

# Mehanička svojstva samozbijajućeg laganog betona nakon izlaganja visokim temperaturama

---

**Pavlić, Marina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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:123:469859>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-01**



*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**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marina Pavlić**

**Split, 2016.**

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

**Marina Pavlić**

**Mehanička svojstva samozbijajućeg laganog betona  
nakon izlaganja visokim temperaturama**

**Diplomski rad**

**Split, 2016.**

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

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI GRAĐEVINARSTVA**  
KANDIDAT: Marina Pavlić  
BROJ INDEKSA: 528/2014  
KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**  
PREDMET: Građevinski materijali I

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Mehanička svojstva samozbijajućeg lakog betona nakon izlaganja visokim temperaturama

Opis zadatka: Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti djelovanje visokih temperatura na mehanička svojstva betona. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ispitati utjecaj požara na mehanička svojstva samozbijajućeg laganog betona čija je starost 2 godine. Uzorci samozbijajućeg laganog betona napravljeni su sa dodatkom recikliranog betona, silikatne prašine i metakaolina a potrebno ih je ispitati nakon sušenja na 100°C te nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C. Na uzorcima se mjeri tlačna čvrstoća, brzina prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti kao i promjena mase. Rezultate je potrebno prikazati te komentirati.

U Splitu, 01. ožujka, 2016.

Voditelj diplomskog rada:

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:

Izv. prof. dr. sc. Sandra Juradin

Doc. dr. sc. Veljko Srzić

## **ZAHVALA**

---

*Posebno se zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. **Sandri Juradin** na strpljenju, pomoći, vodstvu i izuzetnoj suradnji tijekom izrade rada te svima koji su svojim savjetima, strpljenjem i podrškom pridonijeli kvaliteti ovog rada.*

*Najveće hvala mojoj obitelji i svim dragim ljudima koji su vjerovali u mene i davali mi bezuvjetnu podršku, ljubav i strpljenje tijekom ovih godina studiranja.*

# **Mehanička svojstva samozbijajućeg laganog betona nakon izlaganja visokim temperaturama**

## ***Sažetak:***

Beton je građevinski materijal otporan na požar, a promjene koje se događaju na betonskim uzorcima pri visokim temperaturama ovise o sastavu betona te o razini temperature. U radu je ispitan utjecaj visokih temperatura na uzorke samozbijajućeg laganog betona sa dodacima recikliranog betona, silikatne prašine i metakoalina. Uzorci betona cilindričnog oblika, stari dvije godine, izloženi su temperaturama od 100°C, 300°C, 500°C i 700°C. Nakon izlaganja visokim temperaturama na uzorcima je određena tlačna čvrstoća, dinamički modul elastičnosti kao i promjena mase. Analiza rezultata ispitivanja dana je u radu.

## ***Ključne riječi:***

Samozbijajući lagani beton, visoke temperature, tlačna čvrstoća, rezidualna svojstva

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

## ***Abstract:***

Concrete is a building material resistant to fire, and the changes that occur in the concrete samples at high temperatures depend on the composition of concrete and the level of temperature. This paper investigates the impact of high temperatures on samples of self-compacting lightweight concrete with recycled concrete additives, silica fume and metakoalin. Samples are cylindrical, two years old. Samples are cylindrical shape, two years old, exposed to temperatures of 100°C, 300°C, 500°C and 700°C . After exposure to high temperatures in the samples is determined by the compressive strength , the dynamic modulus of elasticity as well as changes in weight . Analysis of the test results is given in the work

## ***Keywords:***

Self compacting lightweight concrete, high temperature, pressure resistance, residual properties

## SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	SAMOZBIJAJUĆI LAKI BETON.....	4
2.1	Općenito o samozbijajućem betonu .....	4
2.1.1	Povijesni razvoj samozbijajućeg betona.....	5
2.1.2	Svojstva samozbijajućeg betona .....	7
2.2	Općenito o lakom betonu.....	8
2.2.1	Podjela lakih betona .....	8
2.2.2	Svojstva lakih betona.....	11
2.3	Trajnost betona s agregatom od recikliranih materijala .....	13
2.3.1	Apsorpcija vode .....	14
2.3.2	Smrzavanje i odmrzavanje.....	14
2.3.3	Otpornost na habanje.....	15
2.3.4	Toplinska provodljivost.....	15
2.3.5	Otpornost na požar .....	15
3	POŽARNA OTPORNOST .....	17
3.1	Djelovanje požara na beton.....	18
3.2	Djelovanje požara na konstrukcije .....	22
4	DOSADAŠNJA ISPITIVANJA BETONA NA POŽAR .....	24
4.1	Utjecaj tipa cementa i agregata na požarnu otpornost mikrobetona (Ivanka Netinger, Dubravka Bjegović, Ivana Kesegić).....	24
4.1.1	Uvod .....	24
4.1.2	Ponašanje cementa zbog izloženosti visokim temperaturama .....	24
4.1.3	Požarna otpornost agregata u betonu.....	25
4.1.4	Utjecaj tipa cementa i agregata na požarnu otpornost mikrobetona .....	27
4.1.5	Zaključak .....	35



4.2	Smanjenje mehaničkih svojstava betona nakon požara i njegov utjecaj na rezidualnu nosivost (Neno Torić, Ivica Boko, Sandra Juradin, Goran Baloević) .....	35
4.2.1	Uvod .....	36
4.2.2	Eksperimentalni program.....	37
4.2.3	Rezultati .....	39
4.2.4	Analiza dobivenih rezultata .....	43
4.2.5	Zaključak .....	44
4.3	Smanjenje mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće nakon požara (Neno Torić, Ivica Boko, Bernardin Peroš).....	44
4.3.1	Uvod .....	44
4.3.2	Ispitivanje preostalih mehaničkih svojstava betona visoke čvrstoće .....	46
4.3.3	Rezultati određivanja preostalih mehaničkih svojstava .....	52
4.3.4	Analiza dobivenih rezultata .....	56
4.3.5	Zaključak .....	57
4.4	Rezidualno tlačno ponašanje betona visokih uporabnih svojstava sa zgurom iz visokih peći pri zagrijavanju (Jianzhuang Xiaoa, Meng Xiea, Ch. Zhangb).....	58
4.4.1	Uvod .....	58
4.4.2	Eksperimentalni dio istraživanja .....	59
4.4.3	Rezultati ispitivanja i analiza rezultata.....	61
4.4.4	Rasprava o učincima na povišenim temperaturama .....	65
4.4.5	Zaključak .....	68
5	EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA.....	69
5.1	Uvod u eksperimentalni dio rada .....	69
5.2	Upotrebljeni materijali.....	69
5.2.1	Cement.....	70
5.2.2	Agregat .....	72
5.2.3	Superplastifikator .....	75

5.2.4	Filer od recikliranog betona .....	75
5.2.5	Silikatna prašina .....	76
5.2.6	Metakaolin .....	77
5.2.7	Sastavi betonskih mješavina .....	78
5.3	Rezultati ispitivanja provedenih u svježem stanju .....	78
5.3.1	Rezultati rasprostiranja slijeganjem .....	79
5.3.2	Rezultati ispitivanja V-lijevkom .....	80
5.3.3	Rezultati ispitivanja L-posudom .....	80
5.3.4	Rezultati ispitivanja J-prstenom.....	81
5.3.5	Sadržaj pora betonskih mješavina .....	82
6	EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA OTPORNOSTI SAMOZBIJAJUĆEG BETONA NA POŽAR .....	83
6.1	Postupak ispitivanja.....	83
6.2	Rezultati i analiza ispitivanja .....	84
6.2.1	Tlačna čvrstoća .....	84
6.2.2	Dinamički modul elastičnosti .....	87
6.2.3	Promjena mase uzoraka.....	92
6.2.4	Analiza dobivenih rezultata .....	94
7	ZAKLJUČAK.....	98
	LITERATURA:.....	101

## 1 UVOD

Počeci betona sežu od starih Azijata, Hebreja i Egipćana, preko Grka i Rimljana koji su poznavali hidraulička svojstva mješavine pucolana, pečene gline i vapna koje su miješali sa pijeskom i drobljenom opekom te na taj način izrađivali mort. Neke građevine izrađene tim mortom su se i do danas održale jer je cementni mort jak i čvrst. Daljnjim znanstvenim iskustvima otkrivaju se hidraulička svojstva nekih drugih vrsta veziva te se 1824.g prvi put proizvodi Portland cement. Isaac Johnson 1845.g pečenjem mješavine gline i vapnenca sve do nastajanja klinkera dobiva Portland cement sa svojstvima po kojima se i danas proizvodi i upotrebljava. [1]

Beton je danas najviše korišten građevinski materijal na svijetu. Gotovo stoljeće i pol, koliko se beton primjenjuje, pokriva oko 70 % potreba u građenju i postao infrastrukturna i urbana osnova suvremenog života. Današnji urbani razvoj u svim područjima života ljudi prati i razvoj u građevinarstvu koji nameće nove zahtjeve. Za postizanje zahtijevanih svojstava betona u konstrukciji, važne su i pojedine faze u procesu proizvodnje kao što su transport, ugradnja i njega koje čine i velik udio u ukupnim troškovima izvedbe betonskih konstrukcija. Između ostalog, povećanje produktivnosti odnosno smanjenje troškova i povećanje te poboljšanje uvjeta rada, uz zadovoljavanje propisanih svojstava betona, postali su prioritet u građevinarstvu. Neke od navedenih zahtjeva obični beton teško je mogao ostvariti pa su krenula istraživanja na području dobivanja novih, boljih građevinskih materijala. [2]

Istraživanjem novih netradicionalnih izvora sirovina, te njihovom kombinacijom s tradicionalnim izvorima uz zadovoljavanje načela održivosti, omogućava se stvaranje novih vrijednosti kroz novi materijal. Primjenom inovativnih tehnologija, međusobnim djelovanjem komponenata sustava i razumijevanjem svakog aspekta toga djelovanja tumače se ponašanja novo nastalih materijala. Također je potrebno istaknuti da značajnijih inovacijskih tehnologija i nema, nego se radi o poboljšanjima i proširenju područja primjene postojećih. 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, inovativna je primjena uglavnom obuhvaćena postojećim normama za materijale. Istraživanja usmjerena tim pravcima rukovode se uglavnom potrebama kvalitete i trajnosti betonskih konstrukcija pri korištenju, ali se sve više

mora voditi računa i o dostupnosti izvora pojedinih materijala, ekološkim potrebama, estetskim rješenjima i zaštiti zdravlja ljudi koji žive u takvim konstrukcijama ili uz njih.

U razvijenom je svijetu aktualno iskorištavanje recikliranog agregata, dobivenog ispiranjem otpadnoga svježeg betona ili drobljenjem otpadnoga očvrnulog betona i ostalih građevinskih materijala

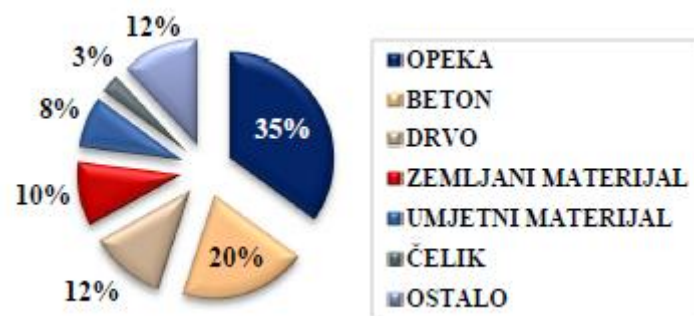
Procijenjene količine otpadnog materijala nastalog rušenjem u zemljama Europske unije iznose oko 180 milijuna tona godišnje, odnosno oko 1,3 kg dnevno po osobi. Postoje znatne razlike u količini proizvedenog građevinskog otpada unutar Europske unije, primjerice Njemačka i Nizozemska proizvode oko 1,9 kg dnevno po osobi dok Švedska, Grčka i Irska proizvode manje od 0,5 kg dnevno po osobi.

U budućnosti je nužno predvidjeti istraživanje i eksploataciju određenih mineralnih sirovina za vlastite potrebe te istražiti i proširiti mogućnosti upotrebe recikliranog agregata, naravno uz bitan pomak u tehnološkom i ekološkom pogledu, što je u konačnici i cilj održivog razvoja (proizvoditi prema potrebi i štedjeti gdje je to moguće).

Budući da je svjetski trend upotreba recikliranih materijala u svim područjima ljudske djelatnosti pa tako i u građevinarstvu, potrebno je i u građevinskoj praksi na području Hrvatske implementirati reciklirani građevinski otpad u proizvodni proces.

Trenutno u Hrvatskoj ne postoji kvalitetna evidencija izvora, količina i tokova građevinskog otpada iako za istu postoji zakonski okvir koji se ne primjenjuje. Građevinski otpad još uvijek se nekontrolirano odlaže, nije uspostavljena kvalitetna komunikacija između svih sudionika u procesu gospodarenja građevinskim otpadom, te ne postoji razrađen sustav poticanja ugradnje recikliranih materijala.

Vrste građevinskog otpada razlikuju se ovisno o tome ruši li se postojeća ili se gradi nova građevina. Na slici 1.1 prikazan je sastav građevinskog otpada nastalog pri rušenju stambenih građevina. Uzevši u obzir geografske specifičnosti Hrvatske, u Dalmaciji i Primorju kao građevinski otpad prevladava kamen, u sjeverozapadnom dijelu beton i opeka, a u istočnom opeka, odnosno miješani otpad.



Slika 1.1 Sastav građevinskog otpada, [4]

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, može se zaključiti 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.

Sve većom industrijalizacijom i urbanizacijom, dolazi do povećanja količina građevinskog otpada te se njegov obujam kontinuirano povećava. Većina građevinskog otpadnog materijala trenutno se upotrebljava kao materijal za nasipavanje terena ili se nekontrolirano odlaže na divljim odlagalištima. Osnovna načela kvalitetnog gospodarenja otpadom jesu smanjenje masovne proizvodnje novog, pronalaženje načina za recikliranje i ponovnu upotrebu postojećeg, te sigurno i ekonomski prihvatljivo odlaganje neupotrebljivog otpada.

Uzimajući u obzir da mort i beton s recikliranim opekarskim lomom, na temelju dosada provedenih istraživanja, imaju bolja toplinska svojstva i otpornost na požar od običnog morta i betona s prirodnim agregatom, u radu će biti dodatno istražena mogućnost primjene betona od recikliranog betona kao i betona sa silikatnom prašinom te matakaolinom u području požarne otpornosti u građevinarstvu. [4]

## 2 SAMOZBIJAJUĆI LAKI BETON

### 2.1 Općenito o samozbijajućem betonu

Samozbijajući beton (eng. Self compacting concrete, SCC) je vrsta betona koja teče samo pod utjecajem vlastite težine bez segregacije, tijekom čega se debarira (nema zarobljenih mjehurića zraka) i u potpunosti popunjava oplatu zaobilazeći armaturu te na kraju zadržava horizontalnu površinu bez uporabe vibracijskih uređaja. Poboljšana fluidnost, visoka čvrstoća u očvrslom stanju, lakša ugradnja i povećana trajnost samo su neke od karakteristika koje razlikuju samozbijajući beton od običnog.

Osnovne komponente običnih vibriranih betona i samozbijajućih betona su iste (agregat, cement, voda, aditivi), ali u usporedbi s običnim betonom, kod samozbijajućeg betona obično je manji udio krupnog agregata, manji je vodovezivni omjer, povećan je udio paste te je povećan udio superplastifikatora, a prema potrebi može se upotrijebiti i dodatak za promjenu viskoznosti. Fluidnost i viskoznost betonske mješavine postiže se pažljivim odabirom cementa i dodataka, uz ograničavanje omjera vode i sitnih čestica te dodavanje superplastifikatora i eventualno dodataka za promjenu viskoznosti. Dodaci za promjenu viskoznosti koriste se za smanjivanje utjecaja varijacije vlažnosti ili raspodjele zrna u ukupnom sastavu agregata, a beton je tada manje osjetljiv na male varijacije u omjeru sastojaka. Često se upotrebljavaju inertni i pucolanski, odnosno hidraulični dodaci. Preporučuje se upotreba najvećeg zrna  $D_{max}=12-20$  mm.

Upotreba samozbijajućeg betona ukazala je na veliku korist u ekonomskom, socijalnom i ekološkom pogledu. Brža izgradnja, osiguranje zbijanja betona posebno na mjestima konstrukcije gdje je vibriranje otežano te eliminacija buke vibriranja glavni su od razloga za primjenu samozbijajućeg betona. Samozbijajući beton može se koristiti u izradi konstrukcije s gustom armaturom i brojnim preprekama. Također je pogodan kod sanacije pojedinih konstrukcija kada se na postojećoj konstrukciji dodaje sloj novog betona koji zamjenjuje dotrajali vanjski sloj ili povećanja nosivosti konstrukcije.

Betonare i pogoni za proizvodnju samozbijajućeg betona imaju iste zahtjeve kao i tradicionalna proizvodnja betona, a transport na veće udaljenosti moguć je samo automikserima. Zbog svojih sastojaka je osjetljiviji od običnog betona te je potrebno redovito kontrolirati sastavne materijale, a samim time i količinu doziranja tih materijala u proizvodnji. Vrlo je važno da se kod preuzimanja betona na gradilištu dokumentacija o proizvodnji

samozbijajućeg betona upotpuni s detaljima važnim za krajnjeg korisnika betona. Ugradnja pumpom je efikasna za ovu vrstu betona jer viskoznost morta u betonu i velika fluidnost omogućavaju dobru pumpabilnost mješavine. [2]

### 2.1.1 Povijesni razvoj samozbijajućeg betona

Osnovni razlozi početka intenzivnih i vrlo ozbiljnih istraživanja na planu dobivanja samozbijajućih betonskih mješavina bili su velik problem s trajnošću armiranobetonskih konstrukcija i velik nedostatak kvalificirane radne snage za kvalitetno ugrađivanje betona.

Smatra se da je samozbijajući beton razvijen u Japanu u kasnim 1980-ima, zbog uočenih problema u trajnosti armiranobetonskih konstrukcija. Na mnogim uzorcima betona izvađenim iz konstrukcije uočene su pojave segregacije na makrorazini, a na mikrorazini potpuna dezintegracija strukture.

Jedna od prvih metoda za projektiranje sastava samozbijajućeg betona nastala je na temelju opsežnih istraživanja provedenih na Sveučilištu u Tokiju, a razvili su je Okamura i Ozawa. Metoda je ograničena na uporabu japanskih materijala za izradu betona s cementom male topline hidratacije i velikim sadržajem dikalcijeva silikata ( $C_2S$ ). Osnovni principi projektiranja sastava prema ovoj metodi su sljedeći:

- 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

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

Samozbijajući beton prvi put se upotrijebio na zgradi u lipnju 1990. Nakon toga SCC je korišten u konstrukciji tornjeva prednapetog betonskog mosta Shin-kiba Ohashi u Japanu 1991.



**Slika 2.1** Most Akashi Kaikyo; Shin-kiba Ohashi most, Japan, 1991. godina [2]

Samozbijajući beton korišten je i u izgradnji najvišeg, najdužeg i najskupljeg visećeg mosta na planetu: japanskog mosta Akashi Kaikyo (slika 2.1). Most se nalazi se na jednoj od najprometnijih i najopasnijih brodskih ruta na svijetu, a još je i u samoj zoni velikih potresa. More koje premošćuje bila je noćna mora za graditelje. Upravo zbog dubine na kojoj se nalazi tlo i brzine morskih struja nije bilo moguće primijeniti uobičajen postupak betoniranja temelja pod vodom. Zbog masivnosti temelja mosta i nemogućnosti vibriranja u čeličnim prstenovima graditelji su se odlučili na samozbijajući beton. U svaki temelj ugrađeno je 265 000 m<sup>3</sup> samozbijajućeg betona, što je ukupno 53 000 m<sup>3</sup> samozbijajućeg betona ugrađenog samo u temeljima mosta. To je do sada najveća upotrijebljena količina samozbijajućeg betona na jednom mjestu. Cjelokupno betoniranje temelja trajalo je 4 godine i 3 mjeseca. Projektirani vijek trajanja ovog mosta je nevjerojatnih 200 godina.

Krajem 90-ih godina samozbijajući se beton prema japanskim iskustvima počeo primjenjivati i u Europi. Jedan od prvih značajnih europskih projekata izveden ovom vrstom betona bila je izgradnja cestovnog tunela u Švedskoj.

Za primjenu samozbijajućih betona velik je napredak napravljen donošenjem Europskih smjernica koje su definirale zahtjeve, metode ispitivanja te preporuke za proizvodnju i ugradnju.

Europska zajednica je osnovala multinacionalni industrijski vodeći projekt SCC 1997 - 2000 i od tada je samozbijajući beton našao široku primjenu u svim europskim zemljama. [2]



### 2.1.2 Svojstva samozbijajućeg betona

Samozbijajući beton mora zadovoljavati zahtjeve dane Europskim smjernicama 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  $T_{500}$  (rasprostiranje slijeganjem) ili V-lijevak
  - Ispitivanje L kutijom
  - Otpornost segregaciji
  - Temperatura svježeg betona
  - Drugi tehnički zahtjevi

Karakteristike samozbijajućeg betona u svježem stanju su:

- TEČENJE- rast deformacija materijala bez povećanja naprezanja

Procjenjuje se metodom rasprostiranja slijeganjem (Slump flow).

- VISKOZNOST-otpor materijala tečenju

Procjenjuje se mjerenjem u reometru, empirijskim postupcima kao što je ispitivanje pomoću V-lijevka, a mogu se primijeniti i druge metode (određivanje parametra  $T_{500}$ , O-lijevka, Orimet).

- SPOSOBNOST ZA OBILAZENJE PREPREKA- sposobnost svježeg samozbijajućeg betona da teče i zaobilazi gustu armaturu te popunjava oplatu, a da pritom ne dođe do segregacije.

- OTPORNOST SEGREGACIJI- izražava se kao postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu.

Osnovne karakteristike sposobnosti popunjavanja oplata samozbijajućim betonom su tečenje i viskoznost kojoj uvelike pridonosi udio superplastifikatora u mješavini. [1]

## 2.2 Općenito o lakom betonu

Laki betoni najčešće imaju gustoću  $600 - 1500 \text{ kg/m}^3$ . Smanjenje gustoće u odnosu na obični beton se postiže na sljedeći način:

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

Zbog povećanog sadržaja pora laki beton ima manju čvrstoću i otpornost na habanje u odnosu na normalni beton, ali ima više drugih prednosti, kao što su manja volumna masa i izolacijska svojstva. Trajnost lakih betona može biti ista kao i kod običnog betona. Laki betoni su skuplji, a proizvodnja, transport i sama ugradnja zahtijevaju više pažnje, upravo da bi se postigla zahtijevana kakvoća. U cjelini, prednosti lakog betona ipak nadmašuju spomenute nedostatke. [3]

### 2.2.1 Podjela lakih betona

Ovisno o načinu postizanja manje volumne mase, laki betoni dijele se na:

- lake betone od jednakozrnatog agregata,
- ćelijaste betone,
- lakoagregatne betone.

#### 2.2.1.1 Laki betoni od jednakozrnatog agregata

Laki betoni od jednakozrnatog agregata dobivaju se izostavljanjem sitne frakcije agregata i upotrebom praktično jedne frakcije nominalno iste veličine zrna. Jedna normalna frakcija kamenog agregata, primjerice  $4 - 8 \text{ mm}$  ima volumnu koncentraciju agregata  $0,55 - 0,60$ . Naime, prema principu geometrijske sličnosti agregata volumna koncentracija uzorka agregata ne ovisi o veličini zrna agregata i najmanja je za jedan razred zrna agregata. Miješanjem više razreda povećava se volumna koncentracija agregata. Primjenom samo jedne frakcije agregata u gotovom betonu ostaje mnogo šupljina.

Volumna koncentracija je veća čim je veća zbijenost agregata. Volumna koncentracija ovisi i o obliku zrna agregata. Agregati, čija zrna većinom imaju oblik kugle, imaju znatno veću volumnu koncentraciju agregata. Međutim, gustoća ovakvih betona ovisi prije svega o granulometrijskom sastavu. U betonu su zrna obavijena slojem cementne paste debljine cca. 1,3 mm, pa stoga između zrna ostaju velike šupljine. Za pripremu betona može se upotrijebiti i više od jedne frakcije agregata, ali se tada dobije manji sadržaj pora i veća volumna masa betona. Poželjno je da zrna agregata ne budu veća od 25 – 30 mm. Pogodna veličina zrna je kad je najkrupnije zrno dva puta veće od najsitnijeg.

Beton od jednakozrnatog agregata je otporan na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, jer gotovo da nema kapilarnih pora (v/c omjer paste iznosi od 0,35 do 0,45).

Za pripremu betona potrebno je najmanje 250 kg/m<sup>3</sup> cementa. Potrebno je pripaziti na količinu cementa, jer višak ugrađenog cementa smanjuje broj šupljina.

Također, beton od jednakozrnatog agregata dobro apsorbira zvuk ako mu se površina ne zagladi. [3]

### 2.2.1.2 Čelijasti betoni

Čelijasti betoni su vrlo laki betoni u čiju je masu prije stvrdnjavanja utisnut zrak ili je kemijskim putem proizveden plin čiji se mjehurići šire u betonu. Ako se čistoj cementnoj pasti dodaju aktivni ili inertni fini agregati kao što su: pijesak, kvarc, pečena glina, škriljac, leteći pepeo, pucolan itd., mogu se dobiti čelijasti betoni porozne strukture na bazi portland i metalurškog cementa. Osnovni načini postizanja čelijaste strukture su stvaranje plina kemijskim putem ili ubrizgavanje zraka.

Prema načinu dobivanja čelijaste strukture čelijaste betone dijelimo na sljedeće vrste:

- plinobetoni,
- pjenobetoni. [3]

### 2.2.1.3 Lakoagregatni betoni

Za pripremu lakoagregatnog betona najčešće se upotrebljavaju određene vrste umjetnog agregata i to:

- ekspandirana pečena glina,
- ekspandirana granulirana zgora,
- ekspandirani perlit ili vermikulit,
- ekspandirani polimerni materijal.

Svi laki agregati imaju veliko upijanje vode. Prilikom miješanja betona agregat ili upija ili otpušta vodu, ovisno o vlažnosti kojom je ušao u miješalicu. Zbog toga nije moguće unaprijed u recepturi odrediti potrebnu količinu vode za pripremu betona, već se ona mora prilagođavati pri miješanju, da beton postigne propisanu konzistenciju.

Budući da zrna agregata sadrže i zatvorene šupljine, dio zrna ima manju volumnu masu od paste pa pri miješanju nastaje segregacija tipična za laki beton, odnosno zrna isplivavaju na površinu betona. Međutim, ova pojava karakterizira nestabilan laki beton, tj. beton koji ima preveliko izlučivanje vode. Ako se količina vode za pripremu betona ograniči tako da se na kraju dobije stabilan beton, takav beton je stabilan i pri miješanju, a opisana segregacija je minimalna. Upotrebom aeranta znatno se poboljšava obradivost i stabilnost svježeg lakog betona te smanjuje njegova sklonost segregaciji pri miješanju.

Lakoagregatni betoni prema namjeni dijele se na toplinsko – izolacijske lake betone, konstrukcijsko – izolacijske lake betone i konstrukcijske lake betone. [3]



**Slika 2.2** Gore: Laki beton od jednakozrnatog agregata, lijevo; Pjenobeton, desno  
Dole: Granule ekspanzirane gline, lijevo; Vermikulit, desno, izvor [3]

### 2.2.2 Svojstva lakih betona

Laki betoni su kruti, te imaju manji modul elastičnosti u odnosu na običan beton. Ponašaju se gotovo linearno elastično, sve do sloma. Kakvoća lakih betona varira više nego kod običnih betona. Količine cementa za  $1\text{ m}^3$  lakog betona 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 njegova se vodljivost povećava. Izolacijska svojstva lakog betona također ovise i o čvrstoći betona. Što je manja čvrstoća lakog betona, bolja su njegova izolacijska svojstva i obratno. Najbolja toplinsko - izolacijska svojstva ima beton ili mort s agregatom od perlita, vermikulita ili ekspanziranog polimernog materijala. Gustoća mu iznosi  $300 - 600\text{ kg/m}^3$ , a čvrstoća najčešće manje od 1 MPa.

Najveću čvrstoću postiže beton s agregatom od ekspanzirane pečene gline ili zgure, te s agregatom prirodnog porijekla. Takav beton koristi se za izradu lakih nosivih konstrukcija, ali djeluje i kao toplinska izolacija. Koeficijent toplinske vodljivosti mu je do 4 puta manji u odnosu na obični beton. Za izradu konstrukcija pogodnim se pokazao i jednozrnati beton, čija

gustoća iznosi 1200 – 2000 kg/m<sup>3</sup>, a čvrstoća na pritisak može postići vrijednosti iznad 15 MPa.

Jednozrnat beton od lakog agregata, plinobeton i pjenobeton postižu znatno manje čvrstoće. Čvrstoća na pritisak iznosi 3,5 – 10 MPa, a gustoća se kreće u granicama od 600 – 1200 kg/m<sup>3</sup>. Ovi betoni imaju bolja toplinsko – izolacijska svojstva od prethodno opisanog betona za lake nosive konstrukcije.

Kod lakih betona javlja se veliko skupljanje i bubrenje, naročito kod betona od lakog agregata. Skupljanje i bubrenje kod lakog betona dovodi do stvaranja mrežastih pukotina koje nastaju nekoliko tjedana ili mjeseci nakon očvršćivanja. Na skupljanje lakih betona mogu utjecati voda, cement i dodaci, a osobito vrsta i kvaliteta agregata. Vrlo male promjene u vlažnosti agregata sprječavaju slobodno skupljanje cementnog morta. Agregat koji je raspoređen u unutrašnjosti prima naprezanja, te je zbog toga jasno da skupljanje betona ovisi ne samo o stupnju slabljenja cementnog kamena, nego i o elastičnim svojstvima agregata i razlici između deformacija skupljanja cementnog kamena i agregata.

Bubrenje lakog betona nastaje uslijed povećanja debljine vodenog omotača u periodu kada kristalni spojevi nisu još dobili dovoljnu čvrstoću, a od trenutka kada kristalni spojevi očvrstnu bubrenje se smanjuje. U očvrstlom betonu bubrenje nastaje zbog povećanja razdvajajućeg utjecaja vode u prostoru između zrna i finih kapilara.

Puzanje lakog betona je znatno veće nego kod običnog betona.

Kako je već prethodno opisano, za izradu lakog betona potrebno je znatno više cementa nego za izradu običnog betona iste konzistencije, a iz toga proizlazi da plastifikatori nisu poželjni u lakom betonu. Međutim, upotrebom aeranta značajno se poboljšava obradivost i stabilnost svježeg lakog betona, a smanjuje se njegova sklonost segregaciji pri miješanju.

