



PROJEKT: **USPOSTAVNI ISTRAŽIVAČKI PROJEKT**  
**REUSE OF SEWAGE SLUDGE IN CONCRETE INDUSTRY – FROM  
MICROSTRUCTURE TO INNOVATIVE CONSTRUCTION  
PRODUCTS (RESCUE)**

BROJ PROJEKTA: **7927**

PROJEKT FINANCIRA: **HRVATSKA ZAKLADA ZA ZNANOST**

ELABORAT: **IZVJEŠTAJ BR.5 –**  
**REZULTATI ISPITIVANJA NA BETONU**

VRSTA ELABORATA: **TEHNIČKI IZVJEŠTAJ**

UGOVOR: **120-050/14**

GODINA ISTRAŽIVANJA: **1 (01.09.2014. – 31.08.2015.)**

DATUM: **Kolovoz, 2015.**

IZRAĐIVAČ: **GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU**

AUTORI:

Dražen Vouk, doc.dr.sc.  
Domagoj Nakić, mag.ing.aedif.  
Nina Štirmer, izv.prof.dr.sc.  
Marijana Serdar, dr.sc.  
Ana Baričević, dr.sc.

DEKAN GRAĐEVINSKOG FAKULTETA

SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

prof. dr. sc. Neven Kuspilić, dipl. ing. grad.





## Rezultati ispitivanja na betonu

### 1. Uvod

Beton je kompozitni građevinski materijal dobiven miješanjem agregata (obično šljunka i pjeska), cementa i vode. S ciljem poboljšanja određenih svojstava betona mogu se dodavati i drugi materijali, a u sklopu ovog istraživanja razmatran je utjecaj dodavanja pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV kao zamjene za određeni udio cementa.

Cilj istraživanja je ispitati mogućnost i opravdanost zbrinjavanja pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV u betonskoj industriji, čime bi se zaokružio cijelovit proces pročišćavanja otpadnih voda, uključivo i zbrinjavanje mulja, kao najveće količine opasne otpadne tvari koja se generira na UPOV, što u potpunosti doprinosi povećanju stupnja održivog gospodarenja otpadom, kao značajnog ekološkog problema današnjice, ne samo u Hrvatskoj, već i u gotovo svim zemljama svijeta.

Provedenim istraživanjem analizirana je i povezanost svojstava betona s različitim udjelom pepela kao zamjenom za dio cementa. Time se ujedno pridonosi smanjenju ekološkog i ekonomskog tereta industrijske proizvodnje cementa i betona. U cilju dokazivanja navedenog, provedena su potrebna ispitivanja svojstva betona, uz dodatak pepela kao zamjene za dio cementa i to u svježem stanju (konzistencija, udio pora, gustoća i temperatura) i očvrsnulom stanju (čvrstoća na savijanje, čvrstoća na tlak, vodonepropusnost i skupljanje), sukladno hrvatskim i europskim normama.

Uz ispitivanje utjecaja temperature spaljivanja mulja na kvalitetu dobivenog pepela, odnosno svojstva betona, ispitivani su utjecaji različitih vodovezivnih omjera, s ciljem utvrđivanja optimalnih odnosa koji će rezultirati povoljnijim svojstvima betona.

Treba naglasiti da je ograničena količina dostupnog pepela bila značajan faktor pri projektiranju eksperimenata.

Glavni smjer istraživanja, prilikom projektiranja eksperimenta, bio je usmjeren na pronalaženje optimalne temperature spaljivanja mulja i optimalne količine pepela ugrađene u beton, kao zamjene za dio cementa. Kao kontrolna mjera i za usporedbu rezultata izradile su se i referentne mješavine.

Temperatura spaljivanja mulja je varirana jer utječe na karakteristike dobivenog pepela i stoga može imati utjecaja na njegova pucolanska svojstva.



Variranjem vodovezivnog omjera ( $v/v_e$ ) najčešće primjenjivanih u praksi, nastojalo se istražiti optimalan omjer vode i veziva (pepela i cementa), koji bi prema karakteristikama pepela dao najbolje rezultate.

Dakle, varirali su se sljedeći parametri:

- temperatura spaljivanja (800 °C, 900 °C i 1000 °C),
- vodocementni ( $v/c$ ), odnosno vodovezivni ( $v/v_e$ ) omjer,
- maseni udio pepela (%) kao zamjena za cement.

U prvoj fazi istraživanja provedenih na betonu pripremljeno je ukupno **14 različitih mješavina** (2 referentne i 12 mješavina s korištenjem pepela samo s UPOV Koprivnica, dok će se mješavine dobivene korištenjem pepela s UPOV Karlovac i Zagreb analizirati u drugoj godini istraživanja).

Za potrebe ispitivanja različitih utjecajnih parametara, predviđeno je da su potrebne količine betona (u litrama) za ispitivanje u svježem i očvrsnulom stanju jedne mješavine oko 75,0 l.

**Tablica 1 Primjer projektiranog sastava betona (20%-tni udio pepela iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenog spaljivanjem na 800°C, uz  $v/v_e=0.50$ ) – oznaka mješavine KC M<sub>20</sub>-B**

Materijal		KC M <sub>20</sub> -B			
		Masa (kg)	Gustoća (kg/dm <sup>3</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	Masa za 37,5 l (kg)
Cement		240,00	2,947	81,44	9,00
Pepeo (20%)		60,00	2,778	21,60	2,25
Voda		150,00	1,000	150,00	5,63
$v/v_e = 0.50$		-	-	-	-
Zrak 2.50%		-	-	25,00	-
AGREGAT	0 – 4	50%	992,70	2,750	360.98
	4 – 8	20%	397,08	2,750	144.39
	8 – 16	30%	595,62	2,750	22.34
Ukupno		2435,40	2,435	1000,00	91,33



## 2. Materijal i postupak miješanja i ugradnje betona

Za potrebe ovog istraživanja korišten je drobljeni dolomit granulacije 0 – 4 mm (50%), 4 – 8 mm (20%) i 8 – 16 mm (30%) iz kamenoloma Očura proizvođača Holcim Hrvatska d.o.o.

Cement je hidrauličko vezivo, odnosno fino mljeveni anorganski materijal koji, pomiješan s vodom, kroz hidratacijske reakcije formira pastu i očvršćava, a nakon očvršćavanja zadržava svoju čvrstoću i stabilnost, na zraku i pod vodom.

Korišten je miješani portlandski cement, CEM II/B-M (S-V) 42,5N, trgovackog naziva Holcim Ekspert® cement (HRN EN 197-1).

Udio sastojaka u CEM II/B-M (S-V) 42,5N (HRN EN 197-1:2012) je kako slijedi:

- 65 – 79 % – klinker
- 21 – 35 % – zgura i silicijski leteći pepeo
- 0 – 5% – drugi spojevi.

Normirana 28-dnevna tlačna čvrstoća iznosi 42,5 – 62,5 MPa, uz normalni razvoj rane čvrstoće (EN 196-1).

Kao rezultat, ovaj cement karakterizira umjeren zahtjev za vodom, mali gubitak optimalne konzistencije, umjerenog vezanja cementa, umjeren razvoj čvrstoće; vrlo umjeren razvoj topline hidratacije, dobra otpornost na umjerenog agresivne utjecaje i posebno prilagođen za nosive betonske konstrukcije i betonske radove više završne čvrstoće.

Zbog navedenih karakteristika CEM II/B-M (S-V) 42,5N ima veliku upotrebu u građevinarstvu, stoga je baš ovaj cement odabran za upotrebu pri projektiranju mješavina betona, kako bi se dokazana svojstva odnosila na proizvod široke primjene na tržištu.

Ujedno, zamjenom dijela cementa dodatcima smanjuje se količina ekološki neprihvatljivog klinkera.

Prilikom miješanja betona korištena je voda iz vodovoda.

Izvagana je masa sastojaka unaprijed određena sastavom betona za svaku mješavinu. Sastojci su dakle: pepeo (osim za referentne mješavine), cement, agregat i voda.

Beton je miješan uobičajenim postupkom laboratorijskog Zavoda za materijale na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, prilagođenim potrebama miješanja betona s pepelom, koristeći se laboratorijskom miješalicom prikazanom na Slici 1. Budući da je konzistencija projektiranih betona bila izrazito loša i ugradnja praktički nemoguća, mješavinama se dodavalo određenu količinu superplastifikatora, čija se maksimalna dopuštena količina zadržala unutar granica propisanih tehničkim listom.



Po završetku miješanja, dio betona je odvojen za ispitivanje pora i konzistencije. Dio betona od ispitivanja konzistencije i dio betona od ispitivanja poroznosti su korišteni i nakon ispitivanja za ugradnju u kalupe.

Ostatak betona je ugrađivan u kalupe, koji su po tipu i broju odabrani prema unaprijed određenim vrstama ispitivanja u očvrsnulom stanju. Korišteni su kalupi oblika kocke dimenzija 15x15x15 cm i prizme dimenzija 10x10x50 cm i 10x10x40 cm.



**Slika 1 Postupak miješanja betona**

Beton je ugrađivan u kalupe uz vibriranje na vibro-solu te uz zaglađivanje površine zidarskom žlicom. Vibriranje se provodilo s ciljem zbijanja betona i izbacivanja viška zahvaćenog zraka, a duljina je ovisila o iskustvu ispitivača i mješavini, uz pažnju da ne dođe do segregacije.

Nakon  $24 \pm 2$  sata od miješanja, uzorci su raskalupljeni, a kalupi su očišćeni i nauljeni, kako bi bili spremni za ponovnu upotrebu. Uzorci na kojima su se ispitivale 1-dnevne čvrstoće potom su izdvojeni za ispitivanje, a oni na kojima su se ispitivale 7-dnevne i 28-dnevne čvrstoće te vodonepropusnost stavljeni su u vlažnu komoru. Prizme na kojima se ispitivalo skupljanje opremljene su posebnim instrumentima kojima se mjere deformacije.



### 3. Ispitivanja na betonu u svježem stanju

#### 3.1 Gustoća

Gustoća svježeg betona određena je kvocijentom njegove mase i volumena koji zauzima kad je ugrađen na predviđeni način prema normi HRN EN 1230-6:2009.



Slika 2 Kalup poznatog volumena korišten u postupku određivanja gustoće svježeg betona

#### 3.2 Temperatura

Temperatura mješavina betona određena je kao i za cementni mort prema normi HRN U.M1.032:1981 korištenjem digitalnog ubodnog termometra (Slika 3). U svježe izmiješan beton unesena je igla termometra, pazeći da mjeri temperaturu sredine mješavine i da ne dodiruje posudu. Nakon stacioniranja pokazivača temperature, izvršeno je očitanje u  $^{\circ}\text{C}$ .



Slika 3 Digitalni ubodni termometar



### 3.3 Konzistencija

Konzistencija slijeganjem prema normi HRN EN 12350-2 se ispitivala na način da se metalni kalup u obliku krnjeg stoča unutarnjih dimenzija:

- promjer baze  $200 \pm 2$  mm
- promjer vrha  $100 \pm 2$  mm
- visina  $300 \pm 2$  mm

puni betonom u 3 nivoa (na svakom nivou se beton zbijanje čeličnom šipkom 25 puta do dubine prethodnog sloja). Tijekom punjenja kalup se čvrsto drži i fiksira da ne bi došlo do izljevanja betona pri dnu. Nakon zbijanja zadnjeg sloja, višak betona iznad vrha kalupa i na podložnoj ploči se odstranjuju. Slijedi odizanje kalupa u 2 do 5 sekundi ravno prema gore bez pomicanja u stranu. Odmah nakon odizanja mjeri se i zapisuje slijeganje određeno razlikom visine kalupa i najviše točke slegnutog uzorka.



Slika 4 Određivanje konzistencije betona slijeganjem



### 3.4 Pore

Za ispitivanje sadržaja pora prema normi HRN EN 12350-7 koristio se porometar koji sadržaj pora mjeri na principu Boyle – Marriottovog zakona. Poznati volumen zraka pri poznatom tlaku graniči, u zabrtvljenom spremniku s nepoznatim volumenom zraka u uzorku betona. Brojčanik porometra je baždaren tako da se rezultirajući tlak pokazuje kao postotak zraka. Pomoću lopatice spremnik se puni svježim betonom u 3 sloja tako da se što je više moguće zraka odstrani iz uzorka. Odmah nakon punjenja spremnika vrši se zbijanje betona vibriranjem. Prije mjerjenja se čiste spremnik i poklopac, te se poklopac postavlja i ukliješti na spremnik s betonom. Glavni ventil za zrak se zatvara, a otvaraju se ventil A i B, te se kroz jedan od njih injektira voda sve dok ne poteče kroz drugi ventil. Porometar se tada lagano udara čekićem da bi se izbacio sav zarobljeni zrak, nakon čega se zatvara ventil za odušak i upumpava zrak u zračnu komoru dok kazaljka ne dođe u početni položaj. Slijedi zatvaranje ventila A i B te otvaranje glavnog ventila za zrak, a vrijednost udjela pora se očita direktno na brojčaniku. Dobiveni rezultat ispitivanja je postotak pora (udio) u svježem betonu.



Slika 5 Porometar



## 4. Ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju

### 4.1 Mehaničke karakteristike

Za ispitivanje tlačne čvrstoće prema normi HRN EN 12390-3 koristila se preša u kojoj se stavljuju uzorci u obliku kocke dimenzija 15x15x15 cm koji zadovoljavaju zahtjeve prema normama HRN EN 12350-1, HRN EN 12390-1 i HRN EN 12390-2. Uzorak se centririra i postavlja tako da je smjer nanošenja opterećenja okomit na smjer ugradnje uzorka. Nakon što se podatci o dimenzijama unesu u softver, slijedi opterećivanje uzorka konstantnom brzinom od 0,5 MPa/s do loma nakon čega se zabilježe najveća sila i tlačna čvrstoća. Tlačna čvrstoća se može i izračunati pomoću formule

$$f_c = \frac{F}{A_c},$$

gdje je F maksimalna sila pri lomu, a  $A_c$  površina uzorka na koju djeluje sila.



Slika 6 Preša za tlačenje uzorka betona

Ispitivanje čvrstoće na savijanje provodi se prema normi HRN EN 12390-5:2009 na uzorcima oblika prizme dimenzija 10x10x50 cm koji se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 12390-2. Postavljanju uzorka u prešu prethodi postavljanje ležajeva na propisanu udaljenost (300 mm). Uzorci se u prešu postavljaju tako da ih se centririra na ležajeve okomito na smjer ugradnje kako bi



opterećenje koje se nanosi brzinom između 0,04 i 0,06 Mpa/s bilo ujednačeno. Uzorak se, dakle, opterećuje jednom koncentriranom silom.



