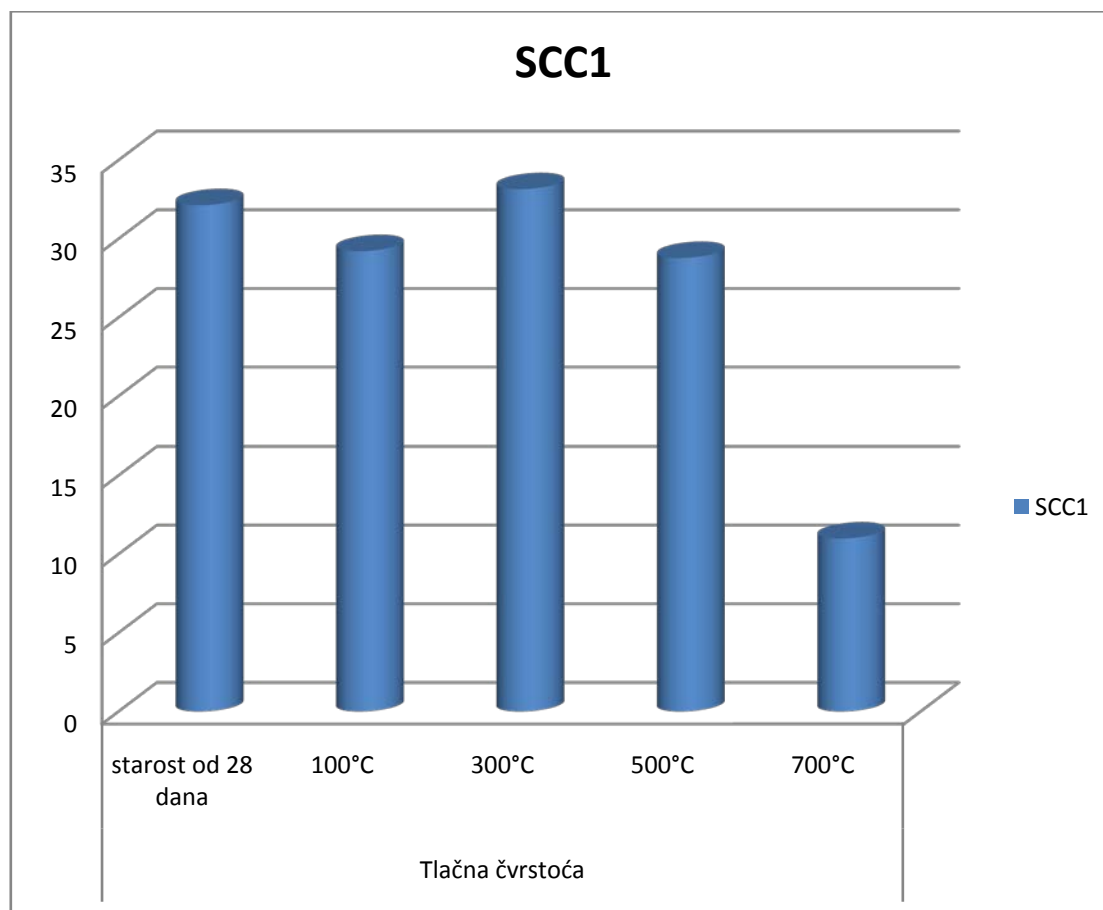
## 5.2 Rezultati i analiza ispitivanja

### 5.2.1 Tlačna čvrstoća

Ispitivanje uzoraka se izvodilo nakon hlađenja kada je temperatura uzorka došla na  $<40^{\circ}\text{C}$ . Hlađenje se odvijalo na sobnoj temperaturi. Uzorci su kao što je navedeno u prijašnjem poglavlju oblika valjka sa bazom promjera 75 mm i visine 225 mm starosti dvije godine. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 5.2 gdje ljubičasti obojeni dio prikazuje čvrstoće na uzorcima u vodom zasićenom stanju starosti 28 dana koji su preuzeti iz datoteke o mješavini SCC1 [3], a desni dio su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na uzorcima starim dvije godine i za temperature požara. Ispitani uzorci nakon 28 dana su pak oblika kocke dimenzije 15 cm. Uzorci oblika kocke su čuvani u vodi do dana ispitivanja, te su ispitani u vodom zasićenom stanju.

Oznaka uzorka	Tlačna čvrstoća(MPa)				
	starost od 28 dana	100°C	300°C	500°C	700°C
SCC1	32,13	29,21	33,15	28,78	10,99