Većina lakih betona imaju niže koeficijente linearnog širenja u odnosu na čelik. Zbog ove činjenice za očekivati je da, pri zagrijavanju u eksploataciji, zajednički rad čelične armature i lakog betona neće biti osiguran.

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

Laki betoni sve se više koriste u raznim sferama, od hortikulturalne primjene, mostova, industrijske gradnje pa čak i brodogranje. [3]

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

Trajnosti betona se posvećuje sve više pozornosti jer se kod nas kao i u svijetu utvrđuje da agresivna okolina potiče odnosno pospješuje propadanje betona. Iz tog razloga se već pri projektiranju koristi koncept po kojemu konstrukcija treba iskazivati odgovarajuću sigurnost, uporabljivost i nosivost tijekom svog životnog vijeka. Trajnost betona možemo predvidjeti poznajemo li okolinu kojoj je objekt izložen te mehanizme mogućih procesa propadanja. Ako su granični uvjeti poznati i dobro određeni, možemo očekivati da će i projektiranje trajnosti betona biti uspješno.

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

Budući da trajnost ovisi o više parametara kao što su sastav i struktura materijala s jedne strane i utjecajima okoliša kojima je izložen s druge strane, nije ga moguće kvantificirati i kao takvog staviti u proračun. Osim sastava i strukture važni parametri koji utječu na trajnost materijala, u slučaju betona, su i svojstva poroznosti, apsorpcije, te propusnosti za fluide i plinove.

Trajnost se ostvaruje pravilnim projektiranjem konstrukcije, odabirom materijala, izvođenjem i održavanjem. Zadovoljavajući navedene parametre koji utječu na ponašanje materijala izloženog utjecajima okoliša i ugrađenog u konstrukcijski element, a tako i čitave konstrukcije, možemo biti sigurni da će konstrukcija uz redovnu kontrolu i održavanje uz minimalne troškove zadovoljiti uvjete sigurnosti, uporabljivosti i nosivosti tijekom projektiranog joj životnog vijeka. [4]

### 2.3.1 Apsorpcija vode

Jedan od glavnih čimbenika koji utječu na propadanje betona je prisutnost i kretanje vode u samom materijalu. Određivanje apsorpcije i transporta vode kapilarnim djelovanjem, čini važan dio procjene trajnosti betona. Voda je neophodna za pojavu korozije armature, kao i za protok klorida i sulfata kroz beton.

Kapilarno upijanje vode betona s recikliranom opekom veće je od kapilarnog upijanja vode običnog betona. Budući da apsorpcija vode znatno raste s porastom udjela reciklirane opeke u ukupnom volumenu betonske mješavine, time smanjena trajnost betona s recikliranom opekom može biti značajan nedostatak za širu primjenu.

Upotreba plastifikatora u sastavu betonskih mješavina ima pozitivan učinak na smanjenje apsorpcije vode betona s recikliranom opekom. Vodopropusnost betona s recikliranom opekom je gotovo dvostruko veća u odnosu na obični beton, te se dodatkom plastifikatora vodopropusnost može smanjiti za oko 11%.

### 2.3.2 Smrzavanje i odmrzavanje

Oštećenja materijala pri izloženosti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja nastaju uslijed širenja vode u porama ispunjenim vodom. Pri prelasku vode iz tekućeg stanja u kruto njezin volumen se povećava za približno 9%. Istovremeno se radi hlađenja okolni materijal skuplja te se u materijalu javljaju vlačna naprezanja.

Beton s recikliranom opekom kao agregatom ima slabiju otpornost prema djelovanju smrzavanja i odmrzavanja od običnog betona. Kod betona s recikliranom opekom u kojem se koristi sitna frakcija od reciklirane opeke do oštećenja uslijed smrzavanja i odmrzavanja dolazi puno brže nego pri korištenju sitne frakcije od prirodnog agregata. Prema nekim istraživanjima nakon izlaganja betona s recikliranom opekom ciklusima smrzavanja i odmrzavanja (25 ciklusa) on u odnosu na obični beton upije dva puta više vode. Već nakon 35 ciklusa izlaganja smrzavanju i odmrzavanju betona s recikliranom opekom uočeno je značajno smanjenje fizikalnomehaničkih svojstava.

Upravo zbog velike apsorpcije vode korištenje betona s recikliranom opekom preporuča se za unutarnje zidove, a ukoliko se koristi za izradu vanjskih zidova potrebno je osigurati dobru izolaciju.



### 2.3.3 Otpornost na habanje

Habanje kao jedan od načina mehaničkog trošenja betona vrlo je važno pri procjeni trajnosti betona. Prema nekim istraživanjima beton s recikliranom opekom pokazuje dobru otpornost na habanje, čak i bolju od betona s vapnenim agregatom. To se može objasniti boljom prionjivosti cementne paste i reciklirane opeke, uzrokovane njezinom većom poroznosti u usporedbi s vapnenim agregatom. Budući da se upotreba vapnenca ne preporuča u uvjetima u kojima je bitna otpornost na habanje iz navedenih rezultata ispitivanja nije moguće donijeti konačan zaključak o otpornosti na habanje betona s recikliranom opekom. Ipak, može se zaključiti da se reciklirana opeka ne preporuča u sastavu betona koji mora biti otporan na habanje.

### 2.3.4 Toplinska provodljivost

Termička svojstva betona mogu se iskazati preko toplinske provodljivosti. Beton s recikliranom opekom ima manji koeficijent toplinske provodljivosti od betona s prirodnim agregatom. Može se uočiti da udio cementa i polimera u betonu ima značajan utjecaj na njegovu toplinsku provodljivost. Primjerice, s manjim udjelom cementa ili s većim udjelom polimera u ukupnom volumenu betona dolazi do smanjenja toplinskog koeficijenta provodljivosti betona s recikliranom opekom.

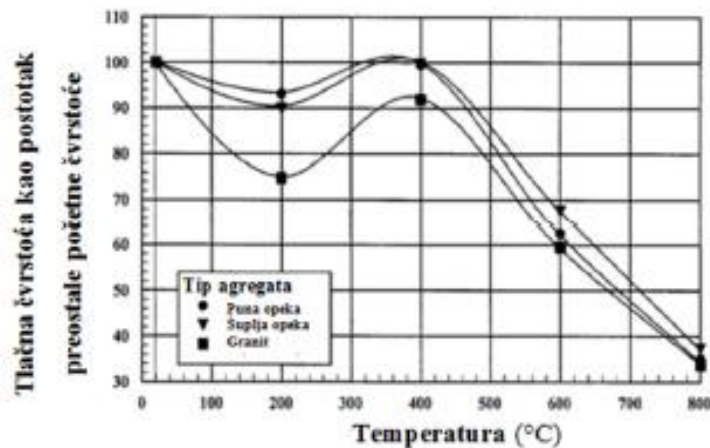
Mali toplinski koeficijent provodljivosti betona s recikliranom opekom pruža mogućnost takvom betonu da bude upotrijebljen u situacijama gdje su potrebna dobra izolacijska svojstva betona. Daljnja istraživanja na području upotrebe reciklirane opeke kao agregata trebalo bi usmjeriti upravo u pravcu određivanja termičkih svojstava betona. Time bi osim održivog zbrinjavanja građevinskog otpada osigurali i uštedu energije dobrim izolacijskim svojstvima materijala.

### 2.3.5 Otpornost na požar

Betonski elementi ne proizvode dim niti emitiraju bilo kakve štetne plinove u okolinu tijekom požara, a osim toga sprječavaju zagrijavanje susjednih soba i prostorija. 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.

Reciklirana drobljena opeka pokazala se kao agregat za beton s dobrim svojstvima u uvjetima izloženosti požaru. U takvim uvjetima izloženosti, beton s recikliranom opekam pokazao je znatno bolje reakcije na visoke temperature od betona s prirodnim riječnim ili drobljenim agregatom (granit, dolomit). Agregat nastao drobljenjem opeke termički je stabilan te je moguće da je upravo to svojstvo razlog dobrog ponašanja kao agregata u betonu izloženom visokim temperaturama. Mali koeficijent toplinske provodljivosti betona s recikliranom opekam također ukazuje na njegovu vatrootpornost. Zbog manjeg koeficijenta toplinske provodljivosti, armirani beton je puno bolje zaštićen od ranog zagrijavanja pri upotrebi betona s recikliranom opekam nego pri upotrebi betona s prirodnim agregatom. [4]



**Slika 2.3** Redukcija tlačne čvrstoće betona normalne početne čvrstoće pri izlaganju visokim temperaturama,[4]

### 3 POŽARNA OTPORNOST

Učinak požara na konstrukciju ovisi o upotrijebljenim materijalima pri izvođenju konstrukcije, a najbolje ponašanje pri povišenim temperaturama pokazuje beton. Agregat, kao dominantni materijal u betonu, u velikoj mjeri određuje ponašanje betona u slučaju izloženosti požaru. Od svih građevinskih materijala, beton pruža najbolju požarnu otpornost i ne gori, ne oslobađa toksične plinove i ima izuzetno malu toplinsku provodljivost.

Budući da je za beton nosivost na tlak mjerodavna, ispitivanja tlačne čvrstoće betona na povišenim temperaturama tema su brojnih kako znanstvenih tako i stručnih radova. Uočeno je da s porastom temperature tlačna čvrstoća betona pada, a naglo opadanje čvrstoće počinje kod temperatura između 300°C i 360°C.

Beton ima prihvatljivo ponašanje do 300°C, ali ni preko te temperature ne nastupa lom konstrukcije. 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.

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. U betonu izloženom djelovanju požara na visokim temperaturama dolazi do kemijskih promjena na cementnoj pasti, a na temperaturi od 100°C voda u porama betona prelazi u vodenu paru i kada pritisak vodene pare prekorači vrijednost koju može podnijeti struktura betona počinje ljuškanje konstrukcije.

Kemijske promjene minerala iz očvrslje cementne paste i agregata pojavljuju se ovisno o temperaturi u betonu. Od 400°C na više dolazi do dehidracije kalcij-hidroksida u očvrsljoj cementnoj pasti 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. Voda koja je oslobođena u obliku vodene pare dodatno ubrzava proces razaranja.

U slučaju kada u betonu kao agregat koristimo kvarc, temperatura od 575°C uzrokuje transformaciju minerala, što je povezano s povećanjem volumena. Posljedica je prskanje (pucanje) betona i agregata koji sadrži kvarc.

Na temperaturama višim od 800°C, dekarbonatizacija vapnenca se događa prema sljedećoj kemijskoj jednadžbi:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Agregat, koji sadrži vapnenac, se raspada, pri čemu oslobođeni  $\text{CO}_2$  izlazi iz betona kao plin. Ako je put za izlazak plina spriječen, stvara se tlak koji uzrokuje raspadanje strukture betona. Na temperaturama do 200°C armaturni čelik ne mijenja ponašanje, ali već na temperaturama većim od 600°C nosivost armature je manja od 70%. Iz tog razloga ograničena je vrijednost temperature kojoj čelik smije biti izložen. U praksi se mali gubitci nosivosti toleriraju, tako da se granična vrijednost temperature kreće u području od 250°C do 300°C. Čelik s malim sadržajem ugljika, što je generalno slučaj kod armaturnog čelika, pokazuje nepravilnosti u ponašanju u području između 200°C i 300°C. Taj fenomen može biti pripisan strukturalnim promjenama.

Beton, kao i većina materijala, mijenja dimenzije uslijed promjene temperature. Promjene temperature uzrokovane klimatskim uvjetima uzimaju se u obzir tijekom projektiranja u statičkom proračunima konstrukcija, a u fazi izvođenja ugradnjom pomičnih ležajeva. U slučaju požara dolazi do opterećenja konstrukcije značajno višim temperaturama i promjene duljine su odgovarajući veće. Ako je prostor za promjenu duljine nedovoljan mogu se pojaviti sekundarni momenti, uzrokujući kolaps konstrukcije.

### 3.1 Djelovanje požara na beton

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

Umanjenje karakteristične tlačne čvrstoće betona kao funkcije temperature,  $\Theta$ , određeno je koeficijentom  $k_c(\Theta)$  prema jednadžbi:

$$f_{ck}(\Theta) = k_c(\Theta) f_{ck}(20^\circ\text{C}) \quad (1)$$

U pomanjkanju točnijih podataka, za beton sa silicijskim agregatom primjenjuju se niže navedene veličine za  $k_c(\Theta)$ . Te su vrijednosti na strani sigurnosti za druge vrste betona.

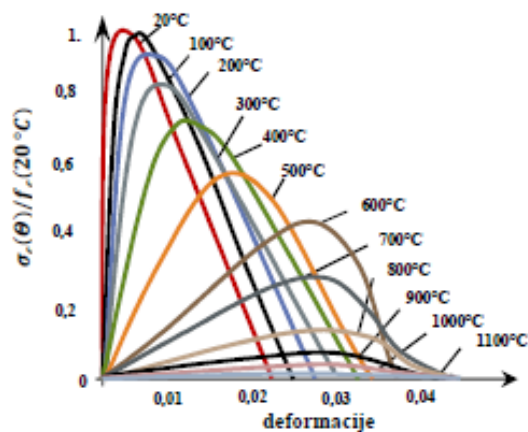
$$k_c(\Theta) = 1,0 \text{ za } 20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 100^\circ\text{C}$$

$$k_c(\Theta) = (1600 - \Theta) / 1500 \text{ za } 100^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 400^\circ\text{C}$$

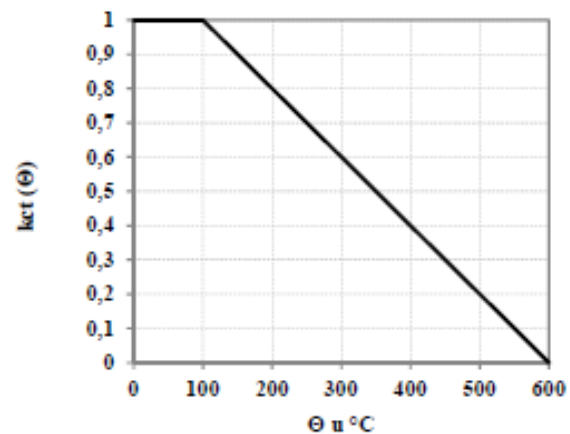
$$k_c(\Theta) = (900 - \Theta) / 625 \text{ za } 400^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 900^\circ\text{C}$$

$$k_c(\Theta) = 0 \text{ za } 900^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

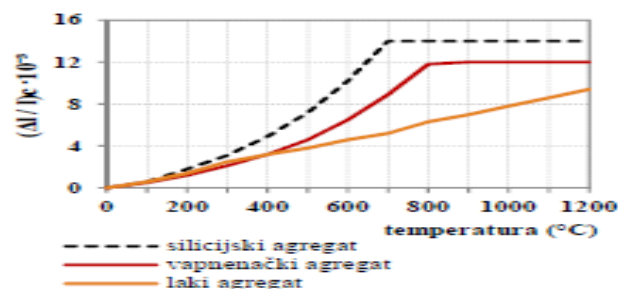
S porastom temperature dolazi do promjene toplinskih svojstva betona. Ukupno toplinsko produljenje betona  $\Delta l/l$  računajući od  $20^\circ\text{C}$  može se odrediti prema slici 3.3 i jednadžbama propisanim normom HRN ENV 1992-1-2:2004.



**Slika 3.1** Odnos naprezanje-deformacije na beton pri jednoosnom tlaku kod povišenih temperatura [4]



**Slika 3.2** Koeficijent  $k_c(\Theta)$  kojim se uzima u obzir umanjene vlačne čvrstoće betona,  $f_{ctk}$ , pri povišenim temperaturama [4]



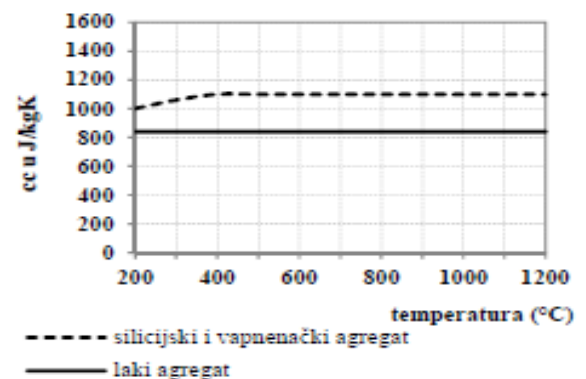
**Slika 3.3** Ukupno toplinsko produljenje betona [4]

Ako se zahtijeva samo približan odgovor (pri jednostavnim proračunima i procjenama), koeficijent toplinskog produljenja,  $\alpha_c = (d(\Delta l/l))/d\Theta$ , može se uzeti kao neovisan o temperaturi betona i to:

- za beton sa silicijskim agregatom:  $\alpha_c = 18 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta$
- za beton s vapnenačkim agregatom:  $\alpha_c = 12 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta$
- za lakoagregatni beton:  $\alpha_c = 8 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta$

Iz slike 3.3 možemo vidjeti da je toplinsko produljenje sa porastom temperature kod betona normalne težine veće od toplinskog produljenja kod lakoagregatnog betona.

Specifična toplina betona raste s porastom temperature, dok kao posljedica toga toplinska provodljivost opada. Ona se u proračunu požarne otpornosti betona može uzeti u obzir prema jednadžbama propisanim normom HRN ENV 1992-1-2:2004 ili prema slici 3.4. Treba napomenuti da se pri izradi dijagrama prikazanog na slici 3.3 sadržaj vlage u betonu razmatra na razini ravnotežne vlage i da viši sadržaj vlage usporava zagrijavanje betona.



**Slika 3.4** Specifična toplina betona [4]

Ako se sadržaj vlage ne razmatra na razini ravnoteže topline i mase, za funkciju danu za specifičnu toplinu betona,  $c_{c \text{ peak}}$ , sa silicijskim i vapnenačkim agregatom mogu se uzeti najveće vrijednosti koje se nalaze između 100 °C i 200°C, i to:

$c_{c \text{ peak}} = 1875 \text{ J/kgK}$  ako je vlažnost 2% od težine betona, odnosno

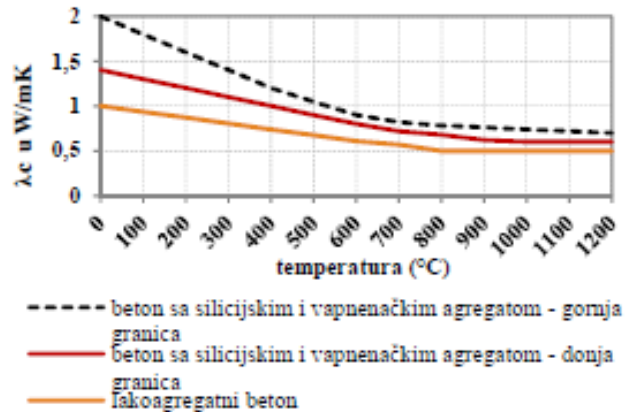
$c_{c \text{ peak}} = 2750 \text{ J/kgK}$  ako je vlažnost 4% od težine betona.

Ako se zahtijeva samo približan podatak može se uzeti da je specifična toplina neovisna o temperaturi betona i da iznosi  $c_c = 1000 \text{ J/kgK}$  za beton sa silicijskim i vapnenačkim agregatom, a  $c_c = 840 \text{ J/kgK}$  za lakoagregatni beton.

Toplinska vodljivost betona,  $\lambda_c$ , može se uzeti prema jednadžbama u Dodatku A norme HRN ENV 1992-1-2:2004, a također i prema slici 3.5 na kojoj su spomenute jednadžbe prikazane. Ako se zahtijeva samo približan podatak, može se uzeti da je toplinska vodljivost neovisna o temperaturi i to:

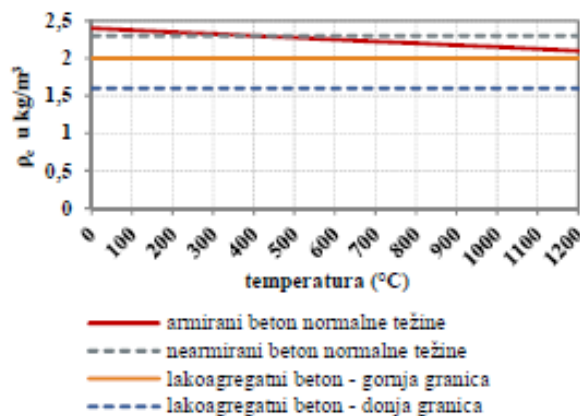
- za beton sa silicijskim agregatom:  $\lambda_c = 1,60 \text{ W/mK}$ ,

- za beton sa vapnenačkim agregatom:  $\lambda_c = 1,30 \text{ W/mK}$ ,
- za lakoagregatni beton:  $\lambda_c = 0,80 \text{ W/mK}$ .



Slika 3.5 Toplinska vodljivost betona [4]

Gustoća betona,  $\rho_c$ , za statička opterećenja po EN 1994-1-2:2005 smatra se neovisnom o porastu temperature betona te se može odrediti prema prethodno navedenoj normi. Promjena gustoće se kod toplinskog odgovora uvažava s porastom temperature kako je to prikazano slikom 3.6. Zbog isparavanja vode može se uzeti da se gustoća smanjuje za  $100 \text{ kg/m}^3$  za temperature preko  $100^\circ\text{C}$ . Sadržaj vlage u betonu može se uzeti jednakim sadržaju ravnotežne vlage. Ako takvi podatci ne postoje, može se uzeti da sadržaj vlage iznosi  $\leq 2 \%$  od težine betona. Visoki sadržaj vlage usporava zagrijavanje betona, ali povećava opasnost odlamanja.



Slika 3.6 Gustoća betona pri visokim temperaturama [4]

Osim promjena mehaničkih i toplinskih svojstvima betona, pojavljuju se promjene i u njegovom površinskom izgledu, a manifestiraju se kao ljuštenje površine i pojava pukotina.

Ljuštenje betona može biti površinsko, može doći do eksplozivnog odlamanja, odvajanje uglova, stvaranje depresija, a do ljuštenja može doći i nakon hlađenja. Najopasnije je naravno eksplozivno odlamanje jer dolazi do odvajanja komadića betona s učinkom eksplozije. Eksplozivno odlamanje je najčešće prouzročeno podizanjem tlaka vode u porama betona i uslijed toga prekoračenjem njegove vlačne čvrstoće tijekom požara, a karakteristično je da se pojavljuje u prvih 30 minuta.

Do pojave pukotina dolazi uslijed naglog povećanja ili smanjenja temperature betona. Primjerice uslijed procesa naglog hlađenja betona tijekom gašenja požara dolazi do naglog stezanja dijelova površine betona što rezultira pojavom pukotina. Također nakon izlaganja betona visokoj temperaturi već od 100° C uslijed različitog istežanja agregata i cementne paste dolazi do formiranja mikropukotina po površini elementa. Pojavom pukotina omogućen je prolaz visokih temperatura u unutrašnjost betona te daljnje oštećenje betona. Beton i armatura se uslijed izloženosti visokim temperaturama počinju različito istežati. Armatura se isteže brže te dolazi do stvaranja dodatnih vlačnih naprezanja u blizini armature i u konačnici pojave pukotina. [4]

### 3.2 Djelovanje požara na konstrukcije

Cilj požarne zaštite je ograničenje rizika pri djelovanju požara za osobe i društvo, susjednu imovinu i, gdje se to zahtijeva, za imovinu izravno izloženu požaru. Građevina mora biti projektirana i izvedena tako da u slučaju izbijanja požara:

- 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 na ponašanje konstrukcije u požarusu sljedeći:

- 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".

Kriterij "I" smatra se zadovoljenim ako srednji porast temperature pri standardnoj izloženosti požaruna izloženoj površini ne premašuje 140 K i ako najveći porast temperature ne premašuje 180 K.

Pri djelovanju požara moraju se uzeti u obzir svojstva gradiva ovisna o temperaturi. Standardni požarni uvjeti određeni su za temperature između 20°C i 1200°C, a u istim granicama određena su i svojstva gradiva.

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.

Požar se razvrstava kao izvanredno djelovanje. Da bi se odredila proračunska situacija, treba odrediti proračunski požarni događaj i s njim vezani proračunski požar na temelju prosuđivanja požarnog rizika. Za konstrukcije kod kojih se rizik od požara povećava kao posljedica nekih drugih izvanrednih djelovanja, ovaj rizik treba uzeti u obzir kod određivanja cjelokupnog koncepta sigurnosti. Pri tome valja uzeti u obzir ponašanje konstrukcije ovisno o vremenu i opterećenju prije izvanredne situacije. Za svaki mogući proračunski požarni događaj treba procijeniti proračunski požar u pojedinome požarnom odjeljku zgrade zasebno. Požarni odjeljci projektiraju se tako da spriječe širenje požara na druge požarne odjeljke. Ponašanje konstrukcije pri požaru ovisi o:

- toplinskom djelovanju i njegovom učinku na svojstva materijala posredno na mehaničko djelovanje
- neposrednom učinku na mehaničko djelovanje.

## **4 DOSADAŠNJA ISPITIVANJA BETONA NA POŽAR**

### **4.1 Utjecaj tipa cementa i agregata na požarnu otpornost mikrobetona (Ivanka Netinger, Dubravka Bjegović, Ivana Kesegić)**

U radu je prikazana mogućnost poboljšanja požarne otpornosti betona odabirom tipa cementa i agregata koji su manje podložni djelovanju visokih temperatura. U tu svrhu provedena su prethodna ispitivanja utjecaja visokih temperatura na dva različita tipa cementa. Uspoređena su mehanička svojstva preostala nakon požara (tlačna i vlačna čvrstoća) mikrobetona sa zgurama domaćeg područja i drobljenom opekrom/crijepom kao agregatom sa istim svojstvima mikrobetona sa riječnim agregatom.

#### **4.1.1 Uvod**

Rezultati studija provedenih u svijetu pokazali su da učinak požara na konstrukciju ovisi o vrsti materijala od kojeg je konstrukcija izvedena i da beton pokazuje vrlo dobro ponašanje pri povišenim temperaturama. Međutim iako se radi o materijalu dobre požarne otpornosti, ne znači da požar i povišene temperature ne utječu na svojstva betona. Promjena boje, tlačne čvrstoće, modula elastičnosti, gustoće betona te izgledu njegove površine (ljuštenje) svojstva su na koje utjecaj visoke temperature ostavlja traga. Prema najnovijim istraživanjima, primjenom «pametnih betona» mogu se postići učinkovite mjere koje reduciraju vjerojatnost pojave ljuštenja betona u armiranobetonskim elementima, štiteći ujedno i čelik (armaturni i prednapeti) u elementu od dostizanja njemu kritične temperature. U ovom radu se upućuje na mogućnost poboljšanja požarne otpornosti betona isključivo odabirom tipa cementa i agregata manje podložnih djelovanju visokih temperatura.

#### **4.1.2 Ponašanje cementa zbog izloženosti visokim temperaturama**

Zbog podložnosti brojnim fizikalno-kemijskim transformacijama radi visokih temperatura, cementna je pasta vrlo nestabilna komponenta betona. Smatra se da unutar temperatura od 4-80 °C produkti hidratacije običnoga portlandskog cementa ostaju kemijski nepromijenjeni. Stoga se promjene svojstava cementne paste u navedenom rasponu

temperatura pridružuju fizikalnim promjenama (promjene u Van der Waalsovima kohezivnim silama, promjene u poroznosti, pojava mrežastih pukotina) ili ubrzanom hidrataciji cementa. Iznad temperature od 80 °C ponašanje cementne paste u dijelu elementa koji ima mogućnost evaporacije vode tijekom izloženosti požaru (površinski sloj betona u elementu) razlikovat će se od ponašanja cementne paste koji zadržava vlagu pod hidrotermalnim uvjetima (unutarnji sloj betona u elementu). Promjene svojstava cementne paste iz površinskog sloja betonskog elementa uglavnom će biti uvjetovane temperaturom, dok će ponašanje cementne paste u unutarnjem sloju betona ovisiti o W/C omjeru - manji W/C omjer osigurava bolje ponašanje zbog izloženosti visokim temperaturama. Sukladno literaturi, mineralnim dodacima kao što su zgura ili leteći pepeo umanjuje se W/C omjer u cementnoj pasti, čime se i osigurava njezina povećana požarna otpornost. Zamjenom dijela cementa silikatnom prašinom također je moguće poboljšati otpornost cemente paste na požarno djelovanje. Osim dodataka cementu, literatura navodi i mogućnost utjecanja na požarnu otpornost cementa u fazi njegove proizvodnje. Izrada portlandskoga cementa bez dodatka gipsa jedna je od takvih mjera. Eksperimentalni dio ovog rada uspoređuje ponašanje dvaju komercijalno dostupnih cementa s ovog područja koji bi sukladno ovdje navedenom trebali pokazivati bolju požarnu otpornost u odnosu na čisti portlandski cement. Promatran je utjecaj visokih temperatura na mehanička svojstva mikrobetona sa CEM II /B-M (P-S) 32,5R i CAC 75.

#### **4.1.3 Požarna otpornost agregata u betonu**

Glavni doprinos termalnim svojstvima i koeficijentu istezanja betona ipak daje agregat. Osim što zauzima 60-80 % volumena betona, agregat umanjuje skupljanje i pužanje cementne paste u betonu. Kada je riječ o požarnoj otpornosti betona, tip agregata često se zanemaruje. Sukladno dosadašnjim istraživanjima, drobljena prepečena opeka i korund u samom su vrhu što se tiče stabilnosti pri izloženosti visokim temperaturama. U opadajućem nizu slijede ih ekspanzirana zgura, škriljac, ekspanzirane gline, granit i bazalt, vapnenački agregati, silicijski agregati te kvarc.

Uobičajeno uporabljeni agregati u betonu na našim su područjima oni iz prirodnih izvora – riječni agregati i dolomit. Kvarc ( $\text{SiO}_2$ ) prisutan u silicijskim agregatima i pijesku podložan je brojnim fizikalnim promjenama pri povišenim temperaturama. Najpoznatija je od tih promjena povratna endotermička kristalna  $\alpha$ - $\beta$  transformacija kvarca koja nastaje pri 575 °C,

uz pridruženu joj naglu obujamsku ekspanziju od 5,7 %. Karbonatni agregati kao što je dolomit stabilni su do 700 °C kada se kalcijev karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) počinje razlagati na kalcijev oksid ( $\text{CaO}$ ) i ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ).

U eksperimentalnom dijelu rada koji se odnosi na utjecaj visokih temperatura na tip agregata u betonu, slijedila je pretpostavka da materijali nastali pri visokim temperaturama koji su iskoristivi kao agregat čine beton otpornijim na visoke temperature. Naglasak je stavljen na mogućnost primjene zgure kao agregata u betonu, čime bi se osim doprinosa požarnom inženjerstvu dao doprinos i zbrinjavanju tog otpadnog materijala s područja Republike Hrvatske. Osim zgure rad upućuje i na mogućnost primjene loma opekarske industrije (drobljene opeke i drobljenog crijepa) kao agregata koji poboljšava požarnu otpornost betona.