Slika 7 Preša za ispitivanje čvrstoće na savijanje na uzorcima betona

## 4.2 Vodonepropusnost

Ispitivanje vodonepropusnosti, odnosno dubine prodora vode pod tlakom provodilo se prema normi HRN EN 12390-8 na uzorcima u obliku kocke dimenzija 15x15x15 cm njegovanim pod vodom u skladu s normom HRN EN 12390-2. Ispitivanje se vršilo na uzorcima starim najmanje 28 dana. Koristi se stroj za utiskivanje vode pod tlakom od  $500 \pm 50$ kPa na  $72 \pm 2$  sata.



Slika 8 Stroj za utiskivanje vode pod tlakom u uzorce betona



Ispitivanjem se određuje dubina prodora vode pod tlakom. Voda se utiskuje s donje strane, a nepropusnost se osigurava gumenim brtvilom. Stroj osigurava ispitnu površinu približno jednaku polovici dijagonale uzorka. Tijekom ispitivanja vodilo se računa da ne dođe do popuštanja brtvila i curenja vode. Nakon pomicanja uzorka višak vode s površine uzorka na koju se djelovalo se obrisao. Zatim se uzorak cijepao na pola u preši okomito na površinu na koju se djelovalo. Nakon cijepanja uzorka markerom se bilježio trag vode i mjerio maksimalan prodor vode u milimetrima. Od tri ispitana uzorka iz svake mješavine, mjerodavna je najveća vrijednost prodora vode. Za svaku mješavinu betona propisuje se razred vodonepropusnosti prema sljedećoj tablici.

Tablica 2 Razredi vodonepropusnosti

Razred vodonepropusnosti	Dopušteni najveći prodor vode [mm]
VDP 1	50
VDP 2	30
VDP 3	15



Slika 9 Uzorci betona na kojima se ispitivala vodonepropusnost

#### 4.3 Skupljanje

Ispitivanje skupljanja provodilo se 3., 7., 14. dan te svaki sljedeći sedmi dan u vremenu od 90 dana starosti betona. Pomoću posebnog instrumenta mjerile su se deformacije u mm/m u odnosu na prvo mjerjenje nakon  $72 \pm 0,5$  sata.

Za ispitivanje skupljanja betona iz svake mješavine napravljeno je po tri uzorka oblika prizme, dimenzija  $100 \times 100 \times 400$  mm. 24 sata nakon miješanja, uzorci se raskalupe i obilježe. Zbog



nedostatka prostora uzorci se nisu mogli njegovati prva 3 dana, stoga je nulto mjerjenje obavljeno odmah prvi dan nakon miješanja. Prije samog mjerjenja postavljaju se reperi na sredinu uzorka na udaljenosti od 20 cm, koji će služiti za mjerjenje skupljanja. Uzorci se odlažu u prostoriji pri temperaturi od  $20\pm4$  °C i relativnoj vlažnosti zraka od  $40\pm5\%$ , postavljeni tako da se tijekom ispitivanja mogu potpuno slobodno deformirati. Mjerjenje se vršilo s A i B strane prizme, te se kao konačna vrijednost za pojedini uzorak uzimala srednja vrijednost. Konačni rezultat ispitivanja predstavlja srednju vrijednost svih pojedinačnih rezultata koji odgovaraju određenom vremenu, zaokruženo na 0,01 mm/m. Deformacije se mjere pomoću posebnog instrumenta prikazanog na slici 10.



Slika 10 Instrumenti za mjerjenje skupljanja



## 5. Denominacija mješavina betona

Radi jednostavnosti zapisivanja i lakše daljnje obrade rezultata mješavine su nazvane skraćeno.

Opis kratica mješavine:

**M<sub>10</sub>-B\***

- M – mješavina
- <sub>10</sub> – indeks označava udio pepela [%] kao zamjene za cement (<sub>0</sub> – 0 %, <sub>5</sub> – 5 %, <sub>10</sub> – 10 %, <sub>20</sub> – 20 %, <sub>30</sub> – 30 %)
- B – označava vodovezivni omjer ( $A - v/v_e = 0,45$ ,  $B - v/v_e = 0,50$ ,  $C - v/v_e = 0,55$ )
- \* – indeks označava temperaturu spaljivanja mulja na kojoj je dobiven pepeo (bez (\*) – 800 °C, \* – 900 °C, \*\* – 1000 °C)

Primjer interpretacije:

**M<sub>10</sub>-B\***, mješavina s udjelom pepela 10 %, dobivenog spaljivanjem mulja na 900 °C i vodovezivnog omjera 0,50.

**M<sub>20</sub>-B\*\***, mješavina s udjelom pepela 20 %, dobivenog spaljivanjem mulja na 1000 °C i vodovezivnog omjera 0,50.

**M<sub>20</sub>-C**, mješavina s udjelom pepela 20 %, dobivenog spaljivanjem mulja na 800 °C i vodovezivnog omjera 0,55.

**M<sub>0</sub>-C**, mješavina s udjelom pepela 0 % (referentna) i vodovezivnog omjera 0,55 (nema temperature spaljivanja jer se u referentnoj mješavini nije koristio pepeo).

Dodatno će se, u kasnijim fazama, pri usporedbama rezultata dobivenih s pepelom s različitim uređajima, ispred oznake mješavine, dodavati i kratica grada s čijeg UPOV potječe korišteni pepeo, odnosno mulj (KA, KC i ZG).



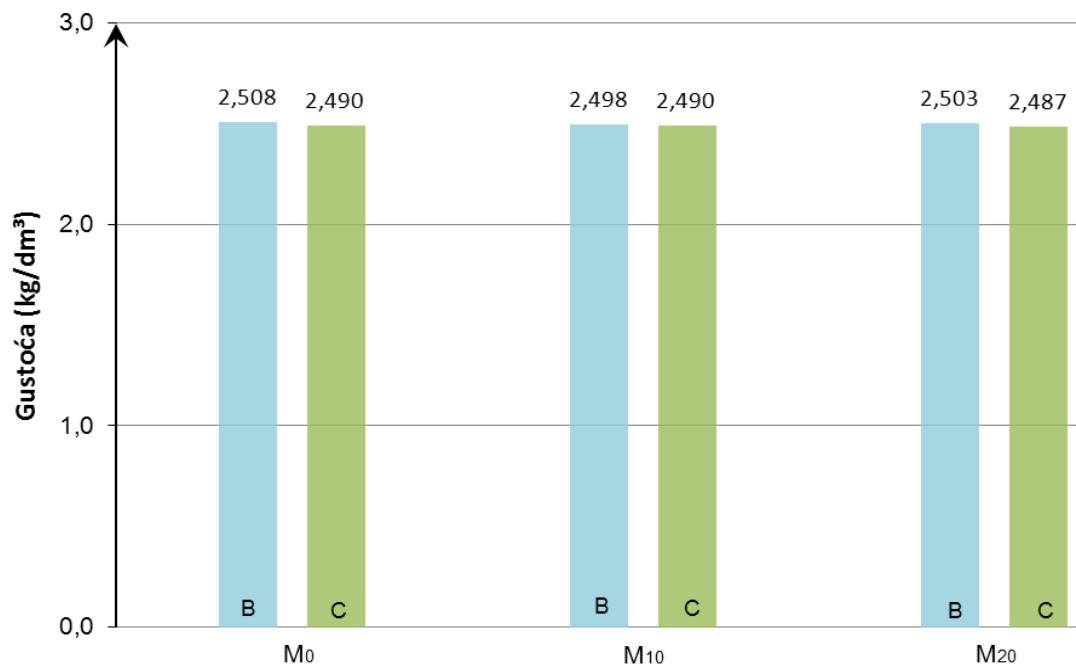
## 6. Rezultati ispitivanja na betonu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica

### 6.1 Rezultati ispitivanja na betonu u svježem stanju

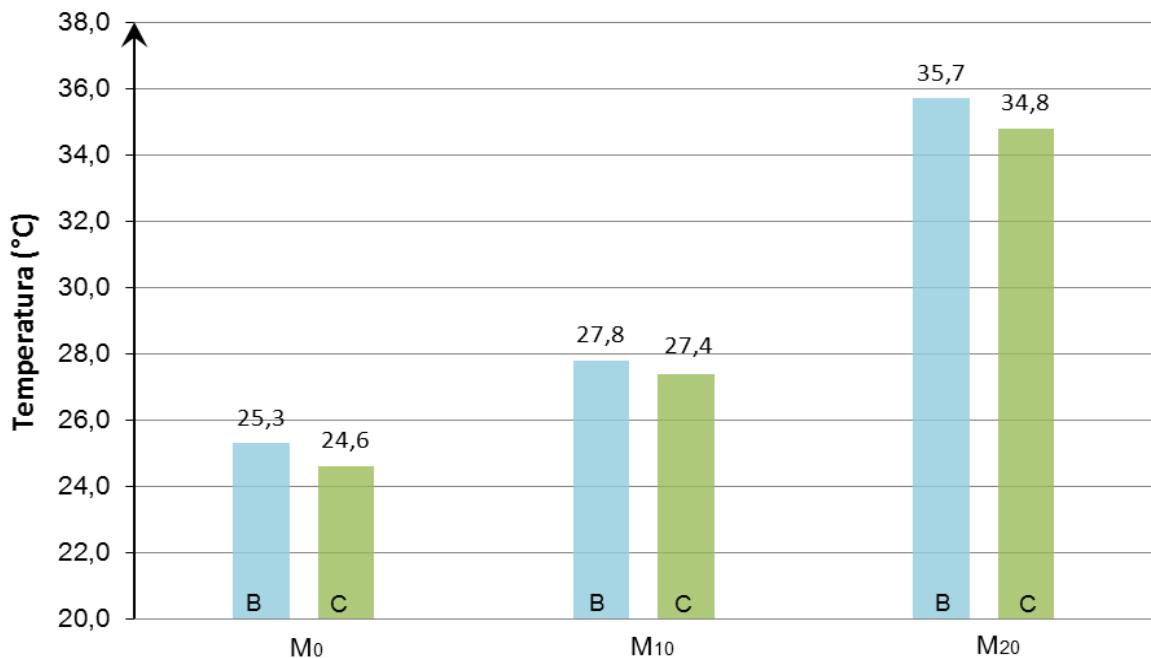
Tablica 3 Rezultati ispitivanja na betonu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 800°C (i na referentnim mješavinama)

Oznaka mješavine	Dodatak superplastifikatora na masu veziva (%)	Gustoća (kg/dm <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Konzistencija (slijeganje) (mm)
M <sub>0</sub> -B	0,6	2,508	25,3	1,6	165
M <sub>0</sub> -C	0,3	2,490	24,6	1,6	150
M <sub>10</sub> -B	0,6	2,498	27,8	2,2	10
M <sub>10</sub> -C	0,3	2,490	27,4	1,8	20
M <sub>20</sub> -B	0,8	2,503	35,7	3,0	0
M <sub>20</sub> -C	0,8	2,487	34,8	2,4	20

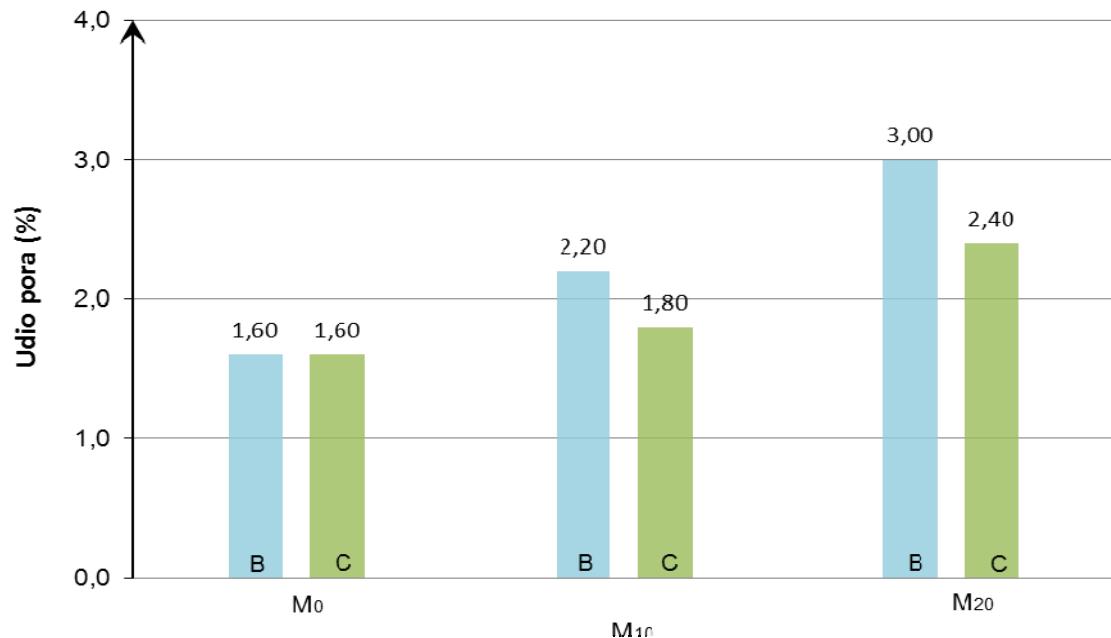
\*0,8% superplastifikatora – maksimalna dopuštena količina prema tehničkom listu



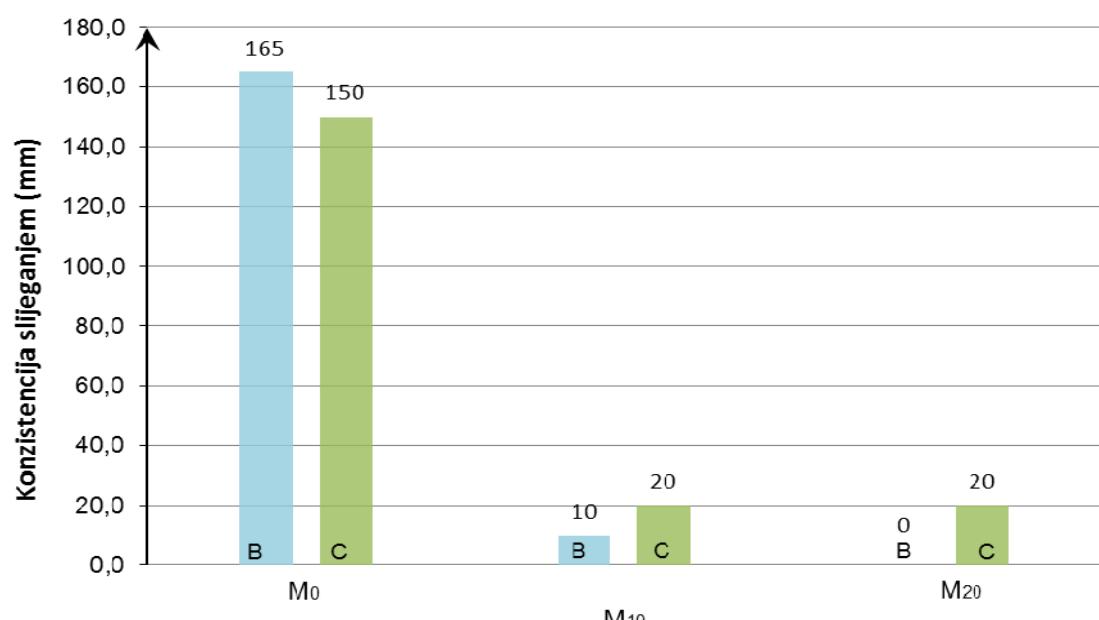
Slika 11 Gustoća svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800°C



