



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.4 –**
**REZULTATI ISPITIVANJA NA CEMENTNOM MORTU (BEZ
DODATKA ADITIVA)**

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.
Lidija Valek Žulj, dr.sc.
Vilko Mandić, dr.sc.

DEKAN GRAĐEVINSKOG FAKULTETA

SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

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





Rezultati ispitivanja na cementnom mortu (bez dodatka aditiva)

1. Uvod

U konvencionalnom postupku cementni mort se dobiva u procesu umješavanja agregata (pijesak), cementa i vode. S ciljem poboljšanja pojedinih svojstava cementnog morta mogu se dodavati i drugi materijali (aditivi), a u sklopu ovog istraživanja razmatran je utjecaj dodavanja pepela kao zamjena za određeni udio cementa.

Cilj ovog istraživanja je ispitati mogućnost i opravdanost zbrinjavanja pepela dobivenog spaljivanjem mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) u betonskoj industriji, čime bi se zaokružio cjelovit 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 koji je prisutan u gotovo svim razvijenim zemljama svijeta.

Također, analizirat će se i povezanost svojstava cementnog morta s različitim udjelom pepela kao zamjenom za dio cementa. Time se ujedno pridonosi smanjenju ekološkog i ekonomskog tereta industrijske proizvodnje cementa. U cilju dokazivanja navedenog, provedena su potrebna ispitivanja svojstava cementnog morta, uz dodatak pepela kao zamjene za dio cementa, i to u svježem stanju (konzistencija, vrijeme vezivanja, udio pora, gustoća i temperatura) i očvrstnulom stanju (čvrstoća na savijanje i na tlak te plinopropusnost), sukladno hrvatskim i europskim normama.

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

U cilju potencijalne primjene pepela u betonskoj industriji, provelo se ispitivanje na uzorcima cementnog morta kao podloga za daljnja istraživanja u ovom području. Mort je pogodan za početne faze ispitivanja radi praktičnosti pri ugrađivanju (manje dimenzije ispitnih uzoraka, odnosno manje količine materijala) i ispitivanju (više uzoraka i više ispitanih parametara). Treba naglasiti da je ograničena količina dostupnog pepela bila značajan faktor pri projektiranju eksperimenta.

Glavni smjer istraživanja, prilikom projektiranja eksperimenta, se kretao oko pronalaženja optimalne temperature spaljivanja mulja i optimalne količine pepela ugrađene u cementni mort, kao zamjene za dio cementa. Kao kontrolna mjera i za usporedbu rezultata izradile su se i referentne mješavine (bez umješavanja pepela).



Temperatura spaljivanja mulja je varirana jer utječe na karakteristike dobivenog pepela i stoga može imati utjecaja na njegova pucolanska svojstva, što se nastojalo istražiti u sklopu provedenog istraživanja.

Variranjem vodovezivnog omjera (v/v_e) najčešće primjenjivanim 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 (0,45, 0,50, 0,55)
- maseni udio pepela (%) kao zamjena za cement (5%, 10%, 20%, 30%).

Do sada su za potrebe ispitivanja na cementnom mortu pripremljene i analizirane ukupno **92 različite mješavine** korištenjem pepela s tri UPOV (Karlovac, Koprivnica i Zagreb), dok će se mješavine dobivene korištenjem pepela s UPOV Varaždin, zbog otežanih okolnosti povođenja postupka spaljivanja mulja, analizirati u drugoj godini istraživanja. Naime, pri spaljivanju mulja s UPOV Varaždin u dva navrata, pojavio se gusti crni dim uz prateće izrazito intenzivne neugodne mirise. Neovisno o tome što se uz opremu kupljenu sredstvima Hrvatske zaklade za znanost u sklopu projekta "RESCUE" ispušni plinovi iz peći za spaljivanje pročišćavaju na uređaju s aktivnim ugljenom, pri spaljivanju mulja s UPOV Varaždin došlo je do generiranja i intenzivnog širenja gustog dima neugodnog mirisa. Obzirom da se spaljivanje mulja provodi u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, smještenom u Savskoj ulici (preko puta Studetskog centra) u dvorišnom objektu uz koji se nalaze i objekti za stanovanje, okolni stanari su pri prvom ciklusu spaljivanja mulja s UPOV Varaždin izrazili su nezadovoljstvo, a pri drugom ciklusu su pozvane vatrogasne i policijske postrojbe, što je rezultiralo privremenim zatvaranjem Savske ulici (kod Studentskog centra). Stoga su članovi projektnog tima odlučili da će se spaljivanje mulja s UPOV Varaždin obaviti na drugoj pogodnijoj lokaciji van mjesta stanovanja. Takva lokacija nije pronađena tijekom prve godine istraživanja, te se njezin uspješni pronašao očekuje tijekom druge godine istraživanja. Neovisno o prethodno navedenom, u dva provedena ciklusa spaljivanja mulja s UPOV Varaždin, dobivene su određene količine koje su korištene za provođenje fizikalnih i kemijskih analiza pepela.

Za potrebe ispitivanja različitih utjecajnih parametara, predviđeno je da su potrebne količine cementnog morta (u litrama) za ispitivanje u svježem stanju jedne mješavine:

- 0,2 l za ispitivanje vremena vezanja,
- 1,0 l za ispitivanje udjela pora, od čega se ponovno upotrebljava 0,7 l morta
- ostala ispitivanja (temperatura, gustoća i konzistencija) omogućavaju ponovnu uporabu morta te ne ulaze u proračun potrebnog volumena morta.

Potrebne količine morta za ispitivanje u krutom stanju su:



- 2,304 l za ispitivanje čvrstoća na savijanje i tlak (3 x 3 prizmi: 1, 7 i 28 dana starosti)
- 1,57 l za ispitivanje plinopropusnosti (1 cilindar).

Ukupni proračunati volumen iznosi 4,07 litara [dm³] na što treba dodati moguće gubitke morta tijekom miješanja i ugradnje u iznosu 0,5 litara čija suma iznosi 4,57 litara. Radi lakšeg proračuna sastava morta i dodatne sigurnosti ukupna potrebna količina morta po jednoj mješavini zaokružena je na 5,0 l.

Tablica 1 Primjer projektiranog sastava morta (20%-tni udio pepela iz mulja s UPOV Karlovac dobiven spaljivanjem na 800°C, uz v/v_e=0,50) – oznaka mješavine KA M₂₀-B

Materijal	KA M ₂₀ -B		
	Masa (kg)	Gustoća (kg/dm ³)	Volumen (dm ³)
Cement	2,027	2,947	0,688
Pepeo (20%)	0,507	2,667	0,190
Voda	1,267	1,000	1,267
v/v _e = 0,50	-	-	-
Zrak 2,5%	-	-	0,125
Agregat	7,508	2,750	2,730
Ukupno	11,309	2,262	5,000



2. Materijal

Za potrebe ovog istraživanja korišten je drobljeni dolomit granulacije 0 – 4 mm iz kamenoloma Očura proizvođača Holcim (u skladu s EN 12620:2002+A1:2008).

Ovaj agregat karakterizira visoka tlačna čvrstoća (184,2 MPa), gustoća (2,85 g/cm³), niski stupanj upijanja vode (0,14-0,6 %) te otpornost na habanje (22,0 cm²), drobljenje (LA 24), polirnost, postojanost na mrazu i visoki afinitet na bitumenska veziva (90/100). Ova svojstva ukazuju na izuzetna fizičko-mehanička svojstva agregata koji se upotrebljavaju kao sirovina u širokom spektru građevinske industrije. Upravo ovaj agregat odabran je zbog kvalitete i dostupnosti.

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, trgovačkog 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 cementnog morta, kako bi se dokazana svojstva odnosila na proizvod široke primjene na tržištu.

Ujedno, zamjenom dijela cementa dodacima (npr. pepelom dobivenim spaljivanjem mulja) smanjuje se količina ekološki neprihvatljivog klinkera.

Prilikom miješanja morta korištena je voda iz vodovoda (HRN EN 1008:2002).



3. Postupak miješanja i ugradnje cementnog morta

Izvagana je masa sastojaka unaprijed određena sastavom cementnog morta za svaku mješavinu. Korišteni sastojci su: pepeo (osim za referentne mješavine), cement, agregat i voda.

Cementni mort je miješan uobičajenim postupkom laboratorijskog miješalica na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, prilagođenim potrebama miješanja morta s pepelom, koristeći se laboratorijskom miješalicom prikazanom na Slici 1.



Slika 1 Postupak miješanja cementnog morta

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

Ostatak morta je ugrađivan u kalupe, koji su po tipu i broju odabrani prema unaprijed određenim vrstama ispitivanja u očvrsnulom stanju. Za svaku mješavinu je upotrijebljeno sljedeće:

- 3 čelična kalupa za prizmice standardiziranih dimenzija 4x4x16 cm (za ispitivanje tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje), svaki po 3 komore – ukupno 9 uzoraka
- 1 čelični kalup za valjak (za ispitivanje plinopropusnosti), koji je poslije ispiljen na 3 manja valjka – ukupno 3 uzorka.



Slika 2 Čelični kalup standardiziranih dimenzija za ugradnju cementnog morta za ispitivanja čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće

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



Slika 3 Ugrađeni mort (jedna mješavina)

Nakon 24 ± 2 sata od miješanja, uzorci su raskalupljeni, a kalupi su očišćeni od morta i nauljeni, kako bi bili spremni za ponovnu upotrebu. Uzorci na kojima se ispitivala 1-dnevna tlačna i čvrstoća na savijanje potom su izdvojeni za ispitivanje, a oni na kojima se ispitivala 7-dnevna i 28-dnevna tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje te plinopropusnost stavljeni su u vlažnu komoru.



4. Ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju

4.1 Gustoća

Gustoća svježeg morta određena je kvocijentom njegove mase i volumena koji zauzima kad je ugrađen na predviđeni način prema normi EN 1015-6:1998+A1:2006.



Slika 4 Kalup poznatog volumena $1,0 \text{ dm}^3$ korišten u postupku određivanja gustoće svježeg morta

4.2 Temperatura

Temperatura mješavina cementnog morta određena je prema normi HRN U.M1.032:1981 korištenjem digitalnog ubodnog termometra (Slika 5).



Slika 5 Digitalni ubodni termometar

U svježe izmiješan mort unesena je igla termometra, pazeći da mjeri temperaturu sredine mješavine i da ne dodiruje posudu. Nakon stacioniranja pokazivača temperature, izvršeno je očitanje u $^{\circ}\text{C}$.



4.3 Konzistencija

Konzistencija je određena pomoću stolića za protresanje (slika 6), na temelju norme EN 1015-3:1999. Usljed vertikalnih udara stolića za protresanje, svježi mort se rasprostire u pogaćicu, čije su konačne dimenzije pokazatelj konzistencije.