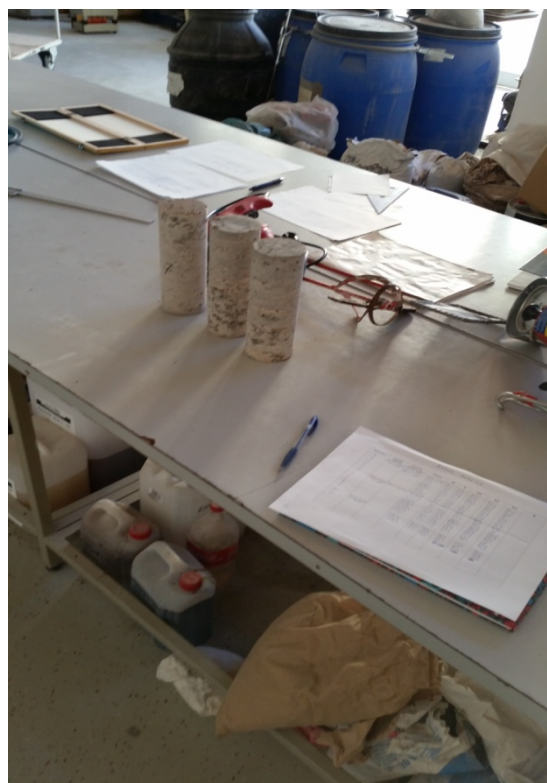
Tablica 5.2 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće



Slika 5.3 Grafički prikaz tlačne čvrstoće



Slika 5.4 Ispitivanje uzorka SCC1 sa prešom



Slika 5.5 Ispitni uzorci SCC1

Nakon analize grafičkog prikaza tlačnih čvrstoća uočeno je da se tlačna čvrstoća smanjuje nakon sušenja na 100°C naspram čvrstoće nakon 28 dana za 9%.

Ipak svoju najveću čvrstoću beton postiže na temperaturi od 300°C. Kod mješavine SCC1 sa dodatkom mljevene opeke gubitak tlačne čvrstoće je osjetan na 700°C te otprilike iznosi 34% tlačne čvrstoće na 100°C.

### 5.2.2 Dinamički modul elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti se određuje metodom ultrazvuka tako da se uz pomoć uređaja kroz uzorak puštaju ultrazvučni valovi, nakon čega se očitava brzina prolaska valova kroz uzorak. Nakon toga se dinamički modul određuje izrazom:

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

gdje je:

$v$  - brzina ultrazvučnog vala [m/s]

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

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



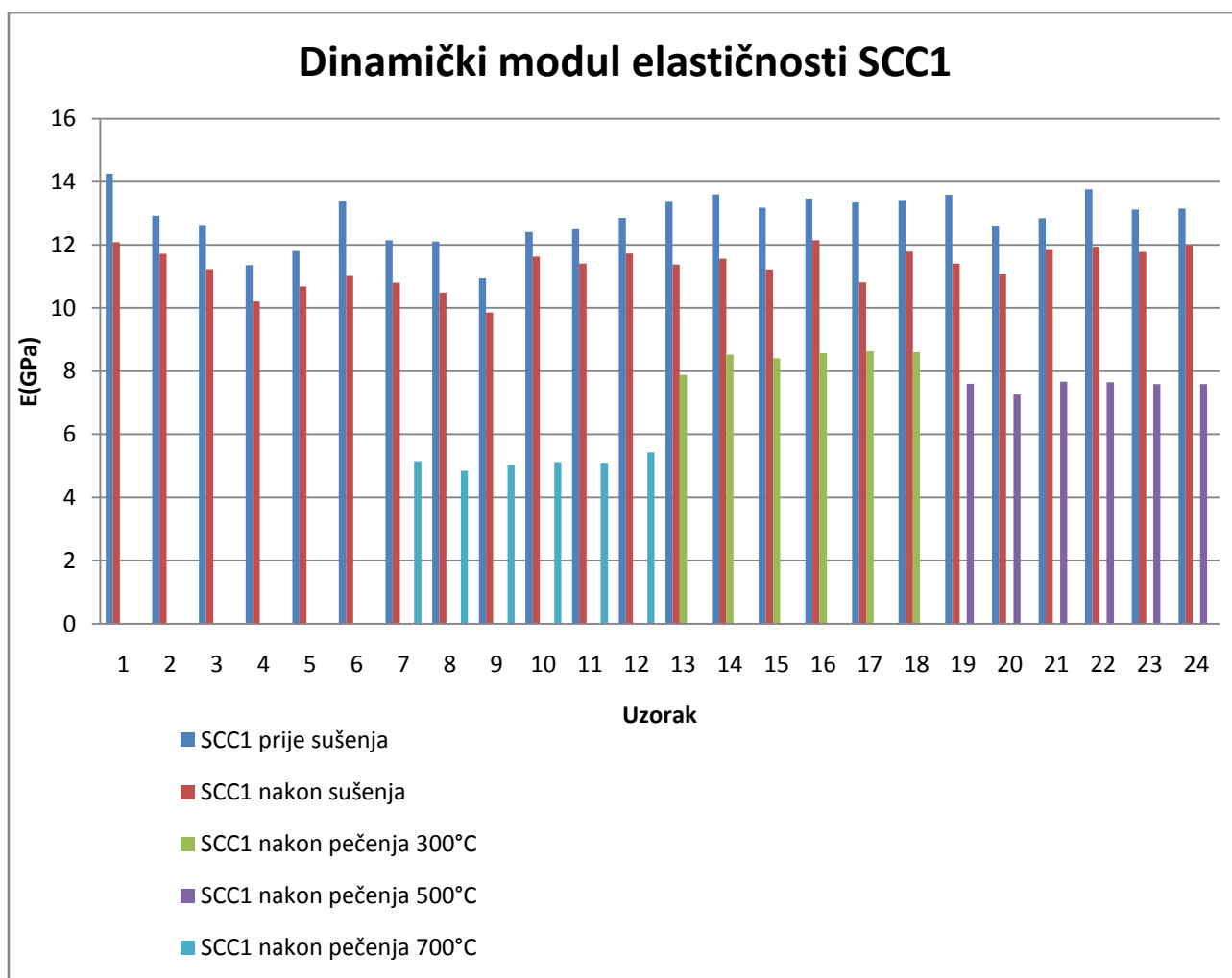
Slika 5.6 Uređaj za mjerenje ultrazvučnih valova

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). Prosječna vrijednost se uvijek uzima 0.2 pogotovo kod plošnih oblika uzoraka.

