



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



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.11 –**

REZULTATI ISPITIVANJA NA BETONU

VRSTA ELABORATA: **TEHNIČKI IZVJEŠTAJ**

UGOVOR: **120-050/14**

GODINA ISTRAŽIVANJA: **2 (01.09.2015. – 31.08.2016.)**

DATUM: **Kolovoz, 2016.**

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. građ.





Napomena:

Ovaj Izvještaj direktno se nastavlja na Izvještaj br. 5 „Rezultati ispitivanja na betonu“ iz kolovoza 2015. godine. Sve metode korištene prilikom provedenih analiza i ispitivanja na različitim uzorcima betona s ugrađenim pepelom iz muljeva s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda opisane su u prethodno navedenom Izvještaju, a u nastavku će se dati prikaz rezultata dobivenih istim laboratorijskim ispitivanjima do sada obrađenih uzoraka betona tijekom druge godine istraživanja provedenih u sklopu projekta „RESCUE“ i to za svaki korišteni pepeo zasebno (ovisno o uređaju, tj. porijeklu mulja, temperaturi spaljivanja i eventualnim dodacima u slučaju suspaljivanja) te međusobna usporedba dobivenih rezultata. Iako je inicialnim projektnim planom bilo zamišljeno i kreiranje mješavina betona s dodatkom pepela bez korištenja aditiva (superplastifikatora), budući da su takve mješavine pokazale izrazito lošu obradivost i bile praktički nemoguće za ugradnju u kalupe, cjelokupno istraživanje na betonskim mješavinama provedlo se uz korištenje aditiva (superplastifikatora) s ciljem dobivanja zadovoljavajuće obradivosti. Istraživanje na mješavinama betona s ugrađenim pepelom podijeljeno je u dva dijela: prvi dio odnosi se na ispitivanja utjecaja porijekla mulja (lokacija UPOV-a) i temperature spaljivanja mulja i njihove međusobne usporedbe, dok je u drugom dijelu istraživanja analiziran utjecaj starosti mulja (vrijeme koje mulj proveđe na privremenoj deponiji prije samog spaljivanja) na ponašanje betonskih mješavina s ugrađenim pepelom iz takvog mulja. Drugi dio istraživanja proveden je samo na mulju s UPOV Zagreb te uz temperaturu spaljivanja od 800°C, a ispitivani parametri ograničeni su samo analize betona u svježem stanju te na 1-dnevnu tlačnu te 28-dnevnu tlačnu i čvrstoću na savijanje, kao i na ispitivanje vodonepropusnosti. S obzirom na ograničene količina dostupnog pepela, nije bilo moguće provesti ispitivanja na većem broju mješavina od onih prikazanih u sklopu ovog Izvještaja te se stoga tijekom treće godine istraživanja predviđa provesti ispitivanja na još dvije mješavine betona s ugrađenim pepelom s UPOV Karlovac.



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.

Provedenim istraživanjem analizirana je 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, s obzirom na prethodno dobivene rezultate tijekom prve godine istraživanja, odabran je jedinstveni vovovezivni omjer od 0,50.

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.

Dakle, varirali su se sljedeći parametri:

- temperatura spaljivanja ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $900\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- maseni udio pepela (10 – 20 %) kao zamjena za cement.

U ovoj fazi (2. godina) istraživanja provedenih na betonu pripremljene su ukupno **22 različite mješavine** (2 referentne i 20 mješavina s korištenjem pepela ili mulja bez spaljivanja u slučaju UPOV-a Koprivnica).

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.



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.

Izagana 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. 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.

Beton je ugrađivan u kalupe uz vibriranje na vibro-stolu 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 ± 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.

3.2 Temperatura

Temperatura mješavina betona određena je kao i za cementni mort prema normi HRN U.M1.032:1981 korištenjem digitalnog ubodnog termometra. 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 [°C].

3.3 Konzistencija

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

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. Dobiveni rezultat ispitivanja je postotak pora (udio zraka) u svježem betonu.



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 centrira 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.

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 centrira 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.

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 ± 50 kPa na 72 ± 2 sata.

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 prođor 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 1 Razredi vodonepropusnosti

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

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 ± 4 °C i relativnoj vlažnosti zraka od $40 \pm 5\%$, 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.

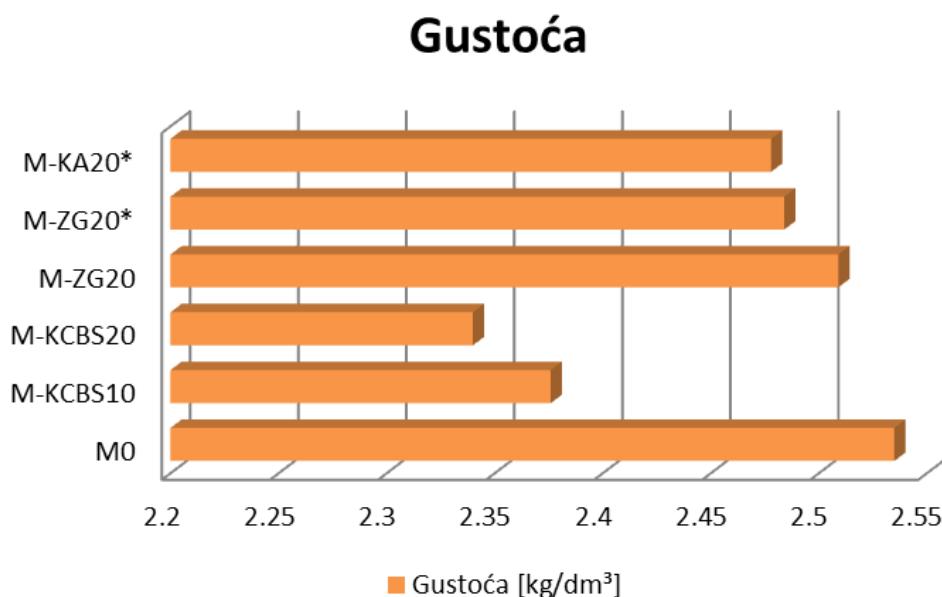


5. Rezultati ispitivanja na betonu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb i Karlovac te na betonu s ugrađenim muljem (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica

5.1 Rezultati ispitivanja na betonu u svježem stanju

Tablica 2 Rezultati ispitivanja na betonu u svježem stanju

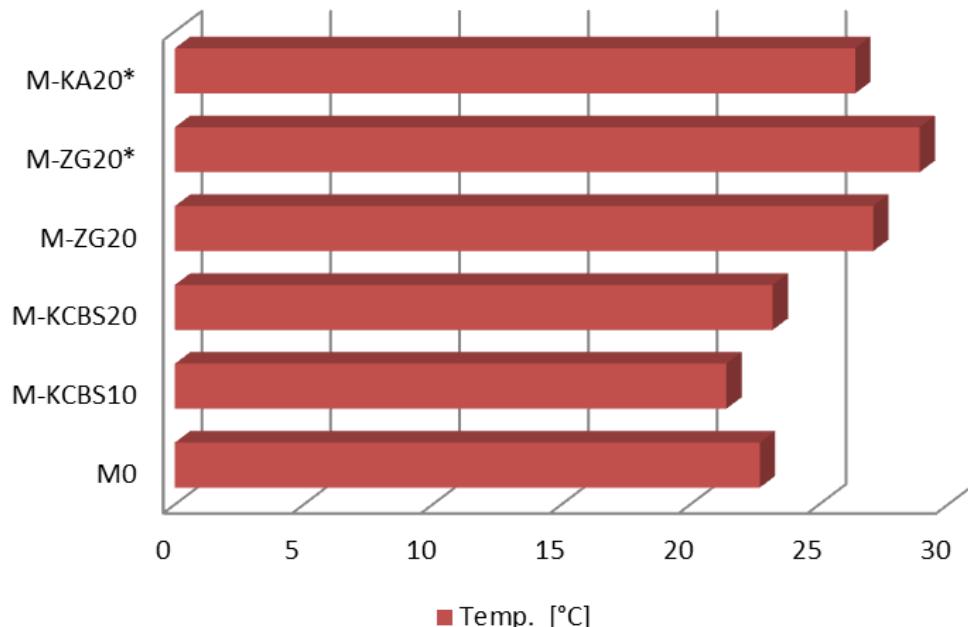
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Konzistencija (slijeganje) (cm)
M0	2.535	22.7	1.5	11
M-KCBS10	2.376	21.4	5.8	9
M-KCBS20	2.340	23.2	7.5	10
M-ZG20	2.509	27.1	2	7
M-ZG20*	2.488	28.9	2.8	6
M-KA20*	2.478	26.4	2.5	7