Slika 12 Temperatura svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800°C



Slika 13 Udio pora u svježem betonu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800°C



Slika 14 Konzistencija (slijeganje) svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800°C

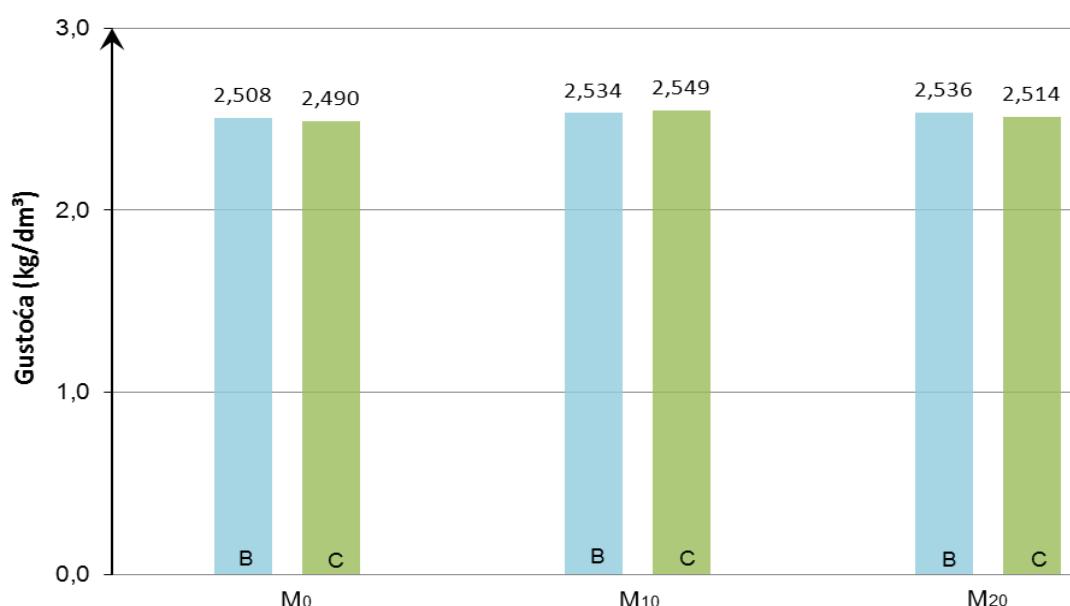


**Tablica 4 Rezultati ispitivanja na betonu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 900°C (i na referentnim mješavinama)**

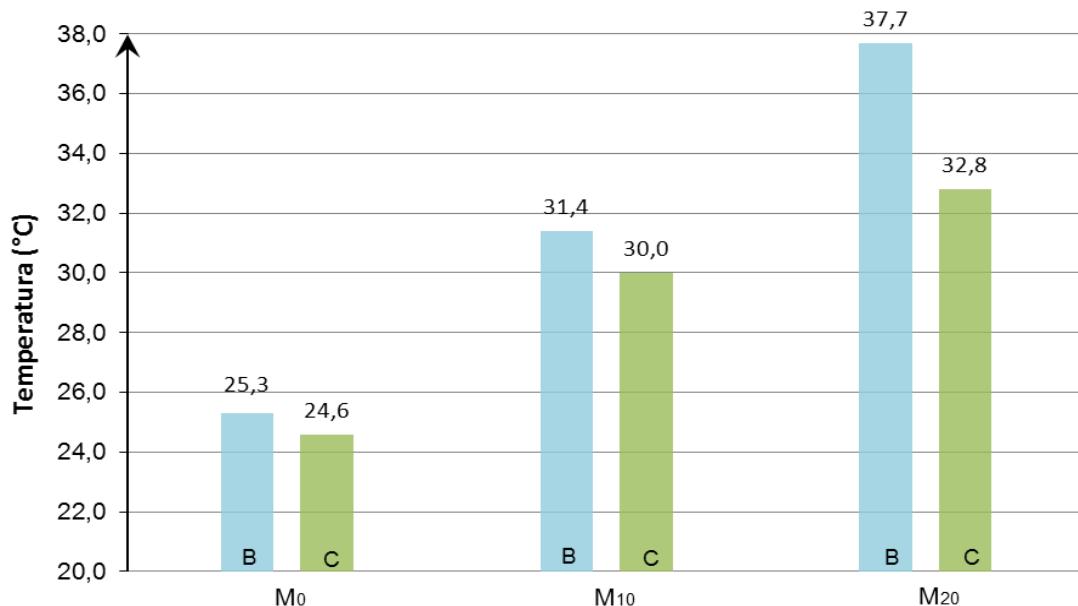
Oznaka mješavine	Dodatak superplastifikatora na masu veziva (%)	Gustoća (kg/dm <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Konzistencija (slijeganje) (mm)
M <sub>0</sub> -B	0,6	2,508	25,3	1,6	165
M <sub>0</sub> -C	0,3	2,490	24,6	1,6	150
M <sub>10</sub> -B*	0,8	2,534	31,4	2,1	40
M <sub>10</sub> -C*	0,8	2,549	30,0	1,7	140
M <sub>20</sub> -B*	0,8*	2,536	37,7	2,1	40
M <sub>20</sub> -C*	0,8	2,514	32,8	1,3	100

\*dodata voda 932,8g

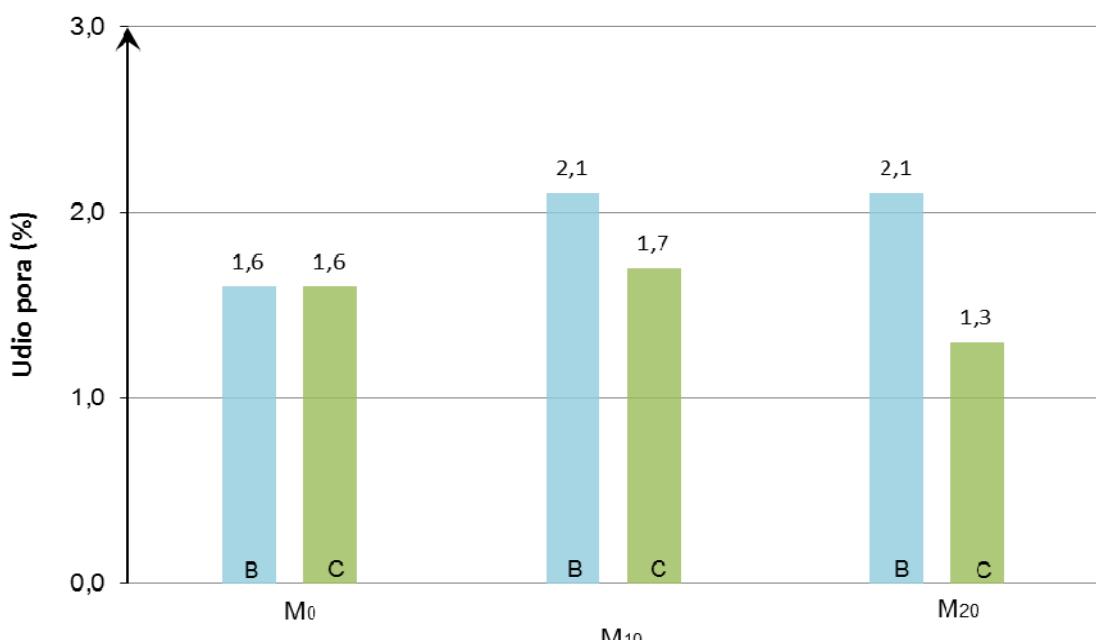
\*\*0,8% superplastifikatora max. dopuštena količina prema tehničkom listu



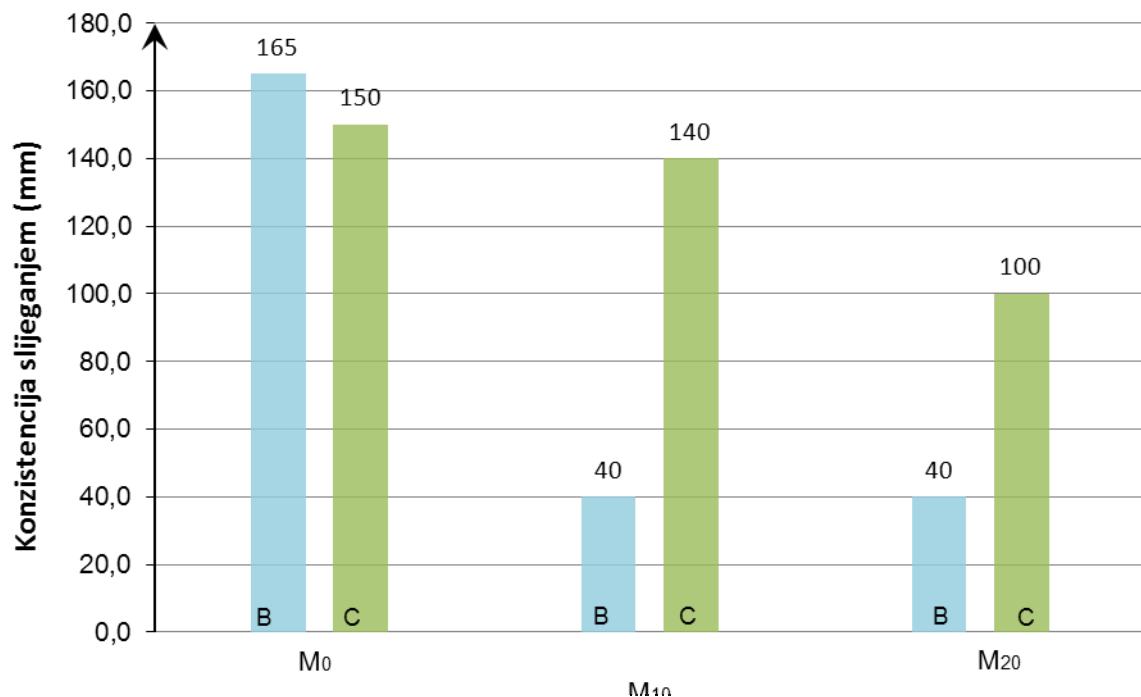
**Slika 15 Gustoća svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 900°C**



Slika 16 Temperatura svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 900°C



Slika 17 Udeo pora u svježem betonu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 900°C



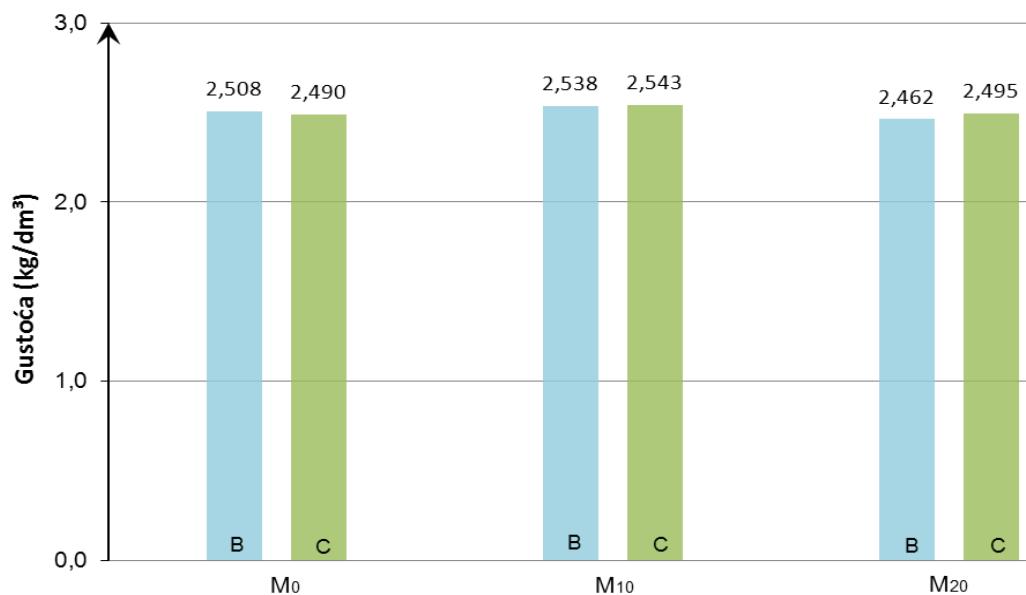
Slika 18 Konzistencija (slijeganje) svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 900°C

Tablica 5 Rezultati ispitivanja na betonu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 1000°C (i na referentnim mješavinama)