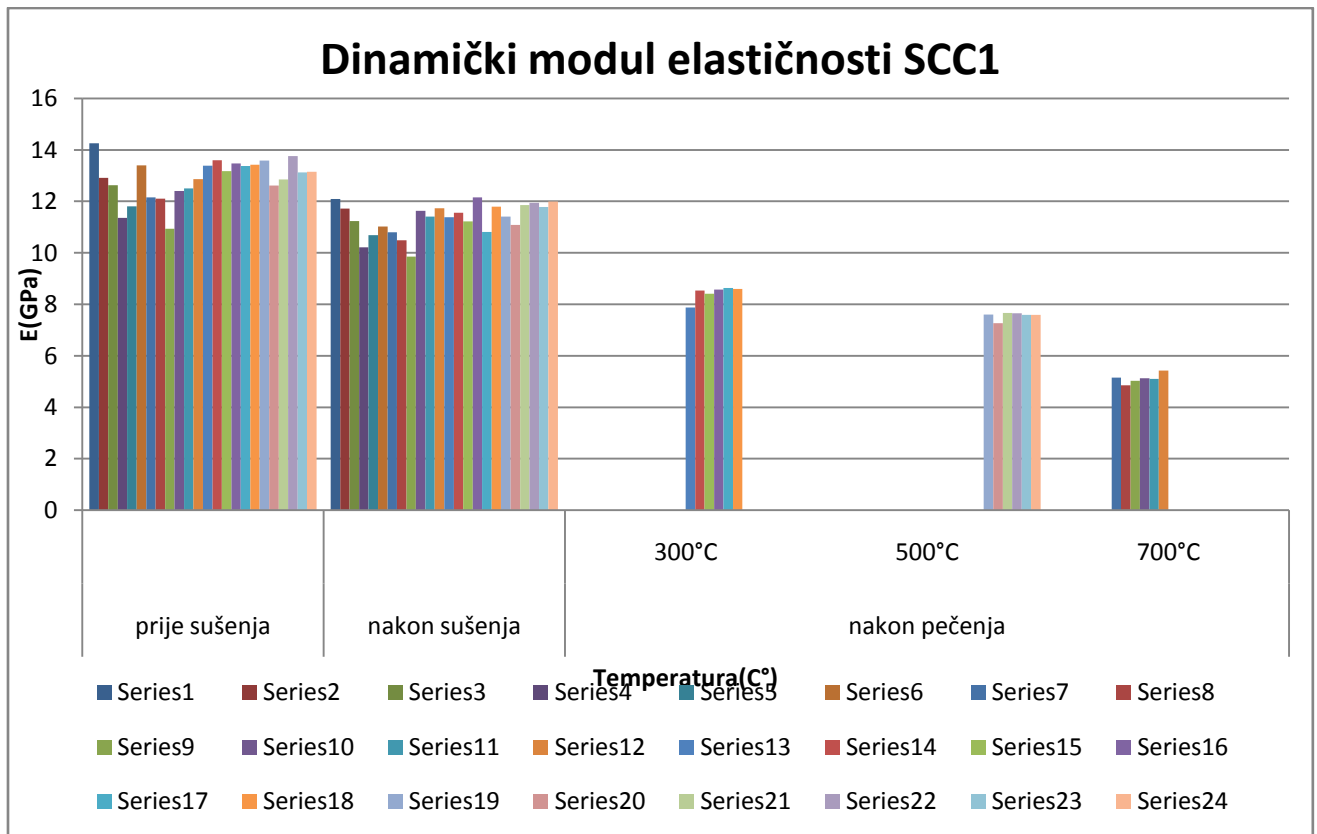
Različiti čimbenici imaju značajne utjecaje na rezultate ispitivanja brzine ultrazvuka. Promjena temperature između 10-30°C ne uzrokuje velike promjene, no ekstremno visoke temperature koje se događaju kod požara utječu na brzine ultrazvuka jer dolazi do mikro raspucavanja. Vlažnost također ima značajan utjecaj. Brzina ultrazvuka je oko 5% veća kroz vlažan beton nego kroz suhi beton, no u drugu ruku uzorci betona zasićeni vodom imaju manju tlačnu čvrstoću.