#### 4.1.3.1 Zgura

Zgura je otpadni proizvod nastao pri pročišćavanju metala, njegovu lijevanju i legiranju. Prema vrsti metala pri čijoj je preradi dobivena, zgure mogu biti: zgure obojene metalurgije i zgure crne metalurgije. Ovisno o načinu hlađenja i očvršćivanja rastopljene mase (one iz prerade obojenih i crnog metala) razlikujemo nekoliko osnovnih vrsta zgura: kristaliziranu zguru (dobiva se lijevanjem u korita te ostavljanjem pod uvjetima okoline na hlađenju), granuliranu zguru (dobivenu hlađenjem s pomoću mlaza vode ili zraka do staklastog stanja, uz malu ili nikakvu kristalizaciju) i ekspandiranu zguru (dobivenu hlađenjem rastaljene mase kontroliranom količinom vode, zraka ili pjene).

S obzirom da i do 88 % ukupne prerade metala otpada na preradu željeza i čelika, glavni problem pri zbrinjavanju zgura čini upravo zgura crne metalurgije. U svijetu se bilježi uporaba zgura iz visokih peći kao poboljšivača tla, kao zamjena dijela cementa i kao materijal za stabilizaciju tla. Čeličanska se zgura rabi kao agregat za oblaganje pokosa rijeka, nasipavanje erodiranih korita rijeka i kao agregat u asfaltnim mješavinama. Upotreba zgure kao agregata u betonu još nije dovoljno proučena. Budući da je većina zgura hlađena na zraku te čini čvrstu stijensku masu, za potrebe agregata takva masa zahtijeva konvencionalno drobljenje i prosijavanje da bi se zadovoljili zahtjevi za granulacijom. Ovako nastao agregat ima dobre mehaničke karakteristike, zdravog je zrna, dobre otpornosti na abraziju, velike tvrdoće, izražene otpornosti na cikluse zamrzavanja/odmrzavanja pa bi u betonu mogao poslužiti kao zamjena redovito upotrebljavanom agregatu iz prirodnih izvora.

### 4.1.3.2 Lom iz opekarske industrije

Lom iz opekarske industrije zajednički je naziv za otpadni materijal nastao oštećenjem zidnih elemenata i glinenog crijepa nakon završne faze njihove proizvodnje. S obzirom da zgotovljene opekarske proizvode s oštećenjem izvan granica tolerancije nije moguće plasirati na tržište, oni se u krugu tvornica usitnjavaju. Svoju primjenu lom iz opekarske industrije nalazi kao materijal za nasipavanje donjih i gornjih slojeva športskih terena. Svjetska istraživanja pokazuju mogućnost iskorištavanja drobljenih opekarskih proizvoda kao agregata u betonu, čime bi se znatno pridonijelo rješavanju problema zbrinjavanja ove vrste otpada te očuvanju prirodnih izvora. Beton pripremljen s takvim agregatom svrstava se u skupinu laganih betona. Koeficijent toplinske provodljivosti takvih betona kreće se u granicama 0,5-0,75 W/mK, dok kod betona s prirodnim agregatom iznosi oko 1,75 W/mK

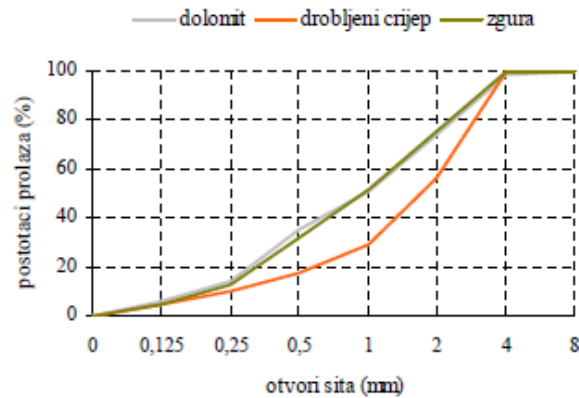
### 4.1.4 Utjecaj tipa cementa i agregata na požarnu otpornost mikrobetona

#### 4.1.4.1 Utjecaj tipa cementa na požarnu otpornost mikrobetona

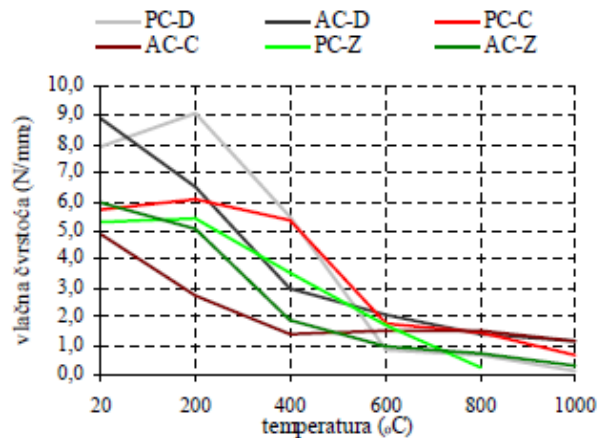
Radi utvrđivanja ponašanja na visokim temperaturama komercijalno dostupnih vrsta cementa koji bi prema gore navedenom trebali pokazivati povećanu požarnu otpornost u odnosu na čisti portlandski cement, načinjeno je šest skupina uzoraka mikrobetona s varijacijama u tipu cementa i agregata (tablica 4.1.). Mješavine su pripremljene u omjeru 3:1 (agregat: cement) te uz isti vodocementi omjer ( $v/c = 0,5$ ). Za pripremanje mješavina upotrijebljeni su portlandski cement s dodacima (CEM II /B-M (P-S) 32,5R) i aluminatni cement (CAC 75). Agregati u mješavini jesu: dolomit, drobljeni crijep (uzeto iz proizvodnje) i zgura podrijetlom iz Željezare Sisak (uzeto s odlagališta). Krivulja prosijavanja agregata prikazana je slikom 4.1.

**Tablica 4.1** Sastojci mikrobetona [5]

Mješavina	Agregat	Tip cementa
PC-D	dolomit	CEM II /B-M (P-S) 32,5R
AC-D	dolomit	CAC 75
PC-C	drobljeni crijep	CEM II /B-M (P-S) 32,5R
AC-C	drobljeni crijep	CAC 75
PC-Z	zgura	CEM II /B-M (P-S) 32,5R
AC-Z	zgura	CAC 75



**Slika 4.1** Krivulja prosijavanja agregata upotrebljenih u mješavinama [5]



**Slika 4.2** Usporedba temperaturne krivulje u peći i krivulje prema normi ISO 834 [5]

Uzorci izmjera 4/4/16 cm, starosti veće od 28 dana, izlagani su djelovanju visokih temperatura u ispitnoj peći. Peć je električna, izmjera 1,0/0,6/0,4 m, s prirastom temperature prema slici 4.2.

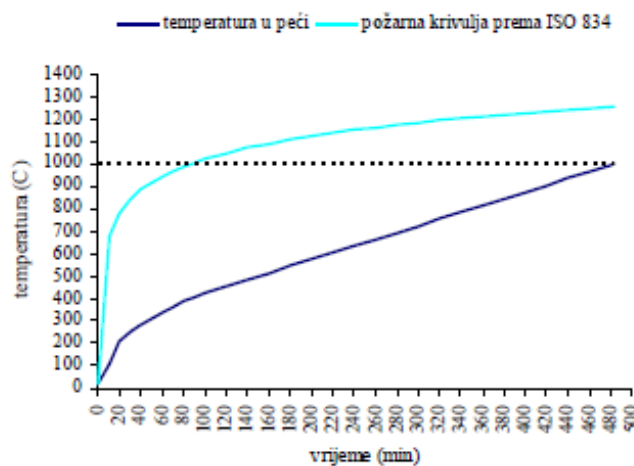
Uzorci mikrobetona stavljeni su u peć prije njezina uključivanja te nakon dostizanja zahtijevane temperature (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, i 1000 °C) zadržani 1 sat. S obzirom na veličinu peći koja nakon postignute temperature predstavlja opasnost za čovjeka pri otvaranju, uzorci su u peći ostavljeni sve do njihova potpunog hlađenja. Nakon hlađenja uzoraka ispitane su njihove vlačne i tlačne čvrstoće.

Slikama 4.3. do 4.6. prikazan je utjecaj visokih temperatura na vlačnu i tlačnu čvrstoću uzoraka. Svaka točka krivulje dobivena je na temelju triju rezultata ispitivanja pri vlačnoj čvrstoći te šest rezultata ispitivanja pri tlačnoj čvrstoći uzorka. Uvidom u slike 4.3. do 4.6. zaključuje se sljedeće:

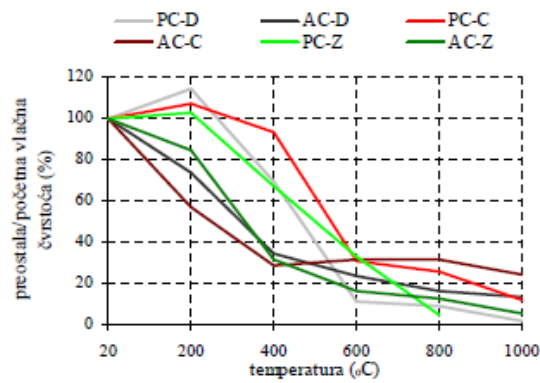
- Uzorci s portlandskim cementom u kombinaciji sa svakim od upotrijebljenih vrsta agregata ponašaju se znatno bolje od uzoraka pripremljenih s aluminatnim cementom do temperature od približno 600°C. Takvi rezultati sukladni su rezultatima prijašnjih istraživanja. Opravdanost takvih rezultata tumači se činjenicom da za razliku od portlandskoga cementa kod kojega se pri temperaturama višim od 400°C raspadaju kemijske veze, kod aluminatnog cementa na temperaturama višim od 800 °C dolazi do taljenja te se počinju stvarati keramičke veze koje omogućavaju njegovu primjenu tek na temperaturama višim od 1000 °C.

- Pri temperaturi od 200°C bilježi se porast vrijednosti vlačnih čvrstoća svih uzoraka sa portlandskim cementom, što je najizraženije kod uzoraka s dolomitom (14 %). Kod iste mješavine (PC-D) bilježi se i blagi prirast tlačne čvrstoće na 200°C (1 %), dok ostale mješavine s portlandskim cementom bilježe znatno blaži gubitak tlačne čvrstoće od mješavina s aluminatnim cementom. Prirast temperatura kod mješavina s portlandskim cementom već je zabilježena pojava i tumači se kao posljedica isušivanja betona, jednoličnog gubitka vlage te jačanja Van der Wallsovih sila (između čestica gela) pri gubitku vlage.

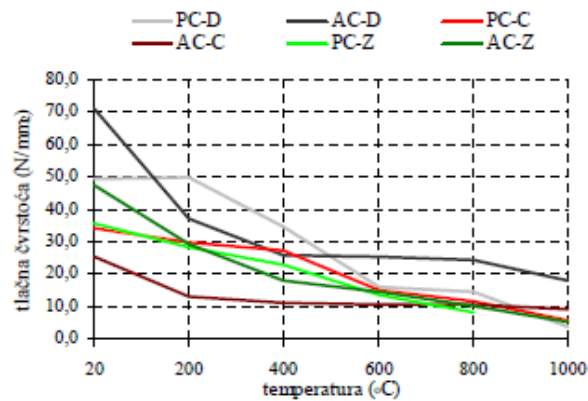
- Iz presjecišta krivulja koje prikazuju opadanje vlačne i tlačne čvrstoće uzoraka sa istim tipom agregata (slike 4.4. i 4.6.) vidi se da temperatura pri kojoj aluminatni cement počinje pokazivati bolju požarnu otpornost u odnosu na portlandski cement varira u rasponu od 600°C do 800 °C. Isto upućuje na bitan utjecaj tipa agregata u mješavini na požarnu otpornost mikrobetona te je povod za ispitivanja opisana u točki 4.1.4.2.



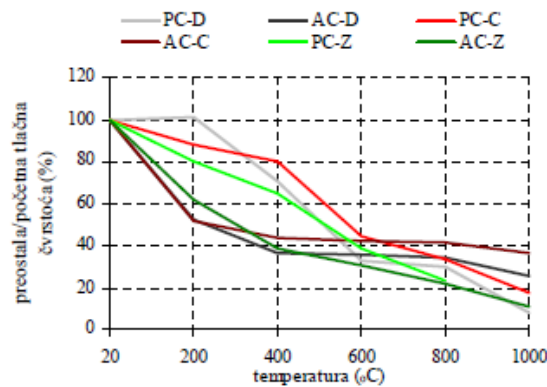
**Slika 4.3** Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću uzoraka mortova sa portlandskim i aluminatnim cementom [5]



**Slika 4.4** Odnos preostale i početne vlačne čvrstoće mortova s portlandskim i aluminatnim cementom nakon izloženosti visokim temperaturama [5]



**Slika 4.5** Utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću uzoraka mortova s portlandskim i aluminatnim cementom [5]



**Slika 4.6** Odnos preostale i početne tlačne čvrstoće mortova sportlandskim i aluminatnim cementom nakon izloženosti visokim temperaturama [5]

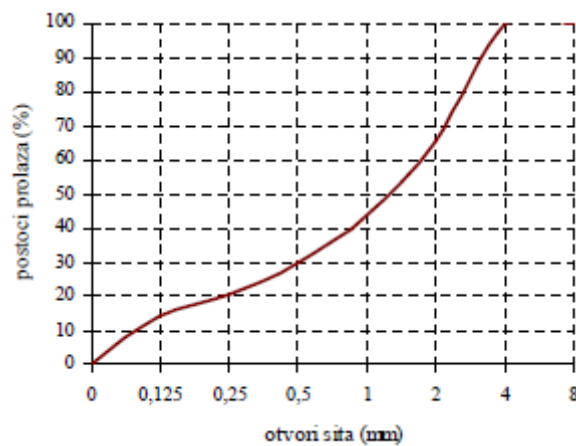


#### 4.1.4.2 Utjecaj tipa agregata na požarnu otpornost mikrobetona

Radi utvrđivanja ponašanja na visokim temperaturama gore nabrojanih potencijalno požarno otpornih agregata, načinjeno je pet skupina uzoraka mikrobetona. Mješavine su istog sadržaja cementa ( $450 \text{ kg/m}^3$ ), pripremljene uz isti vodocementni omjer ( $v/c = 0,5$ ) te svojstava u svježem stanju prema tablici 4.2. Za pripremu mješavina uporabljen je cement CEM I 52,5N. Krivulja prosijavanja ista je za sve agregate (slika 4.7.), prilagođena za ostale agregate prema krivulji prosijavanja riječnog agregata. Kao referentna mješavina (R) promatrana je ona s riječnim agregatom, uobičajeno upotrijebljenim pri pripremanju mikrobetona. U mješavinama ZSI i ZST agregati su zgure raspoložive na području Republike Hrvatske, dok je u mješavini O agregat drobljena opeka te u C drobljeni crijep. U mješavini D agregat je drobljeni dolomit. Agregati podrijetlom iz opekarske industrije (opeka, crijep) uzeti su kao otpad izravno iz proizvodnje. Zgura iz Siska uzeta je s odlagališta, nakon višegodišnjeg izlaganja djelovanju atmosferilija, dok je zgura iz Splita uzeta izravno iz proizvodnje.

**Tablica 4.2** Svojstva mikrobetona u svježem stanju [5]

Mješavina	Agregat	Gustoća ( $\text{kg/m}^3$ )	Sadržaj pora (%)	Konzistencija (cm)	Opažanja
R	riječni	2228	3	16,0	-
ZSI	zgura Sisak	2276	6	15,6	-
ZST	zgura Split	2820	5	15,5	trošna zrna
O	drobljena opeka	1862	10,5	15,8	-
C	drobljeni crijep	1944	4,4	15	-
D	dolomit	2358	3	16	-



**Slika 4.7** Krivulja prosijavanja agregata [5]

Uzorci izmjera 4/4/16 cm, starosti veće od 28 dana i vlažnosti u granicama 3-5 %, izlagani su djelovanju visokih temperatura u ispitnoj peći. S obzirom da u Hrvatskoj ne postoji peć čiji prirast temperature odgovara prirastu temperature po krivulji normiranog razvoja požara danoj u normi ISO 834, odabran je režim u peći koji isključuje utjecaj sporijeg ili bržeg prirasta temperatura (u odnosu na normirani prirast) na mehaničke karakteristike uzoraka.

Uzorci su stavljani u ispitnu peć (inače žarnu), prethodno zagrijanu na neku od predviđenih temperatura (200, 400, 600, 800 i 1000 °C). Nakon 1,5 h u peći na određenoj temperaturi, uzorci su izvađeni i ostavljeni da se hlade na sobnoj temperaturi. Nakon hlađenja uzoraka ispitane su njihove vlačne i tlačne čvrstoće.

Slikama 4.8. do 4.11. prikazan je utjecaj visokim temperatura na vlačnu i tlačnu čvrstoću uzoraka. Svaka točka krivulje dobivena je na temelju triju rezultata ispitivanja kod vlačne čvrstoće te šest rezultata ispitivanja kod tlačne čvrstoće uzorka. Uvidom u slike 4.8. do 4.11. zaključuje se sljedeće:

- Zgura podrijetlom iz Siska daje mikrobeton znatno lošijih mehaničkih karakteristika pri sobnoj temperaturi od agregata za pripremanje mješavina, što se i očekivalo s obzirom na lošiju kvalitetu zrna. Vlačna i tlačna čvrstoća uzoraka sa zgurom iz Splita tek su nešto niže od istih svojstava dobivenih na uzorcima s riječnim agregatom. Mehanička svojstva mješavina s drobljenom opekom i drobljenim crijepom pri sobnoj temperaturi niža su od mehaničkih svojstava referentne mješavine, što se i očekivalo s obzirom na manju tvrdoću zrna u odnosu na riječni agregat.

- Do temperature od 200 °C mješavine s opekom i crijepom pokazuju veći pad vlačne čvrstoće od ostalih mješavina (slika 4.9.), ali blaži pad tlačne čvrstoće od referentne mješavine (slika 4.11.). Nakon te temperature mješavina s opekom pokazuje blaže opadanje mehaničkih svojstava s porastom temperature od referentne mješavine, dok mješavina s crijepom pokazuje čak prirast u vlačnoj čvrstoći na 400 °C. Ostale mješavine pokazuju kontinuirani pad mehaničkih svojstava. Pri izlaganju betona visokim temperaturama razlikuju se tri faze ponašanja materijala s obzirom na čvrstoće: početni gubitak čvrstoće, faza stabilizacije i očvršćivanja te trajni gubitak čvrstoće. Temperaturno područje u kojem pojedina faza nastaje ovisi o vrsti betona. Tako npr. faza stabilizacije i očvršćivanja kod betona obične težine nastaje u području 400 do 450 °C, dok kod laganog betona nastaje u području od 250 do 450 °C. Kako su u ovom ispitivanju mikrobetoni pripremljeni s opekom i crijepom u kategoriji laganog betona, a ostali mikrobetoni u kategoriji betona obične težine, upravo manji raspon temperatura kod „običnih betona“ pri kojima se uobičajeno bilježi

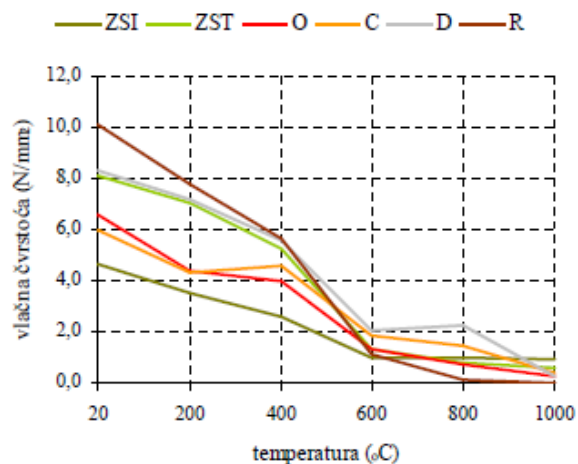
prirast čvrstoće mogao je biti uzrokom da pojava očvršćivanja ne bude zabilježena i kod mješavina obične težine.

- Nakon temperature od 400 °C, mješavina s riječnim agregatom pokazuje izraženiji pad mehaničkih svojstava od svih ostalih mješavina promatranih u okviru ovog ispitivanja. Otpadni materijali (drobljena opeka, drobljeni crijep, zgure) pokazuju tako bolju požarnu otpornost pri izloženosti temperaturama višim od 400 °C od riječnog agregata.

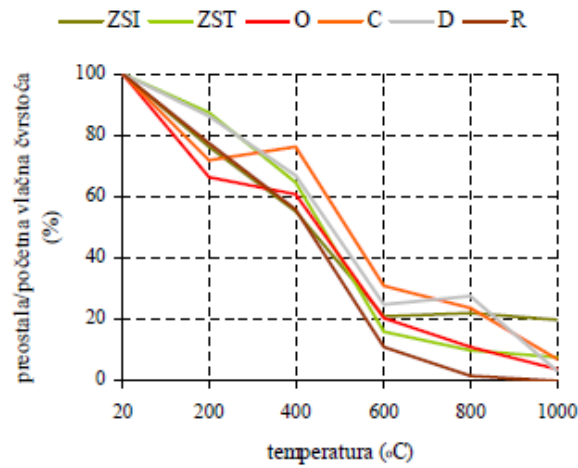
- S obzirom na isti cement u svim mješavinama, dobiveni rezultati pokazuju isključivo utjecaj agregata na ponašanje mikrobetona izloženih visokim temperaturama. Prema ovdje iznesenim rezultatima ispitivanja, postoje naznake kako bi se ovi otpadni materijali mogli rabiti kao agregat u betonu, čime bi se poboljšala požarna otpornost betona prema betonu s uobičajeno

uporabljenim agregatom iz prirodnih izvora.

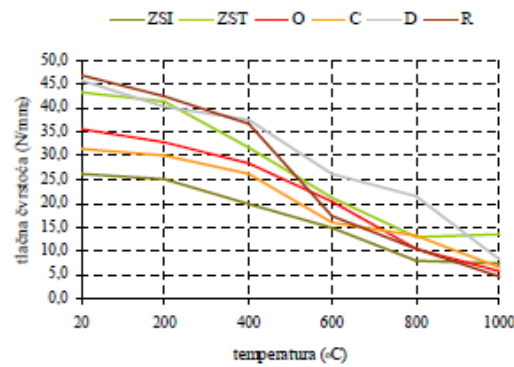
Ovakvi rezultati preliminarnih ispitivanja provedenih na mikrobetonu bit će poticaj za nastavak istraživanja ponašanja betona i s krupnijim agregatom (zrna do 16 mm) pri njegovoj izloženosti požarnom opterećenju.



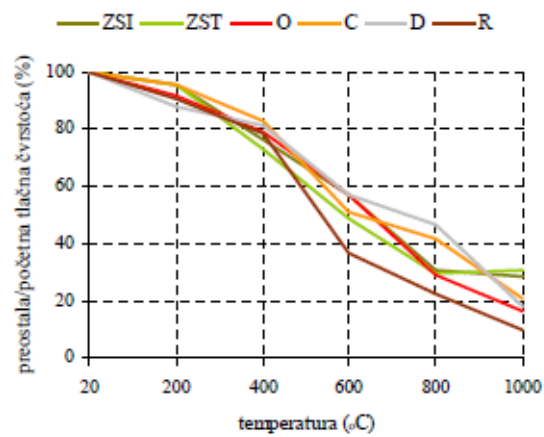
**Slika 4.8** Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću uzoraka s različitim agregatima [5]



**Slika 4.9** Odnos preostale i početne vlačne čvrstoće uzorka s različitim agregatima nakon izloženosti visokim temperaturama [5]



**Slika 4.10** Utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću uzorka sa različitim agregatima [5]



**Slika 4.11** Odnos preostale i početne tlačne čvrstoće uzorka s različitim agregatima nakon izloženosti visokim temperaturama [5]

#### **4.1.5 Zaključak**

U radu se pokazuje mogućnost poboljšanja požarne otpornosti betona isključivo odabirom tipa cementa i agregata manje podložnih djelovanju visokih temperatura. Provedena su preliminarna ispitivanja utjecaja visokih temperatura na mikrobeton sa dva različita tipa cementa – CEM II /B-M (P-S) 32,5R i CAC 75 te mikrobeton s varijacijama u tipu agregata. Uvidom u rezultate ispitivanja došlo se do sljedećih zaključaka:

- Ispitivanja na razini cementa pokazala su bolju požarnu otpornost portlandskoga cementa s dodacima u odnosu na aluminatni cement te znatno različito ponašanje ovih cemenata pri porastu temperature. Činjenica da aluminatni cement pokazuje bolju požarnu otpornost tek izvan temperaturnog raspona tipičnog za požar u građevinama čini ga neprikladnim za uporabu u betonu radi poboljšanja požarne otpornosti.

- Ispitivanja provedena na mikrobetonu sa zgurom domaćeg podrijetla i lomom opekarske industrije pokazuju opravdanost uporabe ovog materijala u svrhu poboljšanja požarne otpornosti mikrobetona. Dobiveni rezultati govore u prilog teoriji da bi agregati nastali na visokim temperaturama potencijalno mogli biti korišteni kao način ostvarivanja bolje požarne otpornosti betona, što bi u idućem razdoblju trebalo detaljnije istražiti.

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

U radu se istražuje smanjenje mehaničkih svojstava četiri različite mješavine lakog betona koje sadrže agregat ekspanzirane gline u kratkom vremenskom razdoblju nakon izlaganja visokom temperaturnom režimu. Istraživanje je pokazalo da tlačna čvrstoća pokazuje dodatno smanjenje i do 10-20%, 96 sati nakon što se ohladi na sobnu temperaturu. Brojčani primjer betonskog stupa izloženog vatri sa četiri strane prikazuje učinak smanjivanja čvrstoće nakon požara na rezidualni kapaciteta opterećenja. Dobiveni rezultati pokazuju da je učinak kratkotrajnog smanjenja tlačne čvrstoće betona u stvarnim strukturama koje su zahvaćene požarom može imati značajan utjecaj na kapacitet nosivosti konstrukcije i treba se uzeti u obzir u građevinskim propisima.

#### 4.2.1 Uvod

Pojava smanjenja tlačne čvrstoće betona nakon djelovanja požara je već zabilježena od strane mnogih istraživača. Njihovi rezultati pokazuju da se tlačna čvrstoća nastoji smanjiti i djelomično vratiti kroz vremensko razdoblje od 1-2,5 godina. Zabilježena su istraživanja koja se odnose na ponašanje betona nakon požara provedena su uglavnom za betone normalne čvrstoće (NSC), visoke čvrstoće (HSC) i samozbijajuće betone (SCC). Međutim, posljedice smanjenja tlačne čvrstoće nakon požara na kapacitet nosivosti još nisu poznate u cijelosti, niti je utjecaj vlage na proces smanjenja dovoljno istražen.

Smanjenje mehaničkih svojstava betona nakon požara je određeno kemijskim i fizikalnim procesima koji se javljaju u betonu nakon hlađenja. Najvažnije su formiranje kalcijeva hidroksida i rehidracija cementa paste. Razina toplinskog oštećenja (razina temperature) i uvjeti vlage nakon procesa hlađenja predstavljaju dva najvažnija faktora za koje se čini da utječu na razinu smanjenja mehaničkih svojstava nakon požara. Oba procesa općenito reguliraju smanjenje tlačne čvrstoće betona, čija se minimalna čvrstoća obično postiže u roku od 1-6 mjeseci. Nakon toga, ovisno o tipu betona, djelomični ili potpuni oporavak tlačne čvrstoće je moguć.

Bez obzira na proces oporavka, mehanička svojstva betona imaju tendenciju smanjenja tijekom dugog vremenskog perioda. To smanjenje može imati značajan utjecaj na rezidualnu nosivost betona, ako je razina smanjenja nakon požara značajna. Važno je napomenuti da se smanjenje čvrstoće betona nakon izloženosti požaru ne uzima se u obzir eksplicitno u zajedničkim inženjerskim građevinskim propisima, budući da se općenito smatra da se ne može doći do značajnog smanjenja čvrstoće u betonu nakon izlaganja vatri.

Većinom se tijekom istraživanja bavi smanjenjem mehaničkih svojstava betona usmjereno na vruća i rezidualna svojstva, koji općenito pokazuju više vrijednosti nego svojstva nakon požara. S druge strane, uzimajući u obzir vrijednosti nakon požara na svojstva može se smatrati realniji pristup u određivanju tlačne čvrstoće betona izloženom požaru. Rezultati prethodno provedenog istraživanja ističu da kratkoročno smanjenje tlačne čvrstoće HSC-a može biti znatno i da to treba uzeti u obzir u analizi procjene požarne otpornost betonske konstrukcije. Cilj predloženog istraživanja je da se dodatno istražiti razina smanjenja čvrstoće u kratkim vremenskim intervalima (48 i 96 sati nakon izlaganja visokoj temperaturi) od četiri različite LWC miješavine kako bi se dobio bolji uvid u ponašanja LWC nakon požara i njegova razina smanjenja nakon požara.

## 4.2.2 Eksperimentalni program

### 4.2.2.1 Oprema i opis uzoraka

Određivanje svojstava nakon požara provedeno je na cilindričnim uzorcima s  $\varnothing 75/225$  mm. 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.

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 .

### 4.2.2.2 Sastav betona

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  $3,14 \text{ kg/dm}^3$ . Superplastifikator je tekući PCE sa specifičnom težinom od  $1,06 \text{ kg/dm}^3$ . 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  $470 \text{ kg/m}^3$ . LWC1 je pripremljen samo sa cementom, LWC2 s cementom i silicijom i LWC4 s cementom i metakaolinom . Karakteristike mješavine dane su u tablici 4.3.

**Tablica 4.3** Karakteristike mješavina [6]

tip dodatka	specifična površina prema	
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	specifična težina (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 vodocemnetnim omjerom. Omjeri pripremljene mješavine prikazani su u tablici 4.4.

**Tablica 4.4** Omjeri mješavina za LWC [6]

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 4.5. Slijeganje, sadržaj zraka i jedinične težine svježeg betona su određene u skladu s EN 12350-2, EN 12350-7 i EN 12350-6.

**Tablica 4.5** Rezultati ispitivanja svježih mješavina betona [6]

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

#### 4.2.2.3 Njegovanje i uvjeti skladištenja

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.



#### 4.2.2.4 Postupak ispitivanja

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.

### 4.2.3 Rezultati

#### 4.2.3.1 Smanjenje tlačne čvrstoće nakon požara

U sljedećem poglavlju prikazani su rezultati smanjenja nakon požara. Tablica 4.6. prikazuje rezultate tlačne čvrstoće na četiri mješavine na sobnoj temperaturi.