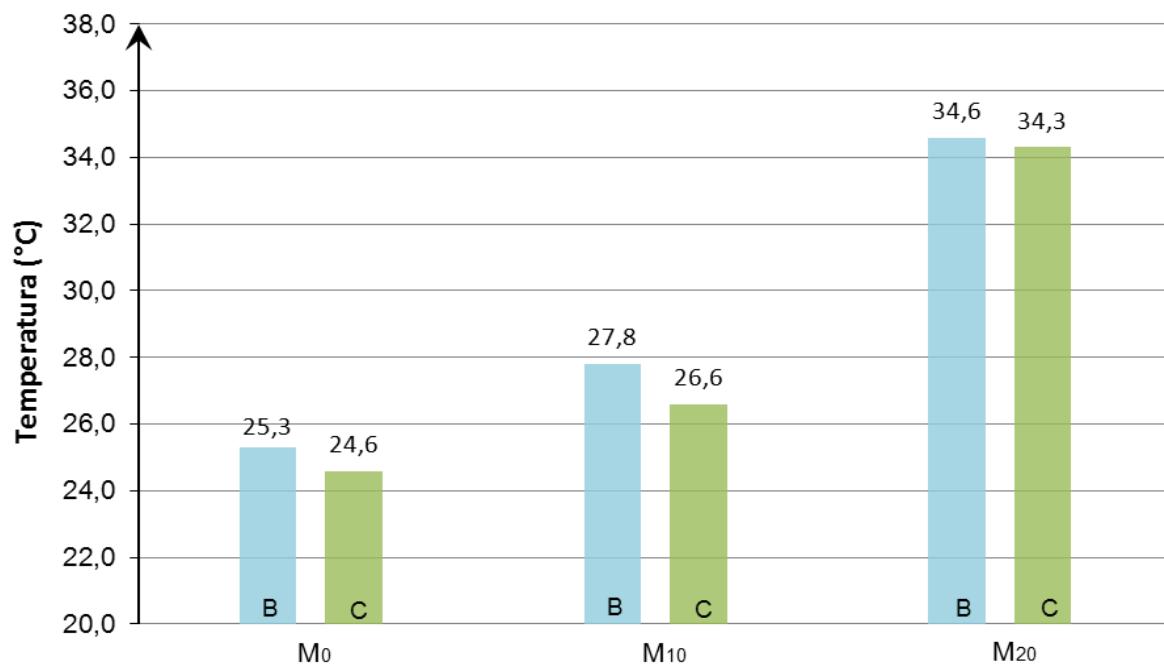
Oznaka mješavine	Dodatak superplastifikatora na masu veziva (%)	Gustoća (kg/dm <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Konzistencija (slijeganje) (mm)
M <sub>0</sub> -B	0,6	2,508	25,3	1,6	165
M <sub>0</sub> -C	0,3	2,490	24,6	1,6	150
M <sub>10</sub> -B**	0,8	2,538	27,8	1,5	10
M <sub>10</sub> -C**	0,8	2,543	26,6	1,0	40
M <sub>20</sub> -B**	0,8*	2,462	34,6	2,2	60
M <sub>20</sub> -C**	0,8	2,495	34,3	1,8	60

\*dodata voda 926,7g

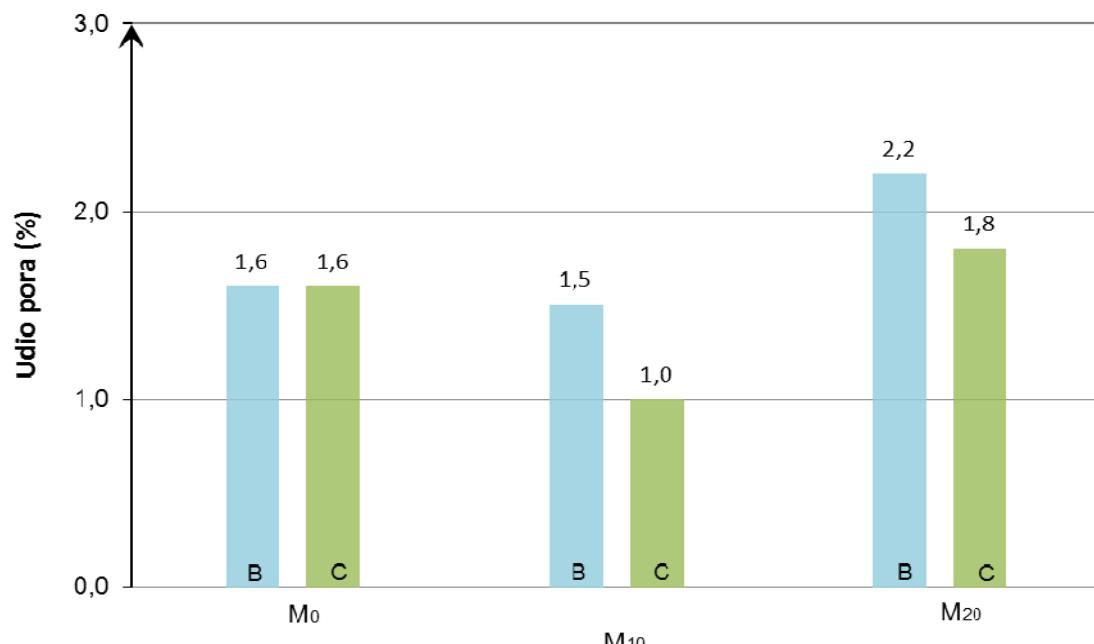
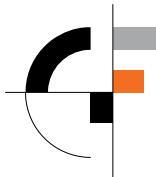
\*\*0,8% superplastifikatora - maksimalna dopuštena količina prema tehničkom listu



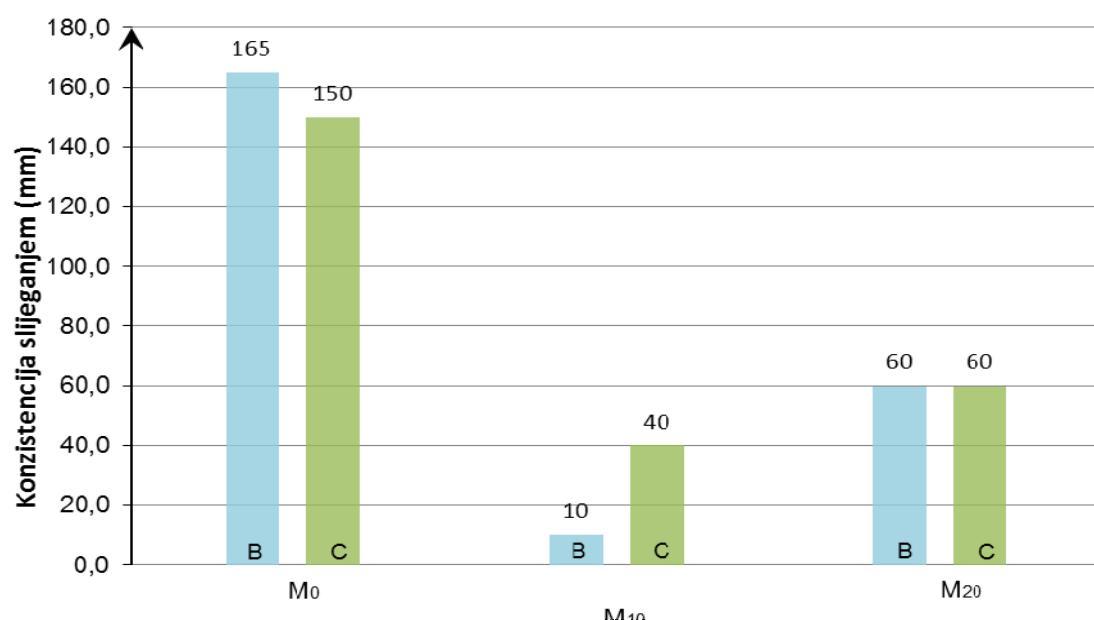
Slika 19 Gustoća svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 1000°C



Slika 20 Temperatura svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 1000°C



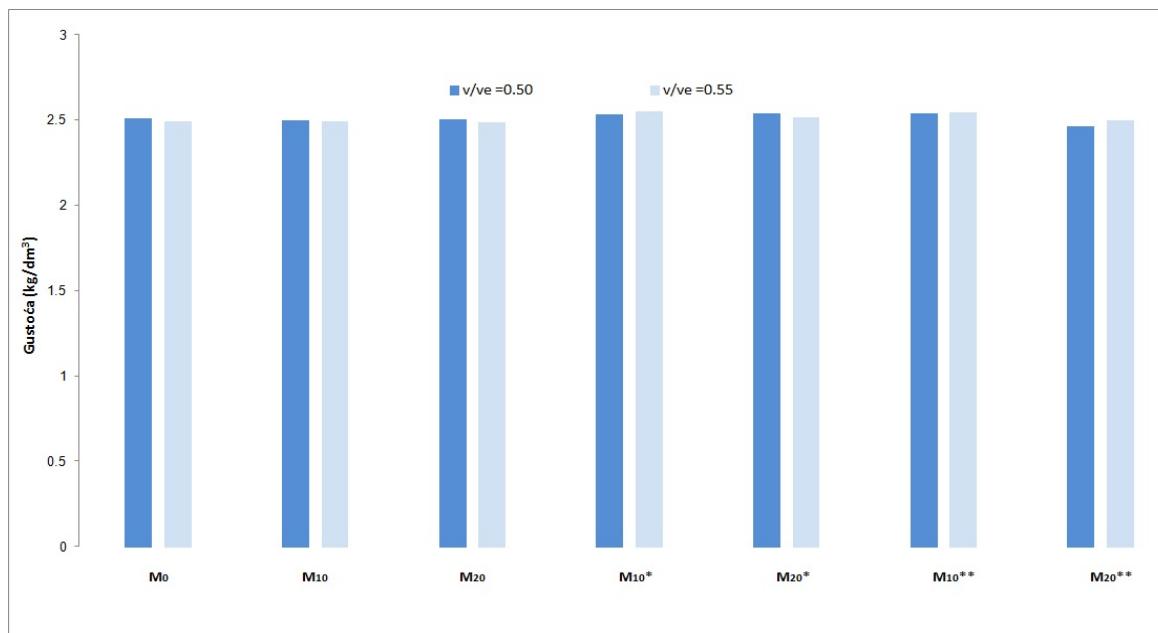
Slika 21 Udio pora u svježem betonu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 1000°C



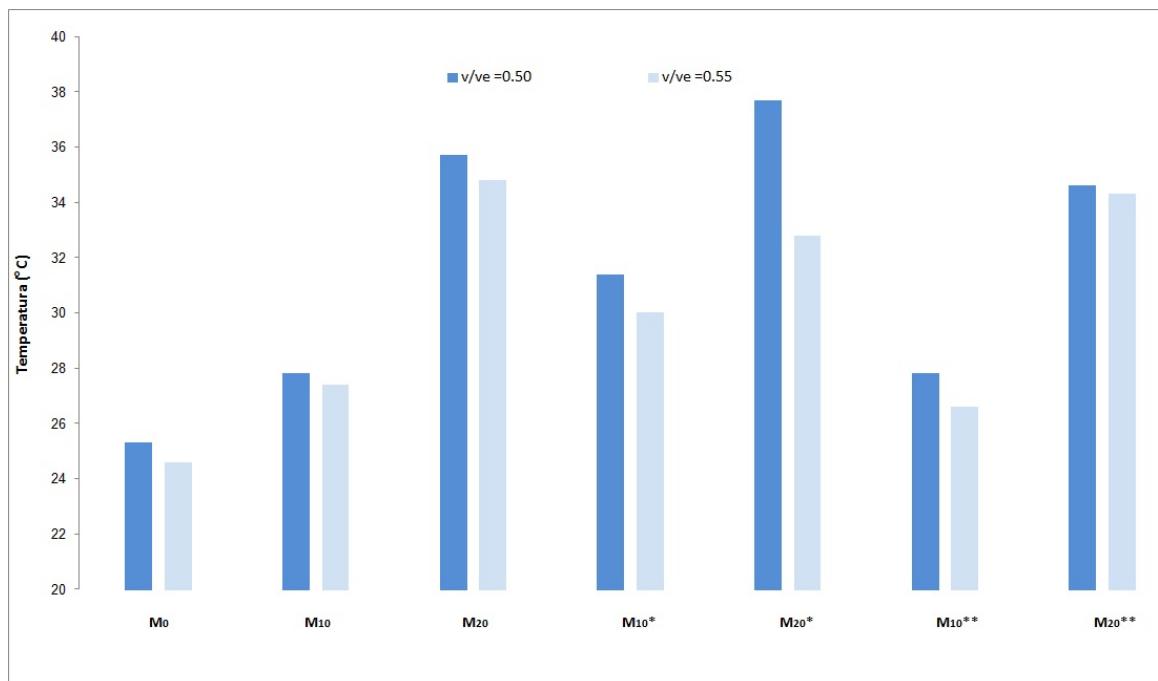
Slika 22 Konzistencija (slijeganje) svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 1000°C



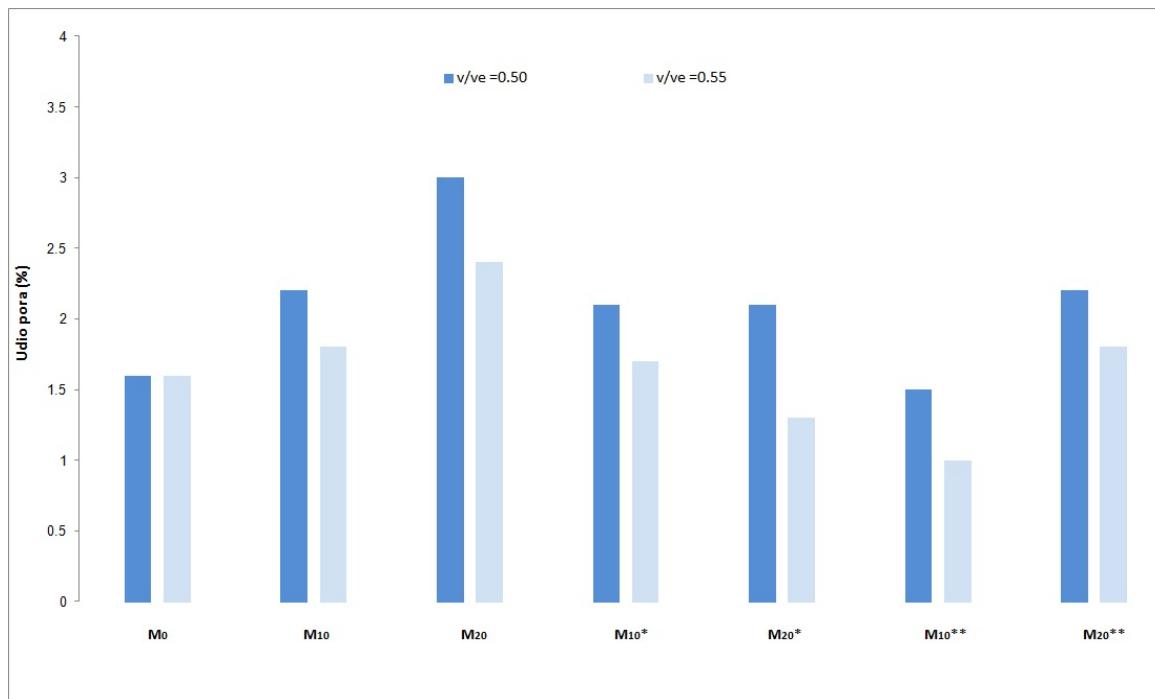
## 6.2 Analiza rezultata ispitivanja na betonu u svježem stanju