Tablica 5.7 Rezultati dinamičkog modula elastičnosti SCC1

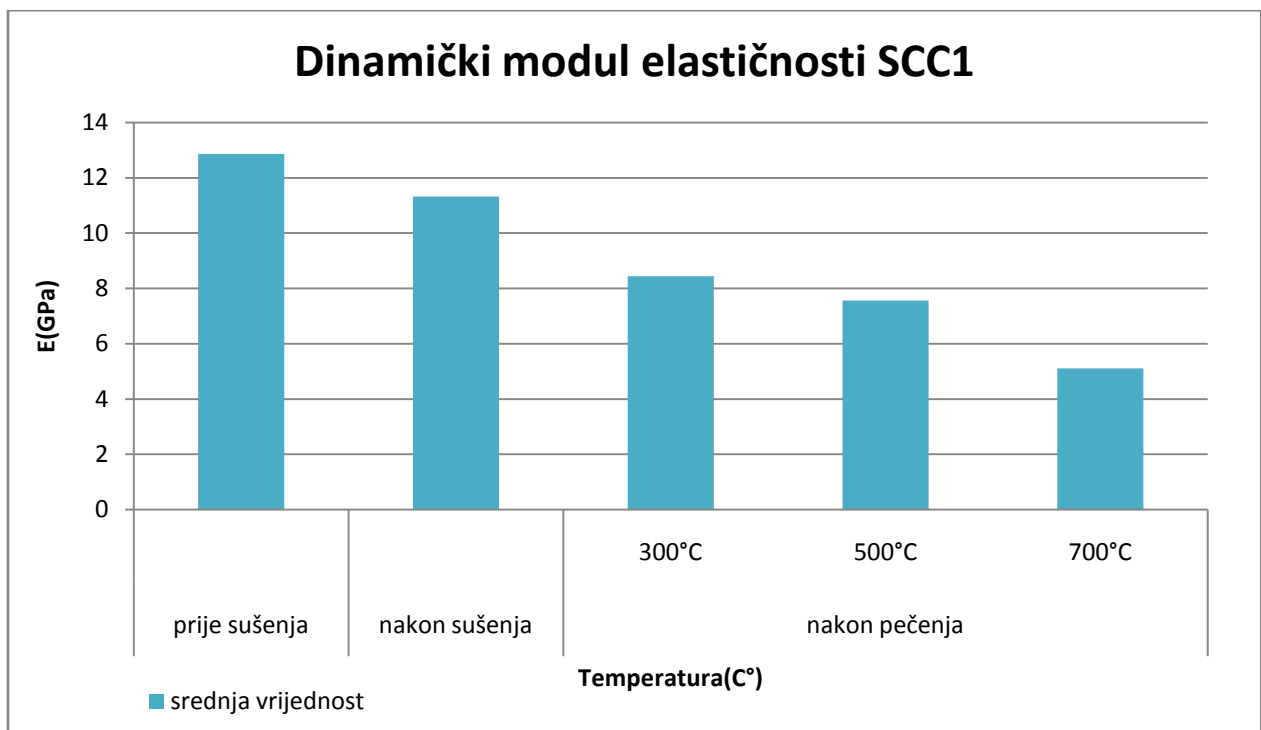
SCC1	Dinamički modul elastičnosti(Gpa)					
	uzorak	prije sušenja	nakon sušenja	nakon pečenja		
				300°C	500°C	700°C
1	14,26	12,09				
2	12,92	11,72				
3	12,63	11,23				
4	11,36	10,21				
5	11,81	10,69				
6	13,4	11,02				
7	12,15	10,8			5,15	
8	12,11	10,49			4,85	
9	10,94	9,86			5,03	
10	12,41	11,63			5,12	
11	12,5	11,41			5,1	
12	12,86	11,73			5,43	
13	13,39	11,38	7,88			
14	13,6	11,56	8,53			
15	13,18	11,22	8,41			
16	13,47	12,15	8,57			
17	13,37	10,81	8,63			
18	13,42	11,79	8,6			
19	13,59	11,41		7,6		
20	12,61	11,09		7,26		
21	12,85	11,86		7,67		
22	13,76	11,94		7,65		
23	13,12	11,78		7,59		
24	13,15	11,99		7,59		
prosjeck	12,86	11,33	8,44	7,56	5,11	



Slika 5.8a Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti po uzorcima



Slika 5.8b Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti po temperaturama



Slika 5.8c Grafički prikaz srednje vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti po temperaturama

Uz pomoć analize grafičkog prikaza dinamičkog modula elastičnosti dolazimo do zaključka da je vidljiv utjecaj temperature na modul elastičnosti. Tablica 5.7 prikazuje rezultate dinamičkog modula elastičnosti dobivenog preko formule i dobivenih brzina ultrazvučnih valova.

Mješavina SCC1 sa dodatkom mljevene opeke ima smanjenje modula elastičnosti za otprilike 12% u svim uzorcima kad je riječ o sušenju uzoraka na 100°C. Nakon pečenja na 300°C i hlađenja na sobnu temperaturu modul se smanjio za 34%, nakon pečenja na 500°C i hlađenja za 41%, te nakon pečenja na 700°C i hlađenja za 60%.