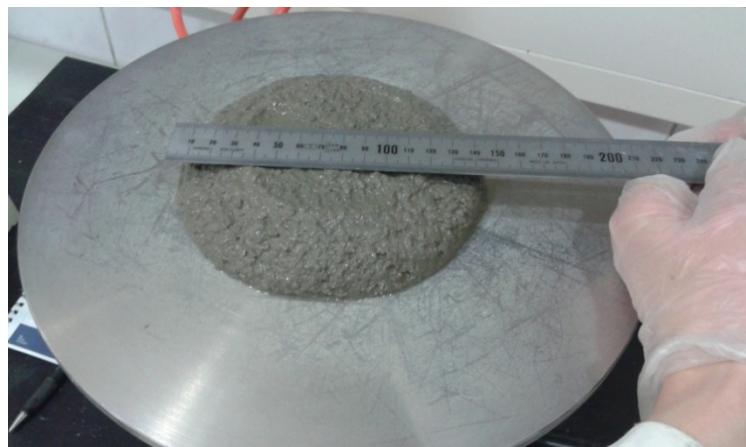
Slika 6 Aparatura za određivanje konzistencije

Svježe izmiješan mort ugrađen je u navlaženi kalup smješten na stolić za protresanje. Površina je zaglađena zidarskom žlicom u ravnini ruba i kalup je polagano odignut. Nakon 15 ujednačenih udaraca stolićem za protresanje (1 udarac/s), svježi mort je rasprostr. Izmjeren je promjer dobivene pogaćice u dva okomita smjera, a srednja vrijednost čini traženu vrijednost promjera rasprostiranja u [mm].

4.4 Pore

Korištena je „Metoda pritiska“, koja se koristi za mortove s udjelom pora manjim od 20 %, a na temelju norme EN 1015-7:1998.

Mort je ugrađen u za to predviđenu posudu (slika 8). Posuda je zaklopljena i zatvoren je ventil za zrak, potom je nalivena voda povrh morta i zatvoreni pripadajući ventili. Pumpom je nanesen tlak, čime voda ispunjava pore morta a iz njih istiskuje zrak. Otpuštanjem ventila koji odvaja komore, manometar bilježi pad tlaka, tj. pokazuje udio pora u [%].



Slika 7 Mjerenje dimenzija pogačice



Slika 8 Porometar

4.5 Vrijeme vezivanja

Vrijeme vezivanja se određuje promatranjem dubine prodiranja igle Vicat-ovog aparata (Slika 9) tijekom vremena u ispitivani mort prema normi HRN EN 480-2:1996.

Postupak ispitivanja kreće od ugradnje svježe izmiješanog morta u posude od čvrste gume. Iglu je potrebno nasloniti na vrh morta i lagano pustiti da svojom težinom vertikalno prodire kroz mort, bez početnog ubrzanja.



Nakon 30 sekundi očitana je s aparata dubina prodiranja. Postupak se ponavlja u intervalima 5 – 30 minuta, dok se dubina prodiranja igle zaustavi na 4 mm od dna posude, što predstavlja početak vezivanja cementnog morta.

Nakon toga posuda se okreće i vraća u aparat te se ponavlja isti postupak prodiranja igle. Međutim, sada se mjeri dubina penetracije od vrha posude, sve dok dubina prodiranja ne iznosi 2,5 mm, što predstavlja kraj vremena vezivanja.



Slika 9 Određivanje vremena vezivanja Vicat-ovim aparatom



5. Ispitivanja na cementnom mortu u očvrsnulom stanju

5.1 Mehaničke karakteristike

Ispitivanje mehaničkih karakteristika morta odnosi se na određivanje čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće prema normi HRN EN 1015-11:1999.

Očvrsnule prizme morta ispituju se na preši postepenim nanošenjem sile do loma te se proračunom određuju konačne čvrstoće.



Slika 10 Preša za savijanje i tlačenje

Nakon 24 sata, raskalupljene prizme morta označavaju se radi kasnijeg lakšeg raspoznavanja i smještaju se u vlažnu komoru ($RH > 95\%$, temperature $20 \pm 2^\circ C$). Uzorci se vade iz vlažne komore neposredno prije ispitivanja, izmjere se pomicnim mjerilom te se poslože i centriraju na ležajeve razmaka 100 cm, glatkom površinom na ležaj, radi jednolike raspodjele opterećenja.

Postupak ispitivanja i proračun čvrstoće

Čvrstoća na savijanje određena je nanošenjem sile na prizme morta u preši (Slika 10), brzinom nanošenja $0,01 - 0,1 \text{ kN/s}$ do trenutka loma. Sila u trenutku loma se obilježava, te uvrštava u formulu za proračun čvrstoće na savijanje:



$$f = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

gdje je:

f – čvrstoća na savijanje [N/mm^2]

F – sila u trenutku loma [N]

l – razmak među ležajevima [mm]

b, d – širina i visina prizme [mm].



Slika 11 Slomljene prizme morta

Lomljenjem prizmi dobivaju se uzorci na kojima se provode ispitivanja tlačne čvrstoće. Tlačna čvrstoća određuje se nanošenjem sile, brzinom nanošenja 0,5 – 1,0 kN/s, na raspolovljene uzorke (Slika 11) do trenutka loma, sila loma se zapisuje i uvrštava u formulu za proračun tlačne čvrstoće:

$$\sigma_c = \frac{F}{b \cdot d}$$

gdje je:

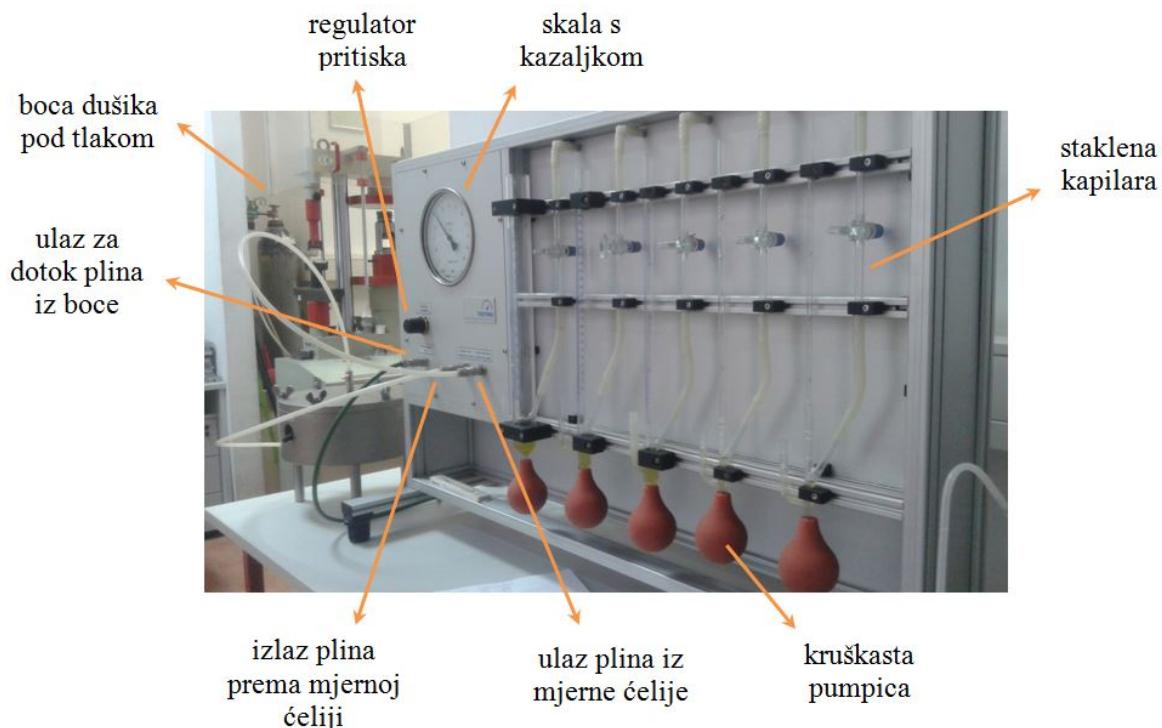
- σ_c – tlačna čvrstoća [N/mm^2]
- F – sila u trenutku loma [N]
- b, d – širina i visina prizme [mm].

5.2 Plinopropusnost

Plinopropusnost kao trajnosno svojstvo određena je na temelju određivanja koeficijenta plinopropusnosti RILEM Cembureau metodom.



Kada se kroz uzorak pod tlakom nekoliko puta većim od atmosferskog pusti plin, uzorak će ga propuštati u dovoljnim količinama da je moguće mjerjenje protoka volumena u vremenu, odnosno mjerjenje procesa koji se u prirodnim okolnostima u materijalu odvija puno sporije.



Slika 12 Uredaj za ispitivanje plinopropusnosti



Slika 13 Mjerna čelija



Uzorci za ispitivanje plinopropusnosti starosti 29 dana su pripremljeni kako slijedi: Valjci morta, promjera 100 mm i visine 300 mm, dozrijevali su u vlažnoj komori ($RH > 95\%$ i temperaturi $20 \pm 2^\circ C$) 28 dana. Nakon toga su ispljeni u 3 manja valjka; promjera 100 mm i visine 50 mm, koji predstavljaju ispitne uzorke (Slika 14). Uzorci su potom stavljeni na 24 h u sušionik na temperaturu od $100^\circ C$, da bi ispitivanje bilo provedeno na potpuno suhim uzorcima, jer plinopropusnost u značajnoj mjeri ovisi o vlažnosti uzorka Slika 15).



Slika 14 Valjci u vlažnoj komori i ispljeni valjci (svaki u 3 uzorka)



Slika 15 Sušenje uzorka u sušioniku

Nakon vađenja iz sušionika, prije nego što su ispitani, uzorci su 2 sata hlađeni na sobnoj temperaturi. Tako ohlađenim uzorcima je, po potrebi, izbrušen plašt od eventualnih neravnina od kalupa, kako bi brtveni prsten što bolje nalijegao i kako bi se spriječilo propuštanje plina u čeliji oko uzorka. Uzorci su potom izvagani i izmjereni te podvrgnuti ispitivanju.



Mjerena je, za dani tlak, brzina putovanja mjeđura sapunice u kapilari kroz proizvoljni mjerni volumen. Za dani tlak i odabran volumen izvršena su tri mjerena brzine prolaska, a u daljnji proračun se uzima srednja vrijednost triju uzastopnih mjerena koja se ne razlikuju za više od 0,5 s.

Dakle, za jednu mješavinu su ispitana tri uzorka, svaki na tri različita tlaka, a za svaki tlak su izvršena tri mjerena.