**Tablica 4.6** Tlačna čvrstoća na sobnoj temperaturi [6]

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

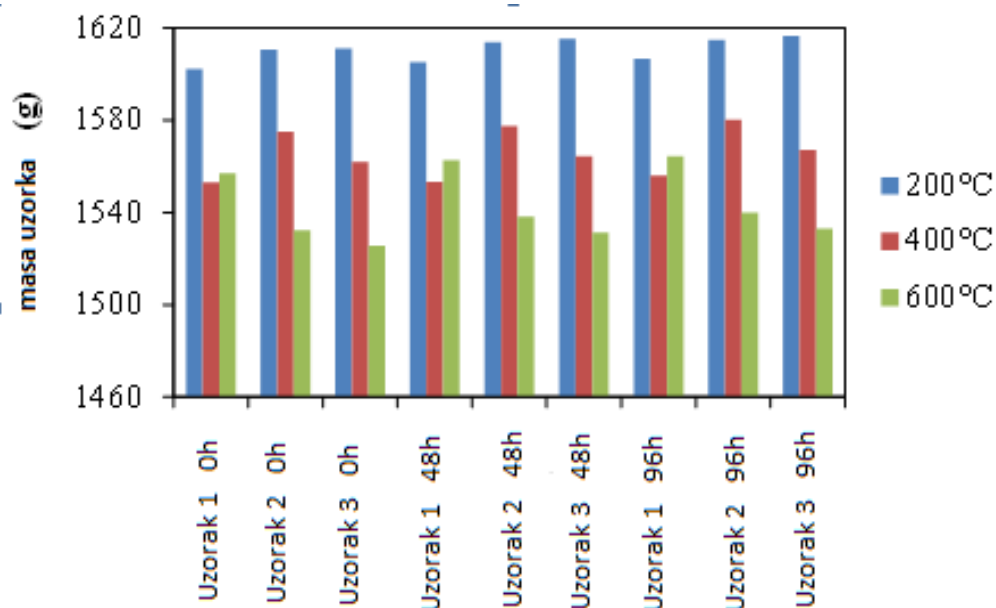
Tablica 4.7. prikazuje rezultate smanjenja tlačne čvrstoće nakon požara nakon izlaganja uzoraka na temperaturi od 400° C za sva četiri mješavine.

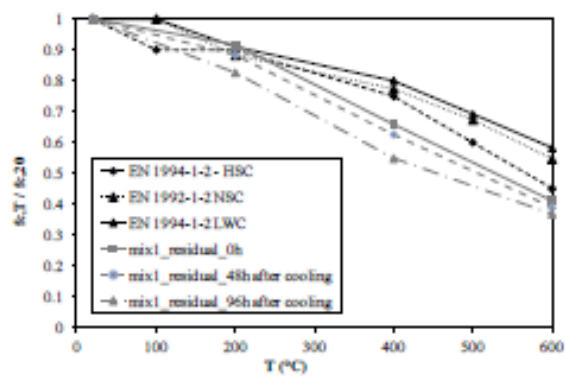
**Tablica 4.7** Smanjenje tlačne čvrstoće nakon početnog hlađenja [6]

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

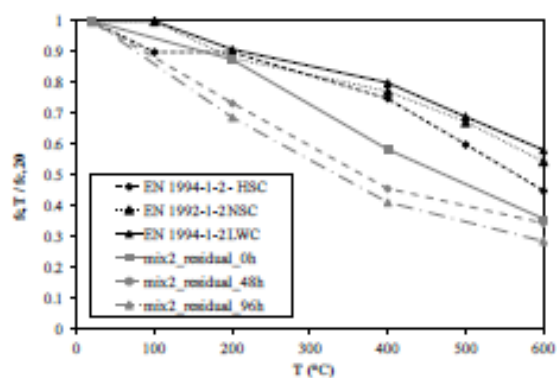
Slika 4.13. prikazuje smanjenje tlačne čvrstoće mješavina neposredno nakon hlađenja i 48 i 96 sati nakon hlađenja. Rezultati su uspoređeni s faktorima za smanjenje uzetih iz Eurocode 2 i Eurokodu 4 za beton visoke čvrstoće, beton normalne težine i lagani beton. Čimbenici smanjenja od Eurokodova su umanjene za 10%, jer su originalne vrijednosti smanjenje od Eurokodova za vruće čvrstoće i općenito su veće u odnosu na početnu rezidualna čvrstoću.

Slika 4.12 prikazuje promjenu mase uzoraka uzetih iz LWC mix3 omjerima u razdoblju do 96 sata nakon hlađenja na tri razine temperature.

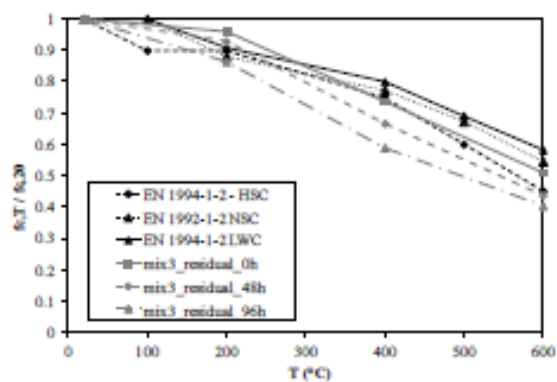
**Slika 4.12** Promjena mase uzoraka tijekom 96 sati nakon hlađenja [6]



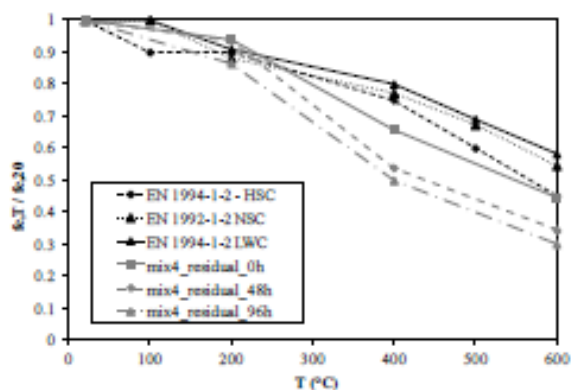
(a) LWC1



(b) LWC2



(c) LWC3

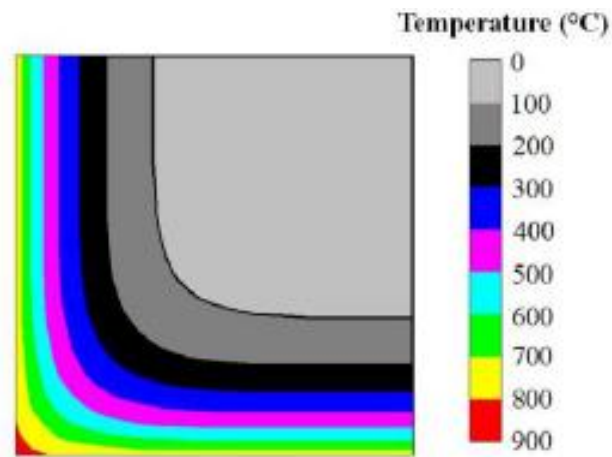


(d) LWC4

Slika 4.13 Rezultati ispitivanja-smanjenje tlačne čvrstoće nakon požara [6]

#### 4.2.3.2 Primjer za procjenu rezidualnog kapaciteta nosivosti

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 4.14.



**Slika 4.14** Temperaturno polje u četvrtini stupa nakon 30 minuta ISO požara [6]

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 4.8. prikazuje rezultate dobivene numeričkom analizom aksijalnog otpor stupa pomoću različitih razina smanjenja nakon požara za tlačne čvrstoće LWC iz slici 2.

**Tablica 4.8** Smanjenja tlačne čvrstoće nakon požara za stupove izložene 30 min ISO vatri[6]

$N_{f,Rd}$ (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

#### 4.2.4 Analiza dobivenih rezultata

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 različitih vrsta agregata od onog koji se koristili u ovom istraživanju. Međutim, faktor smanjenja rezultata za analizirani MGB ističu da se betonske smjese koje sadrže ekspanzirane gline mogu smatrati pouzdanim građevnim proizvodom s odgovarajućom požarnom otpornošću do 600° C.

Rezultati iz slike 4.13 i tablice 4.4 također pokazuju karakteristična smanjenja tlačne čvrstoće MGB (10-20%) u kratkom vremenskom razdoblju od 96 sati nakon hlađenja. 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, kao što je prikazano na slici 4.13.

#### **4.2.5 Zaključak**

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. To je očito zbog smanjenje rezidualne nosivosti kao što je prikazano na jednostavnom primjeru (odjeljak 4.2.3.2) gdje je smanjenje nosivosti nakon požara iznosi otprilike 10%.

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

### **4.3 Smanjenje mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće nakon požara (Neno Torić, Ivica Boko, Bernardin Peroš)**

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 ciljano visoku temperaturu. 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.

#### **4.3.1 Uvod**

Preostala mehanička svojstva običnog betona (OB) i betona velikih čvrstoća (BVČ) predmet su intezivnih eksperimentalnih istraživanja od sredine dvadesetog stoljeća, sa svrhom određivanja ponašanja betona kao građevinskog materijala na visokim temperaturama. Betonom velikih čvrstoća smatra se mješavina betona čiji valjkasti uzorci imaju tlačnu čvrstoću veću od 60 MPa. U preostala mehanička svojstva betona ubrajaju se: tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, dijagrami naprezanje-deformacija te sekantni i tangenti modul elastičnosti

koji predstavljaju osnovne ulazne parametre za numeričke modele mehaničke nosivosti i pouzdanosti konstrukcija.

Pod pojmom preostala svojstva podrazumijevaju se karakteristike materijala nakon djelovanja požara i hlađenja konstrukcije na atmosfersku ili sobnu temperaturu. Eksperimentalne vrijednosti preostalih mehaničkih svojstava ovise o procedurama ispitivanja (režim zagrijavanja, vrijeme održavanja konstantne temperature u uzorku i uvjeti čuvanja uzoraka prije ispitivanja) koje su se uvelike razlikovale kod pojedinih istraživača tijekom vremena. Međutim, osnivanjem udruge RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) definirani su ujednačeni postupci za ispitivanje mehaničkih svojstava betona izloženog visokim temperaturama utemeljeni na iskustvu velikog broja znanstvenika koji pripadaju navedenoj udruzi.

Većina provedenih istraživanja preostalih mehaničkih svojstava pokazuje na izraženiju redukciju mehaničkih karakteristika BVČ-a u odnosu na OB u nižem temperaturnom području, kao i veliko odstupanje rezultata istraživanja u odnosu na pojedini tip betona. Gubitak tlačne čvrstoće BVČ-a pri temperaturama od 200-300 °C iznosi oko 40 %, nakon čega stupanj redukcije lagano opada do temperatura 400-450 °C. Pri temperaturama višim od 450 °C redukcija tlačne čvrstoće BVČ-a i OB-a je u istim omjerima. Potrebno je navesti i da se rezidualna tlačna čvrstoća uzoraka povećava ako je uzorak opterećen pri zagrijavanju, što je poglavito izraženo u višem temperaturnom području s porastom od oko 20 % u odnosu na čvrstoću neopterećenog uzorka.

Dio istraživača pratio je redukciju tlačne čvrstoće tijekom vremena nakon inicijalnog hlađenja uzoraka. Zaključeno je da se tlačna čvrstoća BVČ-a dodatno reducira oko 10 % u odnosu na rezidualnu tlačnu čvrstoću dobivenu nakon hlađenja uzorka na sobnu temperaturu i dostiže svoj minimum 2-8 tjedana nakon inicijalnog hlađenja. Nakon dostizanja minimuma tlačna čvrstoća uzorka lagano raste približno 5 %. Tlačna čvrstoća OB-a ponaša se slično kao i tlačna čvrstoća BVČ-a samo što je redukcija izraženija i iznosi oko 15-20 % s većim porastom čvrstoće, u nekim slučajevima i potpunim povratom rezidualne čvrstoće nakon inicijalnog hlađenja uzorka.

Preostala tlačna čvrstoća BVČ-a doživljava lagani pad do 200°C (u nekim slučajevima i lagani porast) nakon čega slijedi nagli linearni pad u višem temperaturnom području što vrijedi i za rezidualnu tlačnu čvrstoću OB-a.

Degradacija preostalog tangentskog i sekantskog modula elastičnosti za oba tipa betona jest u istim omjerima te je okarakterizirana naglom redukcijom od oko 65 % do 200 °C, u području

na kojem ne dolazi do redukcije modula sve dok temperatura ne prijeđe 300°C i laganim linearnim padom na višim temperaturama.

Dijagrami naprezanje-deformacija dobivaju se pri određivanju tlačne čvrstoće uzorka i okarakterizirani su statičkim modulom elastičnosti, tlačnom čvrstoćom i maksimalnom deformacijom pri slomu uzorka.

Navedeni rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazuju da različiti tipovi mješavina betona, specijalni dodaci (silicijska prašina, zgura, polipropilenska vlakna), granulometrijska krivulja i tip agregata, uvjeti čuvanja, kao i sam materijal beton koji je ocijenjen kao heterogen i anizotropan materijal, uvelike utječu na rezultate ispitivanja rezidualnih karakteristika te da se ponašanje pojedinih parametara može analizirati i uspoređivati jedino kroz trendove ponašanja. Nadalje, činjenica da se preostala svojstva betona mijenjaju nakon inicijalnog hlađenja u vremenu upozorava na potrebu da se karakteristike betona ispituju u određenim vremenskim intervalima, počevši od trenutka kad je uzorak zagrijan na maksimalnu temperaturu, ohlađen na sobnu temperaturu te kad se u hladnom stanju čuvao u laboratorijskim uvjetima određeno razdoblje. Spoznaja o vremenskoj promjenjivosti osnovnih mehaničkih karakteristika za različite betone upućuje na jedinstvenost pojedinog istraživanja koje se provodi za promatrani beton, kao i na činjenicu da eksperimentalna procedura određivanja mehaničkih karakteristika mora biti normirana i u skladu s procedurama ispitivanja koje slijede ostali znanstvenici u području eksperimentalnih istraživanja. Slijedom ovih spoznaja, a radi planiranih istraživanja o ponašanju predgotovljenih šupljih prednapetih ploča na visokim temperaturama, provedena su ispitivanja prikazana u ovome radu.

### **4.3.2 Ispitivanje preostalih mehaničkih svojstava betona visoke čvrstoće**

#### **4.3.2.1 Uvod**

Cilj je ovoga ispitivanja je određivanje preostalih mehaničkih svojstava uzoraka mješavine BVČ-a koja je specifična za proizvodnju predgotovljenih šupljih prednapetih betonskih ploča, uz uporabu najčešće rabljenih eksperimentalnih metoda. Preostala mehanička svojstva određuju se u vremenskom intervalu od 48, 72 i 96 sati nakon inicijalnog hlađenja uzorka da bi se stekao bolji uvid u kratkotrajno smanjenje mehaničkih svojstava u vremenu. Eksperimentalne metode provedene su prema preporukama RILEM-a, i to za ispitivanje tlačne čvrstoće i sekantnog modula elastičnosti u potpunosti, dok je određivanje vlačne čvrstoće provedeno cijepanjem uzoraka (Brazilska metoda) iako je drugačija metoda (vlačni



test) opisana u navedenim preporukama. Također su provedena ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti na uzorcima primjenom ultrazvučne metode (mjerjenje vremena prolaska zvuka kroz uzorak). Istraživači smatraju da je dinamički modul približno jednak inicijalnom tangentnom modulu elastičnosti iako ne postoji direktno fizikalno objašnjenje njihove jednakosti. Sukladno tome, dinamički se modul rabio za procjenu tangentnog modula elastičnosti. Opisana istraživanja provedena su u laboratoriju Zavoda za materijale građevinskog fakulteta u Zagrebu 2010. godine.

#### 4.3.2.2 Sastav betona

U tablici 4.9. dan je sastav ispitne mješavine betona. Frakcija kamenog agregata 0-4 i 4-8 mm podrijetlom je riječni šljunak iz rijeke Neretve u Čapljini. Agregat je, s obzirom na provedenu petrološku analizu, klasificiran kao vapnenački agregat.

**Tablica 4.9** Receptura ispitne mješavine betona[7]

Cement ( $\text{kg/m}^3$ )	425
Frakcija agregata 0-4 mm ( $\text{kg/m}^3$ )	1510
Frakcija agregata 4-8 mm ( $\text{kg/m}^3$ )	266
Vodocementni faktor	0,33-0,34
Plastifikator RHEOFIT 700 (kg)	4,25

#### 4.3.2.3 Osnovni zahtjevi procedure ispitivanja

Zahtjevi procedure ispitivanja poglavito se odnose na postizanje zadanog režima zagrijavanja i hlađenja uzoraka, upotrebu uzoraka karakterističnih dimenzija, specificiranu brzinu nanošenja opterećenja te propisanu starost uzoraka.

Slijedom uvjeta koje RILEM zahtijeva za oblik i dimenzije uzoraka (u ovisnosti o maksimalnom zrnu agregata), uzorci betona za ispitivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti cilindričnog su oblika s odnosom promjer/visina 1/3 (75/225 mm), dok su za ispitivanje vlačne čvrstoće upotrebljeni uzorci s odnosom 1/2 (75/150 mm). Uzorci za ispitivanje stari su najmanje 5 mjeseci što zadovoljava kriterije RILEM-a (minimalna je starost uzoraka 3 mjeseca). Uzorci su se prethodno zagrijavali 24 sata na temperaturu 105°C prije početka ciklusa zagrijavanja na visoke temperature radi odstranjivanja slobodne vode u uzorcima.

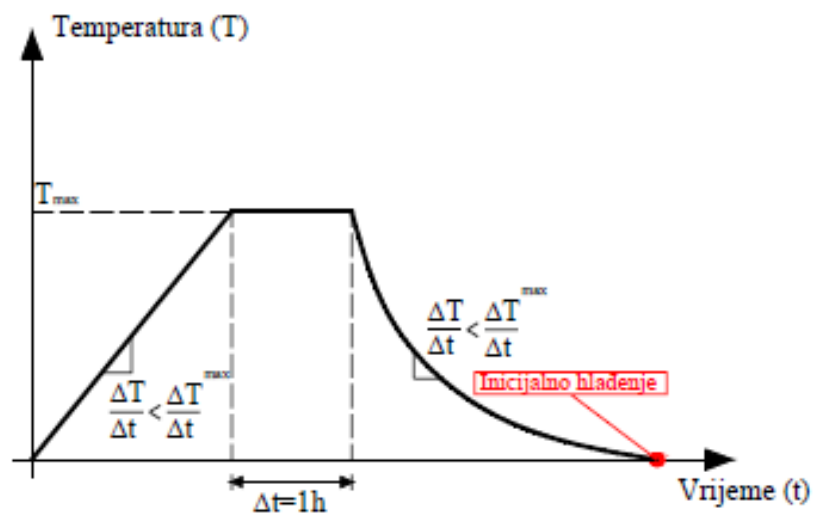
#### 4.3.2.3.1 Postupak režima zagrijavanja i opterećenja uzoraka prema preporuci RILEM-a

U tablici 4.10 je pregled osnovnih parametara ispitivanja koji je preporučio RILEM ovisno o tipu ispitivanja.

**Tablica 4.10** Parametri režima zagrijavanja i opterećivanja uzoraka prema RILEM[7]

Vrsta parametra	Tlak	Vlak	Modul
Stupanj zagrijavanja i hlađenja uzorka (°C/min)	$\leq 2$	$\leq 1,25$	$\leq 2,5$
Stupanj nanošenja opterećenja (MPa/s)	$0,5 \pm 0,1$	0,04	$0,5 \pm 0,1$
Vrijeme držanja uzorka na konst. temp. (min)	$60 \pm 5$	$60 \pm 5$	$60 \pm 5$

Usvojena eksperimentalna procedura zahtijeva da se ispitivanje obavlja u serijama od najmanje 3 uzorka te da se na jednom referentnom uzorku na površini bilježi porast temperature u vremenu s unaprijed definiranim maksimalnim temperaturnim gradijentom koji promjena temperature na površini uzorka ne smije premašiti (tablica 4.10). Na slici 4.15 prikazan je ciklus zagrijavanja uzorka s karakterističnim parametrima.



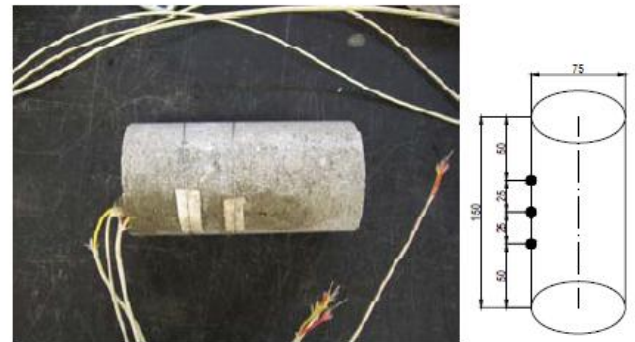
**Slika 4.15** Prikaz ciklusa zagrijavanja uzoraka [7]

#### 4.3.2.3.2 Mjerenje temperature u uzorcima

Pri zagrijavanju i hlađenju uzoraka mjerile su se temperature na površini uzoraka u trima točkama (slike 4.16 i 4.17). Uzorak koji služi za temperaturna mjerenja naknadno je obrađen i u njega je urezan uzdužni kanal dubine 5 mm u koji se postavljaju termoparovi. Termoparovi se vezuju za površinu betona vatrostalnim epoksidnim ljepilom. Upotrijebljeni termoparovi su tipa K (NiCr – Ni) s debljinom žice 0,7 mm. Temperatura uzorka određena je kao srednja vrijednost temperaturnih mjerenja u tri točke uzorka. Prirast temperature na površini uzorka kontrolira se u vremenskom intervalu od jedne minute.



**Slika 4.16** Položaj mjernih točaka na uzorku za određivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti [7]



**Slika 4.17** Položaj mjernih točaka na uzorku za određivanje vlačne čvrstoće [7]

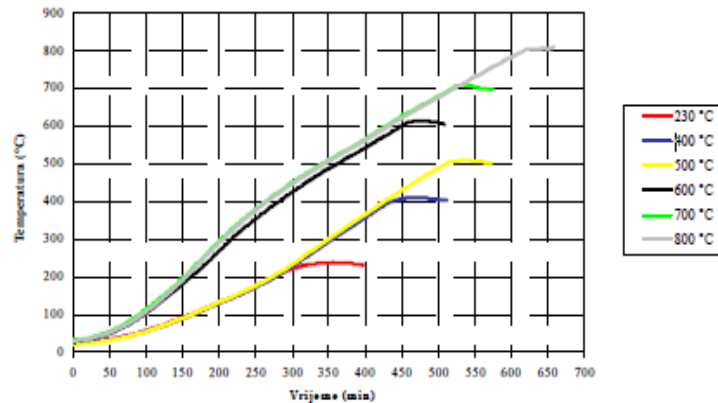
Brzina zagrijavanja i hlađenja uzorka dodatno je ograničena maksimalno dopuštenom temperaturnom razlikom između triju mjernih točaka uzorka. Maksimalno dopuštene temperaturne razlike za ispitivanje modula elastičnosti, tlačne i vlačne čvrstoće navedene su u tablici 4.11.

Nakon dostizanja ciljane temperature uzorak se jedan sat drži na toj temperaturi nakon čega prestaje ciklus zagrijavanja te se uzorak ostavlja u peći gdje se hladi zajedno s komorom. Hlađenje uzoraka u komori ovisi o maksimalnoj temperaturi na koju se uzorak zagrijava, s ukupnim trajanjem od 12 do 16 sati.

Na slici 4.17 prikazane su dobivene temperature na površini uzorka za pojedinu razinu zagrijavanja uzoraka – ispitivanje tlačne čvrstoće.

**Tablica 4.11** Dopuštene temperaturne razlike u mjernim točkama uzorka [7]

$\Delta T_{\max}$ (°C)		Temp. uzorka (°C)
Tlak i modul	Vlak	
1	1	20
10	5	100
20	20	750



**Slika 4.17** Prikaz prosječnih temperatura u uzorcima za određivanje tlačne čvrstoće [7]

#### 4.3.2.4 Eksperimentalno određivanje tlačne čvrstoće uzoraka i dijagrama naprezanje-deformacija

Tlačna čvrstoća uzoraka određena je postupkom koji je definirao RILEM; pritom su se parametri nanošenja opterećenja na uzorak i brzine zagrijavanja uzorka rabili prema tablici 4.9. Nakon hlađenja na sobnu temperaturu (inicijalno hlađenje) uzorak se ispituje u preši. Tijekom nanošenja opterećenja na uzorak bilježi se prirast sile na uzorak u vremenu kao i pomak čelične ploče preše u vremenu (LVDT uređaj na ploči preše).

Omjer sile u preši i ploštine uzorka predstavlja naprezanje u uzorku, a pomak preše podijeljen s duljinom uzorka predstavlja relativnu uzdužnu deformaciju. Iz naprezanja u uzorku i relativne uzdužne deformacije u istom trenutku ispitivanja može se konstruirati dijagram naprezanje- deformacija uzorka.

#### 4.3.2.5 Eksperimentalno određivanje vlačne čvrstoće uzoraka

Vlačna čvrstoća uzoraka određena je cijepanjem uzoraka po izvodnici. Uzorci se zagrijavaju po strožem kriteriju maksimalno dopuštenoga temperaturnoga gradijenta prema tablici 4.9.

Nakon hlađenja na sobnu temperaturu uzorak se postavlja u prešu s posebnim uloškom s kojim se uzorak opterećuje poprečno po izvodnici. Pri ispitivanju bilježi se vrijednost maksimalne sile pri kojoj dolazi do cijepanja uzorka te se računa vlačna čvrstoća na temelju sljedećeg izraza:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi Ld} \quad (2)$$

gdje je:

$f_{ct}$  – vlačna čvrstoća uzorka (N/mm<sup>2</sup>)

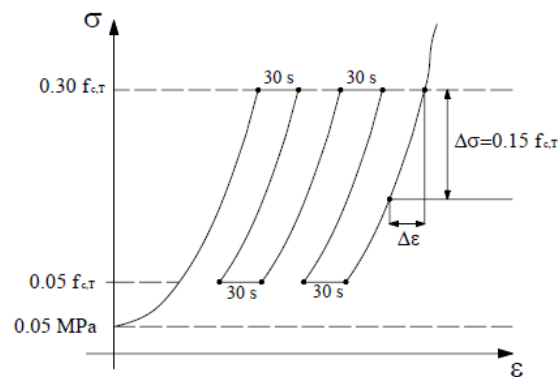
$F$  – sila pri kojoj dolazi do sloma uzorka (N)

$L$  – duljina uzorka (mm)

$d$  – promjer uzorka (mm).

#### 4.3.2.6 Eksperimentalno određivanje sekantnog modula elastičnosti uzorka

Postupak ispitivanja provodi se prema preporuci RILEM-a. Uzorci se nakon procesa zagrijavanja i hlađenja, koji je istovjetan onome za određivanje tlačne čvrstoće, postavljaju u prešu i opterećuju cikličkim opterećenjem kako je prikazano na slici 4.18.



**Slika 4.18** Shema opterećenja uzorka za određivanje sekantnog modula elastičnosti [7]

Pri opterećivanju uzorka prati se relativni pomak  $\Delta l$  između dviju točaka uzorka koje se nalaze na međusobnoj udaljenosti  $l$  (smještene u trećinama visine uzorka) i to na dva mjerna mjesta.

Sekantni modul određuje se izrazom:

$$E_{sc} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

gdje je:

$$\Delta\sigma = 0.15 f_{c,t}$$

$$\Delta\varepsilon = |\varepsilon_{0.3f_{c,t}} - \varepsilon_{0.15f_{c,t}}|$$

$f_{c,T}$  – rezidualna tlačna čvrstoća uzorka na temperaturi  $T$  (MPa).

#### 4.3.2.7 Eksperimentalno određivanje dinamičkog modula elastičnosti uzoraka

Dinamički modul elastičnosti određuje se ultrazvučnom metodom tako da se kroz uzorak puštaju ultrazvučni valovi, nakon čega se na uređaju očitava vrijeme prolaska valova kroz uzorak. Iz vremena prolaska ultrazvuka kroz uzorak računa se brzina prolaza valova, a nakon toga se dinamički modul određuje se izrazom:

$$E_c = \frac{v^2 \rho (1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{(1 - \mu_d)} \quad (4)$$

gdje je:

$v$  – brzina ultrazvuka (m/s)

$\rho$  - gustoća uzorka (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu_d$  – Poissonov koeficijent.

#### 4.3.3 Rezultati određivanja preostalih mehaničkih svojstava

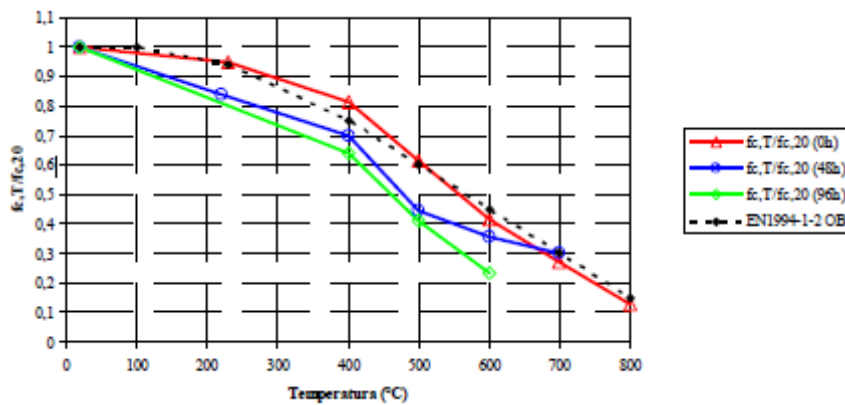
Rezultati su u bezdimenzionalnom obliku tako da se čvrstoća  $f_{i,T}$  za temperaturu  $T$  podijeli s referentnom čvrstoćom uzorka na sobnoj temperaturi  $f_{i,20}$ , gdje je indeks  $i$  oznaka pojedine čvrstoće. Rezultati se odnose na trenutak inicijalnog hlađenja uzorka (0 sati), te 48, 72 i 96 sati nakon inicijalnog hlađenja uzorka. Rezultati određivanja mehaničkih svojstava za svaku temperaturnu razinu dobiveni su kao srednja vrijednost pojedine karakteristike od tri ispitna uzorka. U tablici 4.12 dane su vrijednosti mehaničkih svojstava pri sobnoj temperaturi. U nastavku su opisani rezultati ispitivanja smanjenja tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti za pojedini temperaturni nivo zagrijavanja uzorka kao i usporedbe rezultata s vrijednostima u EN1992-1-2 [5] i EN1994-1-2 [4] za obični beton i beton velike čvrstoće. Iz rezultata ispitivanja smanjenja tlačne čvrstoće i iz usporedbe s vrijednostima u eurokodu (slike 4.19 i 4.20), očito je da se trend smanjenja tlačne čvrstoće ispitivane mješavine slaže s trendom smanjenja koji je karakterističan za običan beton, to više što dijagram smanjenja tlačne čvrstoće nema izraženu razinu (100-300° C) na kojoj nema smanjenja tlačne čvrstoće, generalno karakterističan za betone velikih čvrstoća.