Analizom srednjih vrijednosti brzine ultrazvuka po mješavinama vidi se utjecaj stanja u kojem se beton nalazi prije ispitivanja. Uzorci ispitivani u prijašnjem diplomskom radu nakon 28 dana su u zasićenom stanju i njihova kvaliteta prema Neville-u se ocjenjuje kao dobra jer su brzine ultrazvuka unutar intervala 3,5-4,5 km/s. Rezultati nakon 28 dana dobiveni su na vodom zasićenim kockama. Prema tablici 5.9 brzina prolaska ultrazvuka se smanjuje sa porastom temperature kojoj su bili podvrgnuti uzorci.

Mješavina	Brzina ultrazvuka(Km/s)					
	nakon 28 dana	prije sušenja	nakon sušenja	nakon pečenja		
				300°C	500°C	700°C
SCC1	3,58	2,99	2,87	2,51	2,36	1,99

Tablica 5.9 Srednje vrijednosti brzine ultrazvuka po temperaturama

### 5.2.3 Promjena mase uzorka

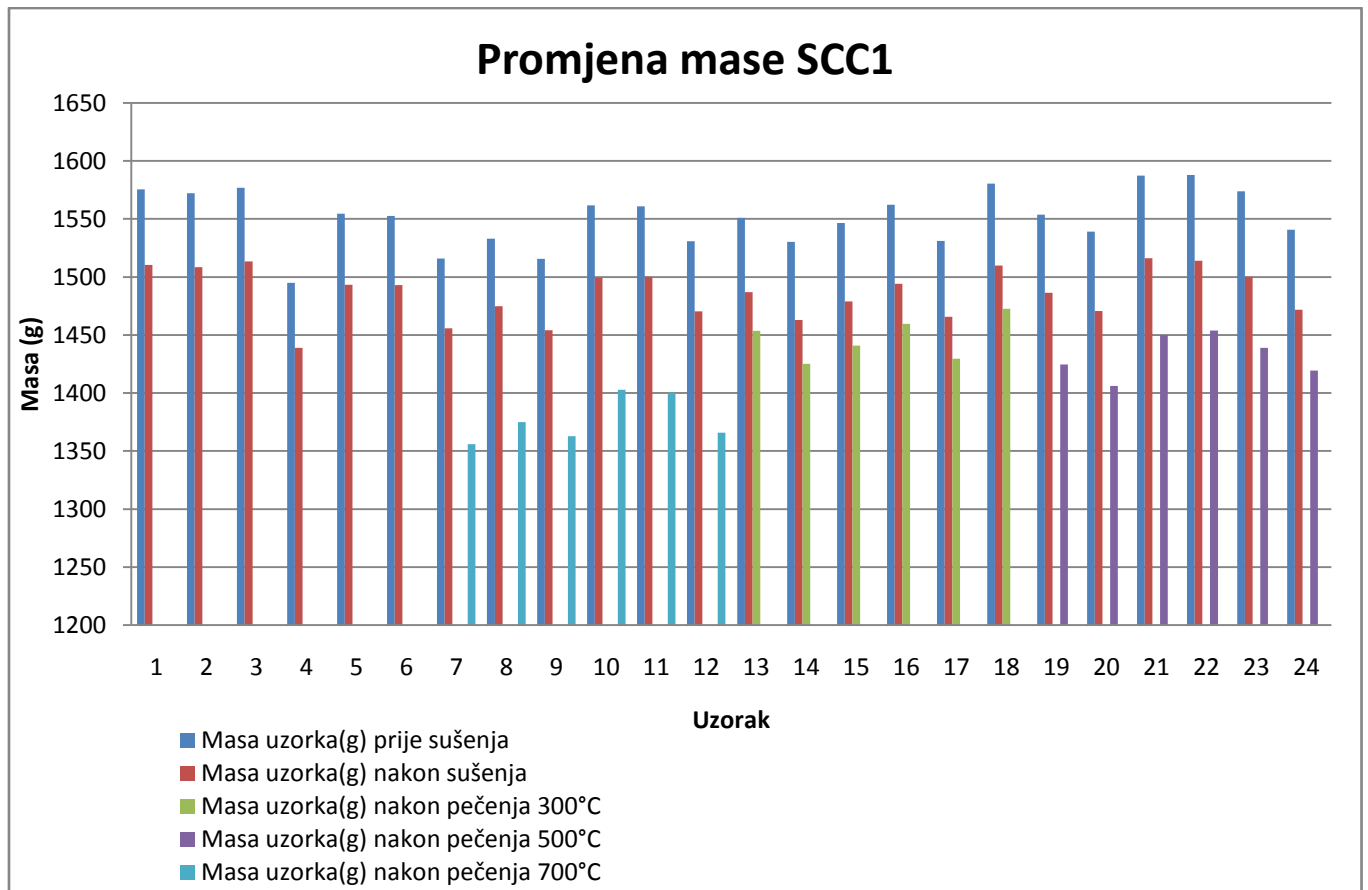
Prilikom analize grafičkog prikaza promjene mase uzorka betona na tablici 5.10 vidi se utjecaj temperature na masu mješavine SCC1.

Mješavina SCC1 sa dodatkom mljevene opeke ima smanjenje mase za otprilike 4% u svim uzorcima kad je riječ o sušenju uzoraka na 100°C. Nakon pečenja na 300°C i hlađenja na sobnu temperaturu masa se smanjila za 7%, nakon pečenja na 500°C i hlađenja se smanjila za 8%, te nakon pečenja na 700°C i hlađenja se smanjila za 11%.