Slika 1 Gustoća svježeg betona s ugrađenim pepelom/muljem

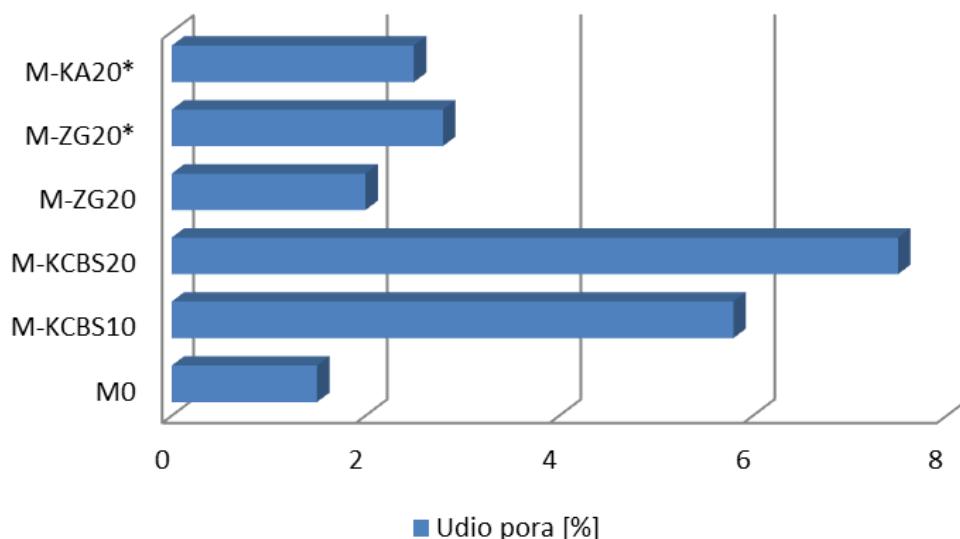


Temperatura



Slika 2 Temperatura svježeg betona s ugrađenim pepelom/muljem

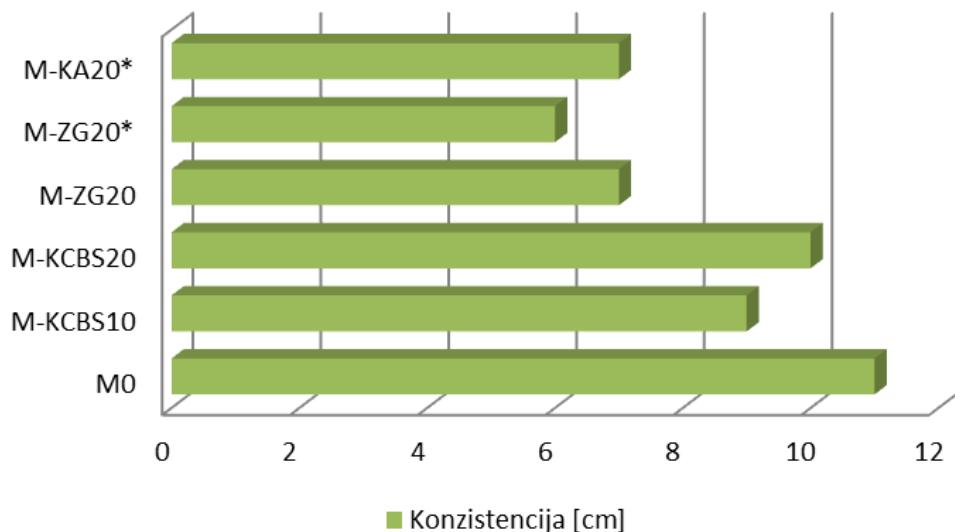
Udio pora



Slika 3 Udio pora u svježem betonu s ugrađenim pepelom/muljem



Konzistencija (slijeganje)



Slika 4 Konzistencija (slijeganje) svježeg betona s ugrađenim pepelom/muljem



5.2 Analiza rezultata ispitivanja na betonu u svježem stanju

Analizom dobivenih vrijednosti gustoća betona (u svježem stanju) s dodatkom pepela dobivene su minimalne razlike s obzirom na udio dodanog pepela i primijenjenu temperaturu spaljivanja mulja. Nešto veći pad gustoće svježeg betona (do 8%) primijećen je kod mješavina s ugrađenim muljem (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica. Budući da su sve preostale vrijednosti uglavnom podjednake i u rangu s vrijednostima gustoće dobivenoj na referentnoj mješavini, generalno se može zaključiti da gustoća betona u svježem stanju ne ovisi o udjelu dodanog pepela kao ni o primijenjenoj temperaturi spaljivanja mulja, ali da u slučaju dodatka mulja (bez spaljivanja) dobivenog MID-MIX tehnologijom obrade dolazi do manjeg pada gustoće.

U mješavinama s dodanim pepelom generalno su se razvile znatno veće temperature u odnosu na referentnu mješavinu (bez dodanog pepela). Najviša temperatura razvila se u mješavini s 20%-tним udjelom pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb na 900°C. Zanimljivo je da mješavine s ugrađenim muljem (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica nisu razvile veće temperature, tj. temperatura svježeg betona ostala je na podjednakoj razini kao i za referentnu mješavinu.

Rezultati dobiveni na betonu s ugrađenim pepelom potvrđuju generalni trend blagog povećanja poroznosti u odnosu na referentnu mješavinu. Ovdje treba naglasiti kako su korišteni i različiti udjeli superplastifikatora u različitim mješavinama (sastavi mješavina i udjeli superplastifikatora dani su u Prilogu 1) kao nužna aktivnost da bi ugradnja betona bila moguća i kako bi se poboljšala obradivost čime se svakako djelovalo i na udio pora u tim mješavinama. Posebno je potrebno istaknuti da je kod mješavina s ugrađenim muljem (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica udio pora u svježem betonu znatno porastao (i do 5 puta u odnosu na referentnu mješavinu) te rezultati na ovim mješavinama značajnije odudaraju od svih ostalih.

Potvrđeni su i povećani zahtjevi za vodom te smanjena obradivost betona s dodatkom pepela. Prikazane je rezultate ipak potrebno uzeti s rezervom budući da količina dodanog superplastifikatora nije ista u svim mješavinama. Također, mješavine s ugrađenim muljem (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica daju nešto bolje rezultate po pitanju obradivosti (i vrijednosti bliže referentnoj mješavini) u odnosu na preostale mješavine s ugrađenim pepelom.