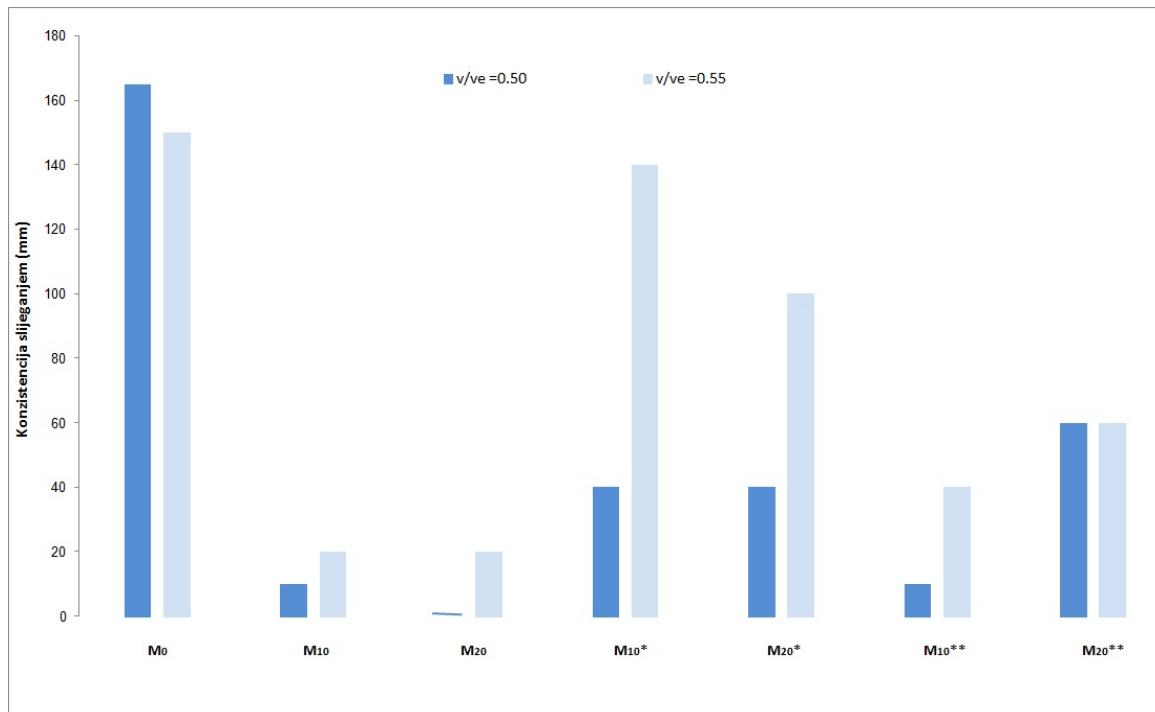
Slika 23 Gustoća svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 24 Temperatura svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 25 Udio pora u svježem betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 26 Konzistencija (slijeganje) svježeg betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Analizom dobivenih vrijednosti gustoća betona (u svežem stanju) s dodatkom pepela dobivene su minimalne razlike s obzirom na udio dodanog pepela i primijenjenu temperaturu spaljivanja mulja. Budući da su sve vrijednosti uglavnom podjednake i u rangu s onim referentnih mješavina, generalno se može zaključiti da gustoća betona u svježem stanju ne ovisi o udjelu dodanog pepela kao ni o primijenjenoj temperaturi spaljivanja mulja.

U mješavinama s dodanim pepelom dobivenim iz mulja s UPOV Koprivnica generalno su se razvile znatno veće temperature u odnosu na referentne mješavine (bez dodanog pepela). Najviše temperature razvile u mješavinama s 20%-tnim udjelima pepela. Ove razvijene temperature značajno su više od onih referentnih mješavina, a ova pojava pridonijela je i bržim reakcijama ovih mješavina kao i otežanoj ugradnji.

Rezultati dobiveni na betonu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica potvrđuju generalni trend povećanja poroznosti s povećanjem udjela dodanog pepela. Treba naglasiti kako su korišteni i različiti udjeli superplastifikatora u različitim mješavinama kao nužna aktivnost da bi ugradnja betona bila moguća, a u nekim mješavinama je korištena i dodatna količina vode kako bi se poboljšala obradljivost čime se svakako djelovalo i na udio pora u tim mješavinama.

Potvrđeni su i povećani zahtjevi za vodom te smanjena obradljivost betona s povećanjem udjela dodanog pepela. Zbog problema s ugradnjom betona s dodanim pepelom s UPOV Koprivnica, usprkos dodatku superplastifikatora, mješavinama s 20%-tnim udjelom pepela i nižim vodovezivnim omjerom dodavana je i voda. Stoga je prikazane rezultate potrebno uzeti s rezervom budući da pojedine mješavine sadrže dodatne količine vode, a i količina dodanog superplastifikatora nije ista u svim mješavinama.

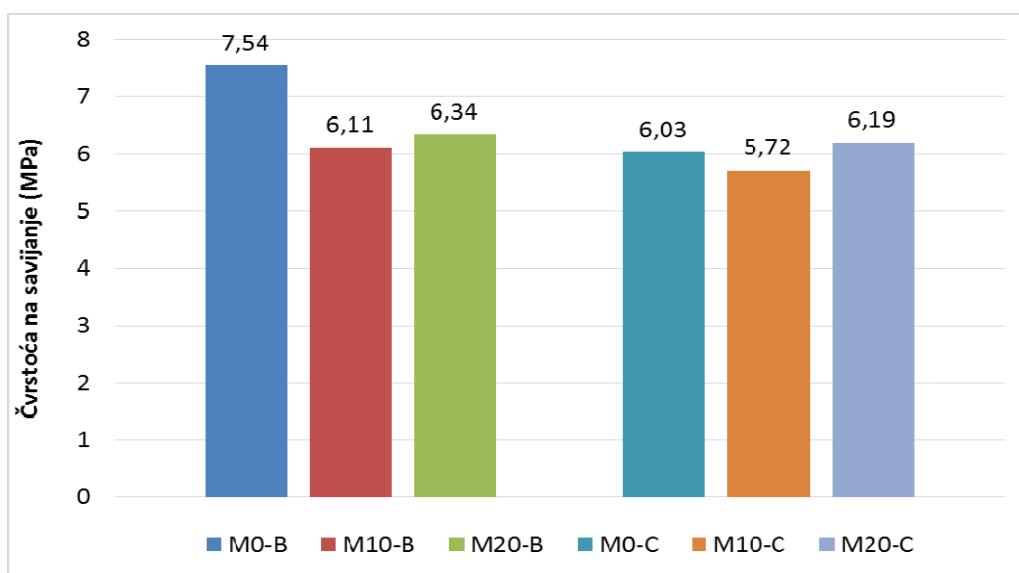


## 6.3 Rezultati ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju

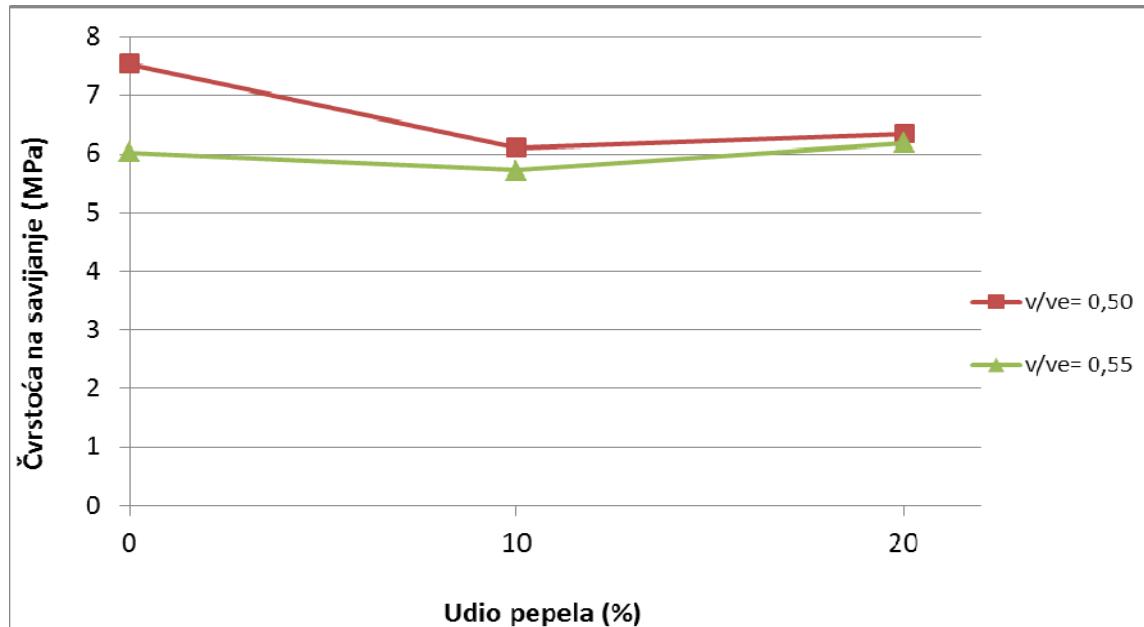
### 6.3.1 Mehaničke karakteristike

Tablica 6 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na betonu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 800°C (i na referentnim mješavinama)

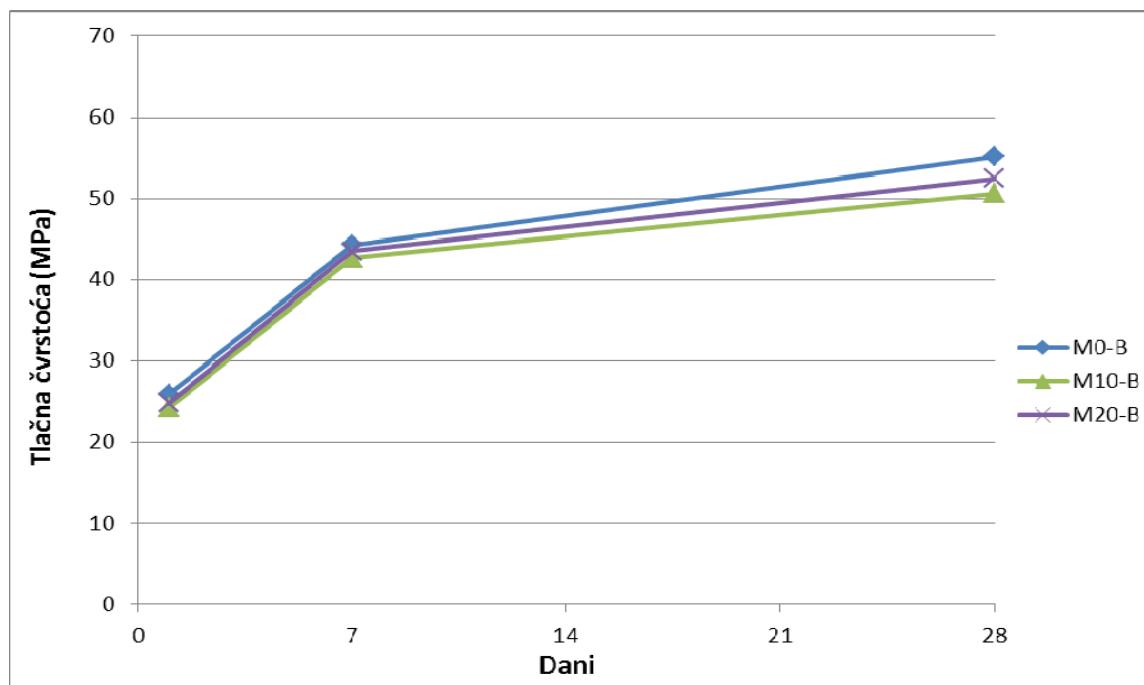
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (Mpa)	Tlačna čvrstoća (MPa)		
		28 d	1 d	7 d
M <sub>0</sub> -B	7,54	25,83	44,28	55,09
M <sub>0</sub> -C	6,03	20,25	37,81	46,86
M <sub>10</sub> -B	6,11	24,17	42,64	50,58
M <sub>10</sub> -C	5,72	20,97	37,06	46,38
M <sub>20</sub> -B	6,34	24,69	43,48	52,45
M <sub>20</sub> -C	6,19	25,38	40,4	49,48



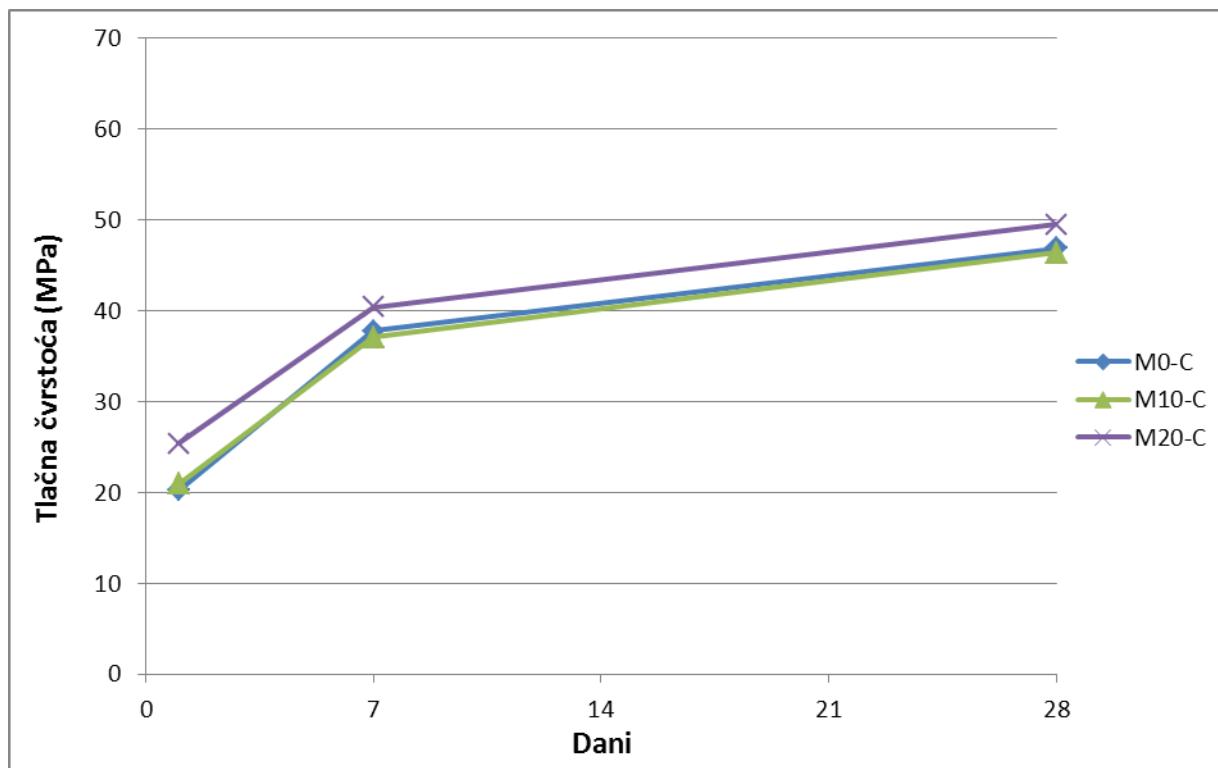
Slika 27 28-dnevna čvrstoća na savijanje uzoraka betona u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C ( $v/v_e=0,50$  i  $v/v_e=0,55$ )