SCC1	Masa uzorka(g)					
	uzorak	prije sušenja	nakon sušenja	nakon pečenja		
				300°C	500°C	700°C
1	1575,6	1510,5				
2	1572,3	1508,5				
3	1577	1513,4				
4	1495	1438,8				
5	1554,4	1493,3				
6	1552,7	1493				
7	1516	1455,7			1356	
8	1533,1	1474,7			1374,8	
9	1515,6	1454,1			1362,9	
10	1561,6	1499,3			1402,8	
11	1560,8	1500,2			1400,2	
12	1530,7	1470,4			1365,9	
13	1551	1486,9	1453,5			
14	1530,3	1462,9	1425,1			
15	1546,6	1479	1440,8			
16	1562,2	1494,1	1459,7			
17	1531,2	1465,7	1429,5			
18	1580,4	1509,8	1472,6			
19	1553,7	1486,5		1424,6		
20	1539,1	1470,8		1406,2		
21	1587,4	1516,2		1449,9		
22	1588	1514		1453,8		
23	1573,8	1500,3		1439		
24	1540,8	1471,7		1419,4		

Tablica 5.10 Promjena mase uzorka SCC1



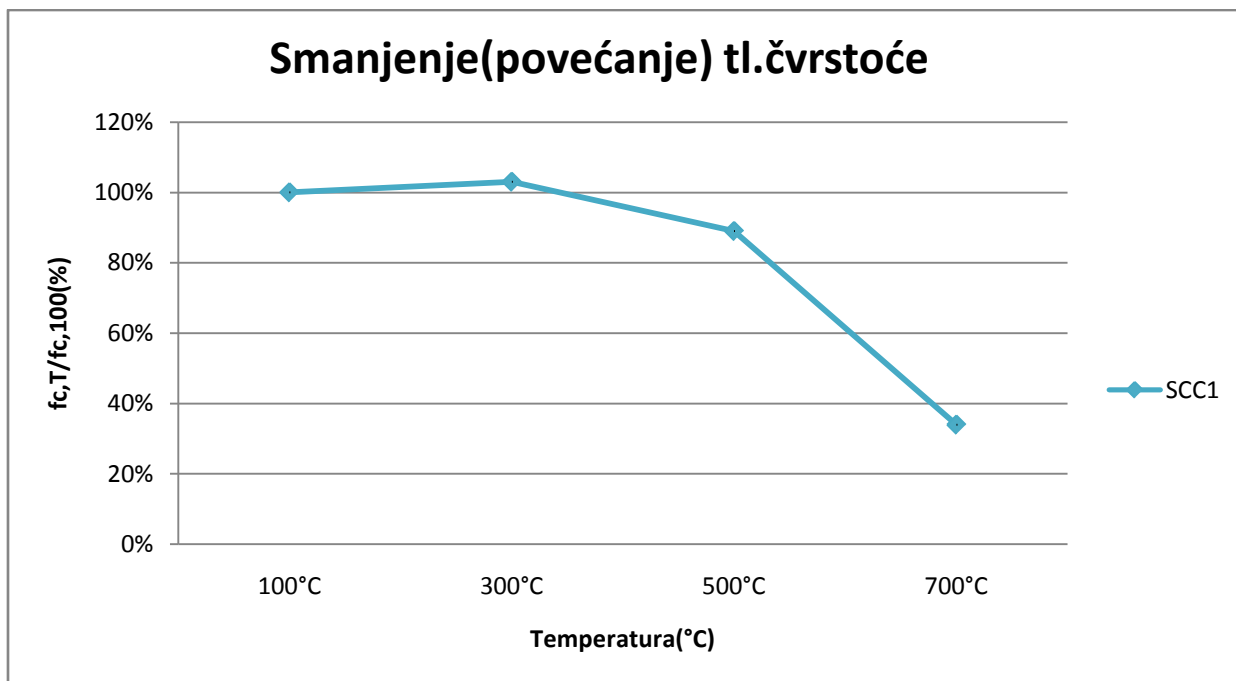
Slika 5.11 Grafički prikaz promjene mase uzorka [1]

#### 5.2.4 Analiza rezultata

Analiza rezultata je poglavlje u kojem se bavimo ispitivanjem i prikazom rezultata promjene tlačne čvrstoće, dinamičkog modula elastičnosti i mase uzorka SCC1.