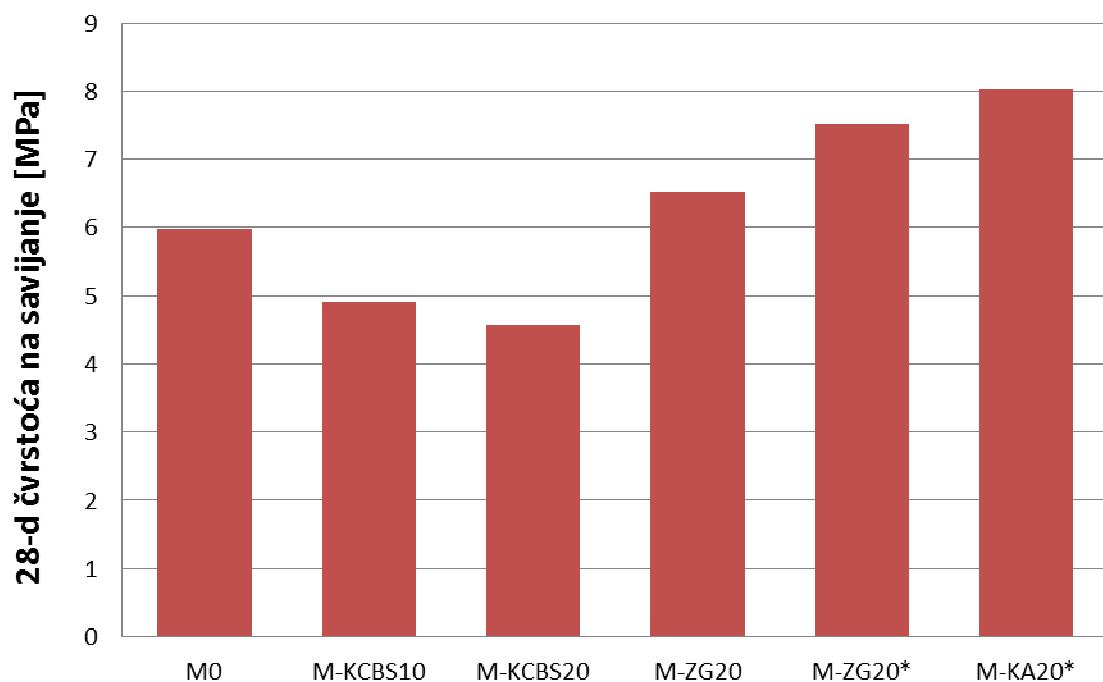


5.3 Rezultati ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju

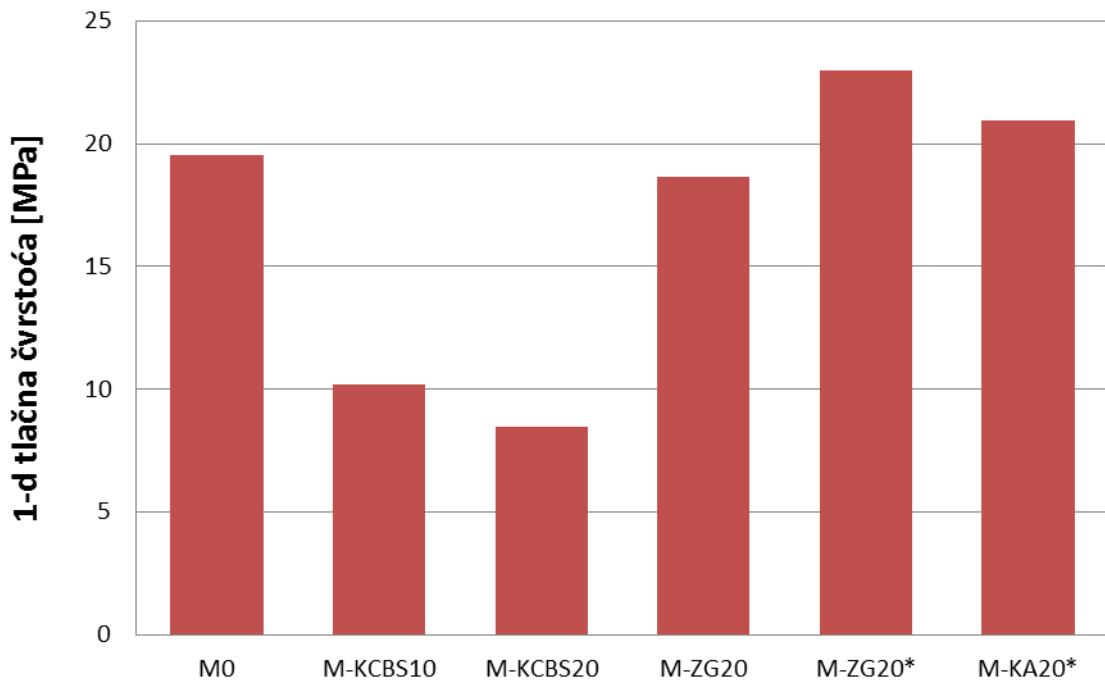
5.3.1 Mehaničke karakteristike

Tablica 3 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na betonu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom/muljem

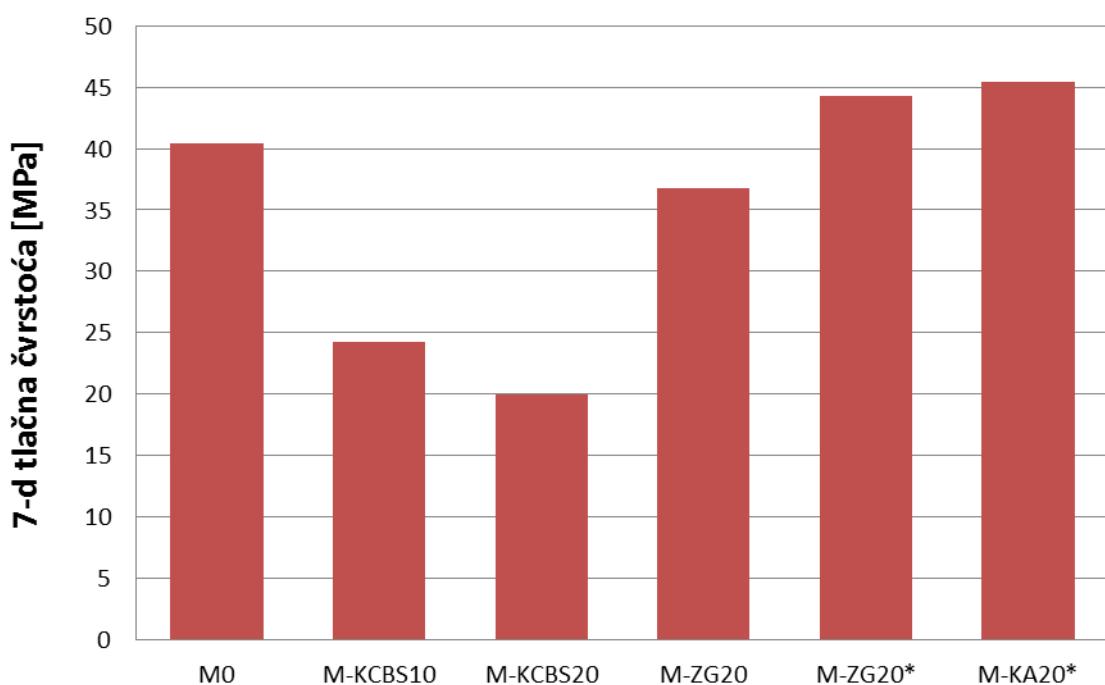
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)	Tlačna čvrstoća (MPa)		
		28 d	1 d	7 d
M0	5.987	19.55	40.38	50.14
M-KCBS10	4.907	10.21	24.27	29.38
M-KCBS20	4.573	8.5	19.93	24.06
M-ZG20	6.533	18.64	36.74	46.68
M-ZG20*	7.520	22.98	44.32	54.44
M-KA20*	8.030	20.94	45.38	59.92



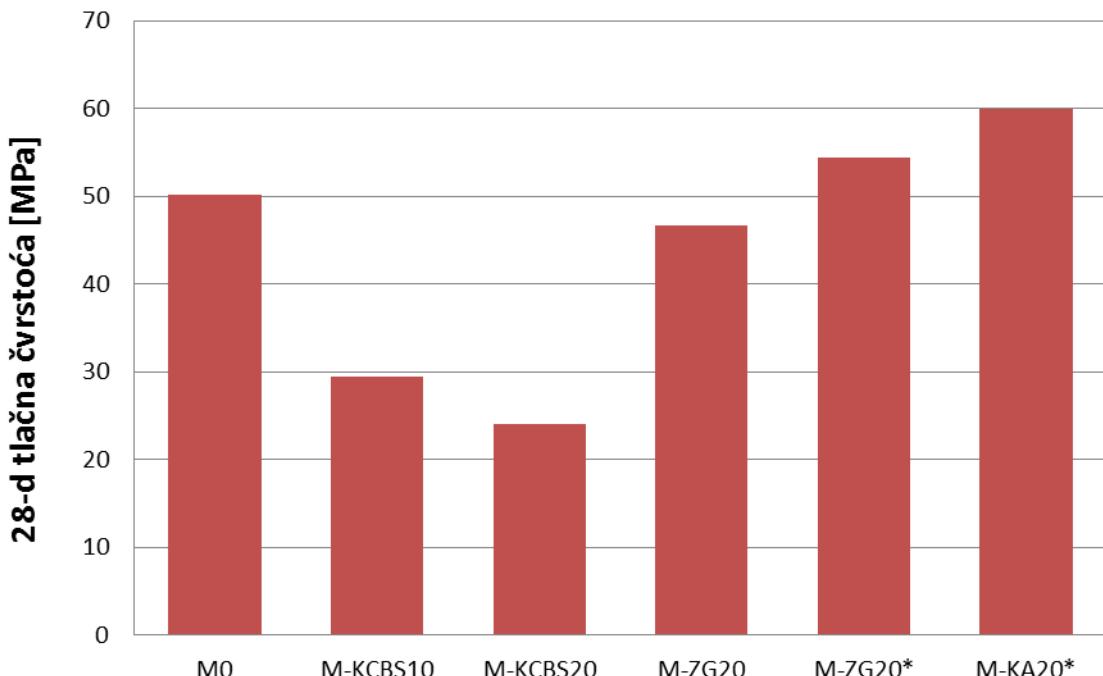
Slika 5 28-dnevna čvrstoća na savijanje uzorka betona s ugrađenim pepelom/muljem



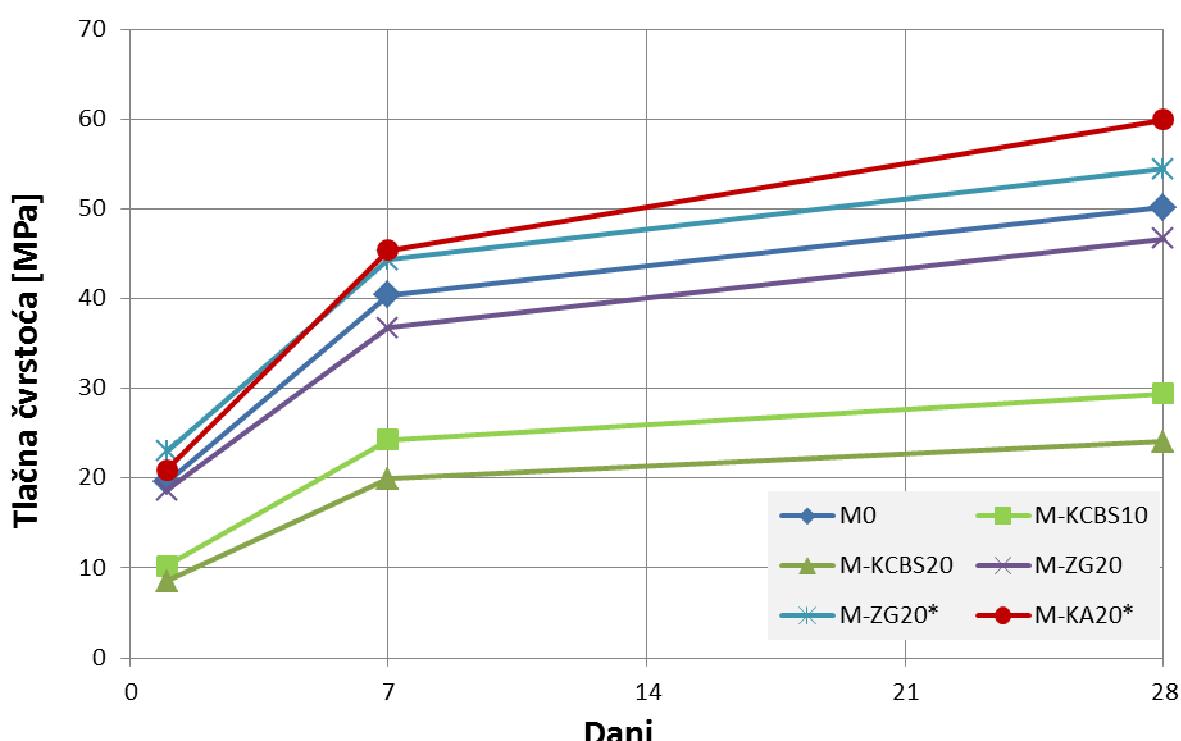
Slika 6 1-dnevna tlačna čvrstoća uzoraka betona s ugrađenim pepelom/muljem