Izračun koeficijenta plinopropusnosti je određen prema:

$$K_t = \frac{2 \cdot Q_t \cdot p_a \cdot L \cdot \eta}{A \cdot (p^2 - p_a^2)}$$

gdje je:

K_t – koeficijent plinopropusnosti [m^2]

Q_t – protok odabranog volumena u kapilari u vremenu, prema:

$$Q_t = \frac{V_t}{t_t}$$

V_t – odabrani ispitani volumen [m^3]

t_t – brzina prolaska mjeđura sapunice kroz odabran volumen [s]

p_a – apsolutni iznos tlaka na vrhu uzorka, atmosferski tlak – 101 325 [Pa]

L – visina uzorka, tj. duljina puta plina kroz uzorak [m]

η – dinamički koeficijent viskoznosti dušika, ovisi o temperaturi [Pa·s]

A – površina uzorka izložena plinu [m^2]

p – apsolutni iznos tlaka na dnu uzorka, jednak zbroju nanešenog i atmosferskog tlaka [Pa].



6. Denominacija mješavina cementog morta

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

Opis kratica mješavine:

M₅-A*

- M – mješavina
- 5 – indeks označava udio pepela [%] kao zamjene za cement (₀ – 0 %, ₅ – 5 %, ₁₀ – 10 %, ₂₀ – 20 %, ₃₀ – 30 %)
- A – 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:

M₅-A*, mješavina s udjelom pepela 5 %, dobivenog spaljivanjem mulja na 900 °C i vodovezivnog omjera 0,45.

M₂₀-B**, mješavina s udjelom pepela 20 %, dobivenog spaljivanjem mulja na 1000 °C i vodovezivnog omjera 0,50.

M₃₀-C, mješavina s udjelom pepela 30 %, dobivenog spaljivanjem mulja na 800 °C i vodovezivnog omjera 0,55.

M₀-C, mješavina s udjelom pepela 0 % (referentna) i vodovezivnog omjera 0,55 (nema temperature spaljivanja jer se u referentnoj mješavini nije koristio pepeo).

Dodatao je, pri usporedbama rezultata dobivenih s pepelom s različitih uređaja, ispred oznake mješavine, dodana i kratica grada s čijeg UPOV potječe korišteni pepeo, odnosno mulj (Karlovac - KA, Koprivnica - KC i Zagreb - ZG).

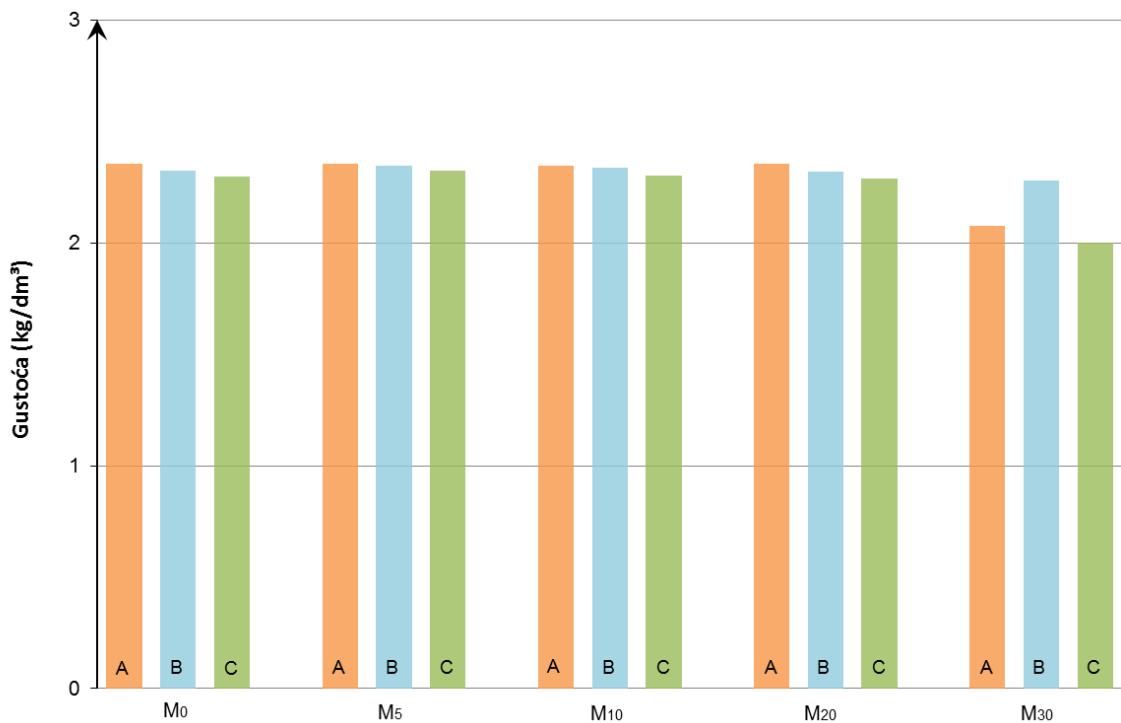
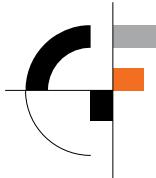


7. Rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac

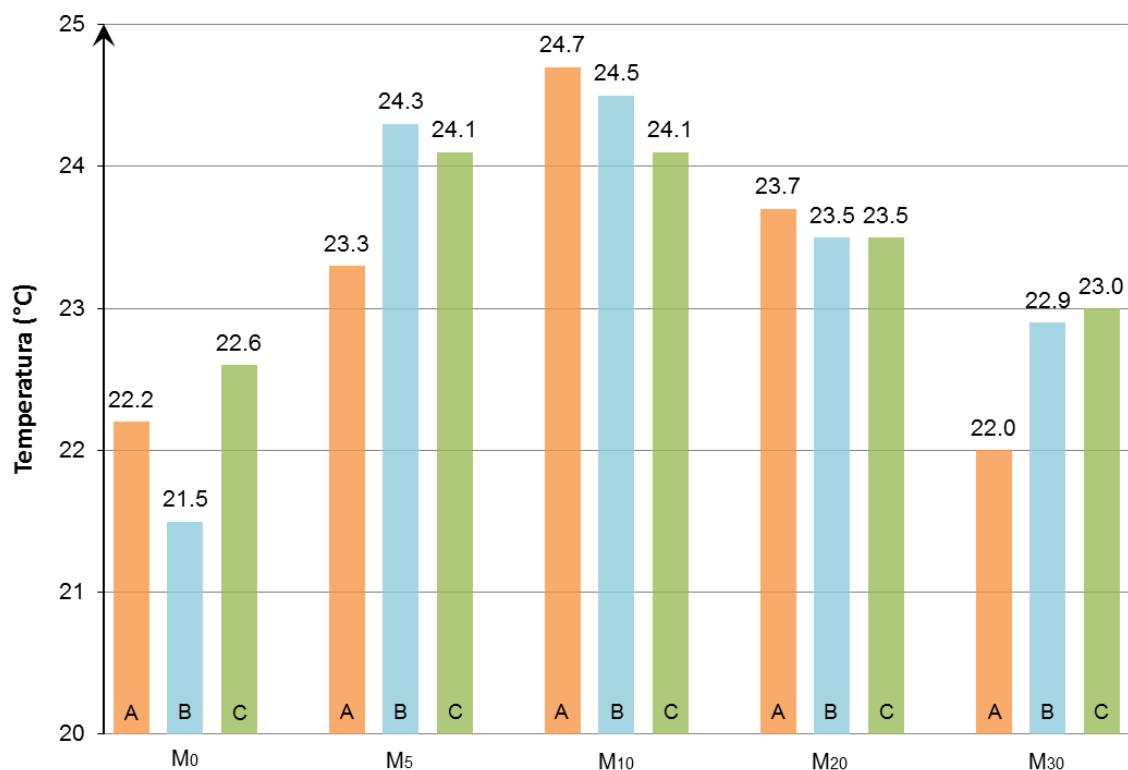
7.1 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju

Tablica 2 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac na 800°C (i na referentnim mješavinama)

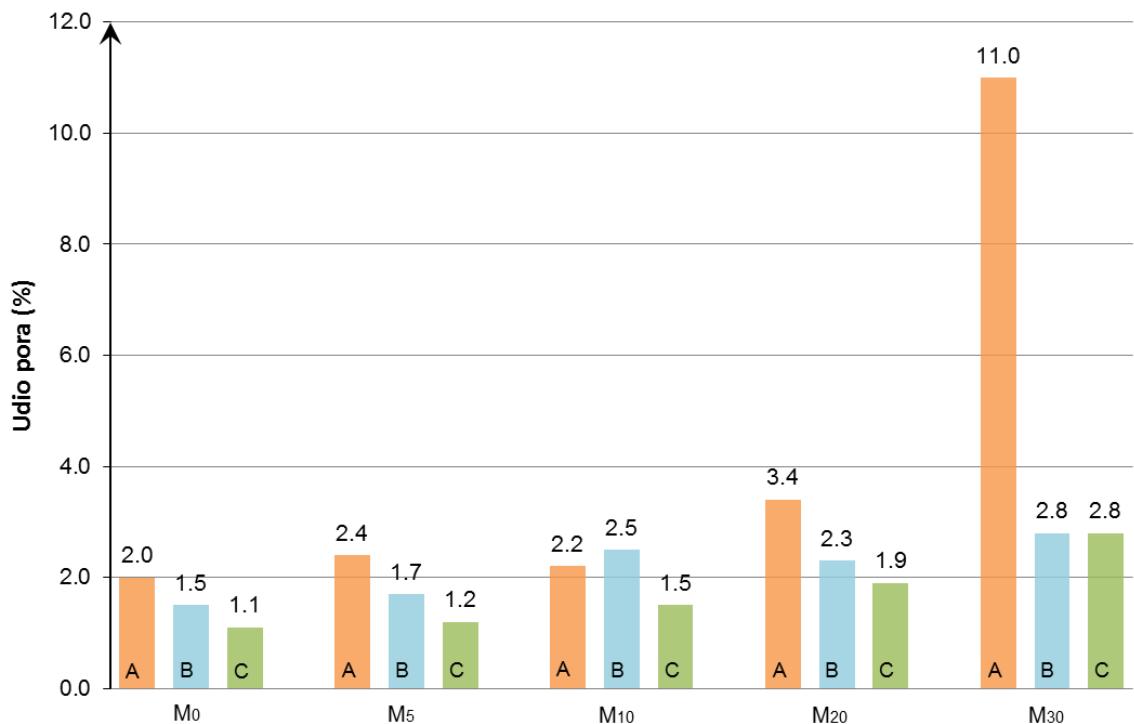
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -A	2,354	22,2	2,0	40	85	113,5
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
M ₀ -C	2,295	22,6	1,1	105	160	189,8
M ₅ -A	2,354	23,3	2,4	30	55	109,0
M ₅ -B	2,346	24,3	1,7	65	140	143,0
M ₅ -C	2,324	24,1	1,2	150	180	187,5
M ₁₀ -A	2,344	24,7	2,2	15	40	100,0
M ₁₀ -B	2,338	24,5	2,5	60	120	132,0
M ₁₀ -C	2,300	24,1	1,5	90	150	168,5
M ₂₀ -A	2,355	23,7	3,4	10	80	100,0
M ₂₀ -B	2,320	23,5	2,3	30	105	122,0
M ₂₀ -C	2,289	23,5	1,9	75	180	155,5
M ₃₀ -A	2,077	22,0	11,0	5	20	100,0
M ₃₀ -B	2,278	22,9	2,8	15	65	100,0
M ₃₀ -C	2,000	23,0	2,8	60	95	113,5