Nadalje, rezultati ispitivanja preostale tlačne čvrstoće neposredno nakon hlađenja poklapaju se s dijagramima smanjenje koje predlaže EN1992 za obične betone. Rezultati ispitivanja smanjenje tlačne čvrstoće 48 i 96 sati nakon inicijalnog hlađenja ne poklapaju se s predloškom EN1992 i približno su jednaki dijagramima smanjenja koji su predloženi kao novi model za smanjenje tlačne čvrstoće betona velikih čvrstoća. Na slici 4.21 prikazani su

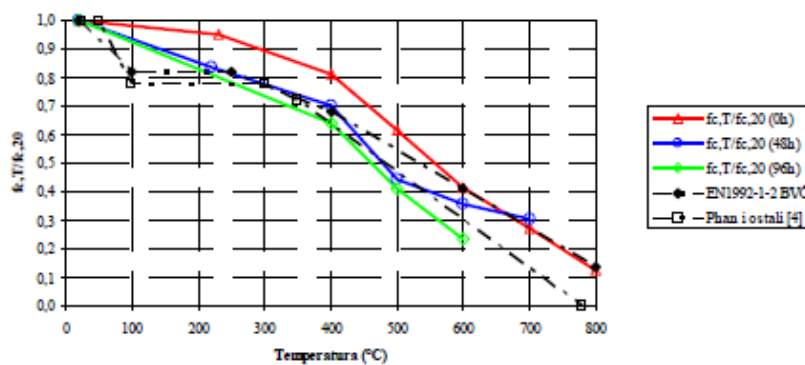
rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za trenutak inicijalnog hlađenja uzorka (0 sati) i 48 sati nakon inicijalnog hlađenja te usporedba s modelom smanjenja u EN1992-1-2.

**Tablica 4.12** Vrijednost mehaničkih svojstava ispitne mješavine betona na sobnoj temperaturi [7]

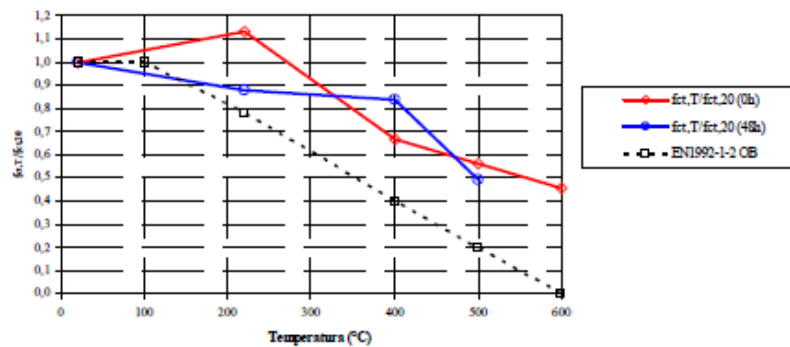
Vrsta parametra (Mpa)	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Srednja vr.	Stand. Dev.
Tlačna čvrstoća	63,9	69,3	68,9	67,4	3,0
Vlačna čvrstoća	5,3	4,7	5,2	5,1	0,3
Sekantni modul	37964,0	39684,0	37098,0	38159,0	1354,0
Tangentni modul	41056,0	45842,0	45484,0	44127,0	2666,0



**Slika 4.19** Smanjenje tlačne čvrstoće u vremenu i usporedba s EN1994-1-2: BSČ [7]

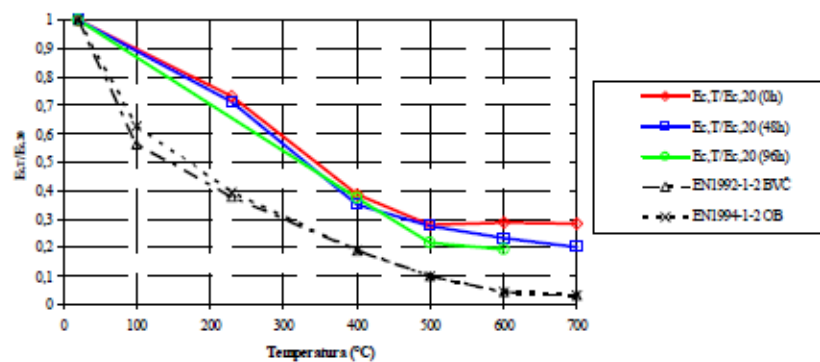


**Slika 4.20** Smanjenje tlačne čvrstoće u vremenu i usporedba s EN1992-1-2: BVČ [7]



**Slika 4.21** Smanjenje vlačne čvrstoće  $f_{ct}$  u vremenu i usporedba s EN1992-1-2: BSČ [7]

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće pokazuju povećanje vlačne čvrstoće u temperaturnom području oko 200 °C, a to upućuje na mogući porast energije sloma betona pri zagrijavanju pa stoga i veće vlačne čvrstoće uzorka. Model smanjenja vlačne čvrstoće predložen prema EN1992 ne poklapa se s dobivenim rezultatima i daje rezultate koji su na strani sigurnosti. Velika odstupanja mogla bi se objasniti ako je poznat točan ispitni postupak po kojem su određeni dijagrami smanjenja vlačne čvrstoće prema EN1992 (određivanje čvrstoće cijepanjem, savijanjem ili čisti vlačni test).



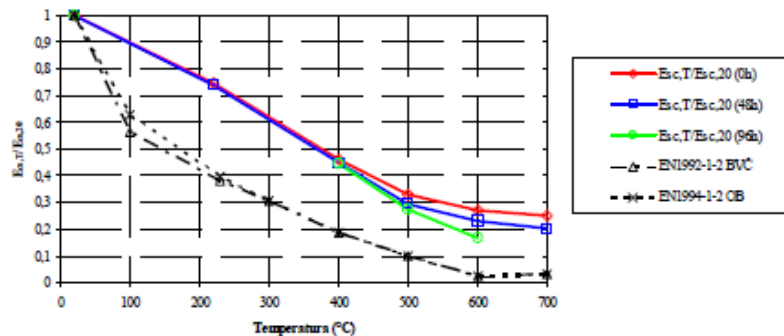
**Slika 4.22** Redukcija tangentskog modula elastičnosti  $E_c$  u vremenu i usporedba s EN1992-1-2 i EN1994-1-2: BSČ i BVČ [7]

Rezultati ispitivanja smanjenja tangentskog modula elastičnosti (slika 4.22) pokazuju naglu redukciju modula elastičnosti, a to je u skladu s činjenicom da temperatura ima jači utjecaj na elastično ponašanje materijala negoli na njegovo krajnje granično stanje sloma (definirano tlačnom čvrstoćom). Iz dijagrama se vidi i veliko odstupanje rezultata ispitivanja tangentskog modula u odnosu na vrijednosti koje su dane u EN1992-1-2 i EN1992-1-4. Razlog tolikog odstupanja jest što krivulje naprežanjedeformacija prema eurokodu sadrže i dodatne



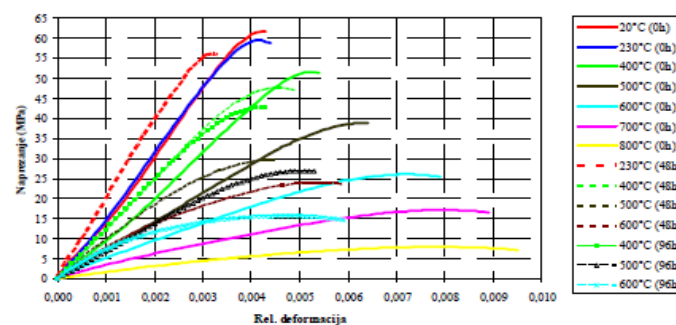
deformacije koje se pojavljuju pri djelovanju visokih temperatura u betonu (deformacija puzanja i prolazna deformacija) koje smanjuju tangenti i sekantni modul elastičnosti i u ishodištu i na cijeloj krivulji naprezanje-deformacija.

Rezultati ispitivanja sekantnog modula elastičnosti (slika 4.23.) u smislu trenda ponašanja jako su slični rezultatima ispitivanja tangenta modula elastičnosti te su rezultati ispitivanja tangenta modula otprilike 15-20 % veći od rezultata ispitivanja sekantnog modula.



**Slika 4.23** Smanjenje sekantnog modula elastičnosti  $E_{sc}$  u vremenu i usporedba s EN1992-1-2 i EN1994-1-2: BSČ i BVČ [7]

Dijagrami naprezanje-deformacija dobiveni su uprosječivanjem vrijednosti naprezanja za istu deformaciju natri ispitivana uzorka. Prikaz rezultata za vremenski interval od 0 do 96 sati nakon inicijalnog hlađenja nalazi se na slici 4.24.

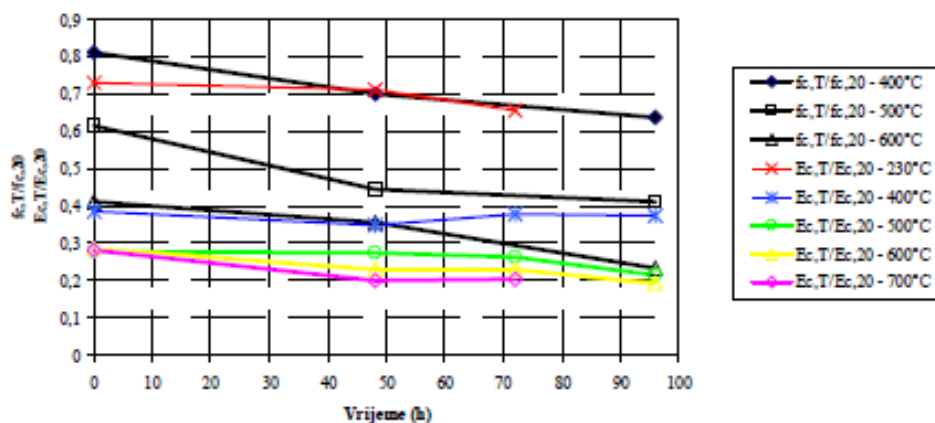


**Slika 4.24** Dijagrami naprezanje-deformacija uzoraka za različite razine temperature u ovisnosti o vremenu [7]

Dijagrami naprezanje-deformacija uzoraka dobivenih pri određivanju tlačne čvrstoće uzoraka pokazuju izraženo povećanje granične deformacije pri slomu, a to je u skladu s rezultatima drugih istraživača. Dijagrami naprezanje-deformacija (slika 4.24) pokazuju, kao druga preostala svojstva, promjenjivost u vremenu, s povećanjem tangenta modula elastičnosti,

što nije u skladu s eksperimentalno određenim vrijednostima dvaju modula. Naime, iz dijagrama naprezanje-deformacija za temperaturne razine 230 i 400°C, 48 i 96 sati nakon inicijalnog hlađenja vidi se, povećanje tangentnog modula što nije u skladu s dijagramom smanjenja tangentnog modula na slici 4.22. Povećanje tangentnog modula uzrokovano je umjetnim putem zato što je na uzorcima, prije nego što im je određena tlačna čvrstoća, primijenjen postupak određivanja sekantnog modula elastičnosti, pri čemu je uzorak opterećen između 5 i 30 % vrijednosti tlačne čvrstoće pri promatranoj temperaturi koja uzrokuje zbijanje uzoraka.

Promjena tangentnog modula i tlačne čvrstoće u intervalu od 0 do 96 sati nakon inicijalnog hlađenja uzoraka prikazana je na slici 4.25. Vidljiva je izrazita varijabilnost tlačne čvrstoće od oko 20 % za kratki vremenski interval, dok je variranje tangentnog modula u granicama do 10 %. Također, iz dijagrama se vidi da krivulje vremenskog smanjenja za pojedine karakteristike imaju različit stupanj opadanja za pojedinu temperaturnu razinu.



**Slika 4.25** Smanjenje tlačne čvrstoće i tangentnog modula u vremenu nakon inicijalnog hlađenja [7]

#### 4.3.4 Analiza dobivenih rezultata

S gledišta vremenskih promjena preostalih svojstava, najveće se promjene događaju kod tlačne čvrstoće koja se u kratkom vremenskom intervalu reducira i do 20 % što nije u skladu s rezultatima drugih istraživača koja pokazuju da se tolika razina smanjenja pojavljuje u puno duljem vremenskom intervalu (minimalno 15 dana nakon inicijalnog hlađenja). Ta činjenica pridonosi općenitom zaključku da se navedeni beton, iako prethodno klasificiran kao beton visoke čvrstoće, zbog izlaganja visokim temperaturama ponaša kao obični beton

(OB doživljava minimum redukcije mnogo prije nego BVČ). Također, iz dijagrama smanjenja tlačne čvrstoće vidi se da se unutar intervala od 96 sati pojavljuje znatno smanjenje trenda opadanja tlačne čvrstoće, a to može značiti da smanjenje tlačne čvrstoće za ovu mješavinu betona dostiže svoj minimum mnogo prije nego što je opaženo kod drugih istraživača.

Rezultati redukcije vlačne čvrstoće u vremenu upućuju na to da će i vlačna čvrstoća pokazati trend smanjenja prethodno opažen kod tlačne čvrstoće, iako nije dostupan dovoljan broj rezultata smanjenja vlačne čvrstoće u vremenu da bi se mogao donijeti siguran zaključak o konačnom smanjenju ili o općenitom ponašanju trendasmanjenja vlačne čvrstoće.

Veličina smanjenja tangentsnog i sekantsnog modula u vremenu pokazuje da se obje veličine zanemarivo mijenjaju tokom vremena, a to pokazuje da isti parametri koji utječu na smanjenje tlačne čvrstoće pri visokim temperaturama utječu i na smanjenje modula elastičnosti, međutim, nakon hlađenja, kemijski procesi, kao što je parcijalna rehidratacija cementne paste, imaju veći utjecaj na smanjenje tlačne čvrstoće nego što je to slučaj kod modula elastičnosti – čija je veličina smanjenja direktno određena veličinom temperaturnog oštećenja (ekspanzije) betona.

S obzirom na provedena istraživanja, buduća ispitivanja odnosit će se na određivanje preostalih svojstava na uzorcima starosti od 1-2 mjeseca (mjereno od trenutka inicijalnog hlađenja). Dodatna istraživanja potrebna su da bi se odredio minimum vrijednosti preostalih svojstava kao i njihova konačna vrijednost. Rezultati bi u konačnici dali kompletan uvid u mehaničko ponašanje betona nakondjelovanja požara.

#### **4.3.5 Zaključak**

Rezultati smanjenja preostalih mehaničkih svojstava dobivenih ispitivanjem navedene mješavine betona pokazuju izrazitu promjenjivost u kratkom vremenskom intervalu (96 sati) posebno za tlačnu čvrstoću betona, dok modul elastičnosti ne pokazuje značajniju promjenjivost u navedenom intervalu. Analizom trenda ponašanja pojedinih mehaničkih svojstava utvrđeno je da ispitivani beton, iako prethodno klasificiran kao beton visokih čvrstoća, pokazuje karakter ponašanja na visokim temperaturama specifičan za običan beton – što je u konačnici pozitivan podatak zato što betoni velikih čvrstoća pokazuju smanjenje mehaničkih svojstava višeg reda u odnosu na obični beton. Razlog je u činjenici što promatrana mješavina betona nema klasičnih dodataka koji su karakteristični za beton velikih čvrstoća, a razlog je dobivanja velike tlačne čvrstoće na sobnoj temperaturi u niskoj

vrijednosti vodocementnog omjera. S obzirom na dosad provedena istraživanja smanjenja mehaničkih svojstava u vremenu, planiraju se provesti opsežnija istraživanja određivanja mehaničkih karakteristika na duži vremenski interval, kao i njihovo određivanje dok je uzorak betona u vrućem stanju, što bi odgovaralo ispitivanju mehaničkih svojstava betona u trenutku djelovanja požara.

#### **4.4 Rezidualna čvrstoća betona visokih uporabnih svojstava sa dodatkom zgure iz visokih peći izloženog povišenim temperaturama (Jianzhuang Xiaoa, Meng Xiea, Ch. Zhangb)**

Eksperimentalni program je osmišljen i provodi se za studiju rezidualne tlačnog ponašanje betona visokih performansi (HPC) s zgurom iz visokih peći - troske ( BFS ) na temperaturi u rasponu od 20 do 800 °C. Rezidualna tlačna čvrstoća kocke ispituje se te se istražuje odnos između rezidualne čvrstoće na pritisak i temperatura na temelju uzoraka grijane kocke (100mm x100mm x 100mm ). Na osnovu grijanih uzoraka prizme dobiveni su rezultati krivulje naprezanje-deformacije, analizirani učinci temperature na preostalu tlačnu čvrstoću prizme, deformacije i modul elastičnosti.

##### **4.4.1 Uvod**

Beton visokih uporabnih svojstava (HPC) ima bolja ekonomična, arhitektonska i mehanička svojstva od betona normalne čvrstoće (NSC). Visoka čvrstoća, dobra trajnost i mala propusnost HPC dovodi do povećanog korištenja HPC u različitim granama građevinarstva, osobito u nekim posebnim konstrukcijama izloženim teškim uvjetima. U ovoj studiji se istražuje ponašanje i rezidualna svojstva HPC-a nakon što je beton podvrgnut povišenim temperaturama.

Učinci visoke temperature na mehanička svojstva betona su istraženi još 1940-te godine. U 1960-ih i 1970-ih, zbog povećanih zahtjeva za otpornost konstrukcije na vatru promovirala su se ispitivanja i modeliranje svojstva betona podvrgnutih visokim temperaturama, ali većina istraživanja je bila ograničena na NSC. Od 1980-ih, neki eksperimenti su počeli proučavati učinke visokih temperatura na ponašanje betona visoke čvrstoće HSC. Prethodna istraživanja

su pokazala da je HSC osjetljiv na eksplozivnu ljuštenja kada je podvrgnut temperaturi koja brzo raste, visoke temperature induciraju gubitak čvrstoće i krutosti ali s druge strane, povećavaju elastične deformacije i puzanje. Primijećeno je da na povišenim temperaturama beton veće čvrstoće ima veću brzinu gubitka čvrstoće od betona s nižom ocjenom čvrstoće. Prijašnje studije su pokazale da oštećenje HPC požarom ima dvije karakteristične komponente: jedna je degradacija mehaničkih svojstva uzrokovana toplinski induciranim promjena u mikrostrukturi HPC, a drugi je rast pukotina unutar HPC što je rezultat uglavnom unutarnjih tlakova. Nedavni rezultati požarnih ispitivanja pokazuju da postoje očite razlike između svojstava HSC/HPC i NSC nakon što je podvrgnut visokim temperaturama. Dodatak zgure iz visokih peći (BFS) pridonosi niskoj propusnosti HPC, dakle poboljšanje njegove trajnosti. Međutim, učinci povišene temperature na mehanička svojstva HPC-BFS još uvijek nisu dobro shvaćeni.

Potaknuti tim činjenicama, provedena su eksperimentalna istraživanja o učincima povišenim temperaturama na HPC-BFS. Tlačna čvrstoća kocke HPC-BFS odabrana za ispitivanje je veća od 50MPa. Uzorci i kocke i prizme/cilindra su dizajnirani i testirani na utjecaj temperature na rezidualna tlačna svojstva, uključujući ponašanje loma, tlačna čvrstoća, deformaciju, modul elastičnosti i Poissonov koeficijent. Na temelju eksperimentalnih rezultata, predložene su veze naprezanje-deformacije za HPC-BFS nakon izlaganja povišenoj temperaturi.

## **4.4.2 Eksperimentalni dio istraživanja**

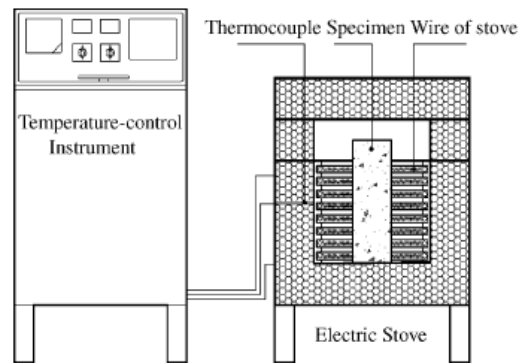
### **4.4.2.1 Uzorci**

Uzorci ovog istraživanja sastoji se od HPC - BFS kocke ( $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ ) i prizme ( $100 \times 100 \times 300 \text{ mm}^3$ ). Gustoća betona na sobnoj temperaturi je  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Izmjereno je slijeganje svježeg betona veće od 200 mm. Uzorci su podvrgnuti požaru nakon 150 dana sušenja u prirodnom okruženje. Uzorci su grijani na pet različitih temperatura (tj  $20^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$  i  $800^\circ\text{C}$ ) i to grupirani po tri uzorka kocke i tri prizme na svakoj razini temperature.

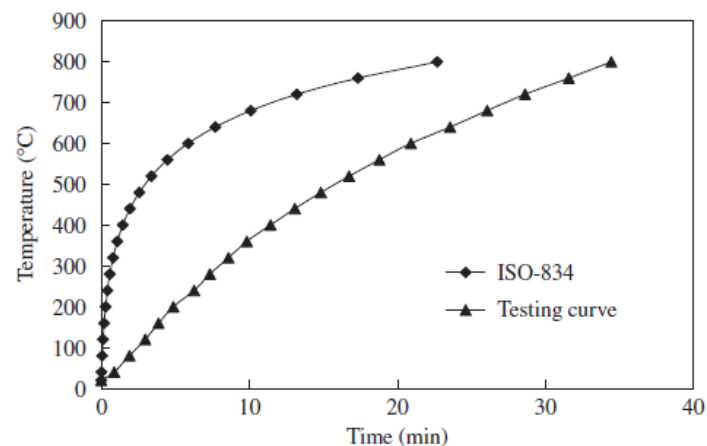
### **4.4.2.2 Plan zagrijavanja**

Oprema za podizanje temperature je električna peć , gdje se može kontrolirati temperatura od 0 do  $1200^\circ\text{C}$  iz TE serije instrumenta s preciznosti od  $20^\circ\text{C}$  (slika 4.26). Krivulja grijanja je prikazana na slici 4.27 i uspoređuje se s odgovarajućom ISO- 834

krivuljom. Uzorci se zagrijevaju u kontroliranim uvjetima, približnom stopom porasta od  $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Budući da temperatura unutar uzorka treba biti ravnomjerno raspoređena, a prema zaključcima Mohamedbhai [11], temperatura se održava na  $200^{\circ}\text{C}$  - 3 h,  $400^{\circ}\text{C}$  - 2.5h i 2 sata za sve ostale temperature. Tada se zagrijani uzorak vadi iz peći i polako ohladi na zraku u prostoriji sobne temperatura. Tijekom požarnih testova, nije uočeno eksplozivno ljuštenje uzoraka.



**Slika 4.26** Oprema za gijanje uzoraka[8]



**Slika 4.27** Krivulja grijanja[8]

#### 4.4.2.3 Plan nanošenja tlačnog opterećenja

Oprema za tlačno opterećenje na uzorke kocke i prizme je s maksimalnim kapacitetom 2000 kN. Kako bi se izmjerila točna uzdužna i poprečna naprežanja na mjestu 150 mm od vrha uzorka (tj, u pola visine uzorka), dizajnirana je posebno punjena polica što. Prije testiranja, prizma je predopterećena na oko 10% čvrstoće kocke. Predopterećenje se ponovi tri

puta kako bi se osiguralo usklađenje opterećenja. Računalo prima automatski sve izmjerene podataka, uključujući uzdužno opterećenje kao i uzdužne i poprečne deformacije. U isto vrijeme, krivulja naprezanje-deformacije se automatski očitava.

#### 4.4.3 Rezultati ispitivanja i analiza rezultata

##### 4.4.3.1 Uzorci kocke

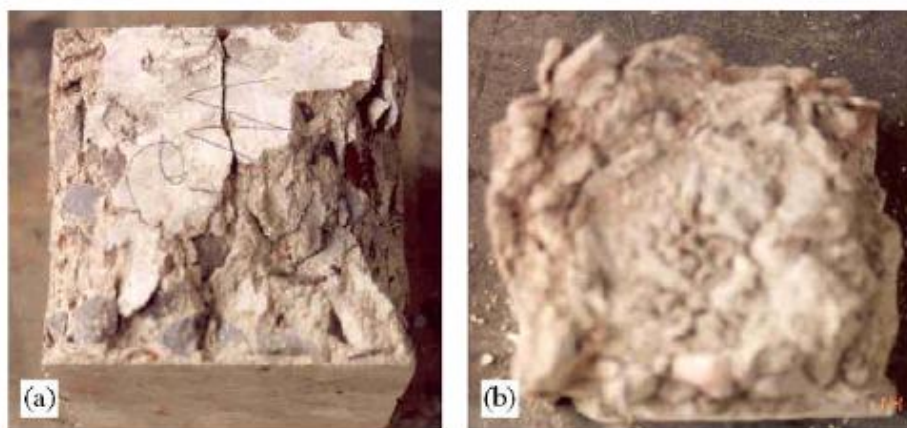
Nakon hlađenja, uzorci kocke se čuvaju 15 dana na sobnoj temperaturi, a zatim ispituju na univerzalnom test stroj. Srednje vrijednosti gubitka mase (odmah nakon što se stavi na povišenu temperaturu) i rezidualna tlačna čvrstoća (15 dana nakon što je povišena temperatura) na svakoj razini izloženosti temperature su navedene u tablicama 4.13 i 4.14. Treba primijetiti da u tablici 4.14 gubitak mase može uključivati sadržaj vlage i kada temperatura je vrlo visoka, kao što je 800 °C. Iz tablice 4.13 i 4.14 može se uočiti je da se povećava gubitak mase dok se rezidualna tlačna čvrstoća kocke smanjuje s povećanjem izloženost temperaturi. Dva tipična loma uzorka grijane kocke nakon nanošenja tlačnog opterećenja su prikazana na slici 4.28.

**Tablica 4.13** Srednje vrijednosti gubitka mase [8]

Temperatura grijanja(°C)	20	200	400	600	800
masa prije grijanja (g)	2404	2404	2420	2459	2433
masa nakon grijanja (g)	2404	2316	2315	2293	2225
gubitak mase (%)	0	3.7	4.3	6.8	8.5

**Tablica 4.14** Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće [8]

Povećanje temperature (°C)	Čvrstoća kocke (MPa)		Čvrstoća prizme (MPa)	
	Test	Posječno	Test	Prosječno
20	64.0	64.0	48.9	55.1
	57.2		53.5	
	70.8		62.9	
200	59.0	55.7	35.7	37.6
	55.6		13.8	
	52.6		39.5	
400	38.6	39.3	25.5	24.0
	36.2		23.0	
	43.0		23.6	
600	33.2	32.2	16.6	16.8
	32.4		16.9	
	31.0		—	
800	10.0	10.2	5.6	5.3
	9.2		5.8	
	11.3		4.5	

**Slika 4.28** Uzorci lomljene kocke nakon ispitivanja tlačne čvrstoće: a) 600°C i b) 800°C [8]

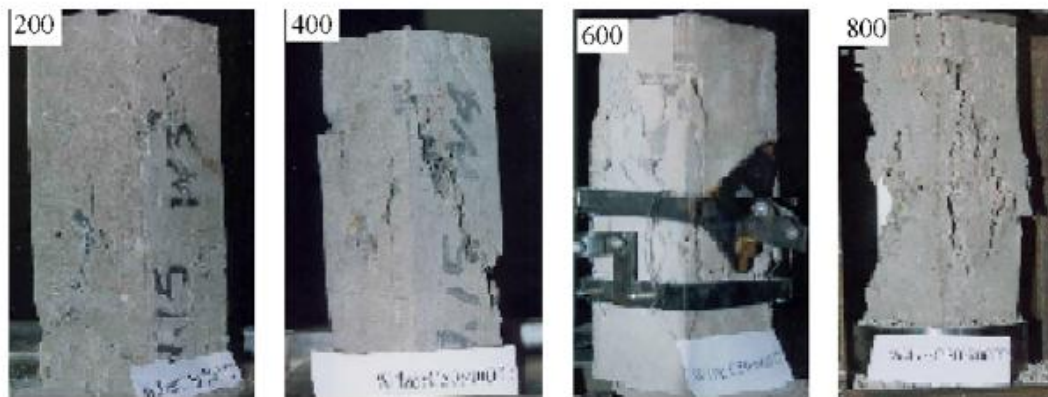


#### 4.4.3.2 Uzorci prizme

##### 4.4.3.2.1 Ponašanje loma

Zbog prethodnog oštećenja uzoraka grijanjem tijekom osnovog tlačnog opterećenja, primijećene su drugačije formacije mikro-pukotina i porast pukotina u uzorcima. Ovisno o temperaturama, bitni eksperimentalni rezultati mogu se sažeti:

U uzorcima prethodno zagrijanim na temperature niže ili jednaka  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pukotine se pojavljuju kasnije nego u uzorcima grijanim na temperature veće od  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Međutim, pukotine u prvom slučaju rastu vrlo brzo i glavna dijagonala pukotina se može jasno vidjeti. Neki primjerci su se čak i slomili kada je opterećenje doseglo svoju vršnu vrijednost. Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća prizmi su navedeni u tablici 4.14.