Slika 28 Ovisnost 28-dnevne čvrstoće na savijanje uzorka betona o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C



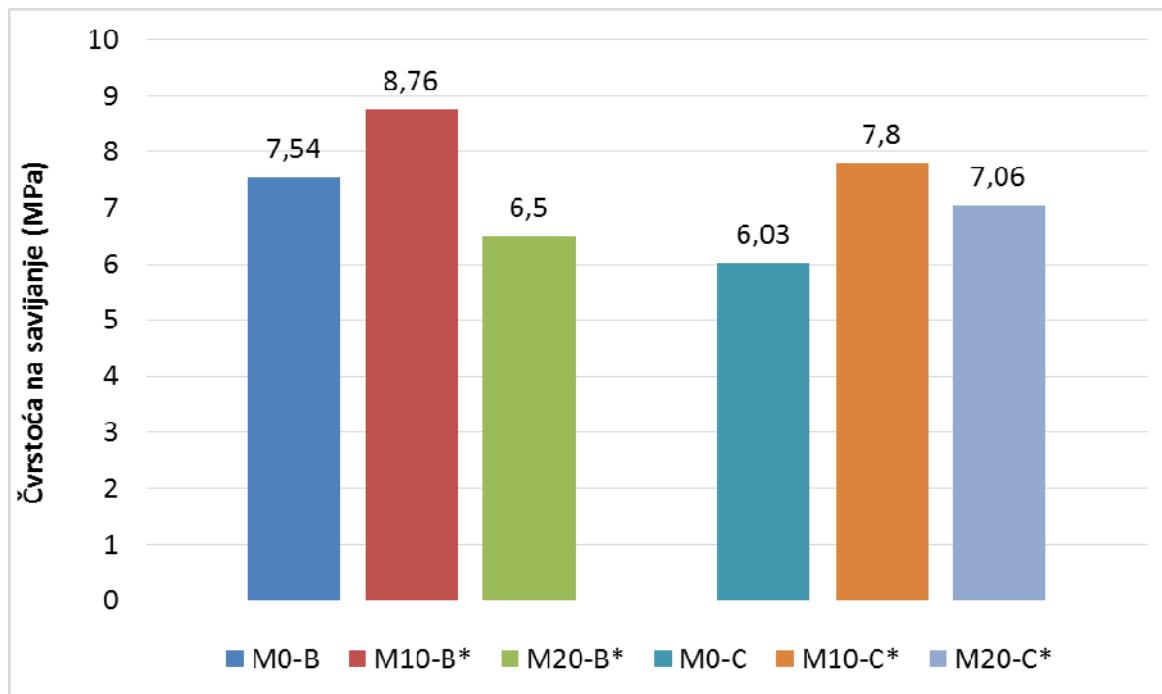
Slika 29 Tlačna čvrstoća uzorka betona u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C ( $v/v_e=0,50$ )



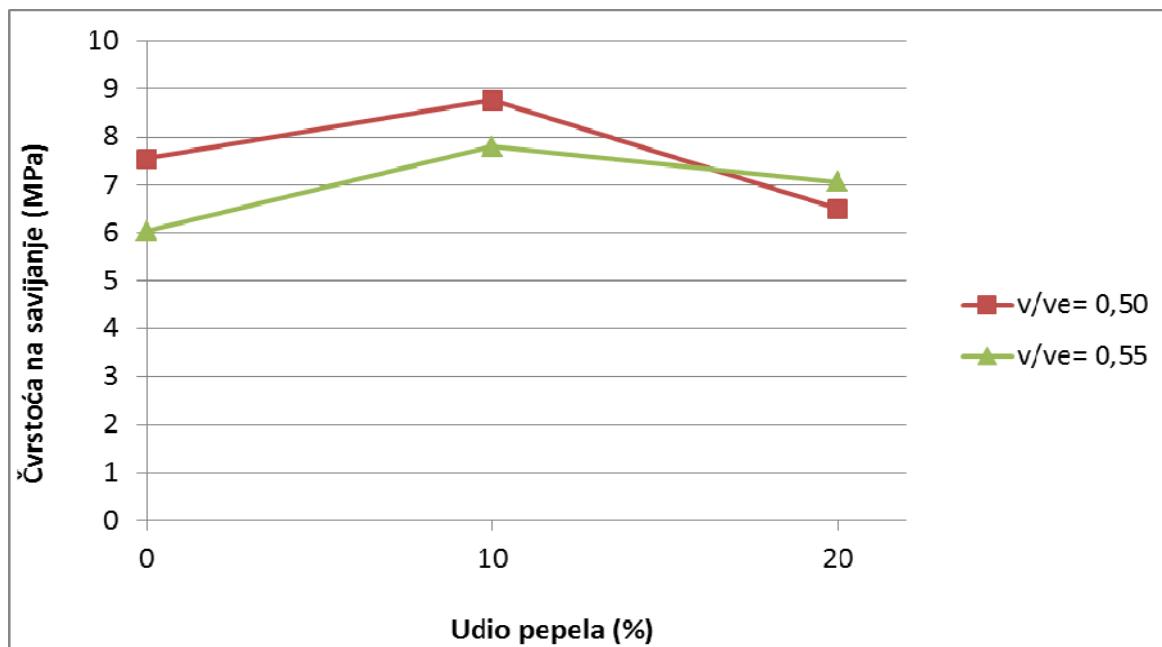
Slika 30 Tlačna čvrstoća uzoraka betona u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C ( $v/v_e=0,55$ )

Tablica 7 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na betonu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 900°C (i na referentnim mješavinama)

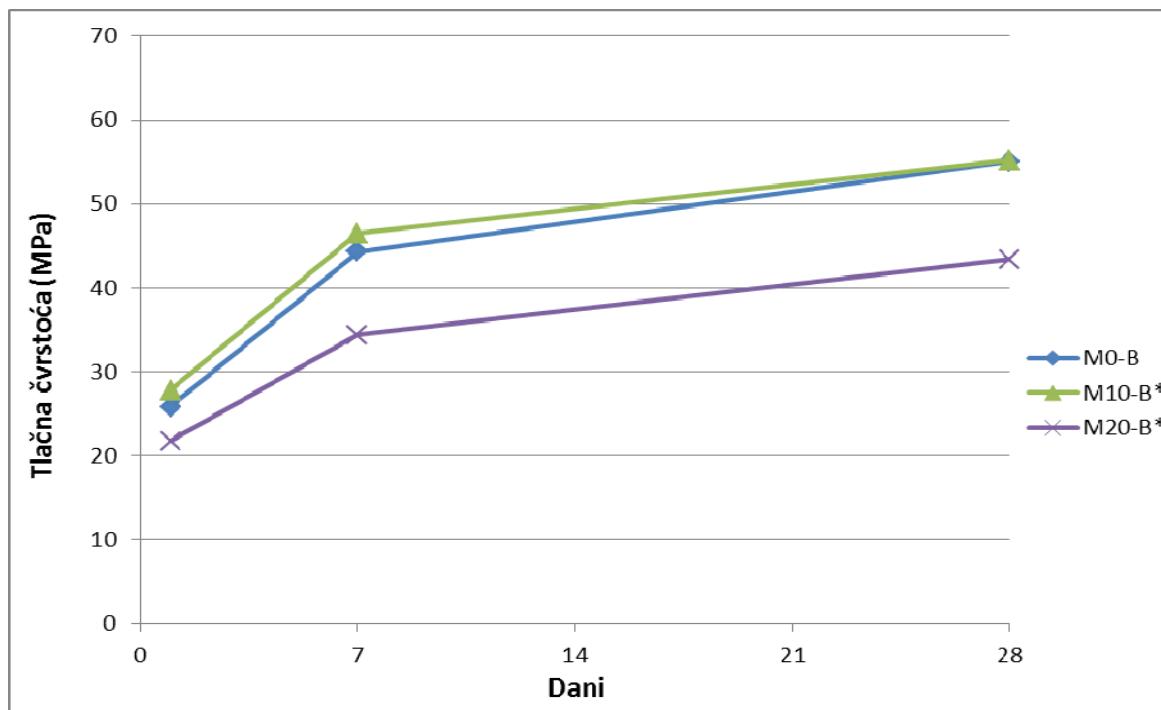
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)	Tlačna čvrstoća (MPa)		
		28 d	1 d	7 d
M <sub>0</sub> -B	7,54	25,83	44,28	55,09
M <sub>0</sub> -C	6,03	20,25	37,81	46,86
M <sub>10</sub> -B*	8,76	27,79	46,47	55,23
M <sub>10</sub> -C*	7,80	22,49	40,46	50,25
M <sub>20</sub> -B*	6,50	21,7	34,39	43,39
M <sub>20</sub> -C*	7,06	19,46	34,66	40,53



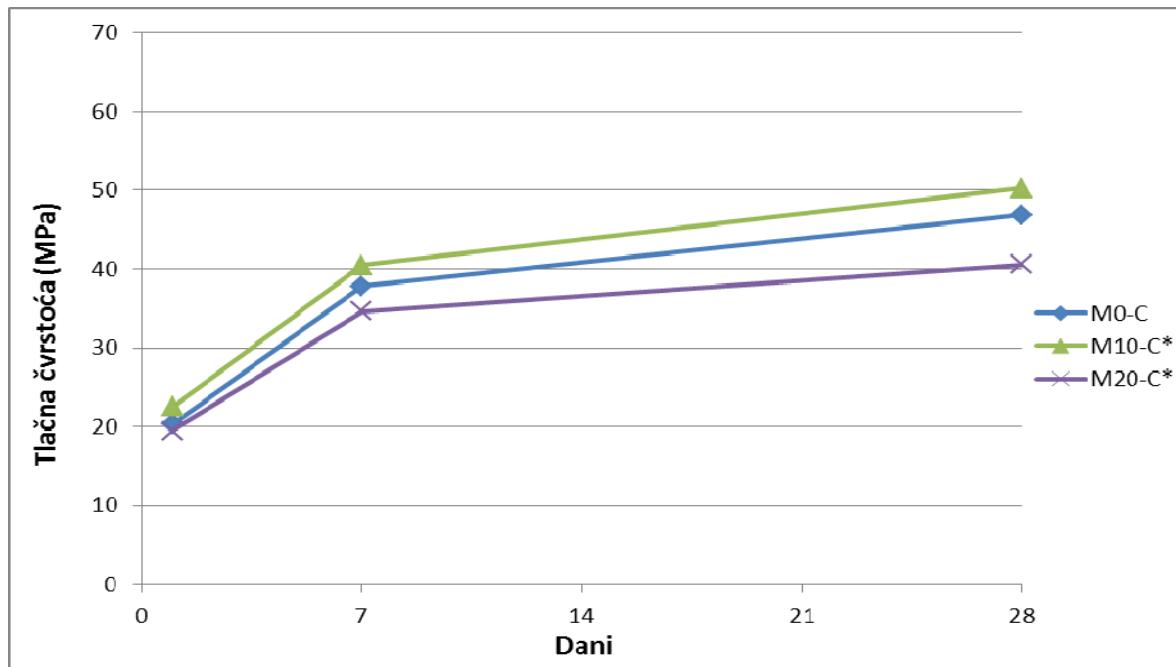
Slika 31 28-dnevna čvrstoća na savijanje uzoraka betona u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 900°C ( $v/v_e=0,50$  i  $v/v_e=0,55$ )



Slika 32 Ovisnost 28-dnevne čvrstoće na savijanje uzoraka betona o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 900°C



Slika 33 Tlačna čvrstoća uzoraka betona u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV  
Koprivnica spaljivanjem na 900°C ( $v/v_e=0,50$ )

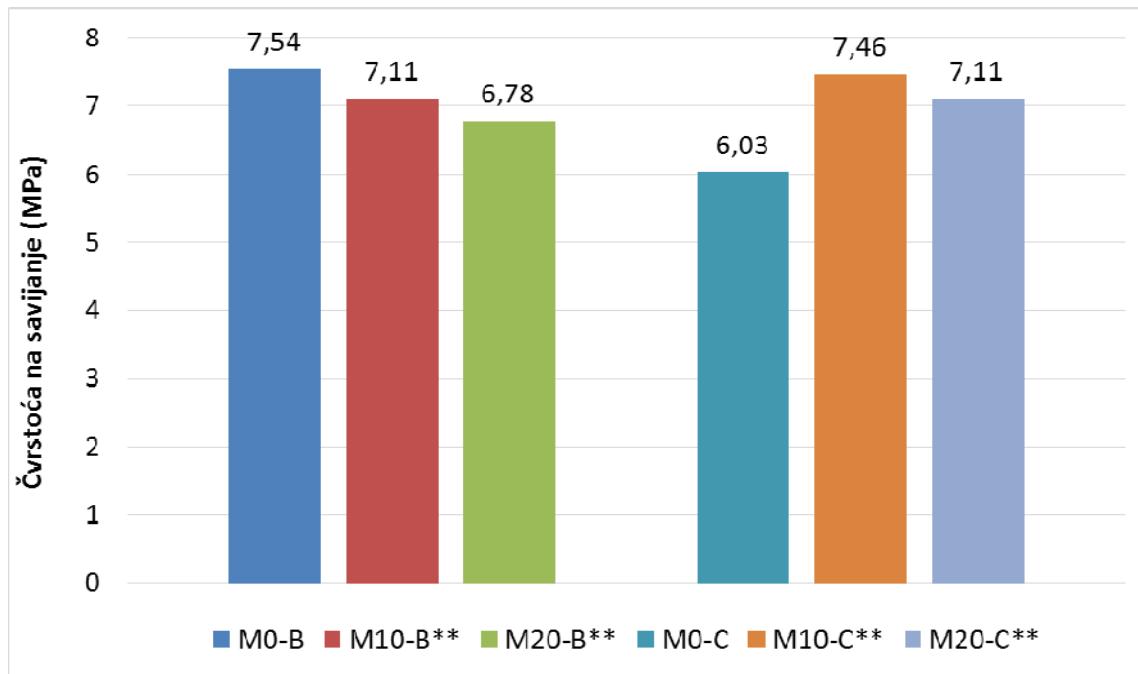


Slika 34 Tlačna čvrstoća uzoraka betona u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV  
Koprivnica spaljivanjem na 900°C ( $v/v_e=0,55$ )