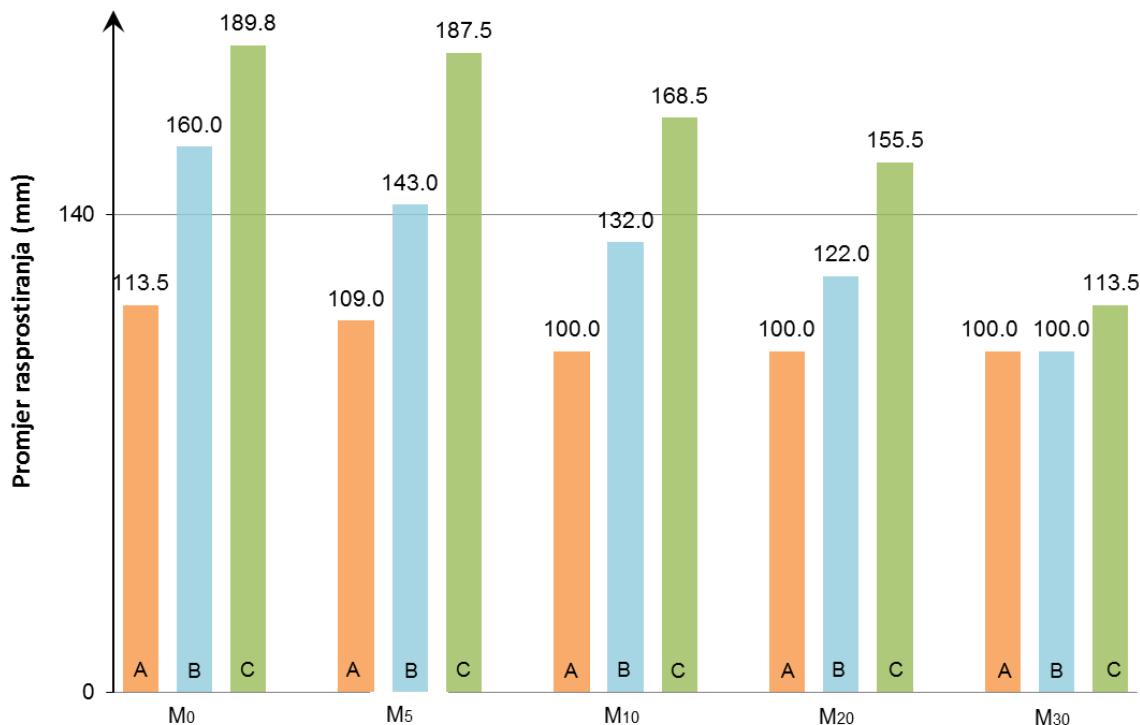
Slika 16 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800°C



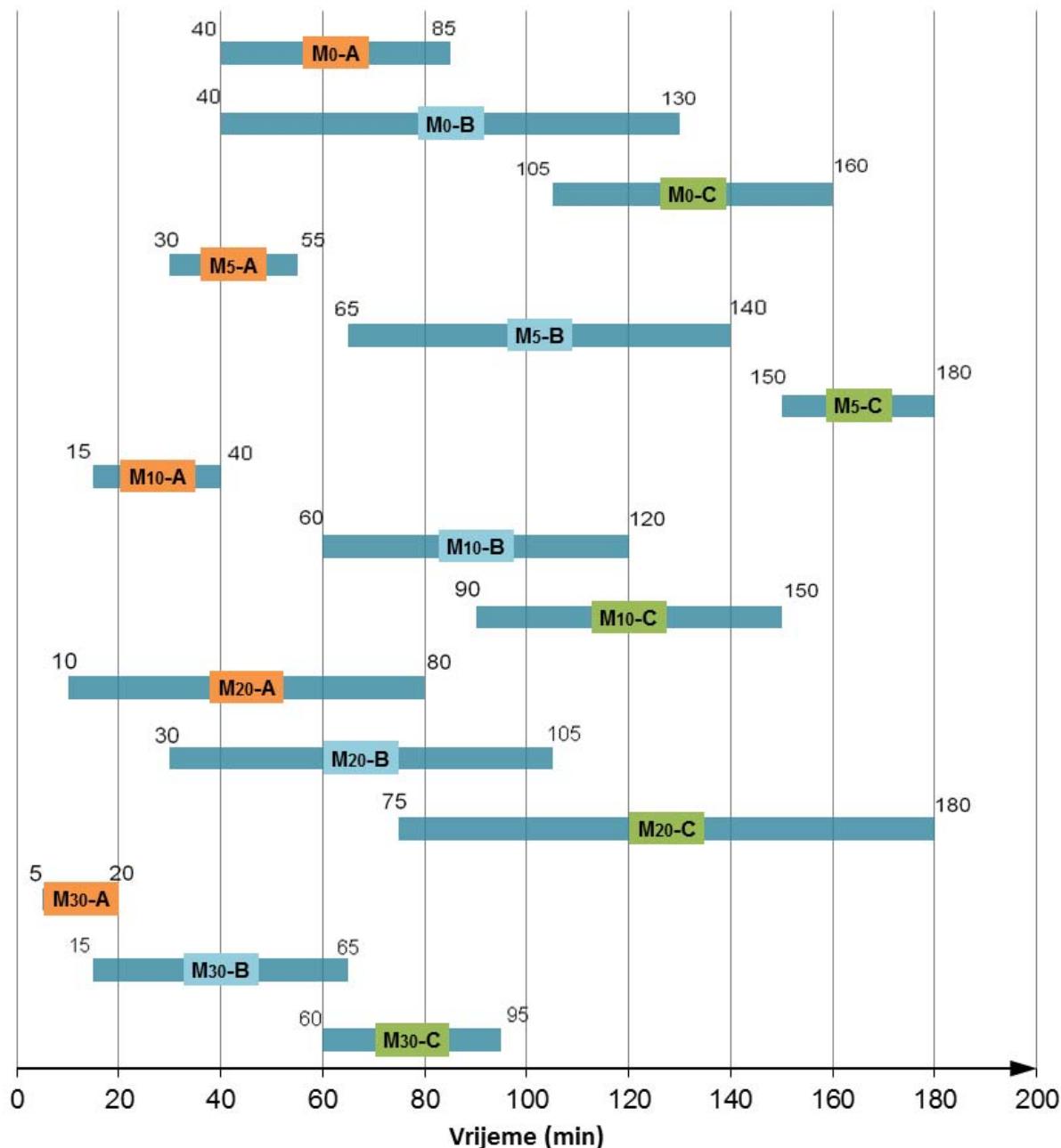
Slika 17 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800°C



Slika 18 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800°C



Slika 19 Konzistencija (promjer raspršivanja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800°C