Slika 7 7-dnevna tlačna čvrstoća uzoraka betona s ugrađenim pepelom/muljem



Slika 8 28-dnevna tlačna čvrstoća uzoraka betona s ugrađenim pepelom/muljem



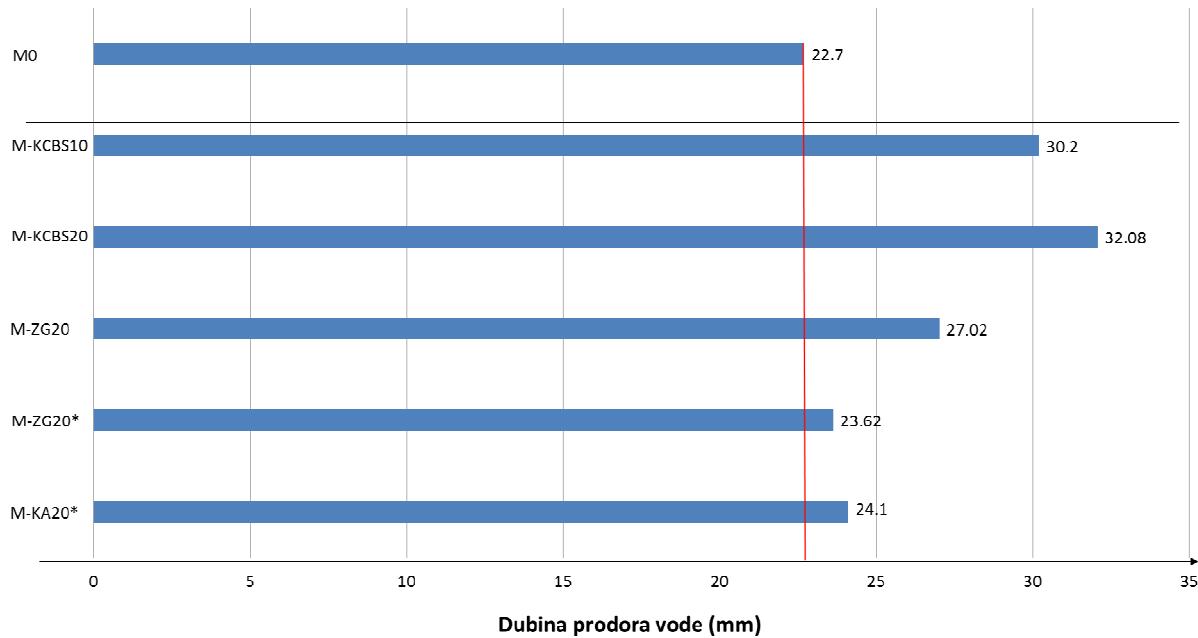
Slika 9 Razvoj tlačne čvrstoće uzoraka betona s ugrađenim pepelom/muljem



5.4 Vodonepropusnost

Tablica 4 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom

Oznaka uzorka	Dubina prodora vode (mm)
M0	22.70
M-KCBS10	30.20
M-KCBS20	32.08
M-ZG20	27.02
M-ZG20*	23.62
M-KA20*	24.10



Slika 10 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom

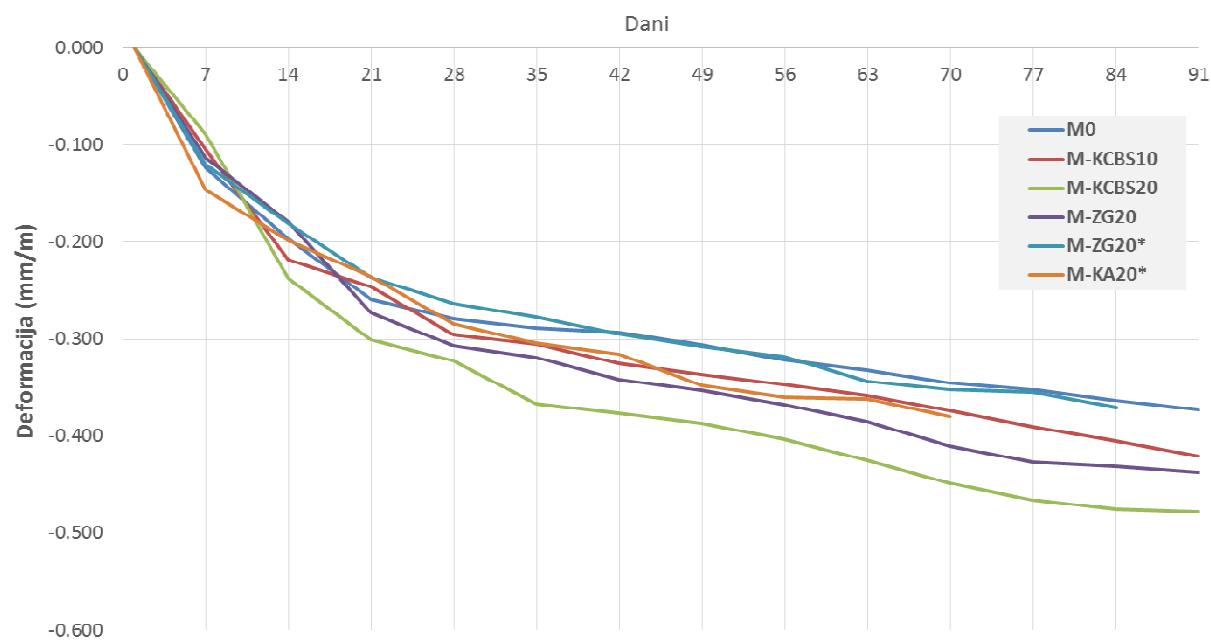


5.5 Skupljanje

Tablica 5 Rezultati ispitivanja deformacija (skupljanja) na uzorcima betona s ugrađenim pepelom/muljem

Oznaka uzorka	Deformacija (-mm)							
	1.	7.	14.	21.	28.	35.	42.	49.
M0	0.000	0.123	0.197	0.259	0.279	0.289	0.293	0.306
M-KCBS10	0.000	0.104	0.218	0.246	0.296	0.306	0.325	0.336
M-KCBS20	0.000	0.089	0.237	0.301	0.322	0.367	0.376	0.387
M-ZG20	0.000	0.113	0.179	0.273	0.307	0.319	0.342	0.353
M-ZG20*	0.000	0.120	0.181	0.236	0.264	0.277	0.295	0.308
M-KA20*	0.000	0.146	0.198	0.236	0.284	0.304	0.315	0.348

Oznaka uzorka	Deformacija (-mm)					
	56.	63.	70.	77.	84.	91.
M0	0.322	0.332	0.345	0.352	0.364	0.373
M-KCBS10	0.346	0.358	0.374	0.390	0.405	0.421
M-KCBS20	0.403	0.425	0.448	0.466	0.476	0.478
M-ZG20	0.368	0.385	0.410	0.427	0.431	0.437
M-ZG20*	0.318	0.344	0.352	0.355	0.370	
M-KA20*	0.360	0.362	0.380			



Slika 11 Deformacije (skupljanje) uzoraka betona s dodatkom pepela/mulja



5.6 Analiza rezultata ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju

Čvrstoća na savijanje ispitivana je samo na betonskim uzorcima starosti 28 dana. Svi ispitani uzorci s ugrađenim pepelom pokazali su prilično ujednačene vrijednosti čvrstoće na savijanje koje po absolutnim iznosima odgovaraju redu veličine vrijednosti dobivenih na referentnim mješavinama. Potrebno je istaknuti da su vrijednosti čvrstoće na savijanje dobivene za betonske mješavine s ugrađenim 20%-tним udjelom pepela dobivenog na 900°C (s UPOV Karlovac i Zagreb) čak i više od vrijednosti dobivenih na referentnoj mješavini. Najveća vrijednost čvrstoće na savijanje dobivena je za mješavinu s ugrađenim pepelom dobivenim na 900°C s UPOV Karlovac i iznosi čak 134% vrijednosti čvrstoće na savijanje referentne mješavine. Najlošiji rezultati po pitanju čvrstoće na savijanje dobiveni su za mješavine s ugrađenim muljem (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica te za mješavinu s 20%-tnim udjelom ovog mulja čvrstoća na savijanje iznosi svega 76% čvrstoće na savijanje referentne mješavine.