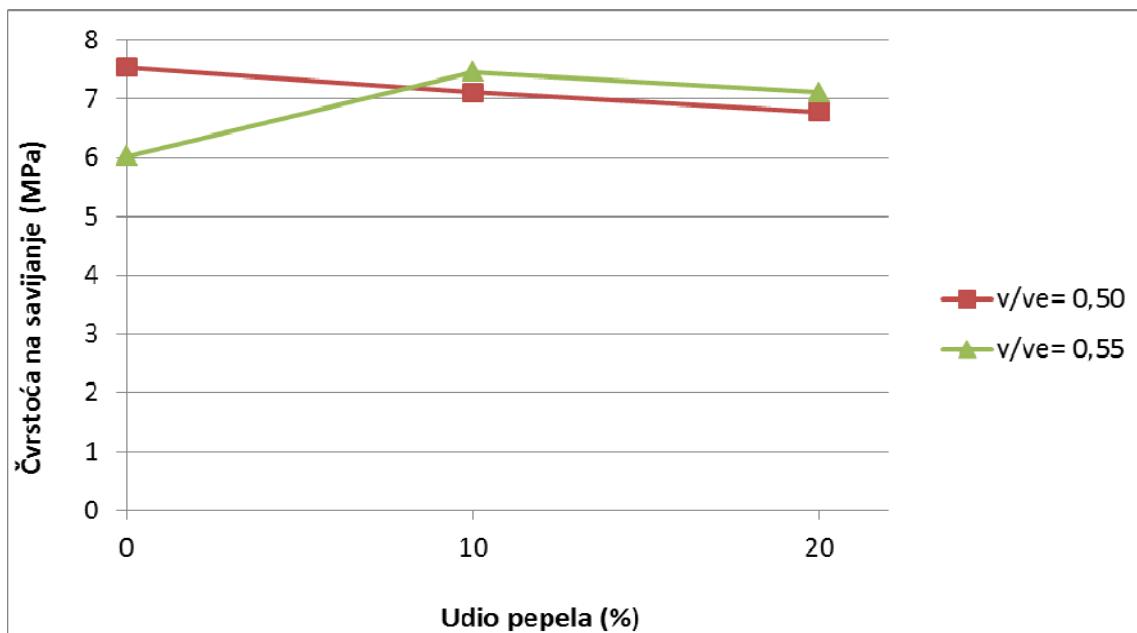


Tablica 8 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na betonu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 1000°C (i na referentnim mješavinama)

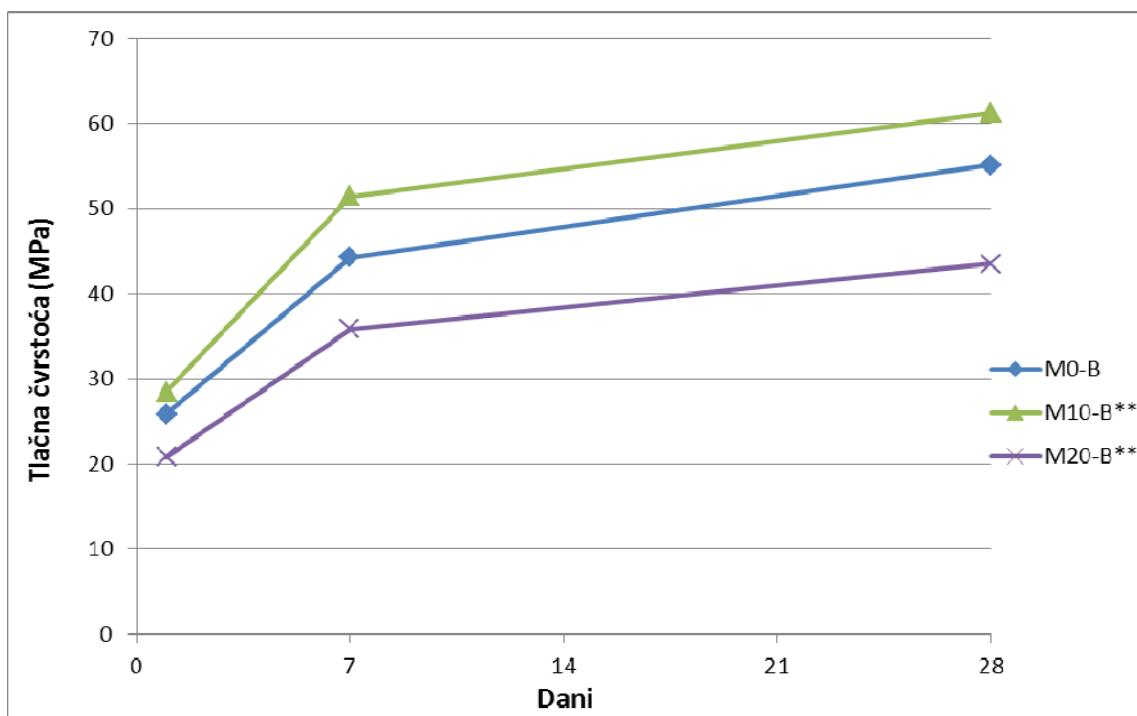
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)	Tlačna čvrstoća (MPa)		
		28 d	1 d	7 d
M <sub>0</sub> -B	7,54	25,83	44,28	55,09
M <sub>0</sub> -C	6,03	20,25	37,81	46,86
M <sub>10</sub> -B**	7,11	28,47	51,46	61,28
M <sub>10</sub> -C**	7,46	23,49	46,1	56,47
M <sub>20</sub> -B**	6,78	20,78	35,88	43,49
M <sub>20</sub> -C**	7,11	22,94	38,13	46,07



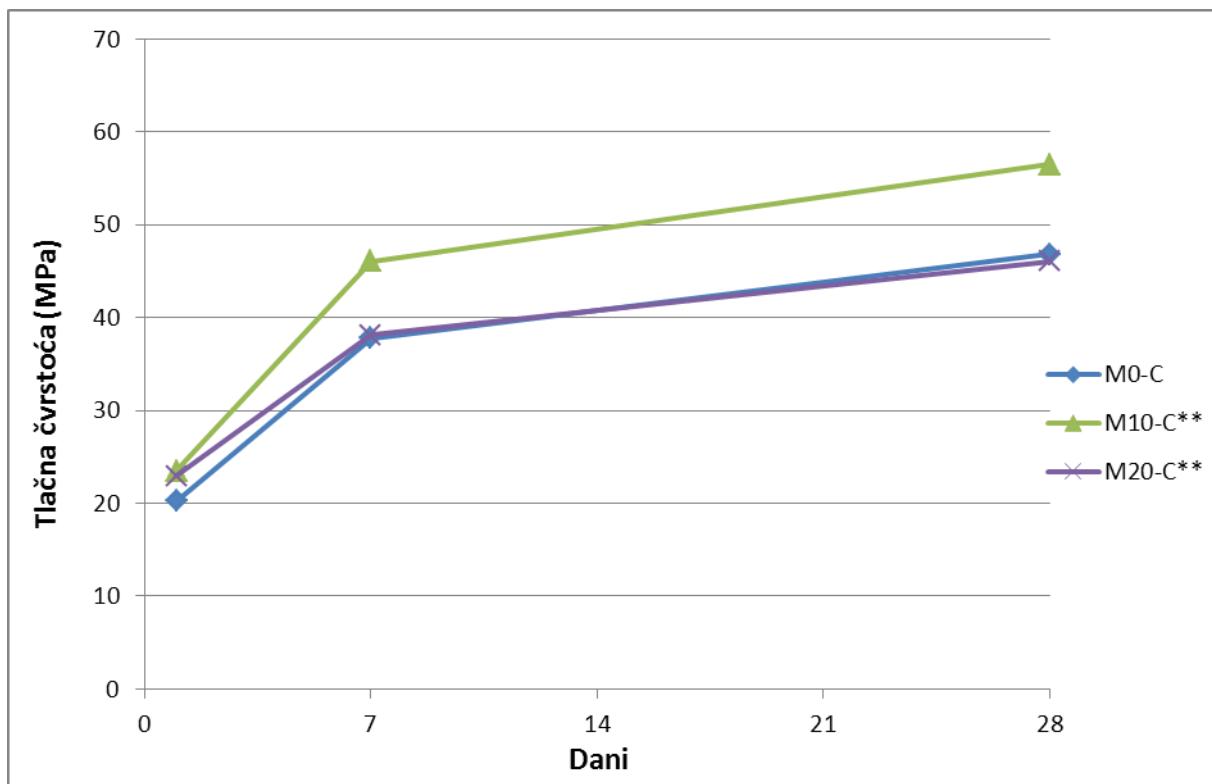
Slika 35 28-dnevna čvrstoća na savijanje uzorka betona u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C ( $v/v_e=0,50$  i  $v/v_e=0,55$ )



Slika 36 Ovisnost 28-dnevne čvrstoće na savijanje uzorka betona o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C



Slika 37 Tlačna čvrstoća uzorka betona u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C ( $v/v_e=0,50$ )



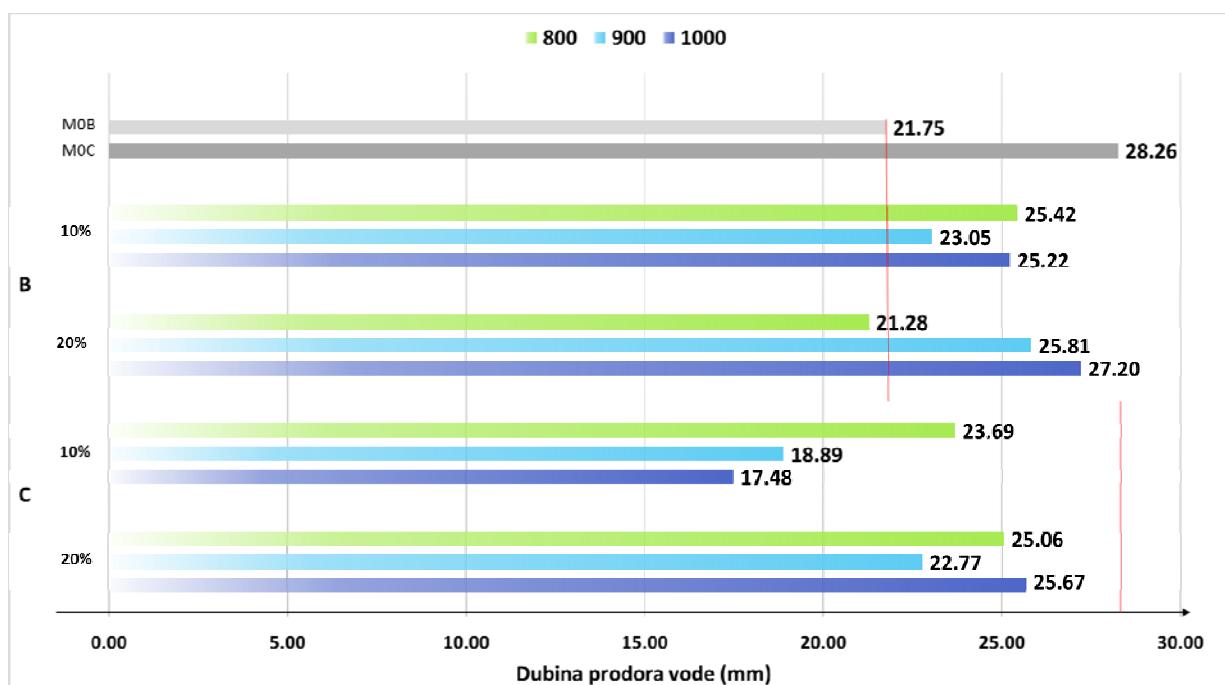
Slika 38 Tlačna čvrstoća uzorka betona u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C ( $v/v_e=0,55$ )



## 6.4 Vodonepropusnost

Tablica 9 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom

Oznaka uzorka	Dubina prodora vode (mm)
M <sub>0</sub> B	21,75
M <sub>0</sub> C	28,26
M <sub>10</sub> B	25,42
M <sub>10</sub> C	23,69
M <sub>20</sub> B	21,28
M <sub>20</sub> C	25,06
M <sub>10</sub> B*	23,05
M <sub>10</sub> C*	18,89
M <sub>20</sub> B*	25,81
M <sub>20</sub> C*	22,77
M <sub>10</sub> B**	25,22
M <sub>10</sub> C**	17,48
M <sub>20</sub> B**	27,20
M <sub>20</sub> C**	25,67



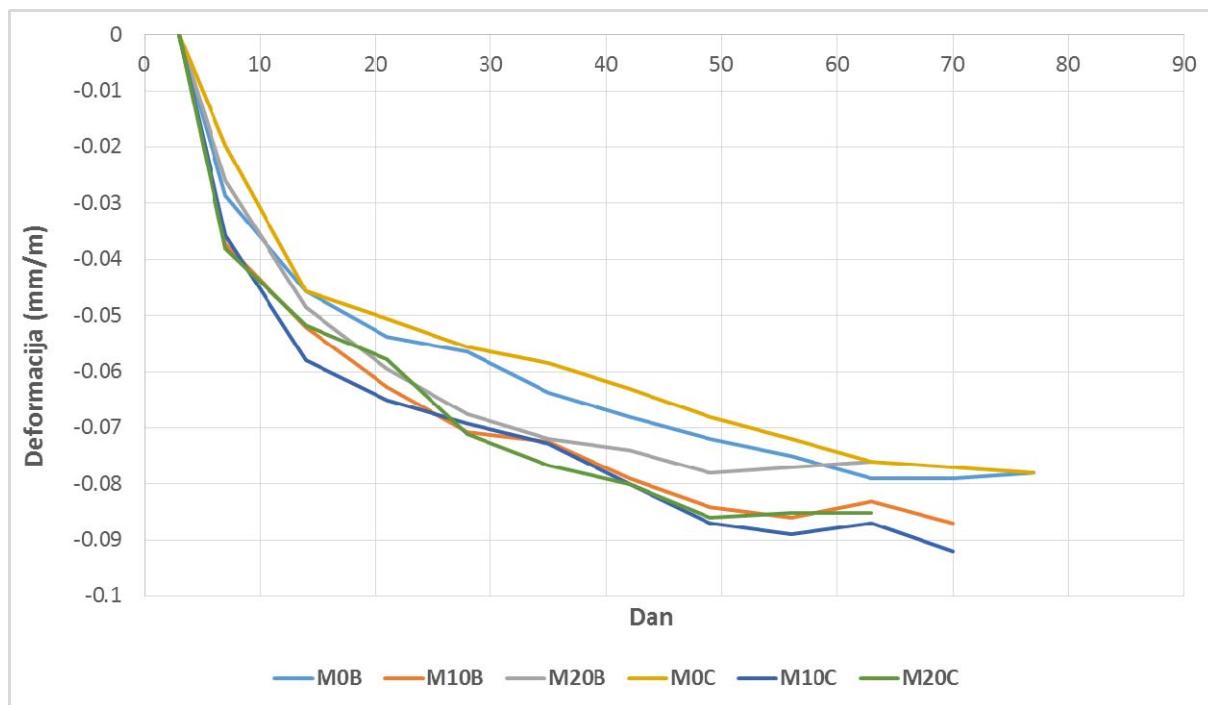
Slika 39 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom