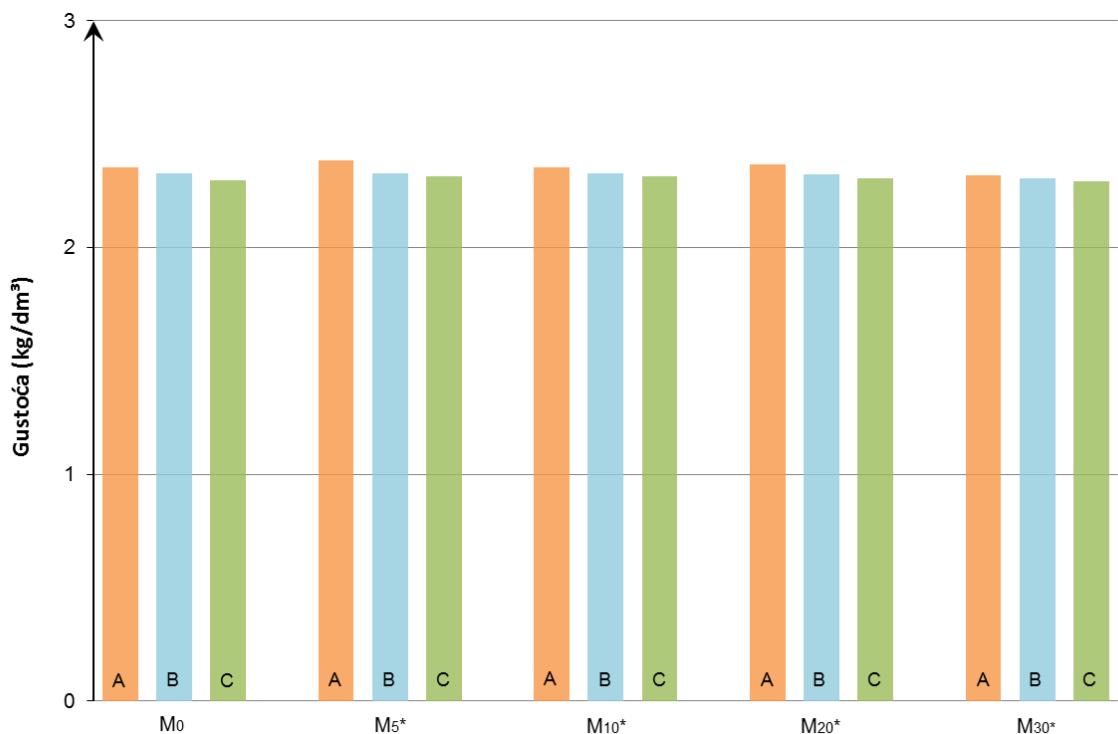


Slika 20 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800°C

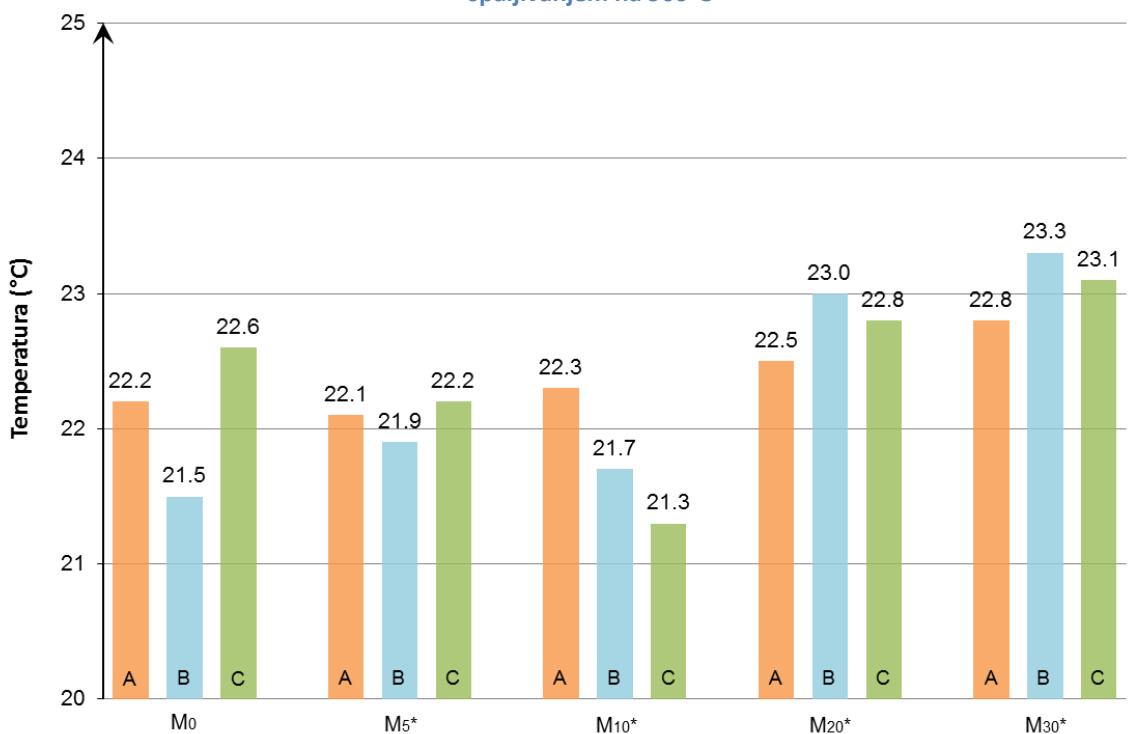


Tablica 3 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac na 900°C (i na referentnim mješavinama)

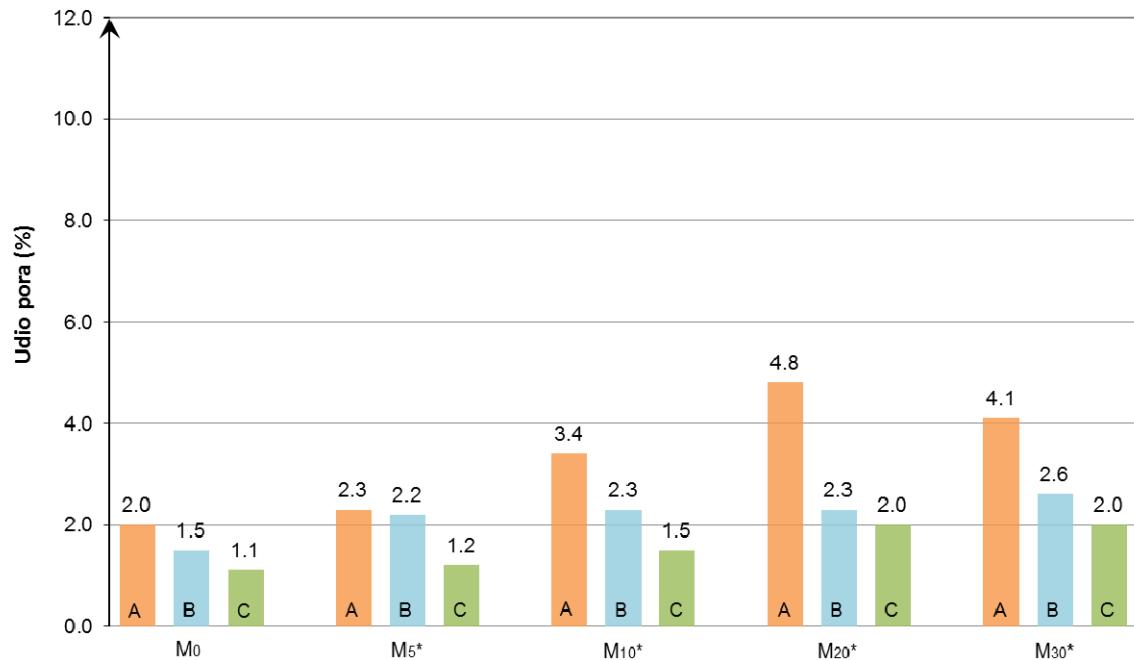
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -A	2,354	22,2	2,0	40	85	113,5
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
M ₀ -C	2,295	22,6	1,1	105	160	189,8
M ₅ -A*	2,384	22,1	2,3	20	105	115,0
M ₅ -B*	2,329	21,9	2,2	60	130	145,0
M ₅ -C*	2,313	22,2	1,2	110	175	191,5
M ₁₀ -A*	2,352	22,3	3,4	30	50	104,0
M ₁₀ -B*	2,325	21,7	2,3	65	135	140,5
M ₁₀ -C*	2,315	21,3	1,5	115	185	172,5
M ₂₀ -A*	2,365	22,5	4,8	10	90	100,0
M ₂₀ -B*	2,323	23,0	2,3	40	105	120,0
M ₂₀ -C*	2,304	22,8	2,0	105	150	162,0
M ₃₀ -A*	2,320	22,8	4,1	10	100	100,0
M ₃₀ -B*	2,306	23,3	2,6	10	100	100,0
M ₃₀ -C*	2,292	23,1	2,0	50	150	139,0



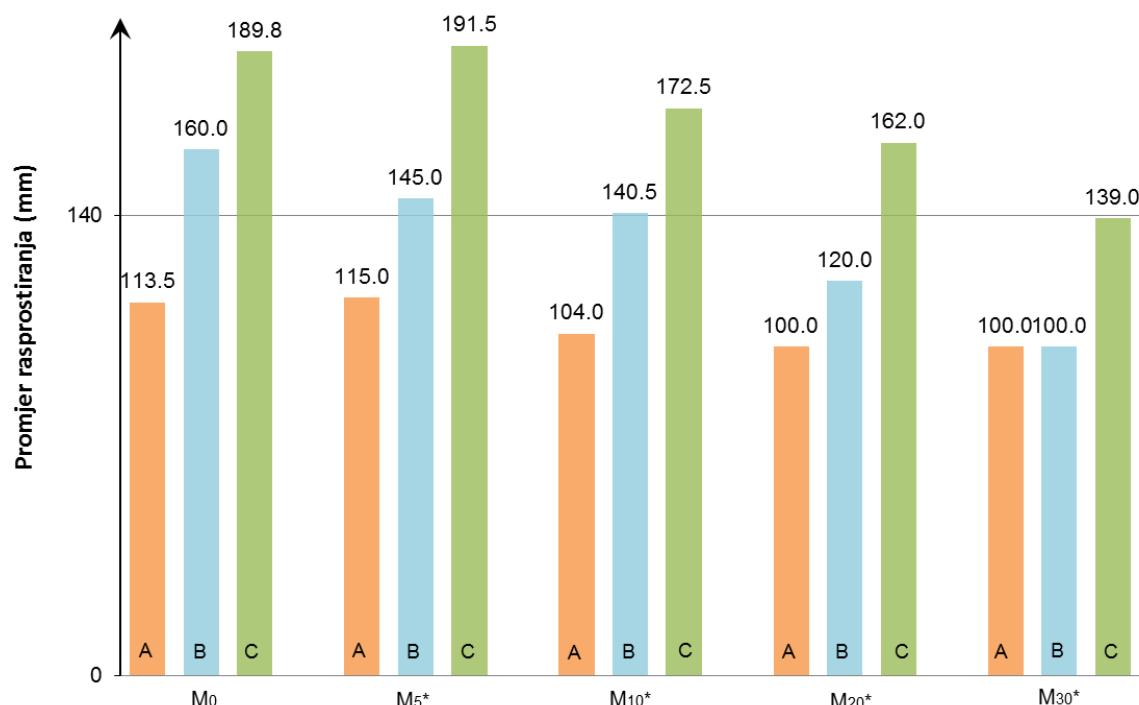
Slika 21 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 900°C



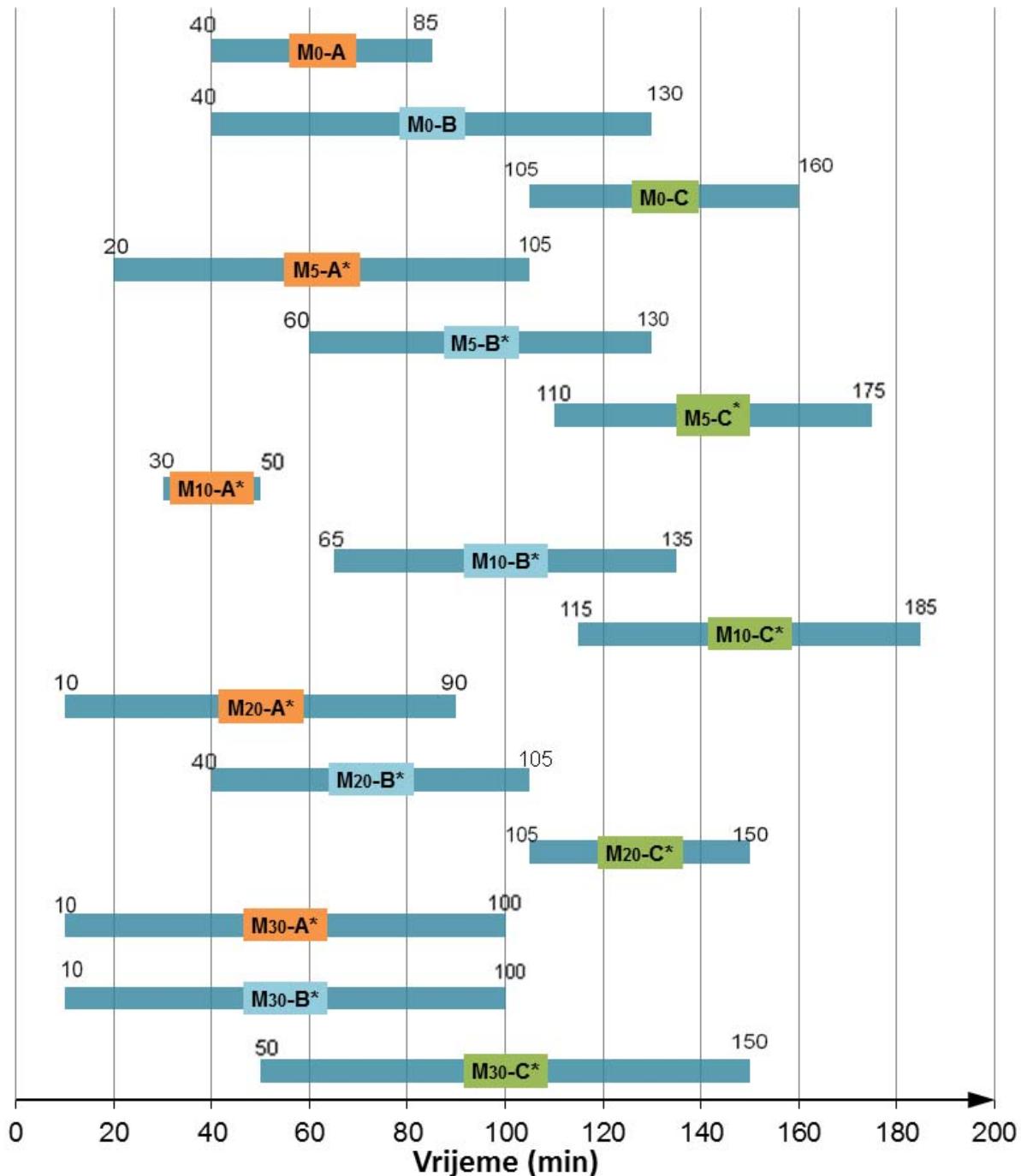
Slika 22 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 900°C