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 za sve ispitivane mješavine.

Generalno se može reći da rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće (za sve starosti) betona prate rezultate dobivene ispitivanjem čvrstoće na savijanje. I u ovom slučaju najbolji rezultati dobiveni su za mješavinu s ugrađenim pepelom s UPOV Karlovac čija 28-dnevna tlačna čvrstoća iznosi 120% tlačne čvrstoće referentne mješavine. Najlošiji rezultati ponovno su dobiveni za mješavine s ugrađenim muljem (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica, prvenstveno za mješavinu s 20%-tnim udjelom ovog mulja čija 28-dnevna tlačna čvrstoća iznosi svega 48% tlačne čvrstoće referentne mješavine.

Na temelju rezultata ispitivanja vodonepropusnosti može se generalno zaključiti da dodatak pepela nepovoljno utječe na vodonepropusnost betona budući da se dubina prodora vode povećava za sve analizirane mješavine u odnosu na referentnu mješavinu. Ovaj nepovoljan utjecaj još je izraženiji u slučaju korištenja mulja (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica. Ipak, najbolji rezultati po pitanju vodonepropusnosti ponovno su dobiveni za mješavine s ugrađenim pepelom dobivenim na 900°C iz mulja s UPOV Zagreb i Karlovac te je tako za mješavinu s pepelom iz zagrebačkog mulja zabilježeno najmanje povećanje dubine prodora (svega 4% u odnosu na referentnu mješavinu). Najlošiji rezultati dobiveni su za mješavinu s 20%-tnim udjelom mulja (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica (povećanje dubine prodora vode u odnosu na referentnu mješavinu od preko 40%).

Prema klasifikaciji razreda vodonepropusnosti, svi analizirani uzorci s ugrađenim pepelom, kao i referentni uzorak, mogu se svrstati u razred VDP2 (maksimalna dopuštena dubina prodora vode do 30 mm), dok se uzorci s ugrađenim muljem (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica razvrstavaju u razred VDP1.

Na temelju prikazanih rezultata ispitivanja deformacija (skupljanja) može se reći da svi analizirani uzorci daju rezultate približno jednake (istog reda veličine) onima dobivenim na referentnoj mješavini. Ipak, prisutan je blagi trend povećanja skupljanja kod svih mješavina s dodanim pepelom ili



muljem u odnosu na referentnu mješavinu. To povećanje najmanje je izraženo za mješavinu s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb na 900°C, dok su najveća odstupanja od referentne mješavine dobivena korištenjem pepela dobivenog iz istog mulja ali na 800°C te posebice za mješavinu s 20%-tним udjelom mulja (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica.

5.7 Zaključak

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

Do sada provedena 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, osim u slučaju korištenja mulja (bez spaljivanja) dobivenog MID-MIX tehnologijom kad je zabilježen manji pad gustoća u svježem stanju.
- Temperatura svježeg betona raste s dodatkom pepela u odnosu na referentnu mješavinu. Navedeni porast temperature manje je značajan u slučaju korištenja mulja (bez spaljivanja) dobivenog MID-MIX tehnologijom, dok je u slučaju korištenja pepela taj porast nešto izraženiji.
- Udio pora u betonu povećava se s dodatkom pepela. Također, udio pora u svježem betonu raste još značajnije u slučaju korištenja mulja (bez spaljivanja) dobivenog MID-MIX tehnologijom.
- Obradivost betona se smanjuje s dodatkom pepela, prije svega zbog povećanih potreba za vodom. Navedeno smanjenje obradivosti manje je izraženo kod mješavina s dodanim muljem (bez spaljivanja) dobivenim MID-MIX tehnologijom.
- Čvrstoće betona s dodatkom pepela (mulja) rastu s povećanjem starosti betona.
- Udjeli pepela do 20% u betonskim mješavinama uz korištenje aditiva (superplastifikatora) ne narušavaju značajno mehaničke karakteristike betona, a za neke mješavine dobiveni rezultati čak i nadvisuju rezultate dobivene na referentnim mješavinama. Rezultati dobiveni na mješavinama s dodanim muljem (bez spaljivanja) dobivenim MID-MIX tehnologijom ne mogu se ocijeniti kao zadovoljavajući budući da u ovom slučaju pad čvrstoća iznosi gotovo 50% u odnosu na referentnu mješavinu.
- Na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem vodonepropusnosti, može se zaključiti da betoni s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV-a generalno pokazuju nešto veći prođor vode pod tlakom u odnosu na referentni beton, ali svi analizirani uzorci s ugrađenim pepelom, kao i referentni uzorak, mogu se svrstati u razred isti razred – VDP2. Nešto nepovoljnija situacija (dublji prođor vode pod tlakom) dobivena je u slučaju korištenja mulja (bez spaljivanja) dobivenog MID-MIX tehnologijom te se dobivene mješavine u ovoj varijanti svrstavaju u razred VDP1.



- Svi analizirani uzorci daju rezultate ispitivanja deformacija (skupljanja) istog reda veličine kao i referentni uzorci. Ipak, može se reći da je s dodatkom pepela (mulja) prisutan blagi trend povećanja skupljanja, što je i u ovom području nešto izraženije u slučaju korištenja mulja (bez spaljivanja) dobivenog MID-MIX tehnologijom.



6. Rezultati ispitivanja na betonu s ugrađenim pepelom dobivenim na 800°C iz mulja različite starosti s UPOV Zagreb

Tablica 6 Pregled mješavina betona s ugrađenim pepelom dobivenim na 800°C iz mulja različite starosti s UPOV Zagreb

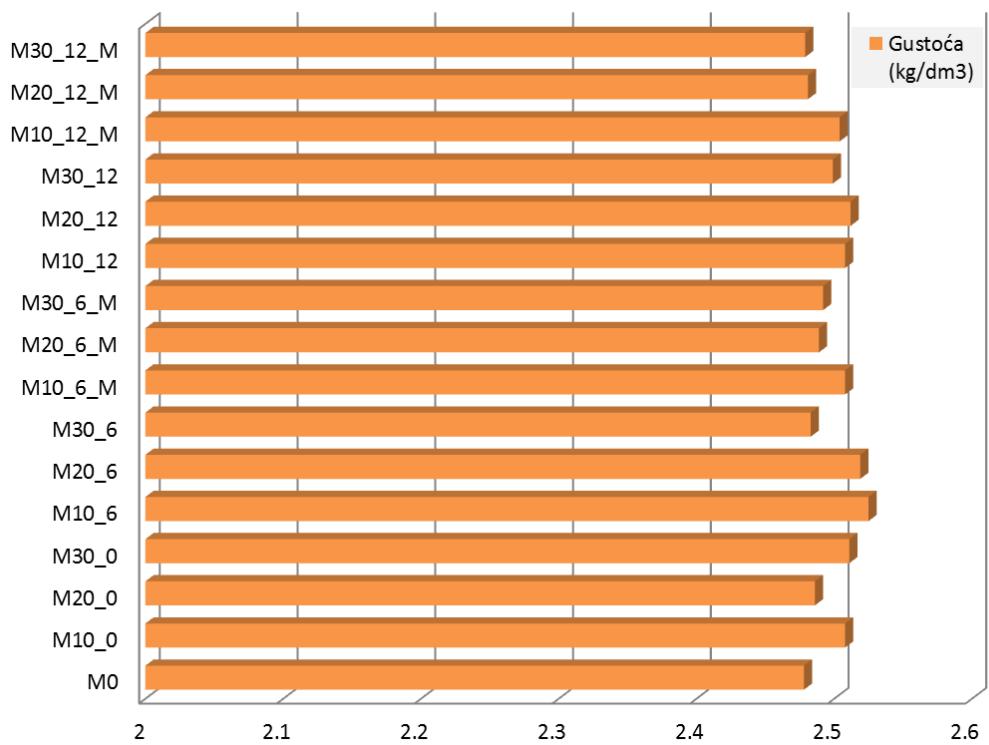
Oznaka mješavine	Starost mulja (mjeseci)	Udio pepela (%)	Udio metakaolina (%)
M0 (referentna)	-	-	-
M10_0	0	10	0
M20_0		20	
M30_0		30	
M10_6	6	10	0
M20_6		20	
M30_6		30	
M10_6_M		10	5
M20_6_M		20	
M30_6_M		30	
M10_12	12	10	0
M20_12		20	
M30_12		30	
M10_12_M		10	5
M20_12_M		20	
M30_12_M		30	