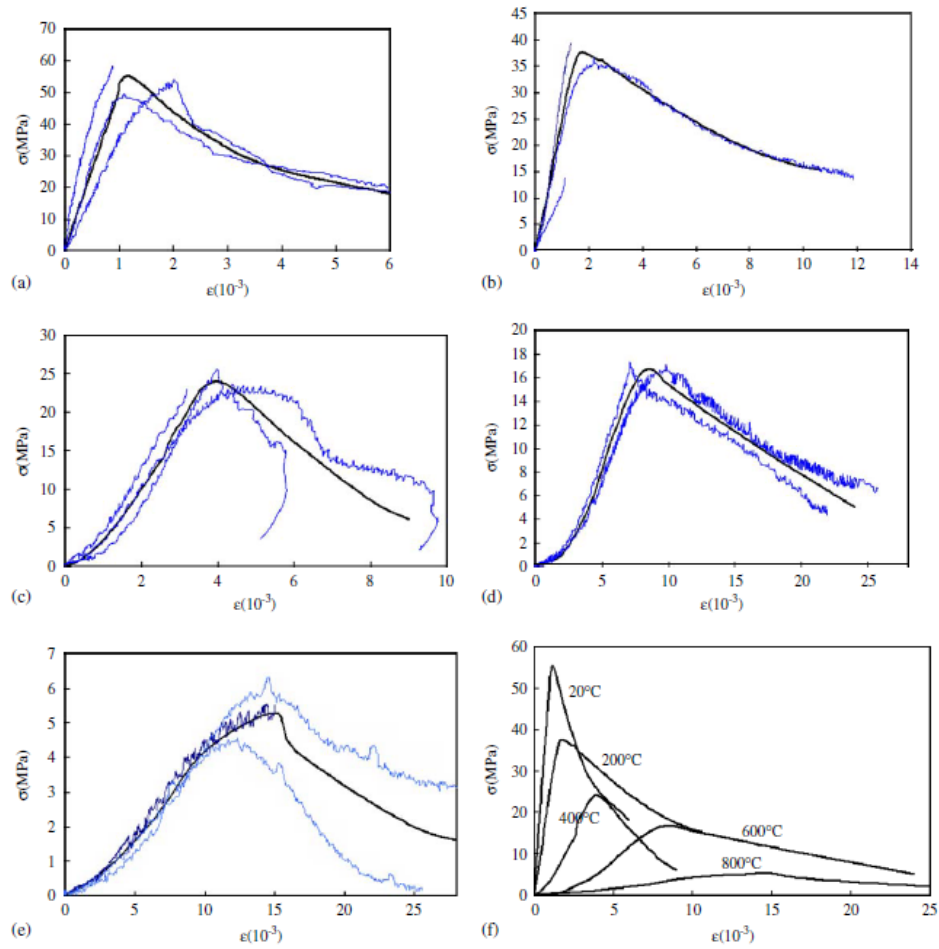


**Slika 4.29** Uzorci lomljene prizme nakon ispitivanja tlačne čvrstoće [8]

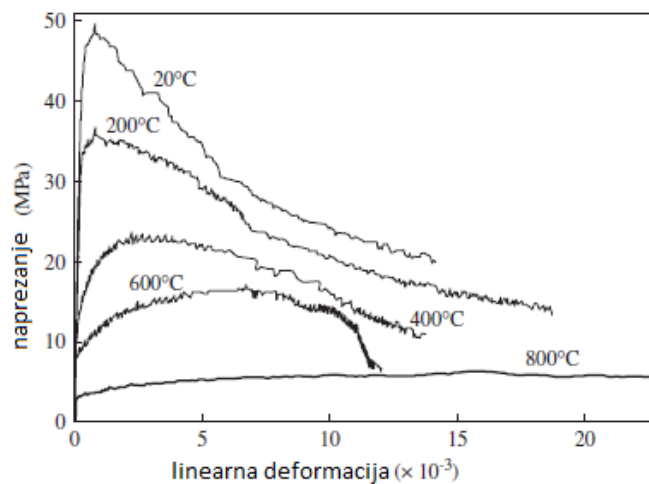
##### 4.4.3.2.2 Odnos naprezanje-deformacije

Odnos između tlačnog naprezanja i uzdužne deformacije može se prikazati pomoću izmjerenih podataka i dimenzija uzoraka prizmi. Krivulje naprezanje-deformacije nakon izloženosti različitim povišenim temperaturama prikazani su u slici 4.30 (a)- (e). Krivulje debelih linija na slici 4.30 (a)-(e) predstavljaju izračunate prosječne vrijednosti svakog niza rezultata ispitivanja. Da bi usporedili rezultate s drugim, sve su srednje krivulje nacrtane zajedno prikazano na slici 4.30 (f). Može se zaključiti iz slike 4.30 (f) da se s porastom temperature, promjene odnosi naprezanje-deformacija. Općenito, čvrstoća se smanjuje, dok se deformacija povećava s rastućim temperature.

Slično tome, odnos između srednje vrijednosti od tlačna naprezanja i srednja vrijednost bočnog naprezanja za različite povišenim temperaturama prikazan je na slici 4.31 pokazuje da se bočne deformacije povećavaju puno brže s povećanjem temperaturama.



**Slika 4.30** Eksperimentalni odnosi naprezanje-deformacija nakon izlaganja različitim temperaturama: (a) 20°C, (b) 200°C, (c) 400°C, (d) 600°C, (e) 800 °C i (F) usporedba [8]

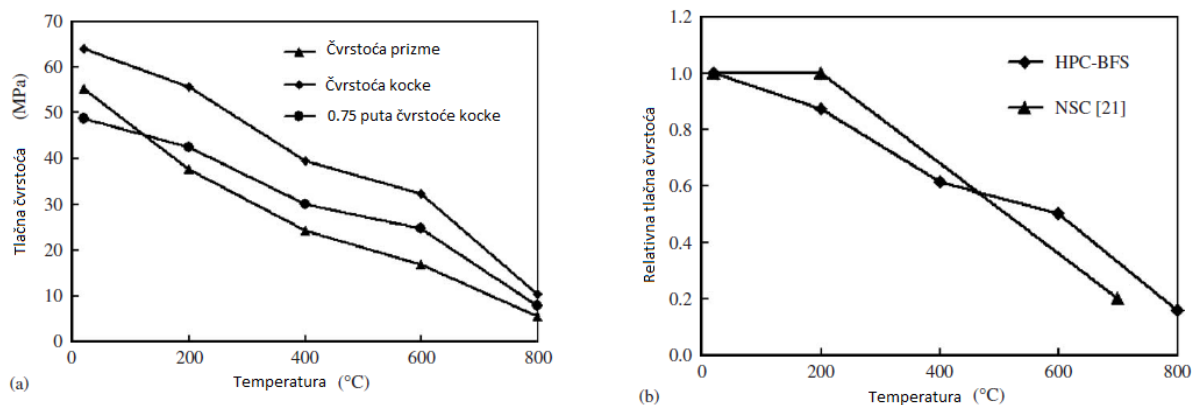


**Slika 4.31** Uzorci lomljene kocke nakon ispitivanja tlačne čvrstoće: a) 600°C i b) 800°C [8]

#### 4.4.4 Rasprava o učincima na povišenim temperaturama

##### 4.4.4.1 Učinci povišene temperature na čvrstoću i deformacije

Srednje vrijednosti tlačne čvrstoće kocke i prizma 0.76 od vrijednosti tlačne čvrstoće kocke u odnosu na povišene temperature prikazani su na slici 4.32 (a). Tlačna čvrstoća kocka u odnosu na temperaturama dana je na slici 4.32 (b), u odnosu na preporučene vrijednosti za NSC po CEB. Slika 4.32 (a) znači da prednosti opadaju s porastom izlaganja temperaturi, a omjer između čvrstoće prizma i kocke nakon povišene temperature se smanjuje u odnosu na omjer 0,76 predložen Guo na NSC na sobnoj temperaturi. Slika 4.32 (b) otkriva da je preostala tlačna čvrstoća HPC-BFS blizu NSC, što znači da HPC-BFS ima bolje performanse kada je podvrgnut vatri.

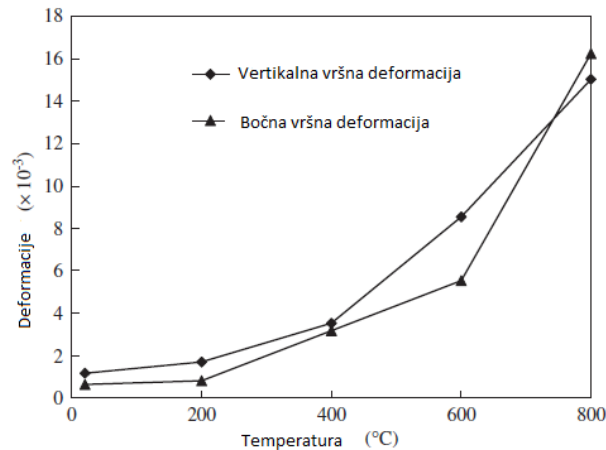


**Slika 4.32** Efekti izloženosti temperaturi na rezidualnu čvrstoću beton (a) apsolutna čvrstoća i (b) relativna čvrstoća [8]

Srednja vrijednost vršnog naprezanja u odnosu na izloženost temperaturi prikazana je na slici 4.33. Slika 4.33 prikazuje da se vrh deformacije povećava s porastom temperature. Struktura cementnog morta nakon izloženosti temperaturi postaje rastresita zbog širenja pora zbog isparavanja apsorbirane vode. Tijekom hlađenja CaO veže vodu i postaje Ca (OH)<sub>2</sub> što rezultira širenjem volumena betona. Oštećenja akumulirana tijekom postupka hlađenja daljnje smanjuju preostalu čvrstoću. Ove izjave mogu biti korisne za objašnjenje promjene vršnih deformacija.

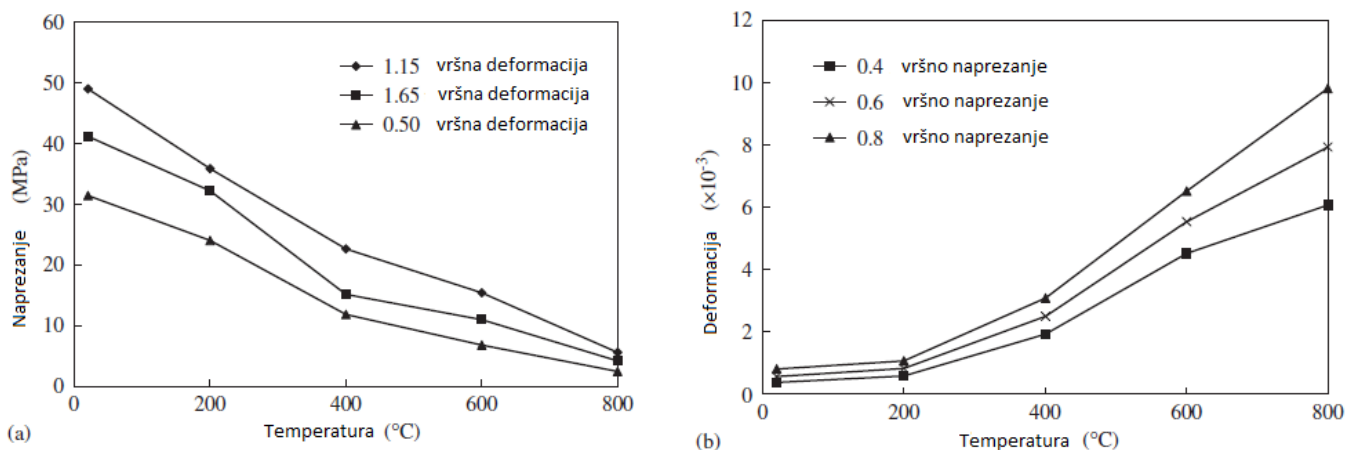
Iz slike 4.33 može se zaključiti da su bočne vršne deformacija općenito manje od vertikalnih deformacija, osim na 800°C. Usporedbom krivulja naprezanje-deformacije kao što je navedeno u slikama 4.30 i 4.31, može se vidjeti da je na istoj razini naprezanja vertikalna deformacija općenito veća od bočne deformacije koja se povećava polako prije postizanja maksimuma. To znači da je na početku nanošenja opterećenja na uzorak deformacija

uglavnom u vertikalnom smjeru. Nakon vršnog napreznja, bočne deformacije se brzo povećavaju za male promjene napreznja. Osim toga, bočne deformacije povećavaju se puno brže ako je izloženost temperaturi veća, što je u skladu sa slikom. 4.31.



**Slika 4.33** Učinci izloženosti temperaturi na betonskim uzorcima za vršne deformacije [8]

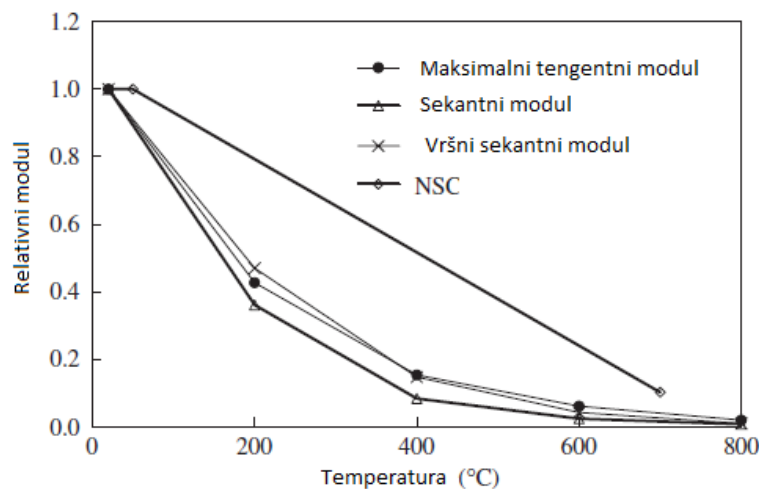
Na slici 4.34 prikazani se učinci izloženosti temperature na čvrstoću betona na tri različite razine deformacije (0,5, 1,15 i 1,65, vidi sliku 4.34 (a)), kao i na tri različite razine napreznja (0,4, 0,6 i 0,8, vidi sliku 4.34(b)) su prikazano na slici. Iz slike 4.34 (a), može se vidjeti da se napreznje na 1,65 od vršne deformacije smanjenje s izloženosti visokoj temperaturi. Iz slike 4.34 (b), može se utvrditi da deformacija na drugoj razini napreznja uvijek ima pravilan porast s povišenjem temperature.



**Slika 4.34** Učinci izloženosti temperaturi na betonskim uzorcima a) napreznje i b) deformacije [8]

#### 4.4.4.2 Učinci povišene temperature na modul elastičnosti

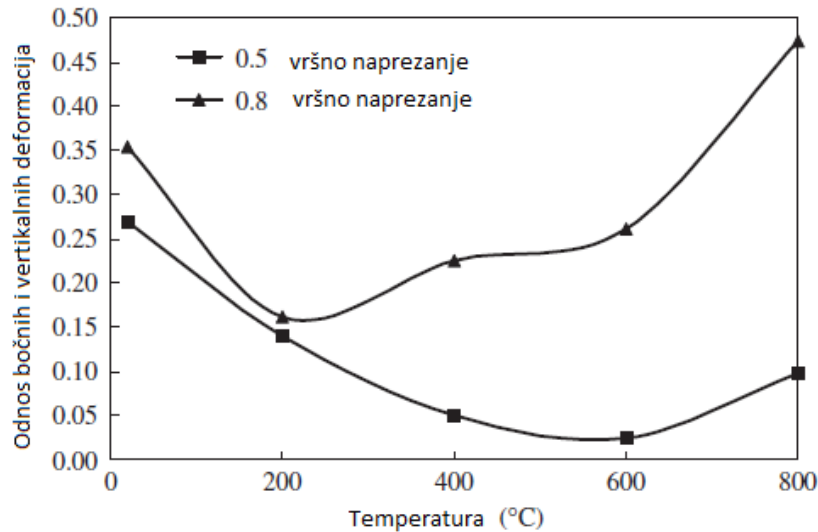
U ovom radu su analizirane tri vrste relativnog modula, odnosno relativni maksimalni tangentni modul, relativni sekantni modul na 0,4 puta od vršnog napreznja, i relativni sekantni modul na vršnom napreznju. Odgovarajući rezultati (u srednjoj vrijednosti) su dani slikom 4.35 i uspoređeni odnosu s preporučenim krivuljama danim za relativni elastični modul NSC nakon djelovanja povišenih temperatura od CEB, relativni modul elastičnosti od HPC - BFS , pokazuje mnogo veći gubitak s povećanjem temperaturama, kao što se može vidjeti na slici 4.35.



**Slika 4.35** Učinci izloženosti uzoraka temperaturi na elastični modul [8]

#### 4.4.4.3 Učinci povišene temperature na omjer bočnih i vertikalnih deformacija

Utjecaj povišenih temperatura na omjer bočnih i vertikalnih deformacija (tj Poissonov koeficijent, kada je beton u linearno-elastičnom stanju) na dvije različite razine napreznja, odnosno 0,5 i 0,8 puta od vršnog napreznja, prikazane su na slici 4.36. Općenito, taj omjer se smanjuje u prvom primjeru s povećanjem temperature i nakon postizanja svojih minimuma i onda se povećava se s porastom temperature. Slika 4.36 pokazuje da stanje napreznja također ima značajan utjecaj na omjer bočnih i vertikalnih deformacija. Za fiksne temperature, ovaj odnos na razini napreznja je jednak 0,8 puta od vršnom napreznju što postaje znatno veće nego za 0,5 puta od vršnog napreznja, što je vjerojatno uzrokovano povećanjem mikro-pora i mikro-pukotina na višoj razini napreznja



**Slika 4.35** Učinci izloženosti uzoraka temperaturi na omjer bočnih i vertikalnih deformacija

[8]

#### 4.4.5 Zaključak

Tema eksperimentalnog istraživanja je ponašanje HPC-BFS nakon izlaganja povišenoj temperaturi i njegova rezidualna tlačna čvrstoća. Eksperimentalni rezultati dovode do sljedećih zaključaka:

- Pod uvjetima grijanja koji se koriste u ovom istraživanju, nije utvrđeno eksplozivno ljuštenja tijekom zagrijavanja na visoku temperaturu.
- Relativna rezidualna tlačna čvrstoća kocke HPC-BFS je blizu referentne NSC.
- Krivulje naprezanja-deformacija HPC-BFS nakon izlaganja visokim temperaturama su slične onima NSC na sobnoj temperaturi. Općenito govoreći, HPC-BFS nakon izlaganja povišene temperature ima bolju mogućnost deformacije, ali njegova krutost i čvrstoća su promjenjene.
- Čvrstoća kocke i prizme na drugačijim razinama naprezanja (tj 50%, 115% i 165% vršnog naprezanja) i modul elastičnosti od HPC-BFS smanjuju se s povećanjem temperature, dok je suprotan slučaj za deformacije pri različitim razinama naprezanja (tj 40%, 60% i 80% vršnog naprezanja).
- Omjer bočnih i vertikalnih deformacija prvo se smanjuje a zatim se povećava s izlaganjem temperature.

## **5 EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA**

### **5.1 Uvod u eksperimentalni dio rada**

Cilj eksperimentalnog rada je ispitati mehanička svojstva betona nakon djelovanja požara i to na različitim temperaturama i pri različitom sastavu betona. Ispitivana su svojstva uzoraka nakon sušenja na 100°C, nakon pečenja na 300°C, 500°C i 700°C te su uspoređeni njihovi rezultati. Mjerena je tlačna čvrstoća, brzina prolaska ultrazvuka kroz uzorke mješavina te mase istih. U nastavku, u poglavlju 6 je detaljno opisan način zagrijavanja uzoraka i održavanja na željenoj temperaturi, te ispitivanje rezidualnih mehaničkih karakteristika mješavina.

Za eksperimentalni dio rada korišteni su cilindrični betonski uzorci stari dvije godine napravljeni za potrebe diplomskog rada na temu samozbijajućeg betona sa različitim dodacima. Korištene su tri različite mješavine:

- SCC6 – samozbijajući beton s dodatkom recikliranog betona
- SCC7 – samozbijajući beton s dodatkom silikatne prašine
- SCC8 - samozbijajući beton s dodatkom metakaolina

Rezultati ispitivanja u svježem stanju betona su preuzeti iz istog diplomskog rada kako bi se dobio ukupan opis mješavina. Stari rezultati tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti (starost od 28 dana) dobiveni su na kocki, dok su se ispitivanja na požar vršila na cilindričnim uzorcima.

### **5.2 Upotrebljeni materijali**

U pripravljanju pokusnih mješavina upotrebljeni su sljedeći materijali:

- Cement CEM I 42,5 R
- Liapor lagani agregat frakcija 0 - 2 mm i 4 - 8 mm
- Superplastifikator FTF
- Filer od recikliranog betona

- Silikatna prašina
- Metakaolin

### 5.2.1 Cement

Cement korišten u pripravi mješavina 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 zahtjevima 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.

U tablici 5.1 prikazana su tipična svojstva cementa.

**Tablica 5.1** Tipična svojstva cementa 42.5 R [2]

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
<b>TIPIČAN SASTAV</b>		<b>ZAHTJEV NORME</b>
Klinker(K) + gips (G)	96-100 %	95-100
Ostalo	0-4 %	0-5

\* Pri temperaturi od 20°C

### 5.2.2 Agregat

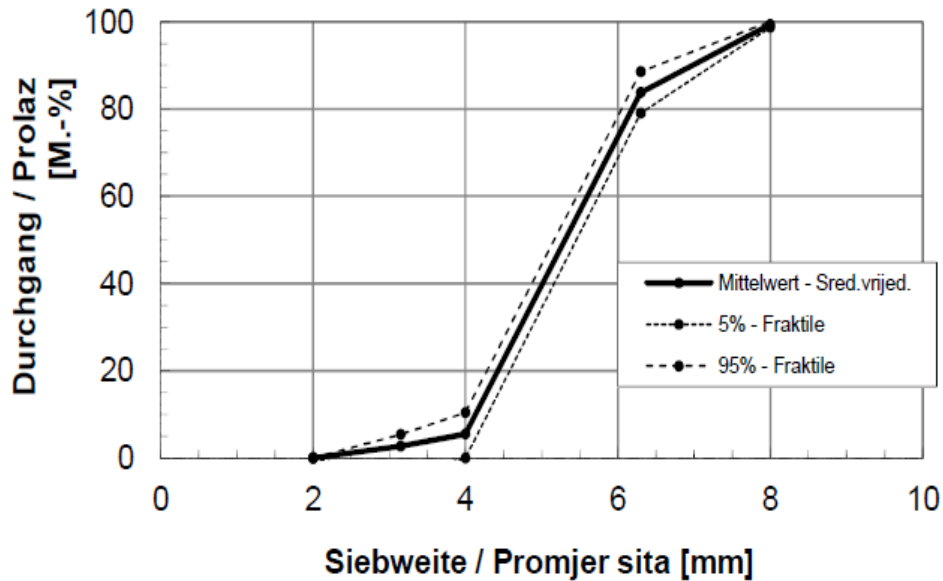
Agregat je liapor frakcija 0-2 mm i 4-8 mm. Prirodno čista i oko 180 mil. godina stara Lias-glina je kvalitetna sirovina za Liapor proizvode. U Liapor proizvodnom procesu prirodna sirovina gline se melje, miješa i oblikuje u kuglice koje su nakon toga podvrgnute tehnološkom procesu pečenja na temperaturi 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 zatvorenim 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.

Granulometrijska krivulja i osnovna svojstva Liapora frakcije 4 – 8 mm prikazana su na slici 5.1, odnosno u tablici 5.2.

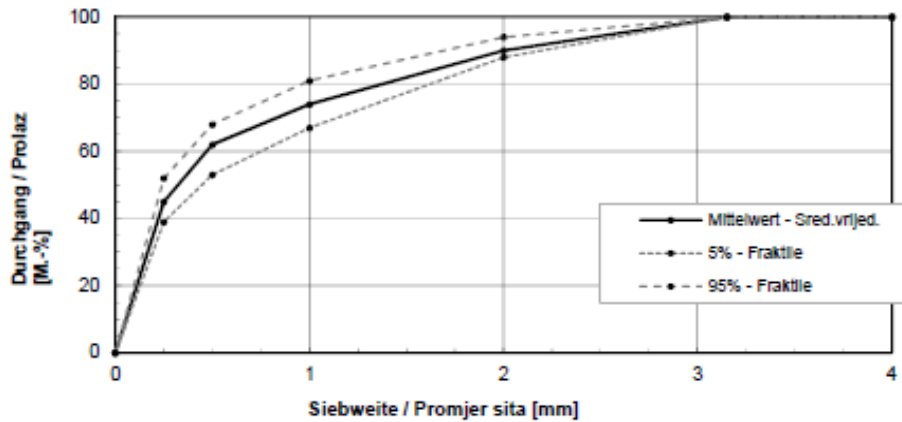


Slika 5.1 Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 4 – 8 mm [2]

Tablica 5.2 Svojstva Liapora frakcije 4 – 8 mm [2]

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	M.-%
	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	%

Granulometrijska krivulja i osnovna svojstva Liapora frakcije 0 – 2 mm prikazana su na slici 5.2, odnosno u tablici 5.3.



Slika 5.2 Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 0 – 2 mm [2]

Tablica 5.3 Svojstva Liapora frakcije 0 – 2 mm [2]

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 $w_{BVK}$	25 - 35	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,02	M.-%
	Sumporni spojevi $SO_3$	< 0,8	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	$SiO_2$	55 ± 5	%
	$Al_2O_3$	24 ± 5	%
	$Fe_2O_3$	14 ± 5	%
	CaO	5 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

### 5.2.3 Superplastifikator

#### Redyplast FTF1

Redyplast je superplastifikator koji se sastoji od miješanog cementa, pijeska i aditiva te služi za poboljšanje konzistencije i obradljivosti. Neke od karakteristika Redyplast-a FTF1:

- optimalna obradljivost s jako malim vodovezivnim omjerom,
- veliko početno tečenje s malim doziranjem,
- velika početna čvrstoća,
- homogenost svježeg betona.

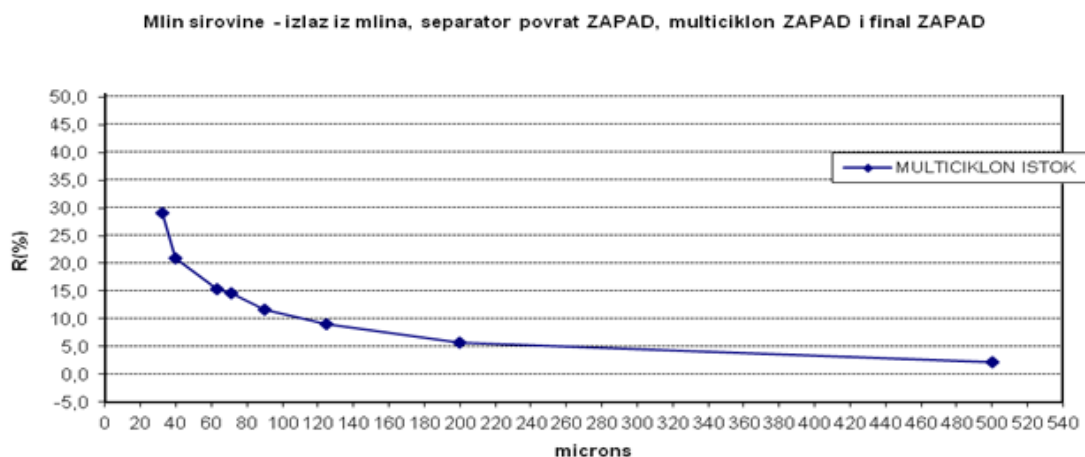
FTF1 je superplastifikator u tekućem stanju, narančaste boje, s gustoćom  $1,07 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  pri temperaturi od  $20^\circ\text{C}$ . Sadržaj kloride je manji od 0,1 % a pH vrijednost iznosi 3,0 – 5,0.

Maksimalna količina Redyplasta-a FTF1 koja se može dodati mješavini je 1,2 % mase veziva.

Superplastifikator treba skladištiti na suhom mjestu, pri temperaturi od  $5^\circ\text{C}$  do  $45^\circ\text{C}$  najmanje 6 mjeseci.

### 5.2.4 Filer od recikliranog betona

Filer je fino mljeveni beton, dobiven strojnim brušenjem betonske površine. Specifična površina zrna po Blaine-u je  $7891 \text{ [cm}^2/\text{g]}$ , a specifična težina  $2,45 \text{ [g/cm}^3]$ . Potječe iz Dugopolja. Slika 5.3 prikazuje granulometrijski dijagram filera od recikliranog betona.



Slika 5.3 Granulometrijski dijagram filera [2]

### 5.2.5 Silikatna prašina

Silikatna prašina je mineralni dodatak betonu koji aktivno sudjeluje u hidrataciji cementa te predstavlja jedan od najkvalitetnijih pucolana. Na svojstva betona djeluje preko pucolanskih reakcija kojima se povećava količina C-S-H, te pomoću sitnih čestica koje doprinose poboljšanju obradljivosti i povećanju kohezivnosti zapunjuju unutrašnju strukturu jer su znatno sitnije od čestica cementa.

U izradi pokusnih mješavina upotrijebljena je *Meyco MS 610*, posebna visoko kvalitetna mikrosilika, koja je kao dodatak izrazito kvalitetnim betonima odobrena prema ASTM propisu. Ona u potpunosti mijenja poroznu strukturu betona te čini strukturu gušćom i otpornijom na bilo kakave vanjske utjecaje. Mikrosilika *Meyco MS 610* koristi se za proizvodnju dugotrajnih, izdržljivih betona, odnosno betona visoke čvrstoće, pumpanih betona, lijevanih betona, podvodnih betona, betona s malim sadržajem cementa itd.

*Meyco MS 610* mora se upotrijebiti u kombinaciji s plastifikatorom ili superplastifikatorom. Dodaje se betonu tijekom doziranja i to u količini 5 – 15% od mase cementa, a minimalno vrijeme miješanja je 90 sekundi.

*Meyco MS 610* ima razna djelovanja, a to su:

- povećava čvrstoću
- poboljšava otpornost na kemijske i mehaničke štetne utjecaje
- sprječava segregaciju svježeg betona
- smanjuje količinu ubrzivača

Osnovni tehnički podaci o silikatnoj prašini *Meyco MS 610* prikazani su u tablici 5.4.

**Tablica 5.4** Osnovna svojstva *Meyco MS 610* mikrosilike [2]

Tehnički podaci	
Oblik	Prah
Boja	Siva
Gustoća	0,55 - 0,70 kg/l
Udio klorida	< 0,1 %

### 5.2.6 Metakaolin

Metakaolin je također mineralni dodatak betonu. To je rafinirana kaolinska glina koja je zagrijavana pod kontroliranim uvjetima s ciljem proizvodnje amorfnog aluminij - silikata koji je reaktivan u betonu. Ponaša se kao i drugi pucolani, u betonu reagira s produktima kalcij hidroksida (vapnom) nastalih tijekom hidratacije cementa.

Upotreba metakaolina ima sljedeće prednosti:

- povećanje tlačne i savojne čvrstoće,
- smanjenje propusnosti,
- povećana izdržljivost i otpornost na udar,
- poboljšana obradljivost betona i završna obrada,
- smanjeno skupljanje.

Za izradu pokusnih mješavina upotrijebljen je *Metavern N*, mineralni dodatak koji može značajno poboljšati svojstva betona. *Metavern N* je dobiven grijanjem čistog kaolina. Bijele je boje i važan je amorfni aluminij – silikat koji reagira s kalcij hidroksidom pri čemu nastaju C-S-H veze. Lako se miješa, djeluje stabilizirajuće te olakšava završnu obradu. Pokazao se osobito koristan u primjenama gdje se zahtjevaju poboljšana snaga, otpornost i izdržljivost. Dodaje se betonu u količini od 5 – 15 % na masu cementa. U tablici 5.5 prikazana su osnovna fizička svojstva metakaolina *Metavern N*.

**Tablica 5.5** Fizička svojstva metakaolina *Metavern N* [2]

Fizička svojstva – <i>Metavern N</i>		
Gustoća zrna		2,6 g/cm <sup>3</sup>
Boja		Bijela
Zapreminska težina	rasuta	0,32 - 0,37 g/cm <sup>3</sup>
	zbijena	0,45 - 0,52 g/cm <sup>3</sup>
d <sub>50</sub>		3,4 - 4,5 μm
d <sub>95</sub>		12 - 18 μm

### 5.2.7 Sastavi betonskih mješavina

Mješavine su projektirane prema CBI metodi čije je osnovno polazište projektiranja da se samozbijajući beton sastoji od tekuće ili kontinuirane faze, faze paste i čvrste faze (agregata). Prednost ove metode je što uzima u obzir granulometriju kombiniranog agregata (drobljenog i riječnog). Primjenjiva je za bilo koju specificiranu veličinu krupnog i sitnog agregata i uzima u obzir uvjete gradnje. Količine potrebne za 1m<sup>3</sup> betona prikazane u tablici 5.6.