Slika 23 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 900°C



Slika 24 Konzistencija (promjer rasprstiranja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 900°C

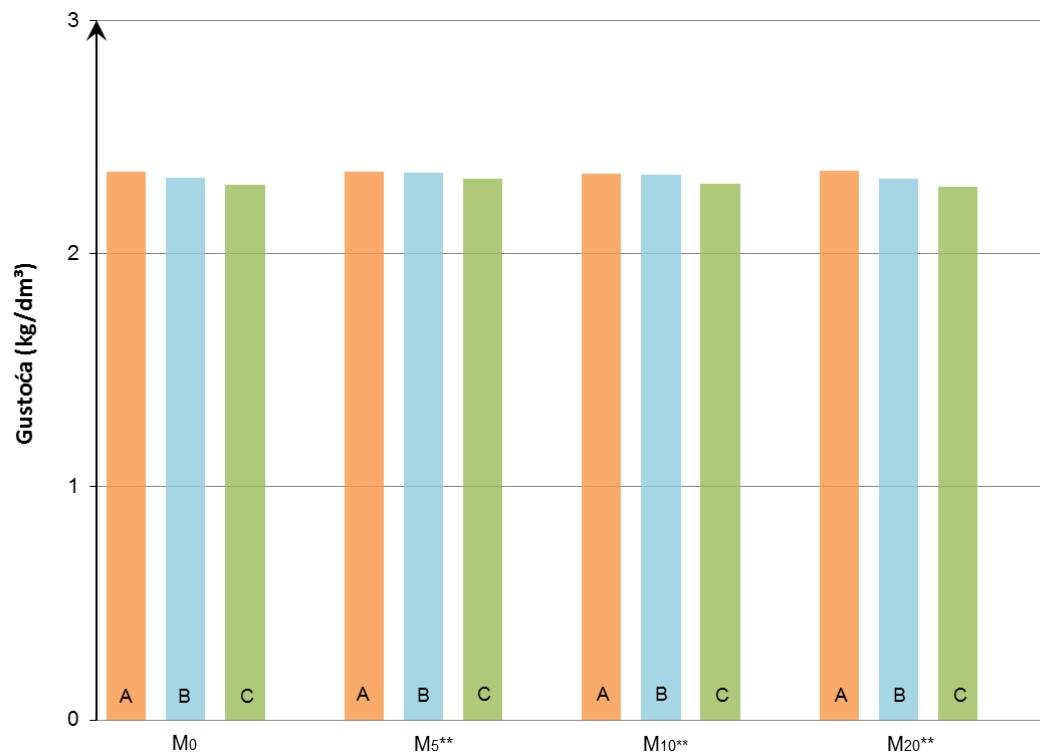


Slika 25 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 900°C

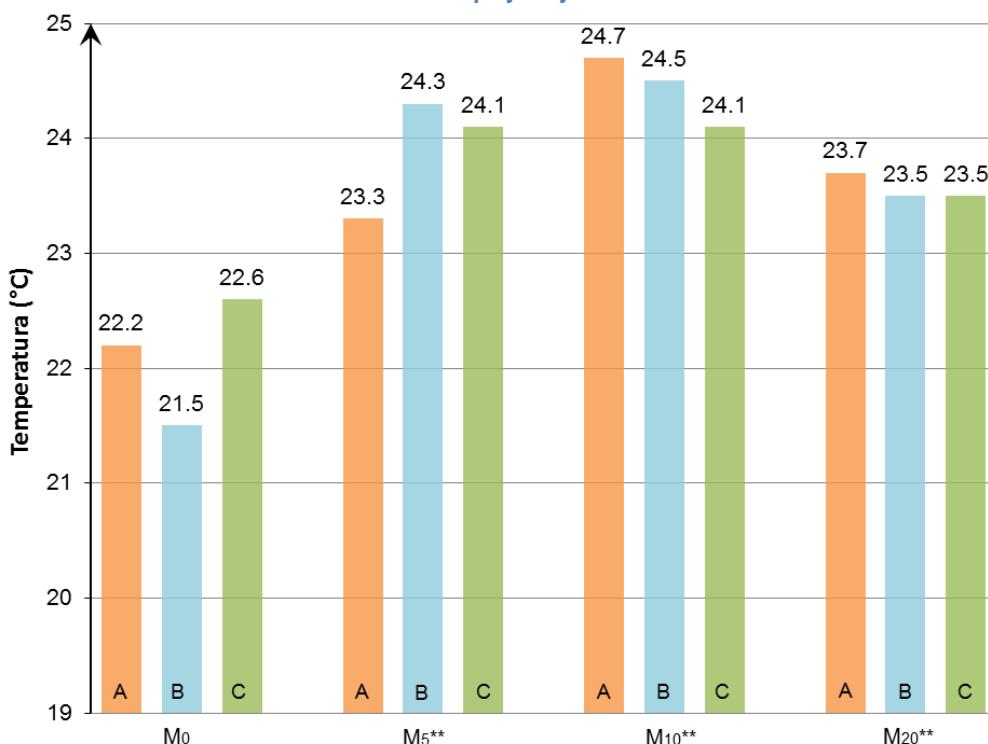


Tablica 4 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac na 1000°C (i na referentnim mješavinama)

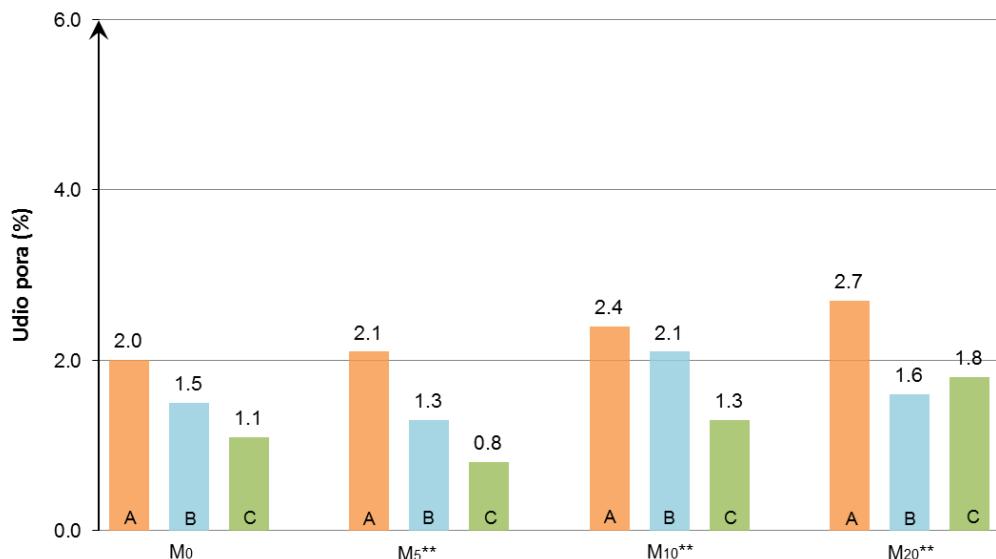
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -A	2,354	22,2	2,0	40	85	113,5
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
M ₀ -C	2,295	22,6	1,1	105	160	189,8
M ₅ -A**	2,354	23,3	2,1	50	90	129,0
M ₅ -B**	2,346	24,3	1,3	100	145	163,0
M ₅ -C**	2,324	24,1	0,8	135	150	189,0
M ₁₀ -A**	2,344	24,7	2,4	20	80	120,0
M ₁₀ -B**	2,338	24,5	2,1	90	165	157,0
M ₁₀ -C**	2,300	24,1	1,3	140	175	187,0
M ₂₀ -A**	2,355	23,7	2,7	15	75	107,0
M ₂₀ -B**	2,320	23,5	1,6	70	145	136,5
M ₂₀ -C**	2,289	23,5	1,8	110	160	167,0



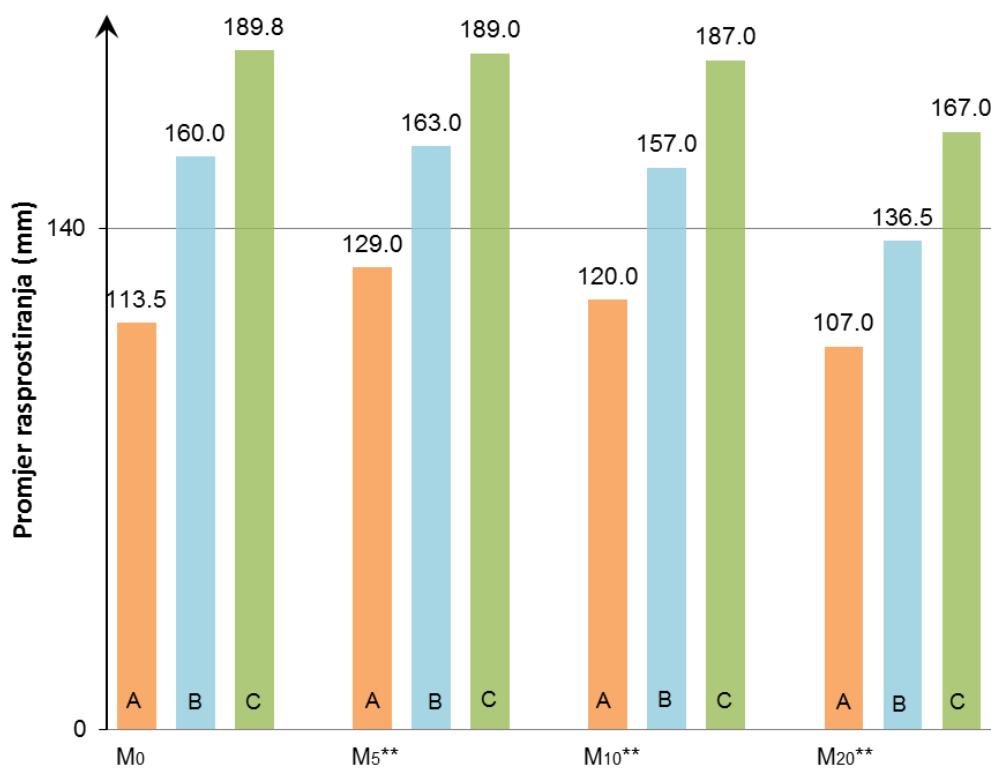
Slika 26 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 1000°C