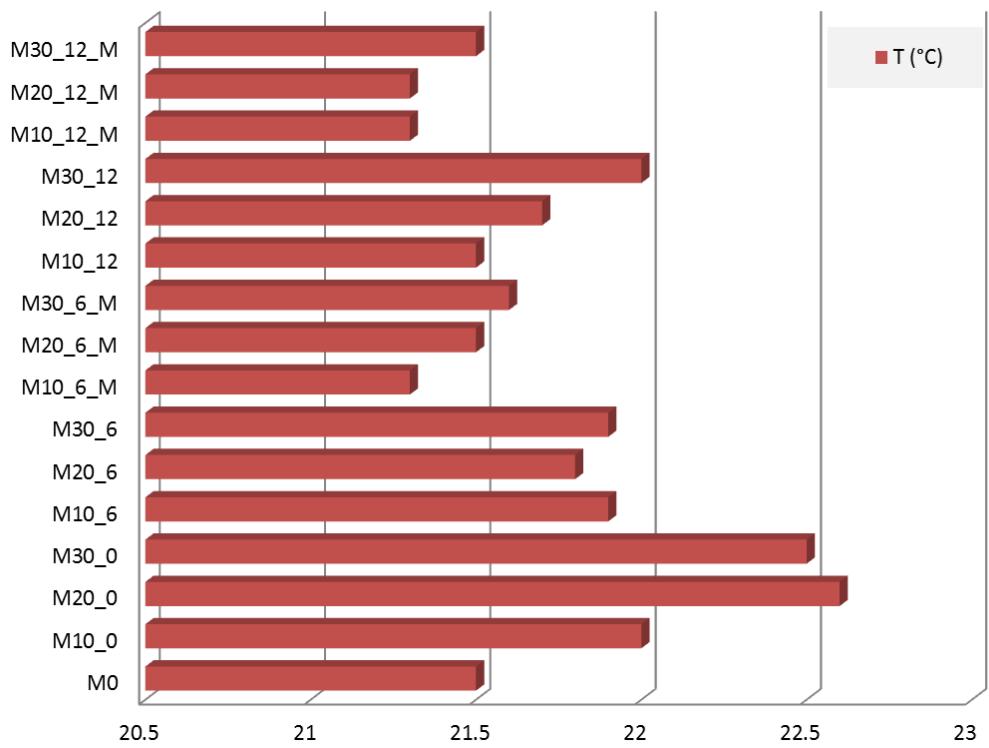
6.1 Rezultati ispitivanja na betonu u svježem stanju

Tablica 7 Rezultati ispitivanja na betonu u svježem stanju

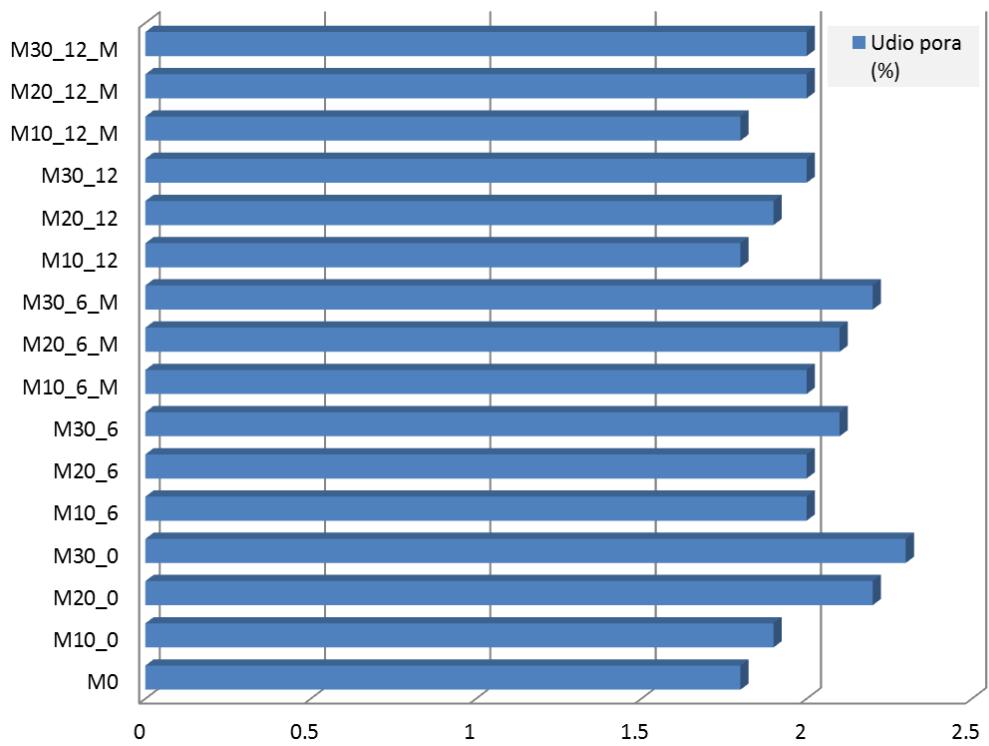
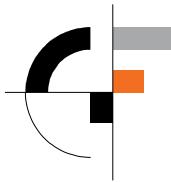
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Konzistencija (slijeganje) (cm)
M0	2.478	21.5	1.8	12
M10_0	2.508	22.0	1.9	4
M20_0	2.486	22.6	2.2	3
M30_0	2.511	22.5	2.3	2
M10_6	2.525	21.9	2.0	3
M20_6	2.519	21.8	2.0	2
M30_6	2.483	21.9	2.1	2
M10_6_M	2.508	21.3	2.0	3
M20_6_M	2.489	21.5	2.1	2
M30_6_M	2.492	21.6	2.2	1
M10_12	2.508	21.5	1.8	5
M20_12	2.512	21.7	1.9	4
M30_12	2.499	22.0	2.0	3
M10_12_M	2.504	21.3	1.8	4
M20_12_M	2.481	21.3	2.0	3
M30_12_M	2.479	21.5	2.0	3



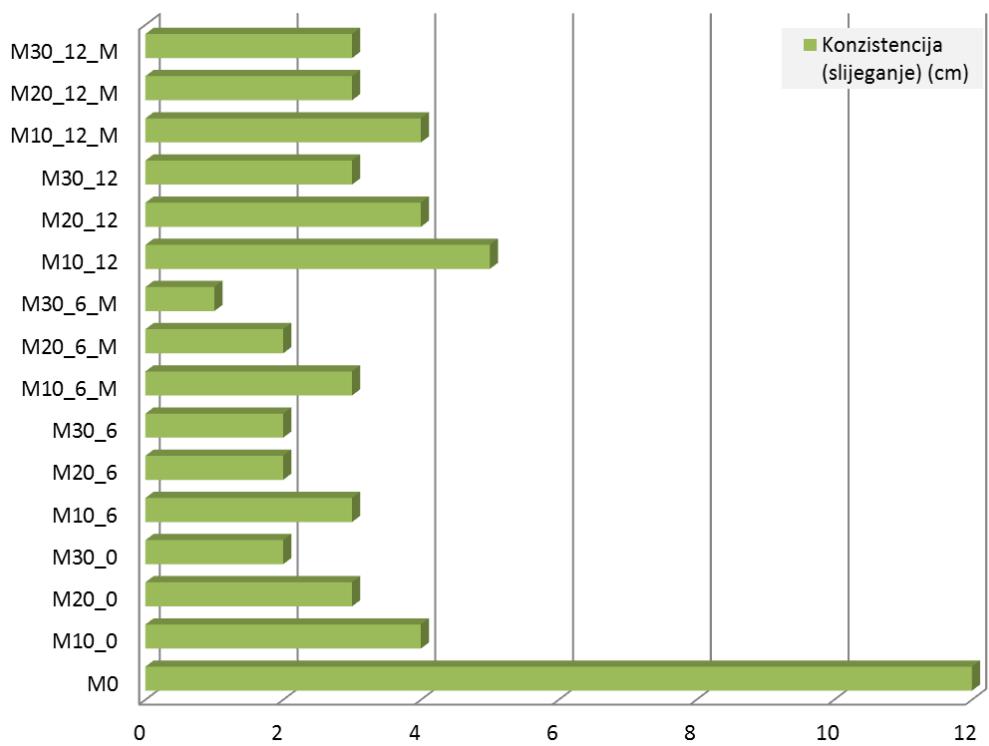
Slika 12 Gustoća svježeg betona s ugrađenim pepelom



Slika 13 Temperatura svježeg betona s ugrađenim pepelom



Slika 14 Udio pora u svježem betonu s ugrađenim pepelom



Slika 15 Konzistencija (slijeganje) svježeg betona s ugrađenim pepelom



6.2 Analiza rezultata ispitivanja na betonu u svježem stanju

Analizom dobivenih vrijednosti gustoća betona (u svježem stanju) s dodatkom pepela dobivene su minimalne razlike s obzirom na udio dodanog pepela. S obzirom na starost primijenjenog mulja (korištenog za dobivanje pepela) također nisu primjetne veće razlike u gustoći svježeg betona. Blago više vrijednosti gustoća dobivene su za mješavine u kojima je korišten pepeo dobiven iz svježeg mulja (0 mjeseci starosti). U mješavinama s dodanim pepelom generalno su se razvile znatno veće temperature u odnosu na referentnu mješavinu (bez dodanog pepela). Najviša temperatura razvila se u mješavini s 20%-tним udjelom pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb na 900°C. Zanimljivo je da mješavine s ugrađenim muljem (bez spaljivanja) s UPOV Koprivnica nisu razvile veće temperature, tj. temperatura svježeg betona ostala je na podjednakoj razini kao i za referentnu mješavinu.