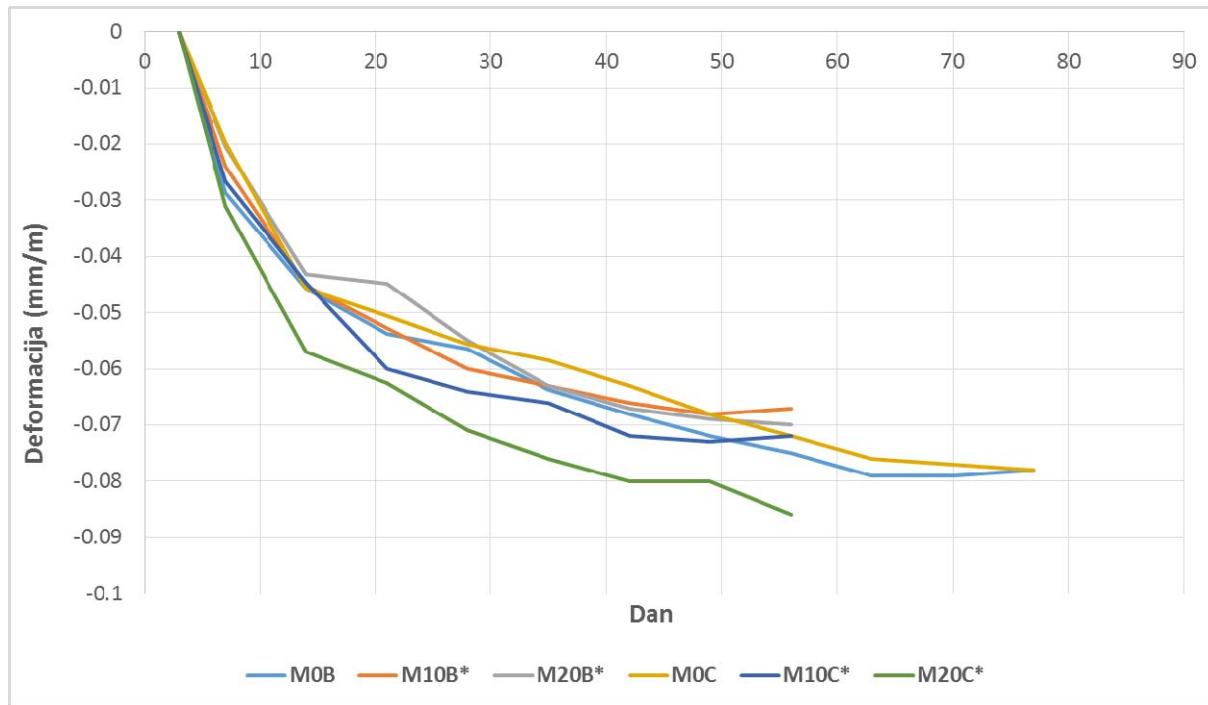
## 6.5 Skupljanje

Tablica 10 Rezultati ispitivanja deformacija (skupljanja) na uzorcima betona

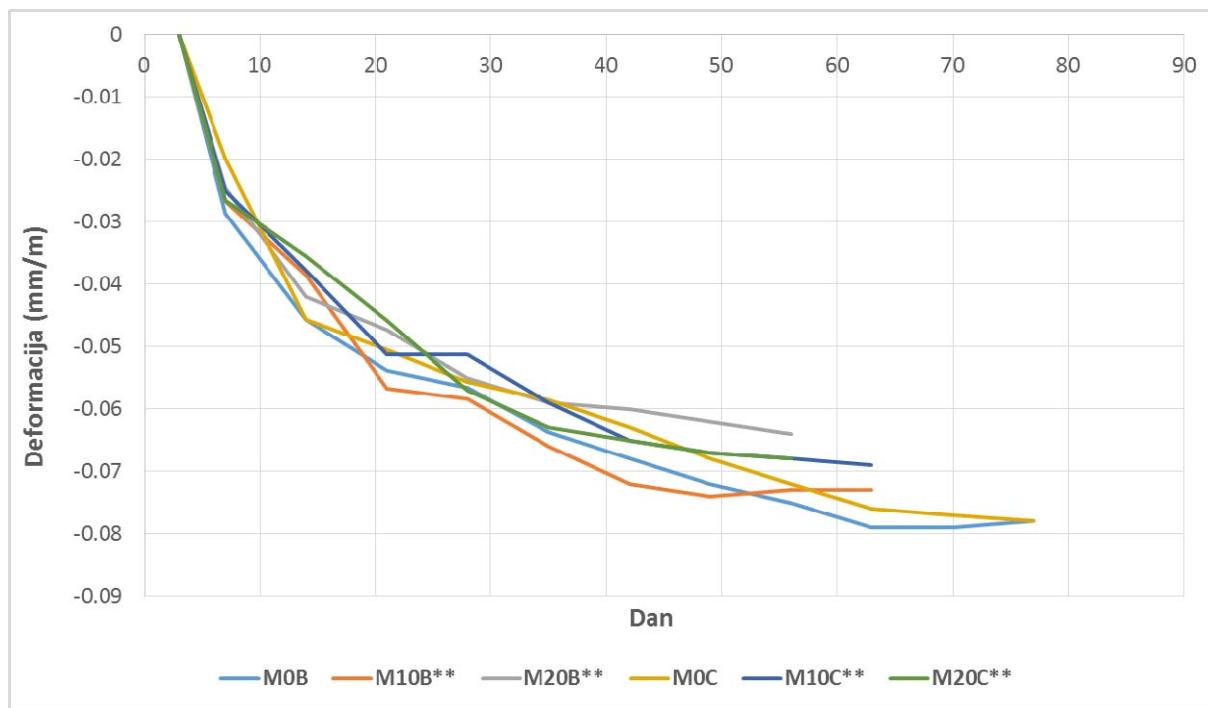
Oznaka uzorka	Deformacija (-mm)											
	3.	7.	14.	21.	28.	35.	42.	49.	56.	63.	70.	77.
M <sub>0</sub> B	0	0,029	0,046	0,054	0,057	0,064	0,068	0,072	0,075	0,079	0,079	0,078
M <sub>0</sub> C	0	0,020	0,046	0,051	0,056	0,059	0,063	0,068	0,072	0,076	0,077	0,078
M <sub>10</sub> B	0	0,037	0,052	0,063	0,071	0,073	0,079	0,084	0,086	0,083	0,087	0,087
M <sub>10</sub> C	0	0,036	0,058	0,065	0,069	0,073	0,080	0,087	0,089	0,087	0,092	-
M <sub>20</sub> B	0	0,026	0,049	0,060	0,068	0,072	0,074	0,078	0,077	0,076	-	-
M <sub>20</sub> C	0	0,038	0,052	0,058	0,071	0,077	0,080	0,086	0,085	0,085	-	-
M <sub>10</sub> B*	0	0,024	0,045	0,053	0,060	0,063	0,066	0,068	0,067	-	-	-
M <sub>10</sub> C*	0	0,027	0,045	0,060	0,064	0,066	0,072	0,073	0,072	-	-	-
M <sub>20</sub> B*	0	0,021	0,043	0,045	0,055	0,063	0,067	0,069	0,070	-	-	-
M <sub>20</sub> C*	0	0,031	0,057	0,063	0,071	0,076	0,080	0,08	0,086	-	-	-
M <sub>10</sub> B**	0	0,027	0,039	0,057	0,058	0,066	0,072	0,074	0,073	0,073	-	-
M <sub>10</sub> C**	0	0,025	0,038	0,051	0,051	0,059	0,065	0,067	0,068	0,069	-	-
M <sub>20</sub> B**	0	0,025	0,042	0,047	0,055	0,059	0,060	0,062	0,064	-	-	-
M <sub>20</sub> C**	0	0,027	0,036	0,046	0,057	0,063	0,065	0,067	0,068	-	-	-



Slika 40 Deformacije (skupljanje) uzoraka betona s dodatkom pepela dobivenog na 800°C



Slika 41 Deformacije (skupljanje) uzoraka betona s dodatkom pepela dobivenog na 900°C



Slika 42 Deformacije (skupljanje) uzorka betona s dodatkom pepela dobivenog na 1000°C

## 6.6 Analiza rezultata ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju

Čvrstoća na savijanje ispitivana je samo na betonskim uzorcima starosti 28 dana. Svi ispitani uzorci pokazali su prilično ujednačene vrijednosti čvrstoće na savijanje koje po apsolutnim iznosima odgovaraju redu veličine vrijednosti dobivenih na referentnim mješavinama. Ipak, može se uočiti da su vrijednosti čvrstoće na savijanje najveće za uzorce s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja na 900°C te su one uglavnom veće od čvrstoća referentnih mješavina. Najveća vrijednost čvrstoće na savijanje dobivena je za mješavinu M<sub>10</sub>-B\* i ona iznosi 116% vrijednosti čvrstoće referentne mješavine, dok je najniža vrijednost dobivena za mješavinu M<sub>10</sub>-C (95% vrijednosti čvrstoće na savijanje referentne mješavine). Ipak, najveći pad čvrstoće u odnosu na referentnu mješavinu zabilježen je kod mješavine M<sub>10</sub>-B (pad čvrstoće od 19%). Dobiveni rezultati potvrđuju prethodno iznesenu činjenicu da je pad čvrstoće manje značajan u mješavinama s većim vodovezivnim omjerom, odnosno da dodani pepeo pokazuje određena vezivna svojstva uz prisutnost dovoljne količine vode.

Tlačna čvrstoća ispitivana je za 3 različite starosti betona (1, 7 i 28 dana) te je moguće uočiti trend povećanja vrijednosti čvrstoće s povećanjem starosti betona.



Sve mješavine s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja na 800°C razvile su tlačne čvrstoće podjednake onima referentnih mješavina za sve ispitivane starosti betona. Mješavine s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja na 900°C također su razvile vrijednosti tlačnih čvrstoća podjednake onima referentnih mješavina s izuzetkom mješavine M<sub>20</sub>-B\* čija je tlačna čvrstoća nešto niže što je direktna posljedica dodavanja dodatnih količina vode ovoj mješavini kako bi se omogućila normalna ugradnja. Sve mješavine s ugrađenim pepelom dobivenim na 1000°C razvile su tlačne čvrstoće podjednake ili malo više od čvrstoća referentnih mješavina, opet s izuzetkom mješavine M<sub>20</sub>-B\*\* čije su čvrstoće nešto niže, a što je posljedica dodatka vode za postizanje bolje obradljivosti i normalne ugradnje.

Sagledavajući sve analizirane mješavine, najbolje rezultate 28-dnevne tlačne čvrstoće pokazala je mješavina M<sub>10</sub>-B\*\* (oko 111% čvrstoće referentne mješavine), dok su najniže vrijednosti dobivene za mješavinu M<sub>20</sub>-C\* (28-dnevna tlačna čvrstoća iznosi 40,53 MPa, odnosno oko 87% čvrstoće referentne mješavine). Također, potrebno je istaknuti kako su sve mješavine izuzev M<sub>20</sub>-C\* dale vrijednosti 28-dnevnih tlačnih čvrstoća iznad 42,5 MPa što zadovoljava klasu korištenog cementa.

Dosadašnjim ispitivanjima vodonepropusnosti ne može se izvesti univerzalni zaključak o utjecaju dodatka pepela, kao ni o utjecaju temperature spaljivanja na dubinu prodora vode pod tlakom. Trend koji se uočava odnosi se na povećanje dubine prodora vode kod uzoraka s dodatkom pepela u odnosu na referentne uzorke za manji vodovezivni omjer (0,50) te smanjenje dubine prodora vode za veći vodovezivni omjer (0,55). Prema klasifikaciji razreda vodonepropusnosti, svi analizirani uzorci mogu se svrstati u razred VDP2 (maksimalna dopuštena dubina prodora vode do 30 mm).

U sklopu ovog Izvještaja dani su samo prvi rezultati ispitivanja skupljanja budući da ispitivanja još uvijek traju te će se prikaz cjelokupnih rezultata s njihovom analizom i obrazloženjima dati u sklopu nastavka istraživanja u drugoj godini projekta "RESCUE".



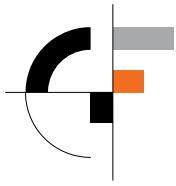
## 7. Zaključak

Iz provedenih ispitivanja na betonu s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV mogu se izvući određeni zaključci, iako je za detaljnije analize potrebno provesti dodatna ispitivanja koja će se odvijati tijekom druge godine istraživanja u sklopu projekta „RESCUE“.

U nastavku istraživanja prikazat će se i rezultati ispitivanja vodonepropusnosti i skupljanja koja su trenutno još u tijeku. Također, u drugoj godini istraživanja obavit će se i ispitivanja s pepelom dobivenim iz mulja s UPOV Karlovac, Varaždin i Zagreb te će se potom dati obuhvatnija analiza i usporedba dobivenih rezultata s obzirom na porijeklo mulja, odnosno dat će se prikaz sličnosti i razlika u rezultatima dobivenim korištenjem pepela s različitih UPOV.

Provadena ispitivanja upućuju na sljedeće zaključke:

- Gustoća svježeg betona za sve analizirane uzorke uglavnom je podjednaka i ne ovisi značajnije o udjelu dodanog pepela kao ni o primjenjenoj temperaturi spaljivanja mulja.
- Temperatura svježeg betona raste s povećanjem udjela dodanog pepela.
- Udio pora u betonu povećava se s povećanjem udjela dodanog pepela.
- Obradljivost betona se smanjuje s povećanjem udjela dodanog pepela, prije svega zbog povećanih potreba za vodom.
- Mehaničke karakteristike betona (čvrstoća na savijanje i tlačna čvrstoća) s udjelom dodanog pepela od 10% i 20% su relativno zadovoljavajuće za sve analizirane mješavine te su njihove vrijednosti uglavnom istog reda veličine kao i vrijednosti čvrstoća dobivenih na referentnim mješavinama; rezultati zadovoljavaju klasu korištenog cementa s izuzetkom mješavina s dodatnim količinama vode koja je bila potrebna kako bi se omogućila neometana ugradnja.
- Pad na savijanje i tlačnih čvrstoća manje je značajan u mješavinama s većim vodovezivnim omjerom.



Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za hidrotehniku  
Katedra za zdravstvenu hidrotehniku i okolišno inženjerstvo