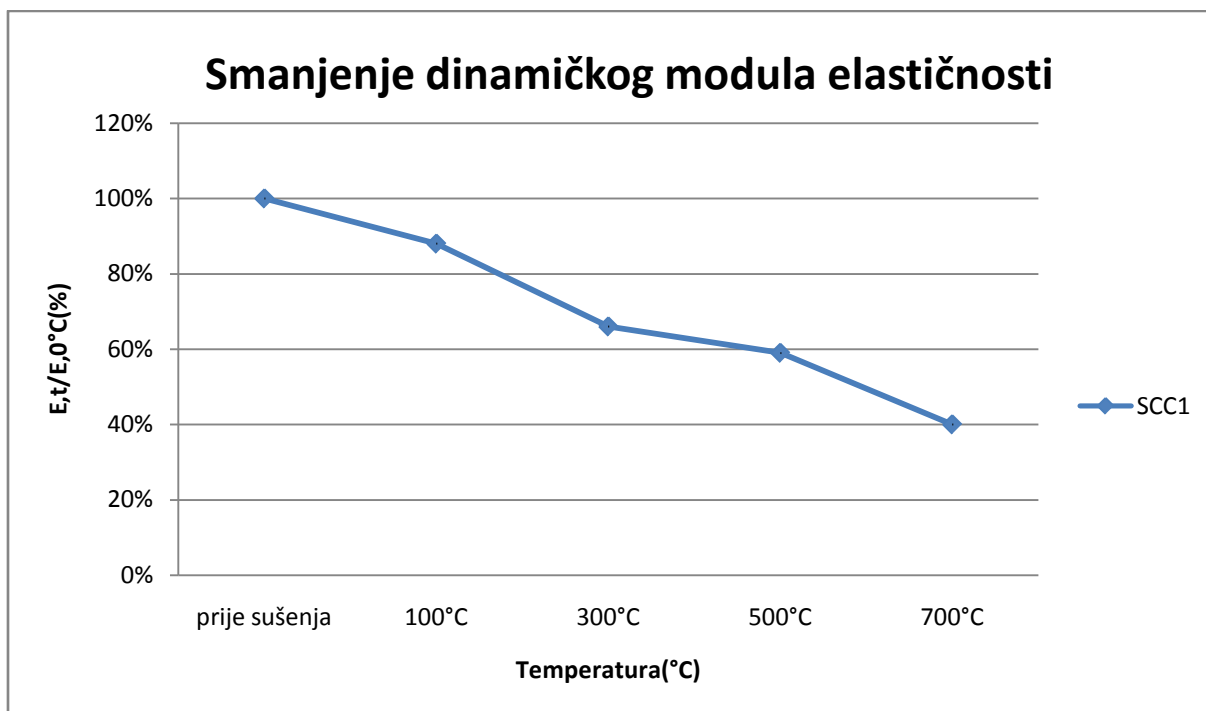
Analiza se radila tako da su uzeti prosjeci svih rezultata (tlačna čvrstoća, modul elastičnosti i masa) uzorka za svaku temperaturu posebno (prosjeak od 24 uzorka za temperaturu prije i nakon sušenja, te prosjeak od 6 uzorka za temperature od 300, 500 i 700°C).

Prikazani su rezultati tlačnih čvrstoća u bezdimenzionalnom obliku tako da se čvrstoća  $f_{c,T}$  za temperaturu T podijeli s referentnom čvrstoćom uzorka mješavine na sobnoj temperaturi nakon sušenja na 100°C  $f_{c,100}$ .



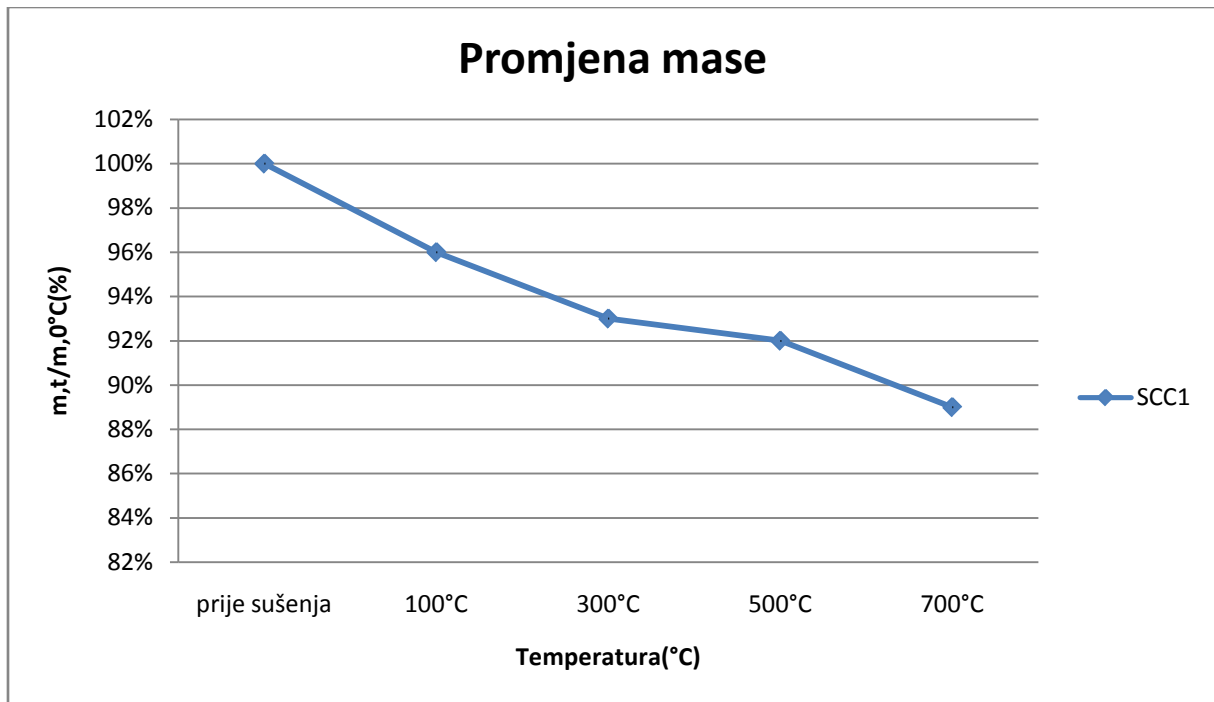
Slika 5.12 Promjena tlačne čvrstoće po temperaturama