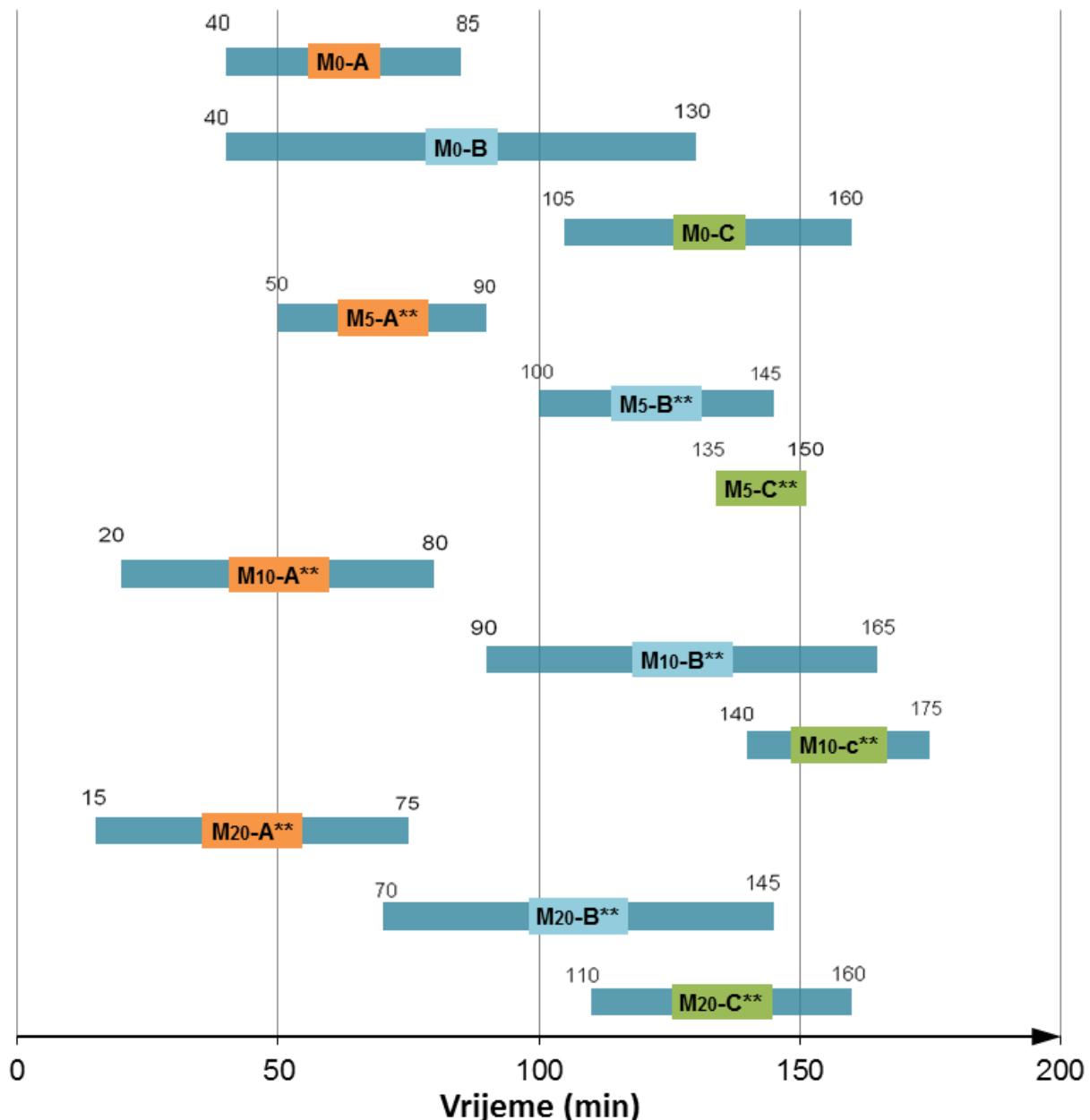
Slika 27 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 1000°C



Slika 28 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 1000°C



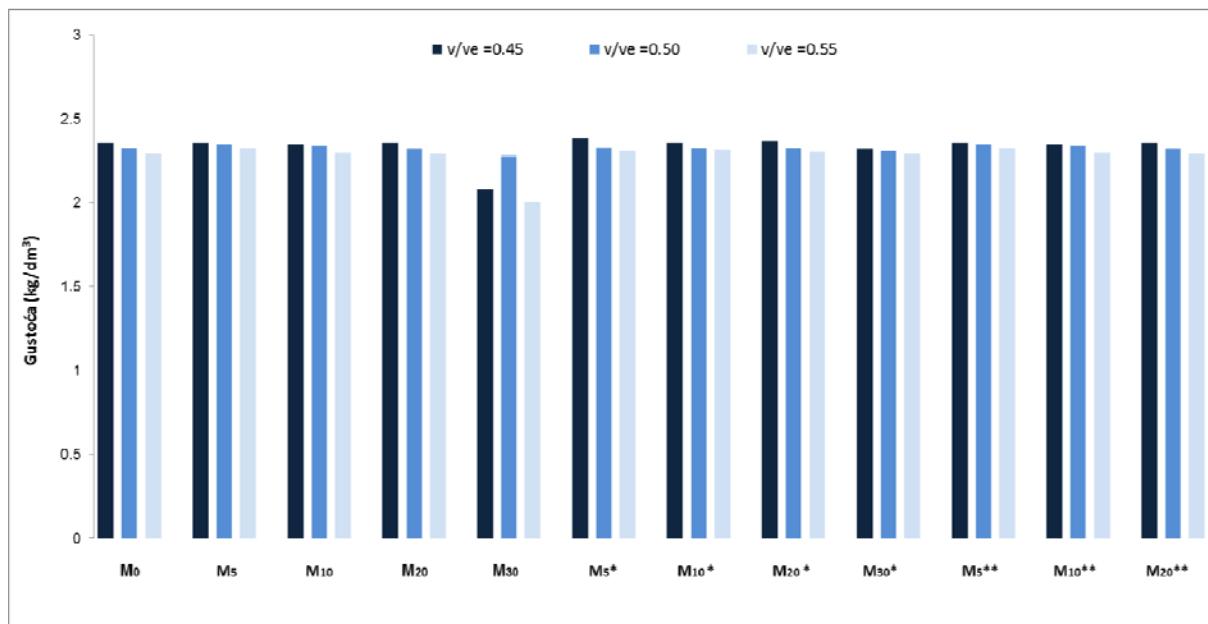
Slika 29 Konzistencija (promjer rasprostiranja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 1000°C



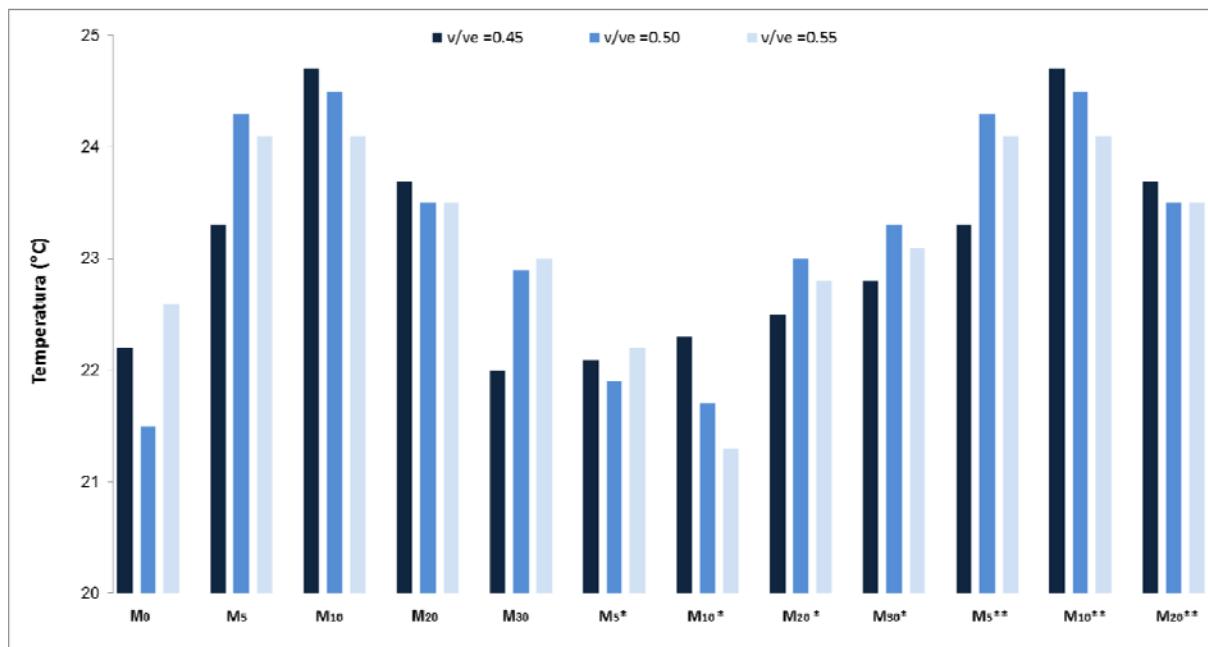
Slika 30 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 1000°C