Sastavne komponente (kg)		SCC6	SCC7	SCC8
Cement		400	380	380
Voda		200	220	190
v/c		0,5	0,42	0,5
Filer (reciklirani beton)		50		
Silikatna prašina			75	
Metakaolin				75
Superplastifikator FTF		4,8	5,46	5,46
Agregat	0 - 2	516,1	544,2	508,2
	4 - 8	531,8	560,7	523,6
UKUPNO:		1702,7	1785,4	1682,2

Tablica 5.6 Sastav betonskih mješavina za 1 m<sup>3</sup> betona [2]

### 5.3 Rezultati ispitivanja provedenih u svježem stanju

Ispitivana svojstava samozbijajućeg betona provedena su prema nizu europskih normi HRN EN 12350 8-12. Sva ispitivanja provedena su u laboratorijskim uvjetima s opremom prema pravilima koja propisuju norme. Postupci ispitivanja provedeni su kako je opisano u poglavlju 3. U idućim tablicama prikazane su ispitane vrijednosti svojstava svježeg betona.

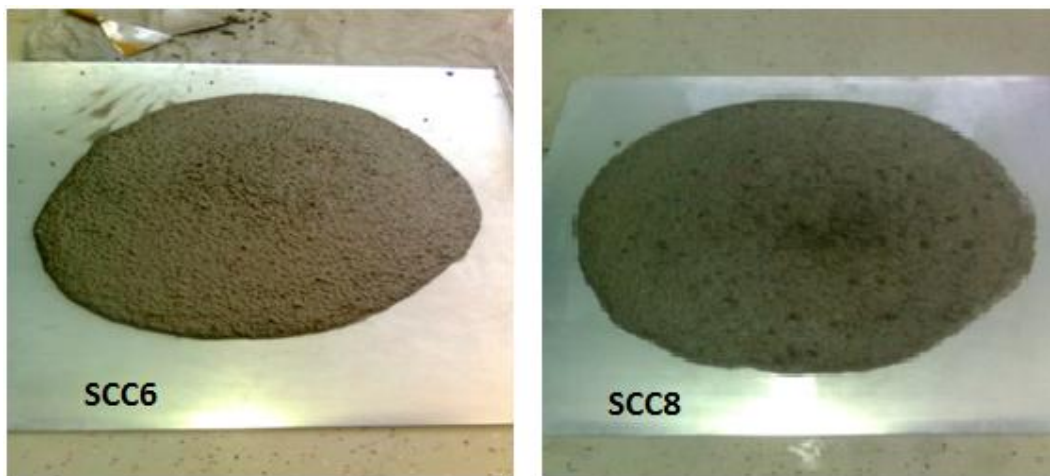


### 5.3.1 Rezultati rasprostiranja slijeganjem

Tablica 5.7 i slika 5.4 prikazuje rezultate rasprostiranja slijeganjem.

**Tablica 5.7** Rezultati rasprostiranja –slijeganjem [2]

Oznaka uzorka	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	SF [mm]	T <sub>500</sub> [s]	Razred SF	Razred VS
SCC6	640	640	640	2.59	SF2	VS2
SCC7	570	520	545	1.69	-	VS1
SCC8	730	700	715	2.22	SF2	VS2



**Slika 5.4** Rasprostiranje- slijeganjem mješavina SCC6 i SCC8 [2]

Mješavina SCC6 ima najduže vrijeme rasprostiranja, 2,59 s. Nema odvajanja krupnog agregata u sredini kao ni odvajanja vode na krajevima.

Mješavina SCC7 nije zadovoljila s rezultatom rasprostiranja SF.

Na slici 5.4 kod mješavine SCC8 vidljiva je pojava segregacije; odvajanje krupnog agregata u sredini mješavine. Na krajevima kruga vidljivo je odvajanje vode.

### 5.3.2 Rezultati ispitivanja V-lijevkom

Tablica 5.8 prikazuje rezultate ispitivanja V-lijevkom, te je vidljivo da sve tri mješavine spadaju u razred VF1 što znači da im je vrijeme tečenja svježje betonske mase <9,0 sekundi

**Tablica 5.8** Rezultati ispitivanja V-lijevkom (vrijeme istjecanja) [2]

Oznaka uzorka	Vrijeme prolaska kroz V-lijevak,tv [s]	Razred
SCC6	4,69	VF1
SCC7	6,33	VF1
SCC8	7.49	VF1

### 5.3.3 Rezultati ispitivanja L-posudom

Tablica 5.9 i slika 5.5 prikazuje rezultate ispitivanja L-posudom kojom se određuje sposobnost prolaska betona kroz uske otvore između tri armaturne šipke bez segregacije i blokiranja.

**Tablica 5.9** Rezultati ispitivanja L-posudom [2]

Oznaka uzorka	$\Delta H_{1,1}$ [mm]	$\Delta H_{1,2}$ [mm]	$\Delta H_{1,3}$ [mm]	$\Delta H_{1,av}$ [mm]	$\Delta H_{2,1}$ [mm]	$\Delta H_{2,2}$ [mm]	$\Delta H_{2,3}$ [mm]	$\Delta H_{2,av}$ [mm]	$H_1=600-$ $\Delta H_{1,av}$ [mm]	$H_2=150-$ $\Delta H_{2,av}$ [mm]	PA	Razred
SCC6	485	505	505	498,33	70	68	75	71	101,67	79	0,78	-
SCC7	455	465	450	456,67	90	85	90	88,3	143,33	61,67	0,43	-
SCC8	495	500	505	500	60	65	60	61,7	100	88,33	0,88	PA2



**Slika 5.5** Prolaznosti mješavina SCC6 i SCC8 [2]

Da bi se postigla dovoljno dobra sposobnost zaobilaženja prepreka, beton mora imati dovoljno paste te mu se mora osigurati viskoznost.

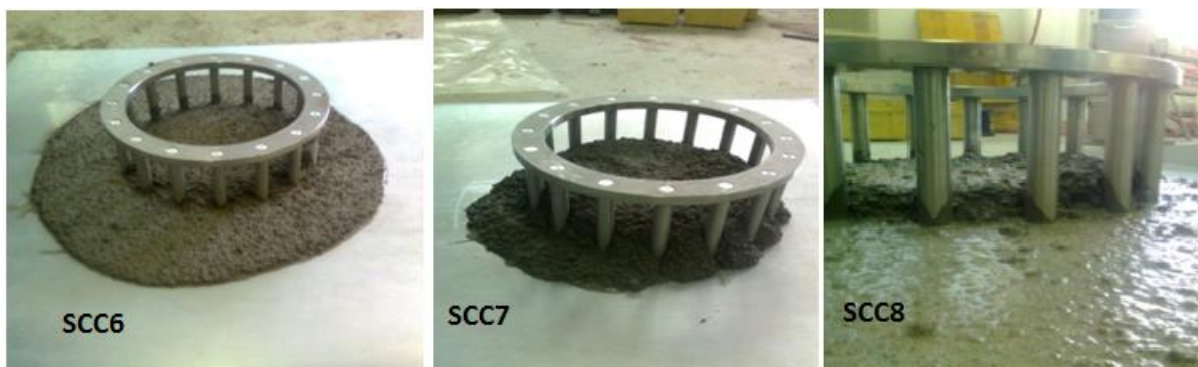
Kod mješavina SCC6, SCC7 i SCC8 vidljivo je veliko izlučivanje vode i odvajanje agregata (slika 5.4).

### 5.3.4 Rezultati ispitivanja J-prstenom

Tablica 5.10 i slika 5.6 prikazuje rezultate ispitivanja J-prstenom kojim se definira svojstvo prolaznosti samozbijajućeg betona i otpornost prema segregaciji.

**Tablica 5.10** Rezultati ispitivanja J-prstenom [2]

Oznaka uzorka	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	SF [mm]	$T_{500}$ [s]	$\Delta h_0$ [mm]	$\Delta h_{21}$ [mm]	$\Delta h_{22}$ [mm]	$\Delta h_{71}$ [mm]	$\Delta h_{72}$ [mm]	PJ	Razred
SCC6	605	650	627,5	5,62	96	120	123	125	125	27,25	-
SCC7	390	400	395	$\infty$	70	105	110	110	105	37,5	-
SCC8	710	640	675	2,52	105	130	130	135	125	25	-



**Slika 5.6** Rezultati ispitivanja J-prstenom mješavina SCC6, SCC7 i SCC8 [2]

Ni jedna mješavina ne zadovoljava kriterij ispitivanja J-prstenom.

Za SCC6 se vidi sa slike 5.5 da je sastav betona stabilan s blagim odvajanjem vode na krajevima. Dobra sposobnost zaobilaženja prepreka (bez obzira na računski dobivene rezultate testiranja).

Mješavina SCC7 ne pokazuje dobro svojstvo zaobilaženja prepreka, velika stopa blokiranja PJ. Vrijeme razastiranja nije zabilježeno jer mješavina nije dosegla krug od 500 mm. Vidljivo odvajanje vode i agregata.

Za mješavinu SCC8 vidljivo je odvajane krupnog agregata u sredini kao i izlučivanje vode.

### 5.3.5 Sadržaj pora betonskih mješavina

Sadržaj pora betonskih mješavina ispituje se prema normi HRN EN 12350-7. Ova norma specificira metodu određivanja sadržaja zraka u svježem betonu, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće, te maksimalne veličine zrna agregata od 63 mm. Sadržaj zraka u svježem betonu ispituje se pomoću porometra. Tablica 5.11 prikazuje sadržaj pora ipitivanih betonskih mješavina.

**Tablica 5.11** Sadržaj pora betonskih mješavina [2]

Oznaka uzorka	Sadržaj pora [%]
SCC6	sadržaj pora nije se mjerio
SCC7	6,80
SCC8	6,10

## 6 EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA OTPORNOSTI SAMOZBIJAJUĆEG BETONA NA POŽAR

U okviru eksperimentalnog istraživanja prikazanog u ovom radu ispitana su mehanička svojstva tri mješavine s različitim dodacima (reciklirani beton, silikatna prašina i metakaolin) starosti dvije godine. Nakon izlaganja uzoraka visokim temperaturama (do 700°C) i hlađenja na sobnu temperaturu provedeno je mjerenja brzine ultrazvuka na svakom uzorku mješavine i mjerenje mase pojedinog uzorka, a nakon toga uzorci su tlačno opterećivani do loma u hidrauličnoj preši. U nastavku ovog poglavlja detaljno su opisani pojedini koraci u provedbi eksperimentalnog rada.

### 6.1 Postupak ispitivanja

Usvojena eksperimentalna procedura zahtijeva da se ispitivanje obavlja u serijama od 3 uzorka i to na cilindričnim uzorcima s  $\varnothing 75/225$  mm. Dimenzije uzoraka su u skladu s preporukama RILEM odbora za ispitivanje tlačne čvrstoće. Ispitivanje se vrši za temperature od 100°C, 300°C, 500°C i 700°C. Ispituju se tri različite mješavine lakog betona s drugačijim filerom. Za svaku mješavinu je upotrebjeno 24 cilindrična uzorka. Po 6 uzoraka je sušeno 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. Za svaki uzorak je vršeno mjerenje prije sušenja, nakon sušenja te nakon pečenja kada se ohladio na sobnu temperaturu ili min na 40°C. Na slici 4.15. prikazan je ciklus zagrijavanja uzoraka karakterističnim parametrima. 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 te su ispitani odmah nakon hlađenja na sobnu temperaturu (početna hlađenje). Tlačna ispitivanja su provedena na uzorcima sa stopom prirasta opterećenja od 0,5 MPa/s.



**Slika 6.1** Lijevo:sušionik, desno:peć [slika zabilježena tijekom ispitivanja]

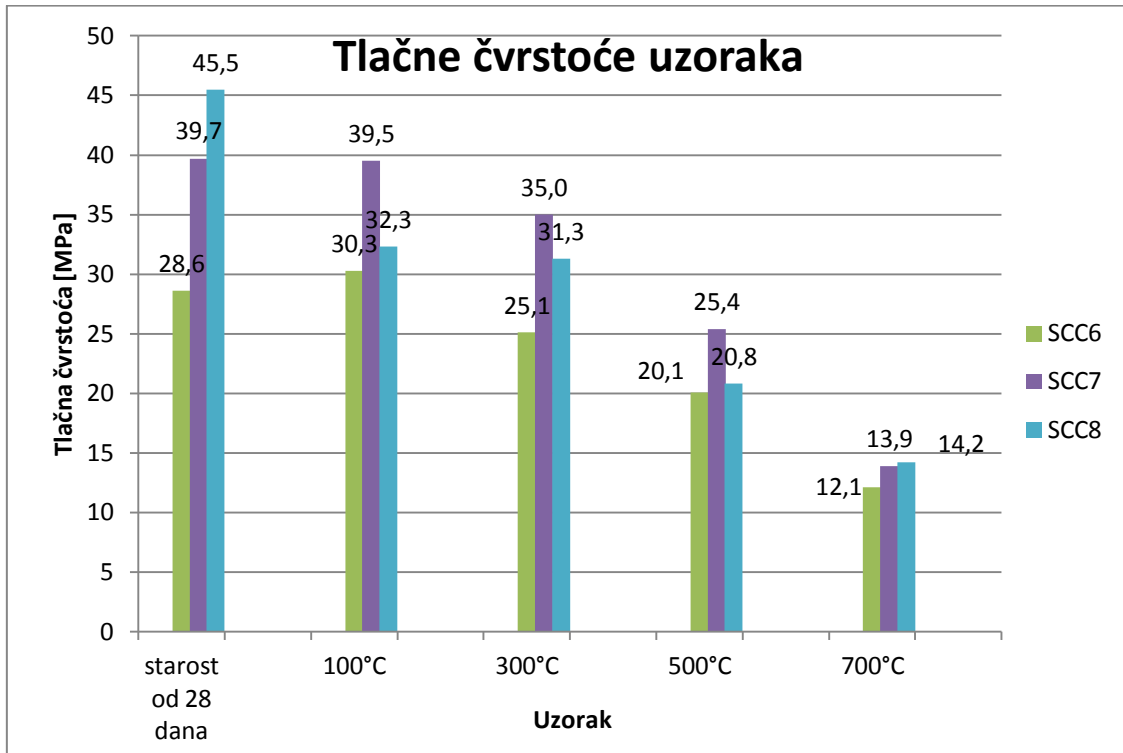
## 6.2 Rezultati i analiza ispitivanja

### 6.2.1 Tlačna čvrstoća

Ispitivanja tlačne čvrstoće su se vršila jednako za sve tri mješavine, nakon inicijalnog hlađenja kada je temperatura uzorka pala ispod 40°C. Hlađenje se odvijalo na sobnoj temperaturi. Uzorci su oblika cilindra sa bazom promjera 75 mm i visine 225 mm starosti dvije godine. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6.1 gdje lijevi obojeni dio prikazuje čvrstoće na uzorcima u vodom zasićenom stanju starosti 28 dana koji su preuzeti iz diplomskog rada [2], a desni dio su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na uzorcima starim dvije godine i za određene temperature požara. Uzorci ispitani nakon 28 dana su, za razliku od predmetnih uzoraka, bili oblika kocke dimenzije 15 cm, čuvani su u vodi do dana ispitivanja, te ispitani u vodom zasićenom stanju.

**Tablica 6.1** Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Oznaka uzorka	Tlačna čvrstoća [MPa]				
	starost od 28 dana	100°C	300°C	500°C	700°C
SCC6	28,6	30,3	25,1	20,1	12,1
SCC7	39,7	39,5	35,0	25,4	13,9
SCC8	45,5	32,3	31,3	20,8	14,2



**Slika 6.2** Grafički prikaz tlačne čvrstoće



**Slika 6.3** Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka mješavine SCC6 [slika zabilježena tijekom ispitivanja]



**Slika 6.4** Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka mješavine SCC7 [slika zabilježena tijekom ispitivanja]



**Slika 6.5** Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka mješavine SCC8 [slika zabilježena tijekom ispitivanja]

Analizom grafičkog prikaza tlačnih čvrstoća betona na slici 6.2 vidljiv je utjecaj pojedinih filera i temperatura na tlačnu čvrstoću. Referentne tlačne čvrstoće uzoraka sušenih na 100°C se razlikuju od čvrstoće nakon 28 dana, što se objašnjava stanjem i oblikom uzoraka. Veća razlika rezultata zabilježena je kod uzoraka sa dodatkom metakaolina. Na slikama 6.3-6.5 prikazani su uzorci betonskih mješavina nakon ispitivanja tlačne čvrstoće u preši.

Kod SSC6 mješavine sa filerom od recikliranom betona gubitak tlačne čvrstoće je približno jednak sa porastom temperature te je tlačna čvrstoća nakon 700°C približno 40% početne tlačne čvrstoće.



Kod SCC7 mješavine sa filerom od silikatne prašine gubitak tlačne čvrstoće je također približno jednak sa porastom temperature te je tlačna čvrstoća nakon 700°C približno 35% početne tlačne čvrstoće.

Kod SCC8 mješavine sa filerom od metakaolina prvo se događa mali pad tlačne čvrstoće nakon 300°C od 3% a zatim približno jednak pad tlačne čvrstoće sa porastom temperature te je tlačna čvrstoća nakon 700°C približno 44% početne tlačne čvrstoće.

Tijekom pečenja nije došlo do eksplozivnog ljuštenja koje se zna dogoditi na temperaturama iznad 100°C kada voda u porama betona prelazi u vodenu paru i kad pritisak vodene pare prekorači vrijednost koju može podnijeti struktura betona.

### 6.2.2 Dinamički modul elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti određuje se ultrazvučnom metodom tako da se kroz uzorak puštaju ultrazvučni valovi (slika 6.6), nakon čega se na uređaju očitava vrijeme prolaska valova kroz uzorak. Iz vremena prolaska ultrazvuka kroz uzorak računa se brzina prolaza valova, a nakon toga se dinamički modul određuje se izrazom:

$$E_{din} = \frac{v^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} [GPa], \quad (5)$$

gdje je:

$v$  - brzina ultrazvučnog vala [m/s]

$\rho$  – gustoća betona [ $kg/m^3$ ]

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



**Slika 6.6** Skica mjerenja brzine ultrazvučnog vala



**Slika 6.7** Uređaj za mjerenje brzine ultrazvučnih valova [slika zabilježena tijekom ispitivanja]

Valja naglasiti da se pri izračunu dinamičkog modula elastičnosti koristi Poissonov koeficijent 0.20. Poissonov koeficijent se malo mijenja s promjenom vodocementnog faktora, a smanjuje se s smanjenjem vlažnosti. Za vlažni cementni kamen približno je 0.25, a za suhi oko 0.15. Kod plošnih i prostornih elemenata uzima se prosječna vrijednost 0.20. [10]

Različiti čimbenici imaju značajne utjecaje na rezultate ispitivanja brzine ultrazvuka. Promjena temperature u granicama između 10°C i 30°C ne uzrokuje bitnu promjenu, no ekstremno visoke temperature koje se događaju kod požara utječu na brzine ultrazvuka jer dolazi do mikro raspucavanja. Isto tako, vlažnost ima značajan utjecaj. Brzina ultrazvuka je oko 5% veća kroz vodom zasićen beton nego kroz suhi beton. S druge strane, uzorci betona zasićeni vodom imaju manju tlačnu čvrstoću. [12]

U ovom radu, svi su uzorci ispitani u istom stanju pa se rezultati mogu međusobno uspoređivati.

**Tablica 6.2** Rezultati dinamičkom modula elastičnosti SCC6

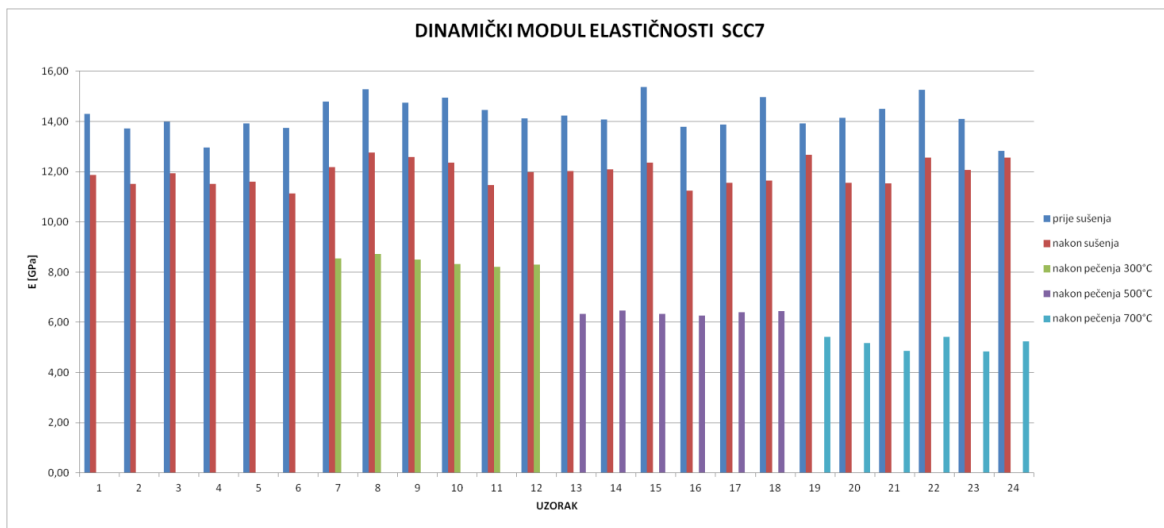
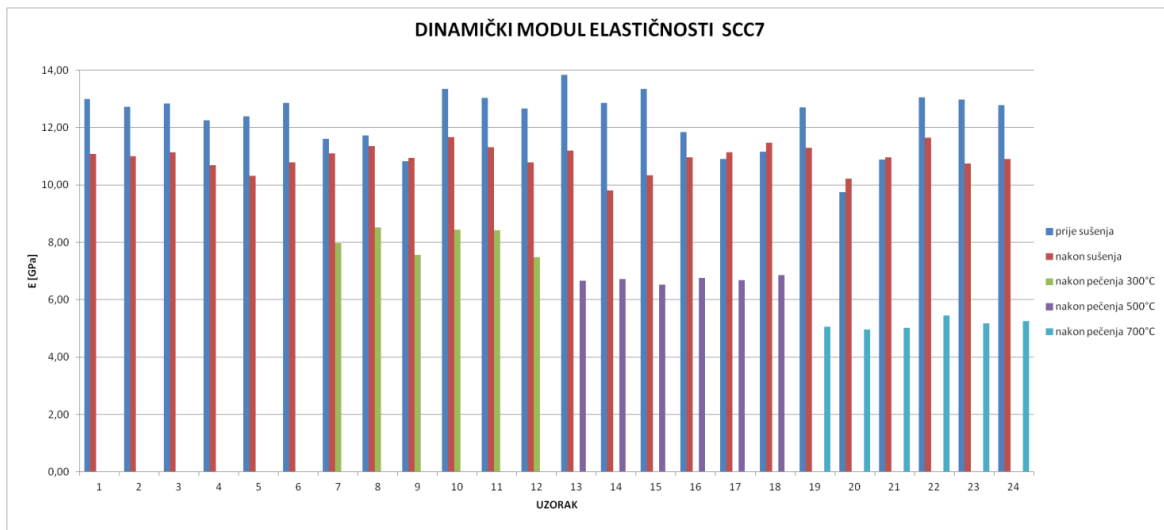
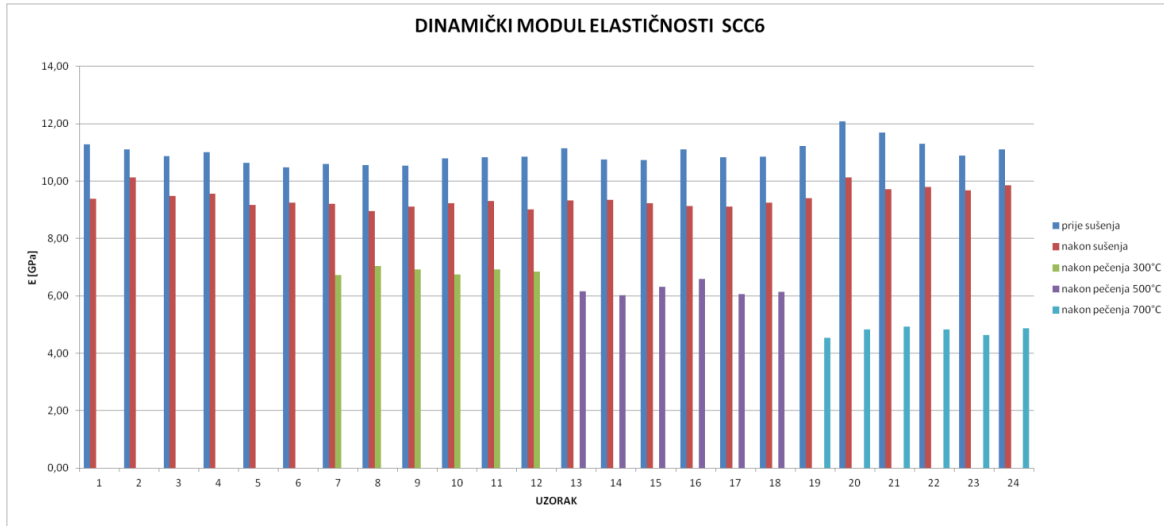
SCC6	DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI [GPa]				
	prije sušenja	nakon sušenja	nakon pečenja		
			300°C	500°C	700°C
1	11,28	9,39			
2	11,10	10,13			
3	10,87	9,48			
4	11,00	9,56			
5	10,64	9,16			
6	10,47	9,24			
7	10,60	9,20	6,73		
8	10,55	8,96	7,04		
9	10,54	9,11	6,92		
10	10,79	9,23	6,75		
11	10,84	9,32	6,93		
12	10,86	9,01	6,84		
13	11,14	9,33		6,15	
14	10,76	9,34		6,02	
15	10,73	9,23		6,31	
16	11,09	9,13		6,59	
17	10,82	9,12		6,07	
18	10,86	9,24		6,15	
19	11,23	9,40			4,54
20	12,08	10,12			4,83
21	11,69	9,73			4,93
22	11,30	9,80			4,84
23	10,88	9,67			4,64
24	11,11	9,85			4,87

**Tablica 6.3** Rezultati dinamičkom modula elastičnosti SCC7

uzorak	DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI [GPa]				
	prije sušenja	nakon sušenja	nakon pečenja		
			300°C	500°C	700°C
1	12,99	11,07			
2	12,72	11,00			
3	12,83	11,15			
4	12,26	10,69			
5	12,40	10,32			
6	12,86	10,79			
7	11,60	11,10	7,97		
8	11,73	11,35	8,53		
9	10,83	10,95	7,57		
10	13,35	11,67	8,45		
11	13,03	11,33	8,41		
12	12,67	10,79	7,49		
13	13,84	11,19		6,67	
14	12,86	9,81		6,71	
15	13,34	10,34		6,53	
16	11,84	10,97		6,76	
17	10,91	11,13		6,69	
18	11,16	11,47		6,87	
19	12,70	11,30			5,07
20	9,76	10,21			4,96
21	10,89	10,97			5,01
22	13,06	11,65			5,44
23	12,98	10,75			5,19
24	12,78	10,91			5,26

Tablica 6.4 Rezultati dinamičkom modula elastičnosti SCC8

uzorak	DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI [GPa]				
	prije sušenja	nakon sušenja	nakon pečenja		
			300°C	500°C	700°C
1	14,30	11,87			
2	13,72	11,51			
3	13,99	11,94			
4	12,97	11,52			
5	13,93	11,61			
6	13,75	11,13			
7	14,79	12,17	8,55		
8	15,28	12,77	8,73		
9	14,76	12,58	8,51		
10	14,95	12,37	8,32		
11	14,47	11,46	8,22		
12	14,13	11,99	8,30		
13	14,23	12,03		6,33	
14	14,08	12,10		6,48	
15	15,37	12,36		6,33	
16	13,78	11,24		6,26	
17	13,89	11,55		6,39	
18	14,96	11,64		6,46	
19	13,91	12,67			5,43
20	14,14	11,56			5,17
21	14,51	11,54			4,86
22	15,26	12,57			5,42
23	14,09	12,07			4,84
24	12,82	12,56			5,25



**Slika 6.8** Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti po mješavinama

Analizom grafičkog prikaza dinamičkog modula elastičnosti betona na slici 6.8 vidljiv je utjecaj pojedinih filera i temperatura na dinamički modul elastičnosti, a tablice 6.2-6.4 prikazuju rezultate dinamičkog modula elastičnosti dobivene na temelju mjerenja brzina prolaska ultrazvuka i po formuli (5).

Kod SSC6 mješavine sa filerom od recikliranom betona smanjenje dinamičkog modula elastičnosti je oko 15 % nakon sušenja na 100°C za sve uzorke. Nakon pečenja na 300°C i hlađenja na sobnu temperaturu vrijednost dinamičkog modula je oko 60% početne vrijednosti, nakon 500°C je oko 55%, a nakon 700°C je oko 40% početne vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti.

Kod SSC7 mješavine sa filerom od recikliranom betona smanjenje dinamičkog modula elastičnosti je oko 10 % nakon sušenja na 100°C za sve uzorke. Nakon pečenja na 300°C i hlađenja na sobnu temperaturu vrijednost dinamičkog modula je oko 65% početne vrijednosti, nakon 500°C je oko 55%, a nakon 700°C je oko 40% početne vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti.

Kod SSC8 mješavine sa filerom od recikliranom betona smanjenje dinamičkog modula elastičnosti je oko 20 % nakon sušenja na 100°C za sve uzorke. Nakon pečenja na 300°C i hlađenja na sobnu temperaturu vrijednost dinamičkog modula je oko 60% početne vrijednosti, nakon 500°C je oko 45%, a nakon 700°C je oko 35% početne vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti.

Analizom srednjih vrijednosti brzine ultrazvuka po mješavinama vidi se utjecaj stanja u kojem se beton nalazi netom prije ispitivanja. Naime, 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 6.6. brzina prolaska ultrazvuka opada sa porastom temperature kojoj su bili podvrgnuti uzorci.