Rezultati dobiveni na betonu s ugrađenim pepelom potvrđuju generalni trend blagog (a za neke mješavine i zanemarivog) povećanja poroznosti u odnosu na referentnu mješavinu. S obzirom na starost primijenjenog mulja (korištenog za dobivanje pepela) također nisu primjetne veće razlike u udjelu zraka u svježem betonu. Blago više vrijednosti sadržaja zraka dobivene su za mješavine u kojima je korišten pepeo dobiven iz svježeg mulja (0 mjeseci starosti).

Potvrđeni su i povećani zahtjevi za vodom te smanjena obradivost betona s dodatkom pepela. Nešto bolji rezultati po pitanju obradivosti dobiveni su za betone s ugrađenim pepelom iz mulja najveće starosti (12 mjeseci).

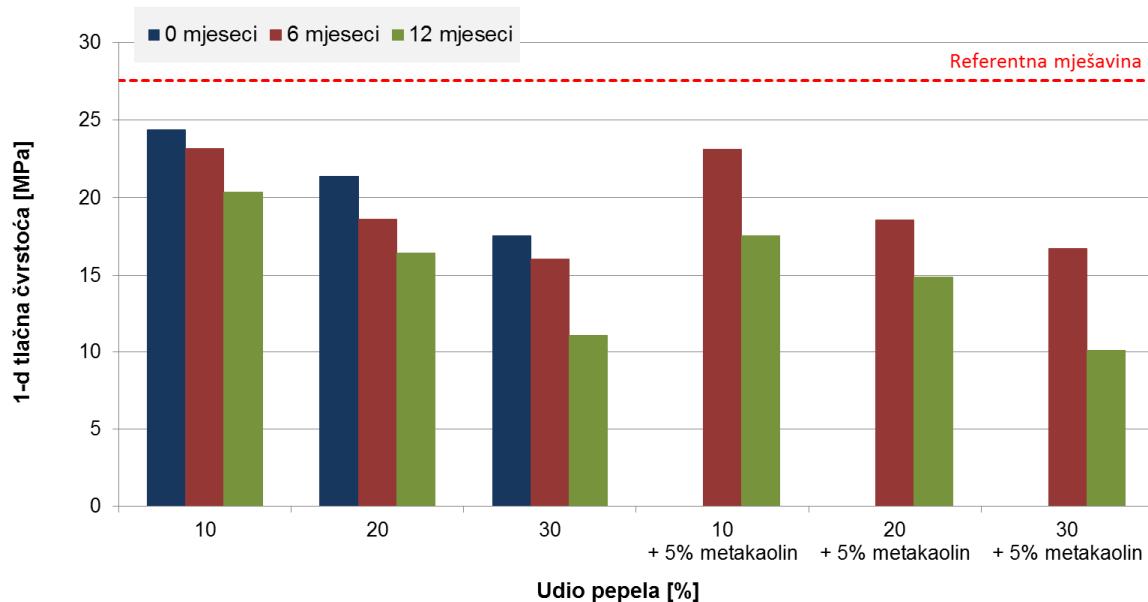


6.3 Rezultati ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju

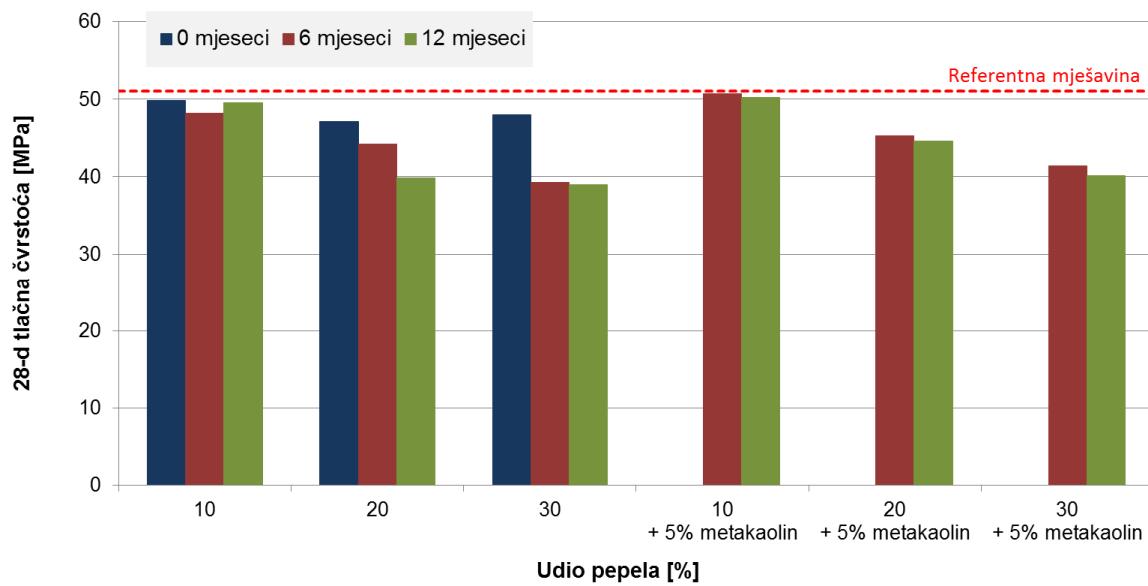
6.3.1 Mehaničke karakteristike

Tablica 8 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na betonu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom

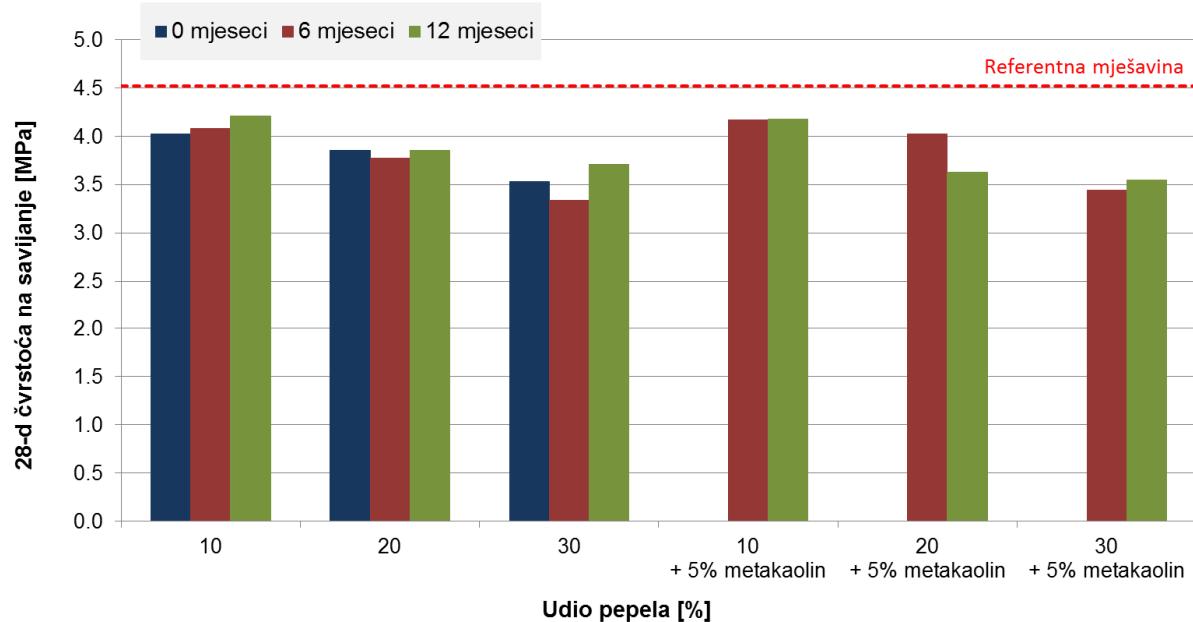
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)	Tlačna čvrstoća (MPa)	
		28 d	1 d
M0	4.52	27.55	51.03
M10_0	4.02	24.38	49.85
M20_0	3.85	21.36	47.13
M30_0	3.53	17.56	48.02
M10_6	4.08	23.16	48.15
M20_6	3.77	18.61	44.21
M30_6	3.34	16.03	39.22
M10_6_M	4.17	23.11	50.67
M20_6_M	4.02	18.56	45.29
M30_6_M	3.44	16.73	41.41
M10_12	4.21	20.35	49.55
M20_12	3.85	16.45	39.88
M30_12	3.71	11.07	38.96
M10_12_M	4.18	17.54	50.27
M20_12_M	3.63	14.87	44.62
M30_12_M	3.55	10.07	40.13