Dinamički modul elastičnosti se smanjuje što je temperatura uzorka veća po prikazanoj slici 5.13, te svoju najmanju vrijednost ima na temperaturi od 700°C kada se smanjio za 60%.



Slika 5.13 Promjena dinamičkog modula elastičnosti

Promjena mase uzoraka može se objasniti gubitkom slobodne vode iz pora tijekom sušenja na 100°C. Izlaganju uzoraka temperaturama iznad 100°C gubi se adsorbirana voda, a na temperaturama iznad 400°C počinje se gubiti i kemijski vezana voda u cementnim hidratima. Iz slike 5.14 vidi se da se gubitkom slobodne vode pri sušenju na 100°C gubi oko 4% početne mase uzoraka za sve tri mješavine. Najveći gubitak se vidi na uzorcima koji su pečeni na temperaturi od 700°C.



Slika 5.14 Promjena mase po temperaturama [1]

## 6 ZAKLJUČAK

Vrsta betona koja teče samo pod utjecajem vlastite težine bez segregacije, tijekom čega nema zarobljenih mjehurića zraka i beton koji popunjava oplatu zaobilazeći armaturu, te na kraju zadržava horizontalnu površinu bez uporabe vibracijskih uređaja naziva se samozbijajući beton (eng. Self compacting concrete, SCC). Neke od karakteristika koje razlikuju samozbijajući beton od običnog su poboljšana fluidnost, visoka čvrstoća u očvrslom stanju, lakša ugradnja i povećana trajnost. Samozbijajući beton i obični vibriran beton imaju iste osnovne komponente (agregat, cement, voda, aditivi), ali za razliku od običnog betona kod samozbijajućeg betona obično je manji udio krupnog agregata, manji je vodovezivni omjer, povećan je udio paste te je povećan udio superplastifikatora, a po potrebi može se upotrijebiti i dodatak za promjenu viskoziteti. Laki betoni najčešće imaju gustoću 600 – 1500 kg/m<sup>3</sup>. Smanjenje gustoće se postiže u odnosu na obični beton: upotrebom agregata s velikim sadržajem pora, stvaranjem međuprostora između krupnih zrna agregata, stvaranjem pora u mortu.

Beton je okarakteriziran kao negorivi materijal. Ovisno o temperaturi u betonu pojavljuju se kemijske promjene minerala iz očvrsljele cementne paste i agregata.

Cilj eksperimentalnog rada je ispitivanje mehaničkih svojstava betona nakon djelovanja požara pri različitim temperaturama. Ispitivana su svojstva uzoraka nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C, a zatim su uspoređeni njihovi rezultati. Mjerena je tlačna čvrstoća, masa te brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorke mješavine. Za eksperimentalni dio rada korišteni su cilindrični betonski uzorci od samozbijajućeg betona sa dodatkom mljevene opeke, stari dvije godine.

Rezultati ispitivanja na različite temperature:

- tlačne čvrstoće nakon temperature žarenja od 300°C imaju cca. 103% vrijednosti tlačne čvrstoće nakon sušenja na 100°C
- tlačne čvrstoće nakon temperature žarenja od 500°C imaju cca. 89% vrijednosti tlačne čvrstoće nakon sušenja na 100°C
- tlačne čvrstoće nakon temperature žarenja od 700°C imaju cca. 34% vrijednosti tlačne čvrstoće nakon sušenja na 100°C
- Dinamički modul elastičnosti se smanjuje za 60% nakon žarenja na temperaturi od 700°C u odnosu na početnu temperaturu
- Mase uzoraka se smanjuju za 4-11% nakon žarenja na temperaturama od 300,500,700°C u odnosu na početnu temperaturu

Zbog velikog pada čvrstoće betona nakon izlaganja visokim temperaturama od 700°C, potrebno je još detaljnije ispitivanje ovakve vrste betona.

**LITERATURA:**

- [1] Marina Pavlić: Mehanička svojstva samozbijajućeg laganog betona nakon izlaganja visokim temperaturama; Diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2016.
- [2] Katarina Grbeša: Utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrstlog SCLC-a; Diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2014.
- [3] Sandra Juradin, Katarina Grbeša: Influence of ground clay brick on the properties of fresh and hardened Self Compacting Lightweight Concrete (SCLC). *Advanced materials research*. 1106 (2015) ; 57-60
- [4] <http://novi.ba/clanak/1902/most-koji-prolazi-ispod-vode>
- [5] <https://www.themajka.com/viewtopic.php?t=49>