Brzina ultrazvuka [km/s]	Kvaliteta betona
> 4,5	Odlična
3,5 - 4,5	Dobra
3,0 - 3,5	Sumnjiva
2,0 - 3,0	Loša
< 2,0	Potpuno loša

**Tablica 6.5** Ocjena kvalitete betona prema Neville-u [9]

**Tablica 6.6** Srednje vrijednosti brzine ultrazvuka po mješavinama i temperaturama

MJEŠAVINA	BRZINA ULTRAZVUKA [km/s]					
	nakon 28 dana	prije sušenja	nakon sušenja	nakon pečenja		
				300°C	500°C	700°C
SCC6	3,72	2,89	2,74	2,38	2,28	1,99
SCC7	3,72	2,97	2,88	2,51	2,30	2,06
SCC8	3,67	3,15	2,96	2,52	2,21	2,03

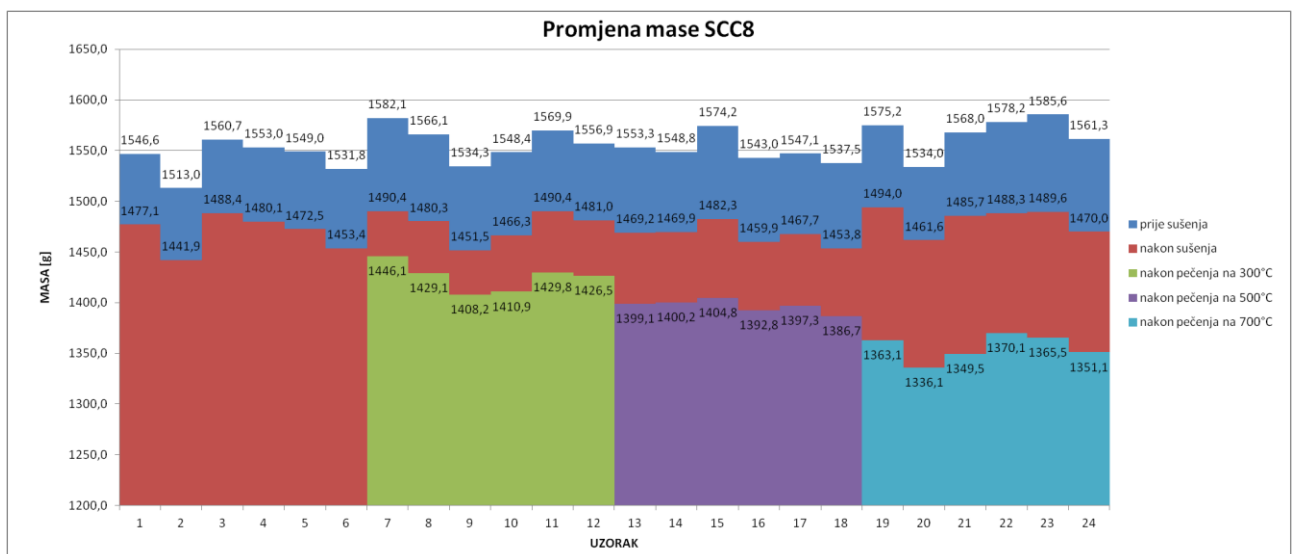
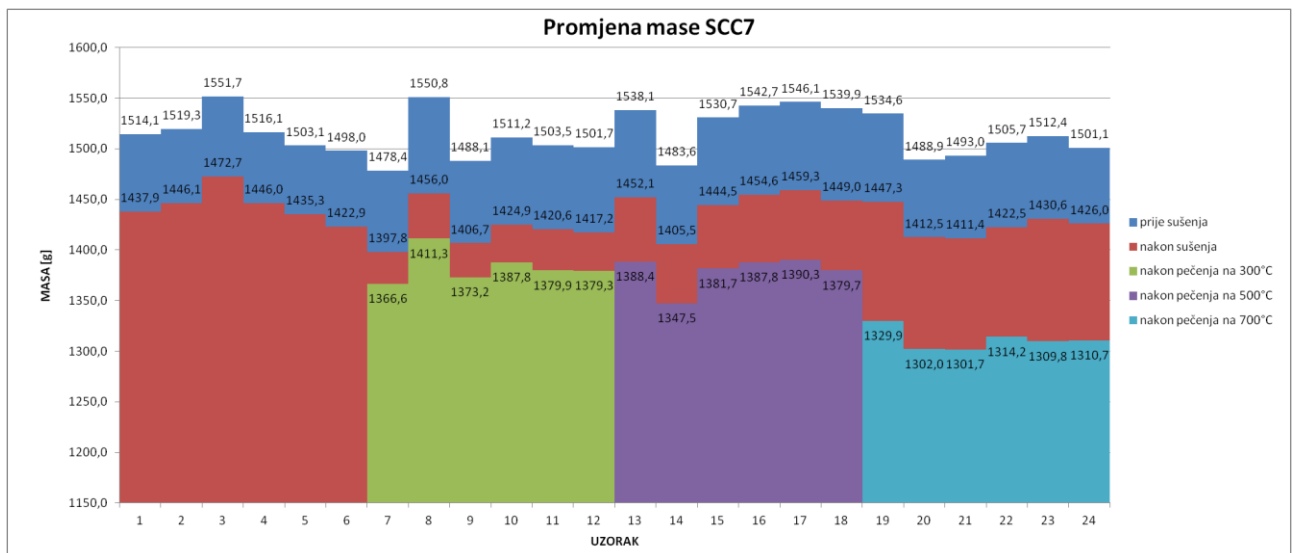
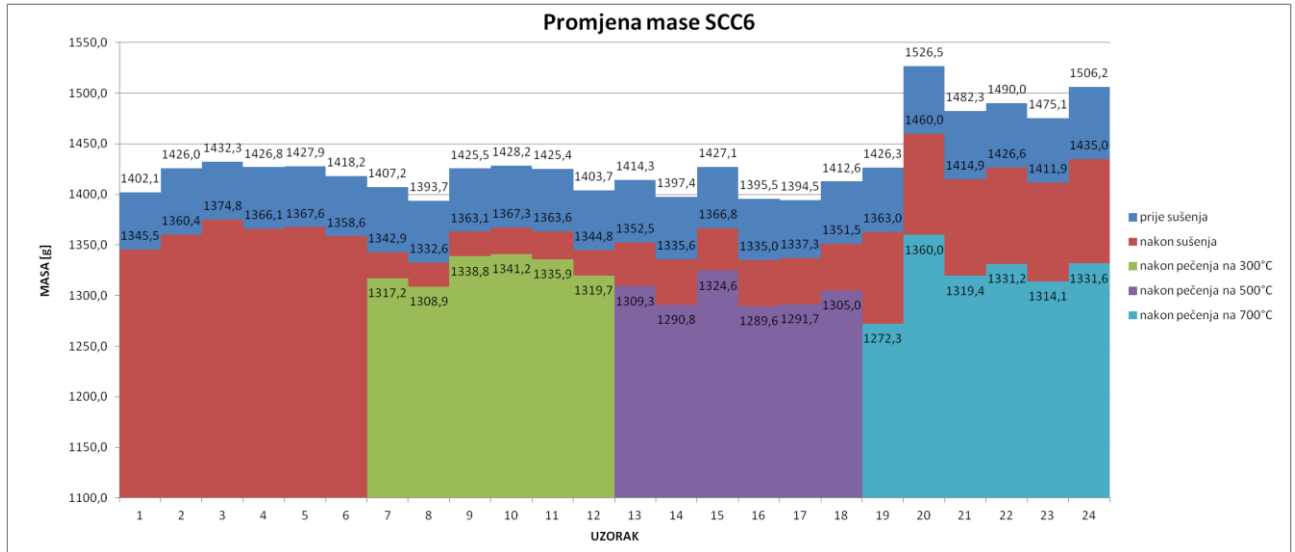
### 6.2.3 Promjena mase uzoraka

Analizom grafičkog prikaza promjene mase uzoraka betona na slici 6.9 vidljiv je utjecaj pojedinih filera i temperatura na masu.

Kod SSC6 mješavine sa filerom od recikliranom betona smanjenje mase je oko 5 % nakon sušenja na 100°C za sve uzorke. Nakon pečenja na 300°C i hlađenja na sobnu temperaturu masa je oko 94% početne vrijednosti, nakon 500°C je oko 92%, a nakon 700°C je oko 90% početne mase.

Kod SSC7 mješavine sa filerom od recikliranom betona smanjenje mase je oko 5 % nakon sušenja na 100°C za sve uzorke. Nakon pečenja na 300°C i hlađenja na sobnu temperaturu masa je oko 92% početne vrijednosti, nakon 500°C je oko 90%, a nakon 700°C je oko 87% početne mase.

Kod SSC8 mješavine sa filerom od recikliranom betona smanjenje mase je oko 5 % nakon sušenja na 100°C za sve uzorke. Nakon pečenja na 300°C i hlađenja na sobnu temperaturu masa je oko 91% početne vrijednosti, nakon 500°C je oko 90%, a nakon 700°C je oko 86% početne mase.

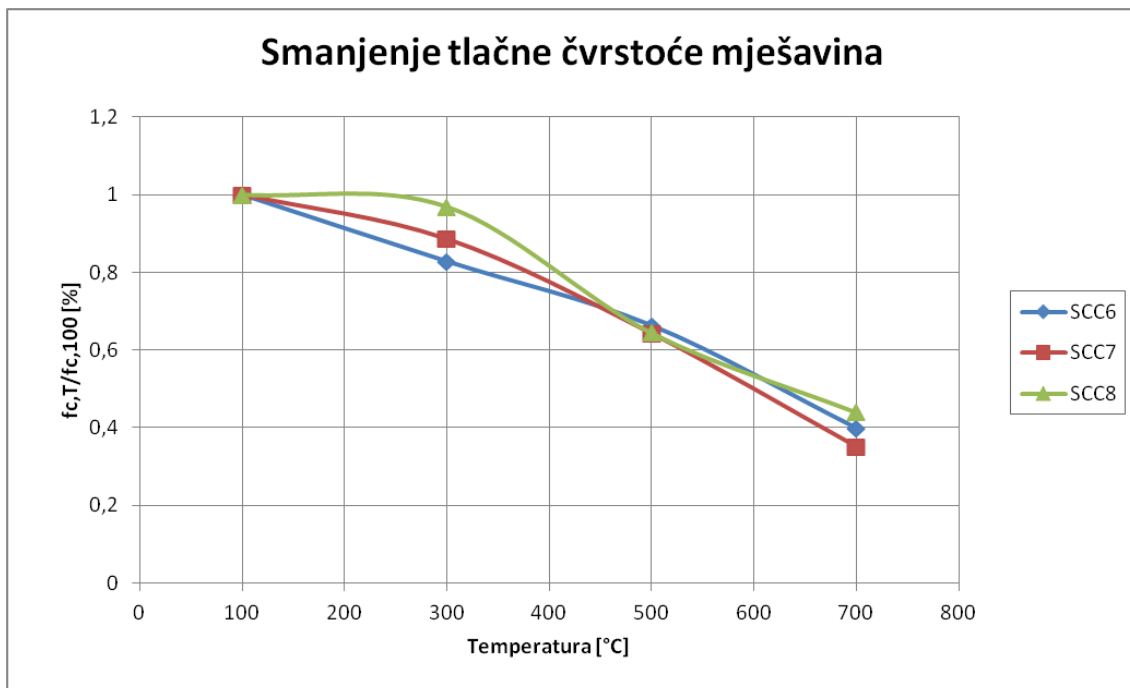


Slika 6.9 Grafički prikaz promene mase uzorka po mješavinama

#### 6.2.4 Analiza dobivenih rezultata

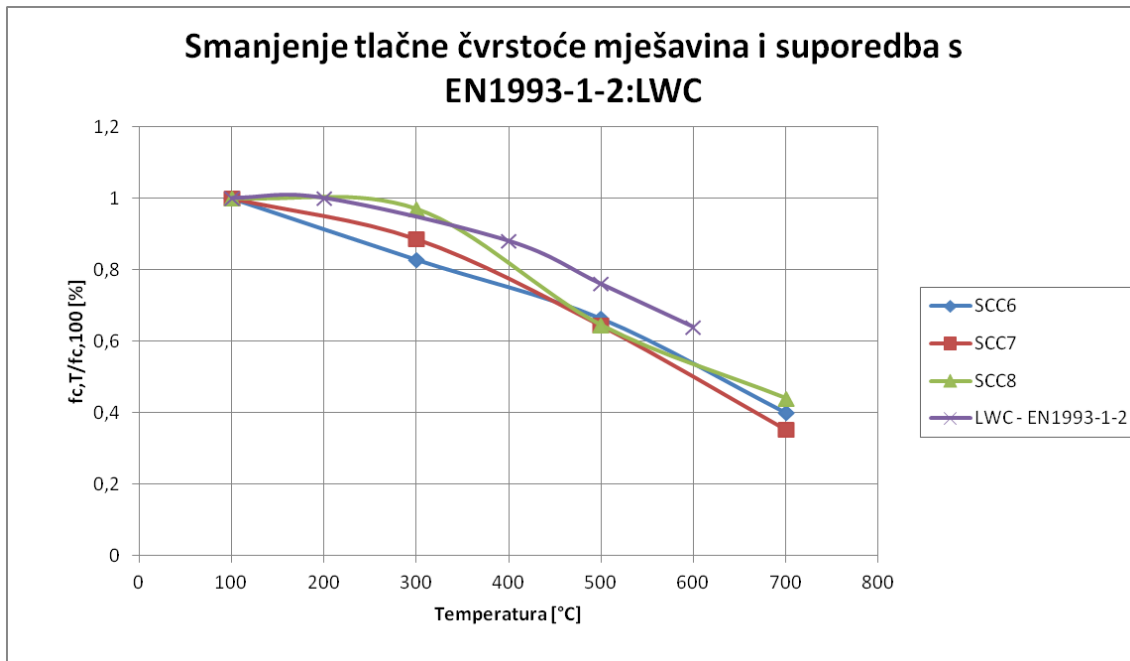
U ovom poglavlju su opisani rezultati ispitivanja smanjenja tlačne čvrstoće, dinamičkog modula elastičnosti i mase za pojedine temperature ispitivanja uzoraka na sve tri mješvine.

Prikazani su rezultati tlačnih čvrstoća u bezdimenzionalnom obliku tako da se čvrstoća  $f_{c,T}$  za temperaturu  $T$  podijeli s referentnom čvrstoćom uzoraka mješavine na sobnoj temperaturi nakon sušenja na  $100^{\circ}\text{C}$   $f_{c,100}$ . Rezultati su dobiveni kao srednja vrijednost pojedine karakteristike od 6 ispitnih uzorka svake mješavine koji su se zagrijavali za svaku ispitanu temperaturu. Iz slike 6.10 vidi se smanjenje tlačnih čvrstoća po mješavinama i za različite temperature. Može se zaključiti da uzorci SCC8 mješavine sa filerom od metakaolina imaju najbolje čvrstoće za sve ispitane temperature požara. Općenito, sve tri ispitanе mješavine imaju sličan trend opadanja tlačne čvrstoće, najveća razlika je na temperaturi od  $300^{\circ}\text{C}$  gdje uzorci SCC6 mješavine sa recikliranim betonom imaju očigledno najmanje čvrstoće. Na temperaturi od  $500^{\circ}\text{C}$  je trend opadanja čvrstoće najujednačeniji za sve tri mješavine i na toj temperaturi sve mješavine imaju oko 65% referentne čvrstoće. Iz slike 6.11 vidi se usporedba smanjenja tlačne čvrstoće ispitanih mješavina sa vrijednostima iz eurokoda EN1993-1-2 za laki beton i uočljivo je kako ispitani rezultati prate trend smanjenja tlačne čvrstoće koji se predlaže u eurokodu u rasponu 10-15 % ispod predloženih vrijednosti tlačnih čvrstoća.



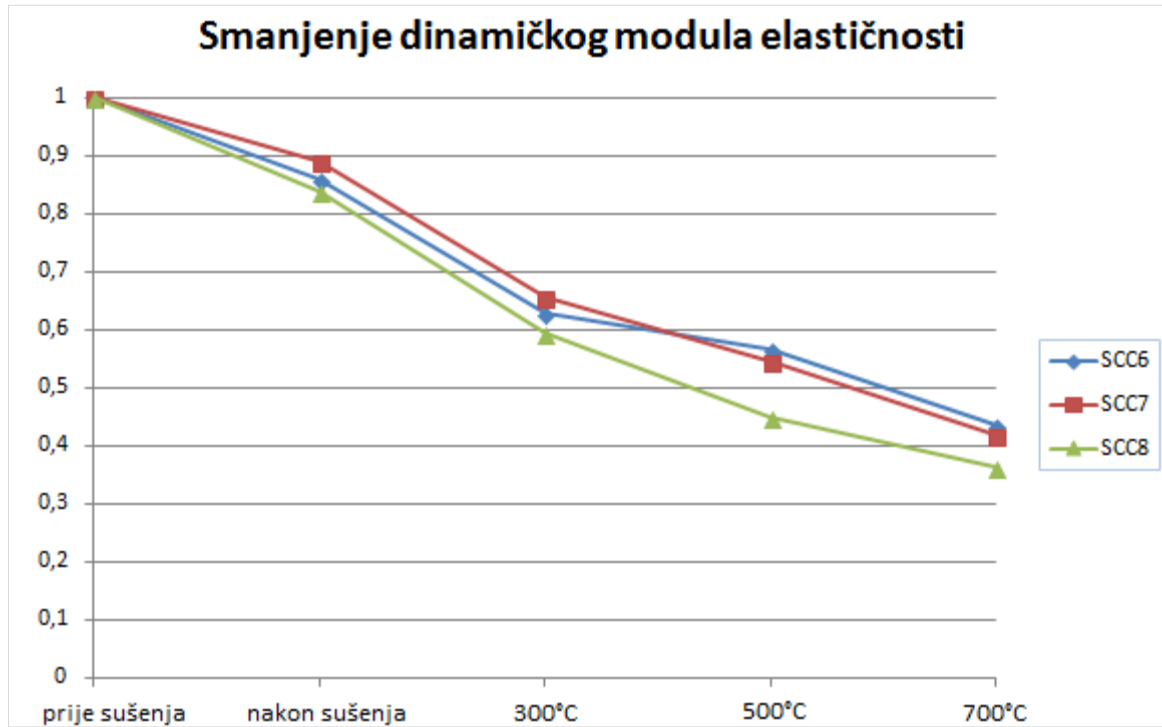
Slika 6.10 Smanjenje tlačne čvrstoće po temperaturama i mješavinama



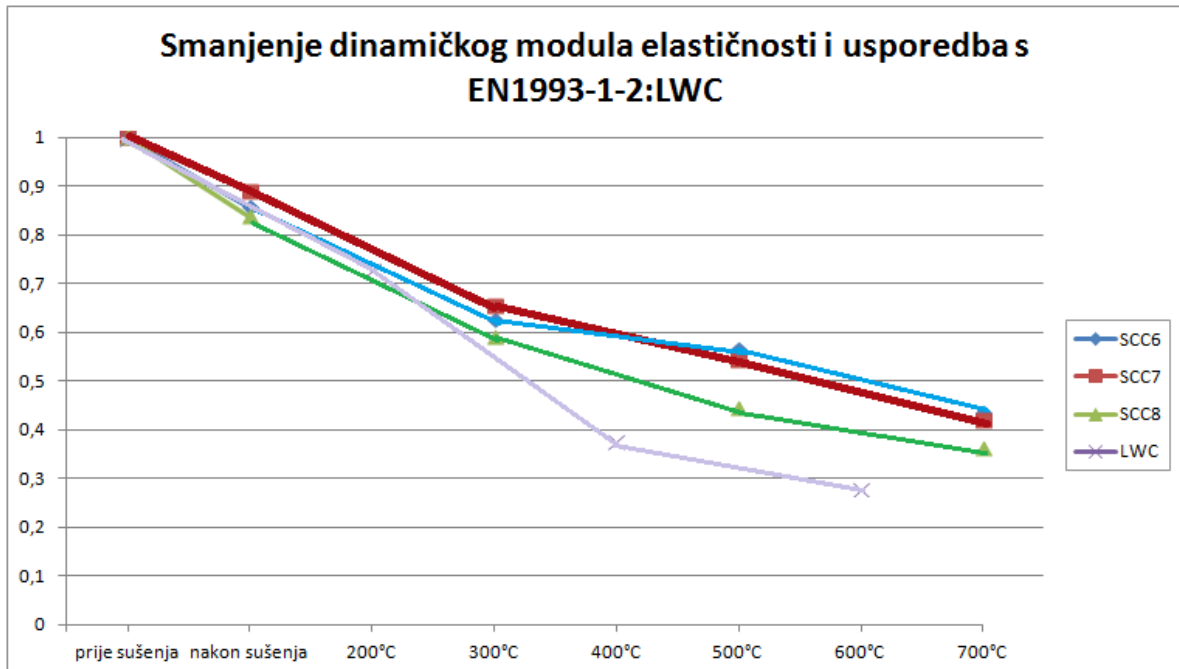


**Slika 6.11** Smanjenje tlačne čvrstoće po temperaturama i mješavinama i usporedba sa EN1993-1-2

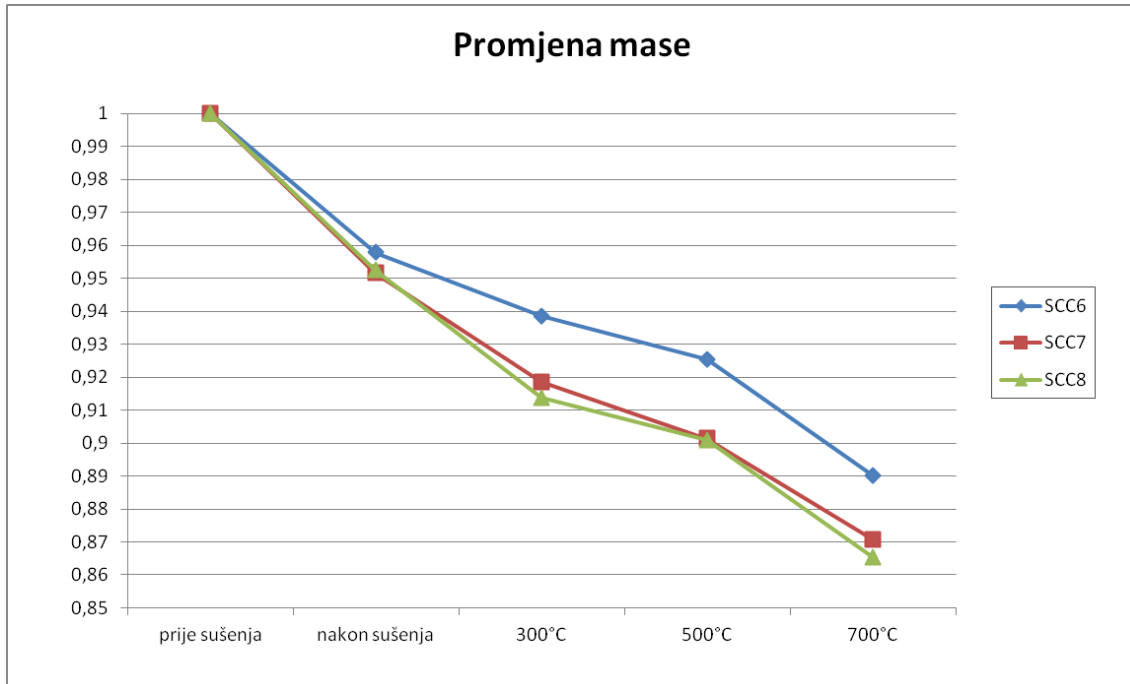
Na slici 6.11 vidi se grafička usporedba smanjenja rezultata ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti. Najveće odstupanje ima mješavina SCC8 koja u odnosu na referentni modul elastičnosti prije sušenja ima najmanje vrijednosti te nakon pečenja na 700°C ima 35% vrijednosti referentnog dinamičkog modula elastičnosti. Mješavine SCC6 i SCC7 imaju približno jednako smanjenje vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti u odnosu na vrijednosti modula na 700°C. Slika 6.13 prikazuje usporedbu rezultata sa normom na laki beton iz Eurokoda EN1993-1-2:LWC. Rezultati mješavina ovog ispitivanja pokazuju bolje rezultate od lakog betona LWC predloženog u normi.



Slika 6.12 Promjena dinamičkog modula elastičnosti



Slika 6.13 Promjena dinamičkog modula elastičnosti i usporedba s EN1993-1-2:LWC



**Slika 6.14** Promjena mase

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 6.14 vidi se da se gubitkom slobodne vode pri sušenju na 100°C gubi oko 4-5% početne mase uzoraka za sve tri mješavine. Uzorci mješavine SCC6 sa recikliranim betonom imaju najmanje smanjenje mase u odnosu na početnu mase prije sušenja.

## 7 ZAKLJUČAK

Beton je danas najviše korišten građevinski materijal na svijetu. Gotovo stoljeće i pol, koliko se beton primjenjuje, pokriva oko 70 % potreba u građenju i postao infrastrukturna i urbana osnova suvremenog života. Današnji urbani razvoj u svim područjima života ljudi prati i razvoj u građevinarstvu koji nameće nove zahtjeve. Za postizanje zahtjevanih svojstava betona u konstrukciji, važne su i pojedine faze u procesu proizvodnje kao što su transport, ugradnja i njega koje čine i velik udio u ukupnim troškovima izvedbe betonskih konstrukcija. Između ostalog, povećanje produktivnosti odnosno smanjenje troškova i povećanje te poboljšanje uvjeta rada, uz zadovoljavanje propisanih svojstava betona, postali su prioritet u građevinarstvu. Neke od navedenih zahtjeva obični beton teško je mogao ostvariti pa su krenula istraživanja na području dobivanja novih, boljih građevinskih materijala kojima potiče održiva i ekološki savjesnija tehnologija proizveden istih.

Samozbijajući beton (eng. Self compacting concrete, SCC) je vrsta betona koja teče samo pod utjecajem vlastite težine bez segregacije, tijekom čega se debarira (nema zarobljenih mjehurića zraka) i u potpunosti popunjava oplatu zaobilazeći armaturu te na kraju zadržava horizontalnu površinu bez uporabe vibracijskih uređaja. Poboļšana fluidnost, visoka čvrstoća u očvrslom stanju, lakša ugradnja i povećana trajnost samo su neke od karakteristika koje razlikuju samozbijajući beton od običnog.

Osnovna karakteristika lakih betona je njihova gustoća  $600-1500 \text{ kg/m}^3$  koja se postiže upotrebom agregata s velikim sadržajem pora, stvaranjem međuprostora između krupnih zrna agregatata te stvaranjem pora u mortu. Zbog povećanog sadržaja pora laki beton ima manju čvrstoću i otpornost na habanje u odnosu na normalni beton, ali ima više drugih prednosti, kao što su manja volumna masa i izolacijska svojstva. Trajnost lakih betona može biti ista kao i kod običnog betona.

Beton se smatra negorivim materijalom koji pri djelovanju visokih temperatura ne ispušta štetne plinove, ali gubi na čvrstoći te može doći do oštećenja strukture betona. Brzina i stupanj oštećenja ovisi o najvišoj temperaturi, vremenu izloženosti, sastojcima betona i sadržaju vlege te veličini elmentata.

Cilj ispitivanja ovog rada je određivanje preostalih mehaničkih svojstava nakon požara za različite temperature i različite sastave mješavina betona te usporedba istih sa rezultatima prije utjecaja požara, tj utjecaja visokih temperatura. Ispitivanje se vršilo na uzorcima starim dvije

godine, za usporedbu se uzete tri mješavine, različite po sastavu. Poznati su i rezultati ispitivanja u sviježem stanju ispitivanih uzoraka:

- Kod analize rezultata rasprostiranja - slijeganjem, mješavina s dodatkom silikatne prašine pokazala je najbolja svojstva; nema segregacije krupnog agregata, nema odvajanja vode na krajevima, postignuta je dobra viskoznost;
- Kod svih mješavinam vidljivo je veliko izlučivanje vode i odvajanje agregata te su rezultati ispitivanja L-kutijom potpuno nezadovoljavajući
- Nijedna mješavina nije zadovoljava kriterij ispitivanja J-prstenom

Rezultatati ispitivanja otpornosti na požar:

- Preostale tlačne čvrstoće nakon požara na 300°C imaju 80-95% vrijednosti početne tlačne čvrstoće (nakon sušenja na 100°C). Na ovoj temperaturi najveću čvrstoću ima mješavina SCC8 sa dodatkom metakaolina.
- Preostale tlačne čvrstoće nakon požara na 500°C imaju oko 65% vrijednosti početne tlačne čvrstoće. Na ovoj temperaturi najveću čvrstoću ima mješavina SCC6 sa recikliranim betonom.
- Preostale tlačne čvrstoće nakon požara na 700°C imaju 35-45% vrijednosti početne tlačne čvrstoće. Na ovoj temperaturi najveću čvrstoću ima mješavina SCC8 sa dodatkom metakaolina.
- Dinamički modul elastičnosti se smanjuje za 55-65% nakon požara temperature 700°C u odnosu na prije požara.
- Mase uzoraka se smanjuju za 10-15% nakon požara temperature 700°C u odnosu na prije požara.

Različiti autori su u svojim ispitivanjima dobili da su mješavine sa različitim dodacima najbolje, te se ne može zaključiti koji dodatak daje najbolje rezultate. Tako je, po Mrduljaši, najmanji utjecaj na pad mehaničkih svojstava utvrđen kod mješavina s dodatkom letećeg pepela. [13] S druge strane, u istraživanju koje je proveo prof Torić, Boko, Juradin i Baloević najbolje se pokazala mješavina pripremljena je s najmanjim iznosom cementa i najvišim vodocemnetnim omjerom. Može se zaključiti da se požarna otpornost, odnosno smanjenje rezidualnih mehaničkih svojstava uvelike razlikuje ovisne o sastavu mješavine i dodacima koji su u mješavini, te bi požarna otpornost u slijedećim znanstvenim istraživanjima trebala

biti detaljnije ispitana kako bi se dobio detaljniji učinak požara na strukturu i mehanička svojstva betonskih elemenata.

**LITERATURA:**

- [1] Lidia Karla Vranješ: Samozbijajući lagani beton s dodatkom punila od mljevene opeke; Diplomski rad
- [2] Katarina Grbeša: Utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrslog SCLC-a; Diplomski rad
- [3] Marina Pavlić: Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke; Završni rad
- [4] Ivana Milišćević: Požarna otpornost betona s opekarskim lomom kao agregatom; Doktorska dizertacija
- [5] Ivanka Netinger, Dubravka Bjegović, Ivana Kesegić: Utjecaj tipa cementa i agregata na požarnu otpornost mikrobetona; GRAĐEVINAR 60 (2008) 9, 779-786
- [6] 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
- [7] Neno Torić, Ivica Boko, Bernardin Peroš: Smanjenje mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće nakon požara, GRAĐEVINAR 63 (2011) 12, 1033-1041
- [8] Jianzhuang Xiaoa, Meng Xiea, Ch. Zhangb: Residual compressive behaviour of pre-heated high-performance concrete with blast-furnace-slag, Fire Safety Journal 41 (2006) 91-98
- [9] Krstulović P.: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
- [10] Velimir Ukrainczyk: Beton, Struktura, Svojstva, Tehnologija; Zagreb 1994
- [11] Mohamedbhai GTG. Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete. Mag Concrete Res 1986;38(9):151-8.
- [12] <https://www.scribd.com/doc/306007540/f24905-7-p-Ultrazvuk>
- [13] Branka Mrduljaš: Doprinos karakterizaciji svojstava betona izloženog požaru ; Zagreb, 2015.