Slika 16 1-dnevna tlačna čvrstoća uzoraka betona s ugrađenim pepelom



Slika 17 28-dnevna tlačna čvrstoća uzoraka betona s ugrađenim pepelom

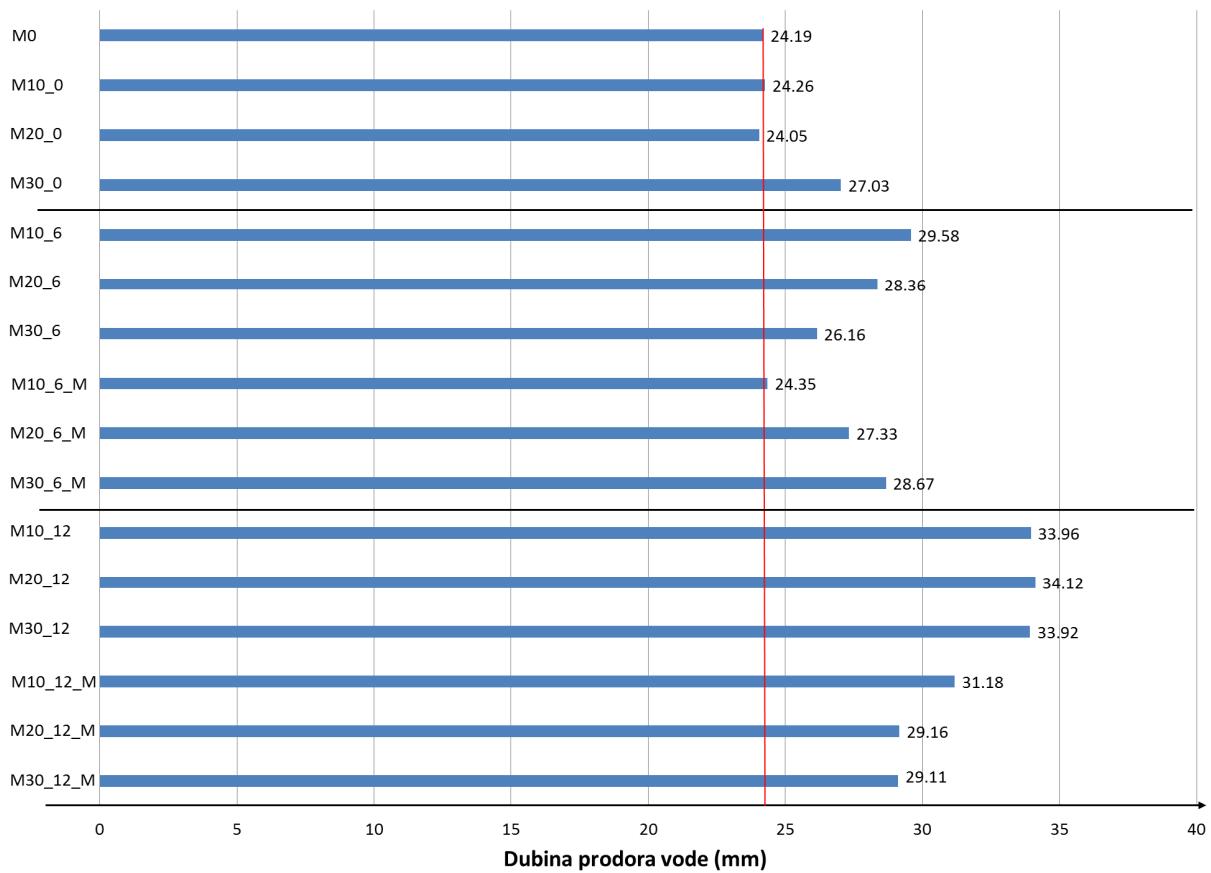


Slika 18 28-dnevna čvrstoća na savijanje uzoraka betona s ugrađenim pepelom

6.3.2 Vodonepropusnost

Tablica 9 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom

Oznaka mješavine	Dubina prodora vode (mm)
M0	24.19
M10_0	24.26
M20_0	24.05
M30_0	27.03
M10_6	29.58
M20_6	28.36
M30_6	26.16
M10_6_M	21.35
M20_6_M	27.33
M30_6_M	28.67
M10_12	33.96
M20_12	34.12
M30_12	33.92
M10_12_M	31.18
M20_12_M	29.16
M30_12_M	29.11



Slika 19 Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom



6.4 Analiza rezultata ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju

Čvrstoća na savijanje ispitivana je samo na betonskim uzorcima starosti 28 dana. Svi ispitani uzorci s ugrađenim pepelom pokazali su prilično ujednačene vrijednosti čvrstoće na savijanje koje po apsolutnim iznosima za sve analizirane uzorke ipak ostaju niže od vrijednosti dobivenih na referentnoj mješavini (5-25% niže vrijednosti čvrstoće na savijanje mješavina s dodatkom pepela u odnosu na referentnu mješavinu). Može se primijetiti i da dodatak metakaolina pridonosi blagom povećanju čvrstoće na savijanje.

Tlačna čvrstoća ispitivana je za 2 različite starosti betona (1 i 28 dana) te je moguće uočiti trend povećanja vrijednosti čvrstoće s povećanjem starosti betona za sve ispitivane mješavine. 1-dnevne tlačne čvrstoće mješavina s ugrađenim pepelom značajnije zaostaju za vrijednostima dobivenim na referentnoj mješavini (za pojedine mješavine pad 1-dnevne tlačne čvrstoće iznosi i preko 50% u odnosu na referentnu mješavinu). S povećanjem starosti betona, mješavine s ugrađenim pepelom po pitanju tlačne čvrstoće znatno se približavaju vrijednostima dobivenim na referentnoj mješavini pa se tako mješavine s 10%-tним udjelima pepela (s i bez dodatka metakaolina) gotovo i ne razlikuju od referentne mješavine. Generalno gledano, nešto bolje vrijednosti tlačnih čvrstoća dobivene su korištenjem pepela iz mulja manje starosti (najbolji rezultati s pepelom iz svježeg mulja, a najlošiji korištenjem pepela iz 12 mjeseci starog mulja). Također, kod tlačne čvrstoće pozitivan doprinos dodatka metakaolina je nešto manje izražen.

Na temelju rezultata ispitivanja vodonepropusnosti može se generalno zaključiti da dodatak pepela nepovoljno utječe na vodonepropusnost betona budući da se dubina prodora vode blago povećava za sve analizirane mješavine u odnosu na referentnu mješavinu. Ovaj nepovoljan utjecaj još je izraženiji u slučaju korištenja pepela iz mulja veće starosti (12 mjeseci), dok su rezultati dobiveni korištenjem svježeg mulja u rangu onih dobivenih na referentnoj mješavini. Također, može se zaključiti da dodatak metakaolina pridonosi blagom smanjenju prodora vode pod tlakom.

Prema klasifikaciji razreda vodonepropusnosti, većina analizirani uzoraka s ugrađenim pepelom, kao i referentni uzorak, mogu se svrstati u razred VDP2 (maksimalna dopuštena dubina prodora vode do 30 mm), dok se pojedini uzorci s ugrađenim pepelom iz mulja starosti 12 mjeseci razvrstavaju u niži razred vodonepropusnosti VDP1.



6.5 Zaključak

Iz provedenih ispitivanja na betonu s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja različite starosti s UPOV Zagreb mogu se izvući sljedeći zaključci:

- Na betonu u svježem stanju ne uočavaju se značajnije razlike s obzirom na starost mulja korištenog za dobivanje pepela kojim se zamjenjuje dio cementa. Generalno su potvrđeni prethodno izneseni zaključci o minimalnom utjecaju dodatka pepela na gustoću svježeg betona, blagi porast temperature, kao i udjela zraka u svježem betonu s dodatkom pepela, te nepovoljan utjecaj na obradivost uzrokovani povećanim zahtjevima za vodom u mješavinama s dodanim pepelom.
- Čvrstoća na savijanje uzoraka s dodanim pepelom niža je od vrijednosti dobivenih na referentnoj mješavini za sve analizirane uzorke. Tlačna čvrstoća betona s dodanim pepelom u ranim fazama hidratacije (1-dnevna čvrstoća) značajnije zaostaje za vrijenostima dobivenim na referentnoj mješavini, dok se s povećanjem starosti betona ove razlike smanjuju te vrijednosti 28-dnevnih tlačnih čvrstoća pojedinih mješavina betona s 10%-tним udjelima pepela dosežu vrijednosti dobivene na referentnoj mješavini. Uzorci s ugrađenim pepelom iz svježeg mulja generalno su razvili nešto veće tlačne čvrstoće u odnosu na mješavine s pepelom iz mulja veće starosti.
- Iako dodatak pepela generalno nepovoljno utječe na vodonepropusnost betona budući da se dubina prodora vode pod tlakom blago povećava u odnosu na referentnu mješavini, i ovdje je prisutan trend dobivanja povoljnijih rezultata korištenjem pepela iz svježeg mulja (0 mjeseci starosti). Razred vodoneprospusnosti betona s ugrađenim pepelom uglavnom ostaje isti kao i za referentni beton, dok se tek pojedini uzorci s pepelom iz mulja najveće starosti (12 mjeseci) degradiraju u niži razred.