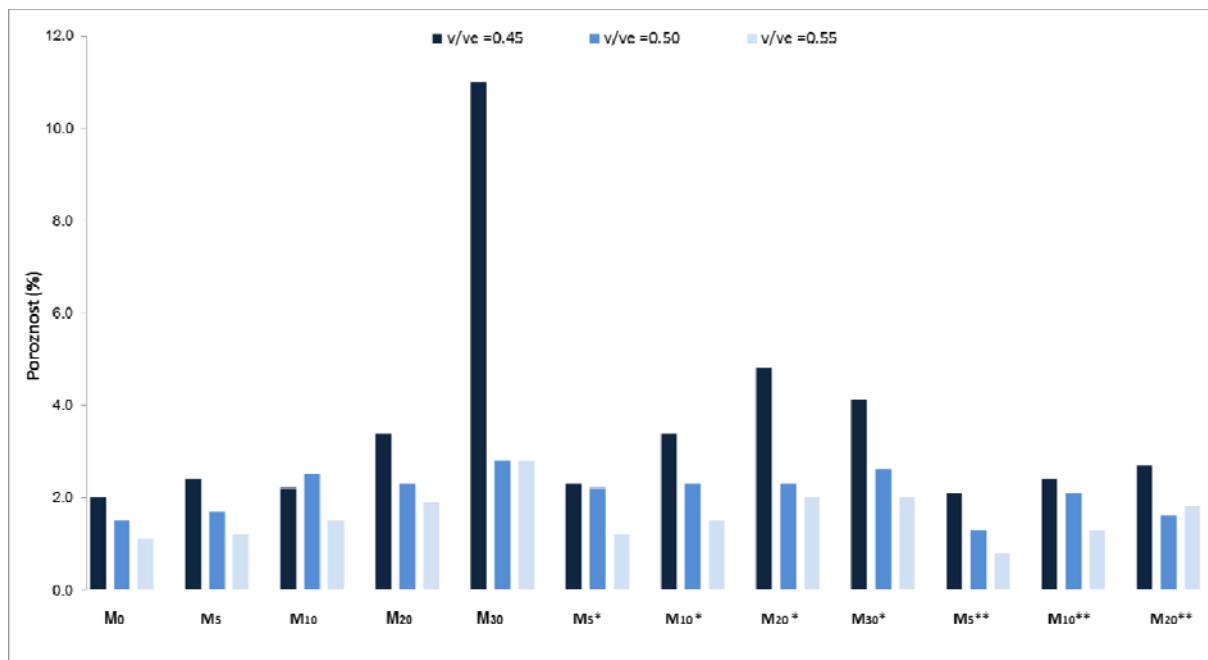
7.2 Analiza rezultata ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju



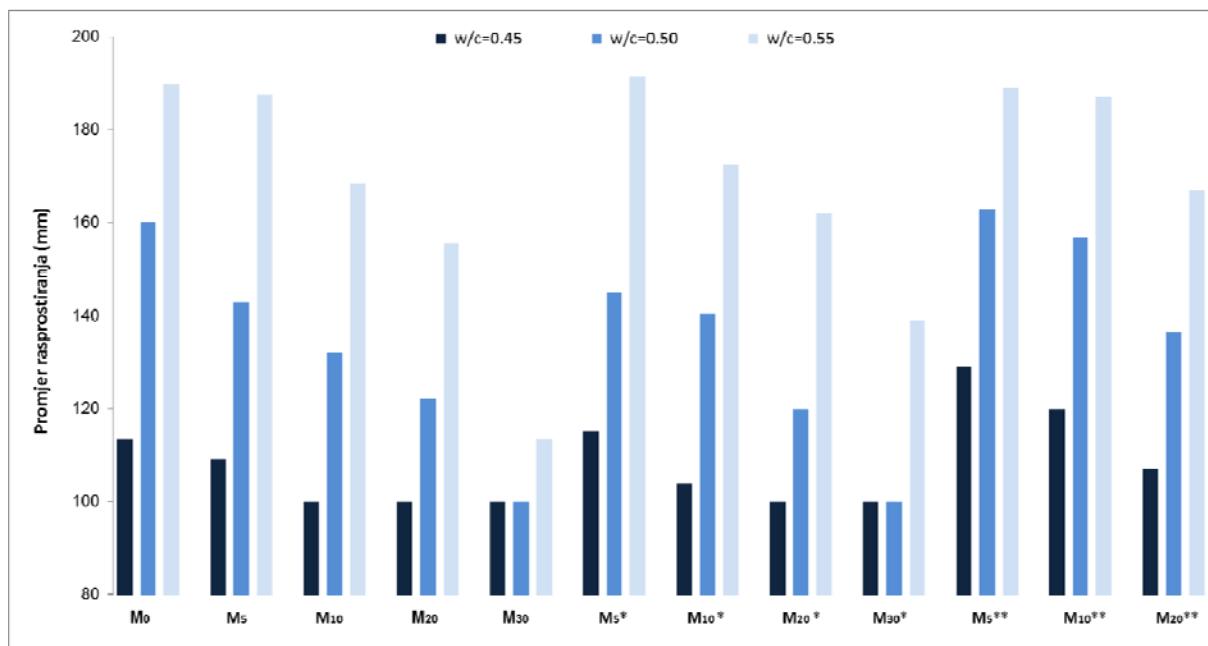
Slika 31 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbrini rezultati



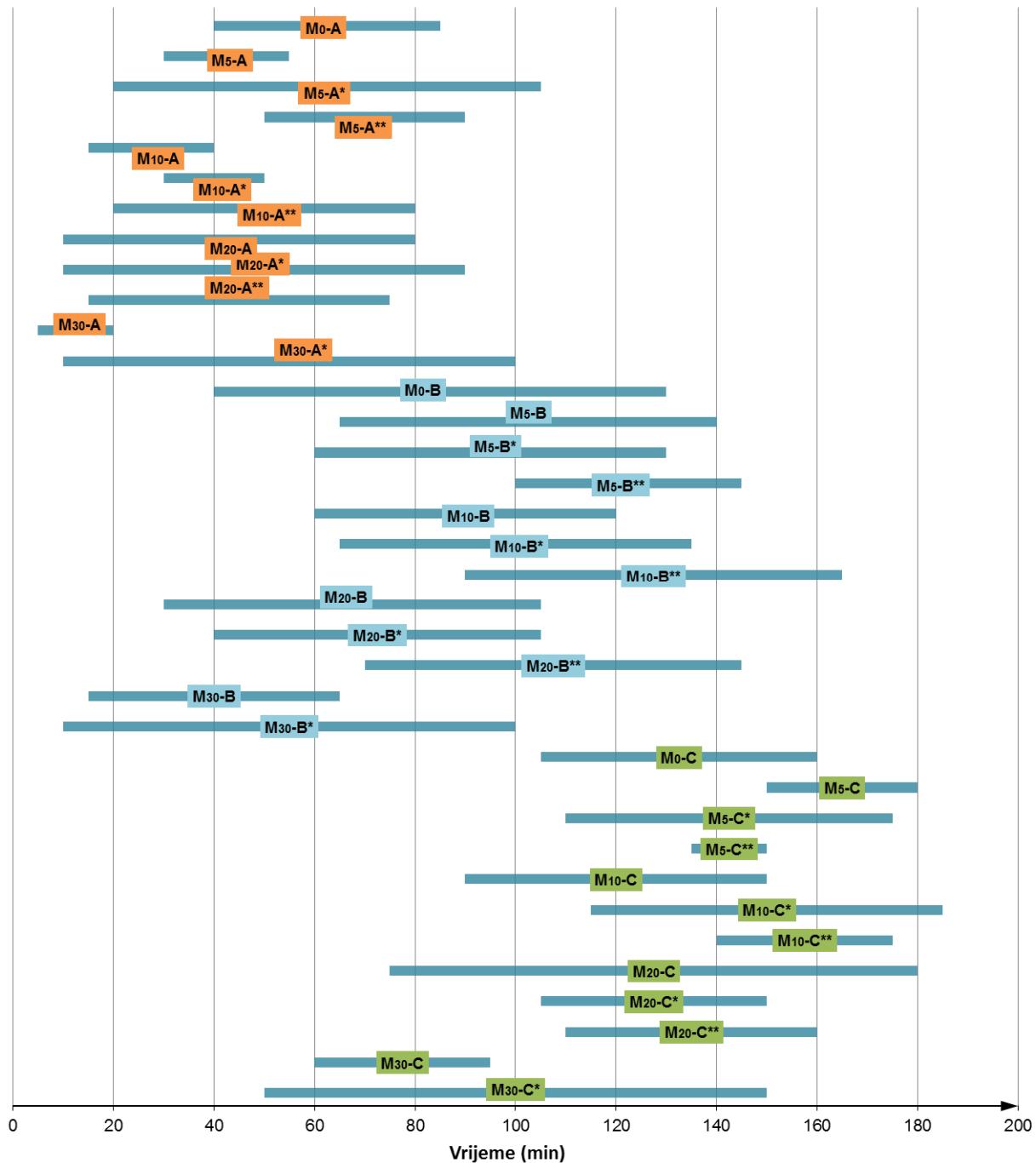
Slika 32 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 33 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 34 Konzistencija (promjer rasprširanja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 35 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) – zbirni rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C



Analizom dobivenih vrijednosti gustoća cementnog morta (u svježem stanju) s dodatkom pepela dobivene su minimalne razlike s obzirom na udio dodanog pepela i primijenjenu temperaturu spaljivanja mulja. Najniže vrijednosti gustoće morta u svježem stanju dobivene su za mješavine s 30%-tним udjelima pepela, ali kako su sve ostale vrijednosti uglavnom podjednake i u rangu s onima referentnih mješavina, ne može se generalno zaključiti kako gustoća morta u svježem stanju opada s povećanjem udjela pepela.

U mješavinama s dodanim pepelom generalno su se razvile nešto veće temperature u odnosu na referentne mješavine (bez dodanog pepela). Također, može se primijetiti da su se u mješavinama s pepelom dobivenim spaljivanjem mulja na 900°C razvile najniže temperature, dok su se najviše temperature razvile u mješavinama s 10%-tnim udjelima pepela dobivenog na 800 i 1000°C.

Rezultati dobiveni na mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac potvrđuju generalni trend povećanja poroznosti s povećanjem udjela dodanog pepela. Također, zamjetan je trend smanjenja poroznosti s povećanjem temperature spaljivanja mulja. Potrebno je istaknuti i određene nedosljednosti i odstupanja u dobivenim rezultatima za mješavine s većim udjelom pepela i manjim vodovezivnim omjerima (što se posebice odnosi na mješavinu M₃₀-A) što je uzrokovano prije svega smanjenom obradljivosti i otežanom ugradnjom.

Također, potvrđeni su i povećani zahtjevi za vodom te smanjena obradljivost mortova s povećanjem udjela dodanog pepela. S povećanjem temperature spaljivanja mulja zamjetno je blago povećanje obradljivosti, odnosno najbolji rezultati po pitanju obradljivosti dobiveni su za mješavine s pepelom dobivenim spaljivanjem mulja na 1000°C. Ovdje je potrebno posebno istaknuti probleme vezane uz izrazito smanjenu obradljivost i otežanu ugradnju za mješavine s 30%-tnim udjelima pepela, a posebice uz najmanji primjenjeni vodovezivni omjer (0,45), odnosno za mješavine M₃₀-A, M₃₀-A* i M₃₀-A**.

Analizirajući prikazane rezultate može se uočiti generalni trend odgode početnog i krajnjeg vremena vezivanja s povećanjem vodovezivnog omjera, ali također i s povećanjem temperature spaljivanja mulja. Najduža vremena vezivanja dobivena su za mješavine s 10 i 20%-tnim udjelima pepela.

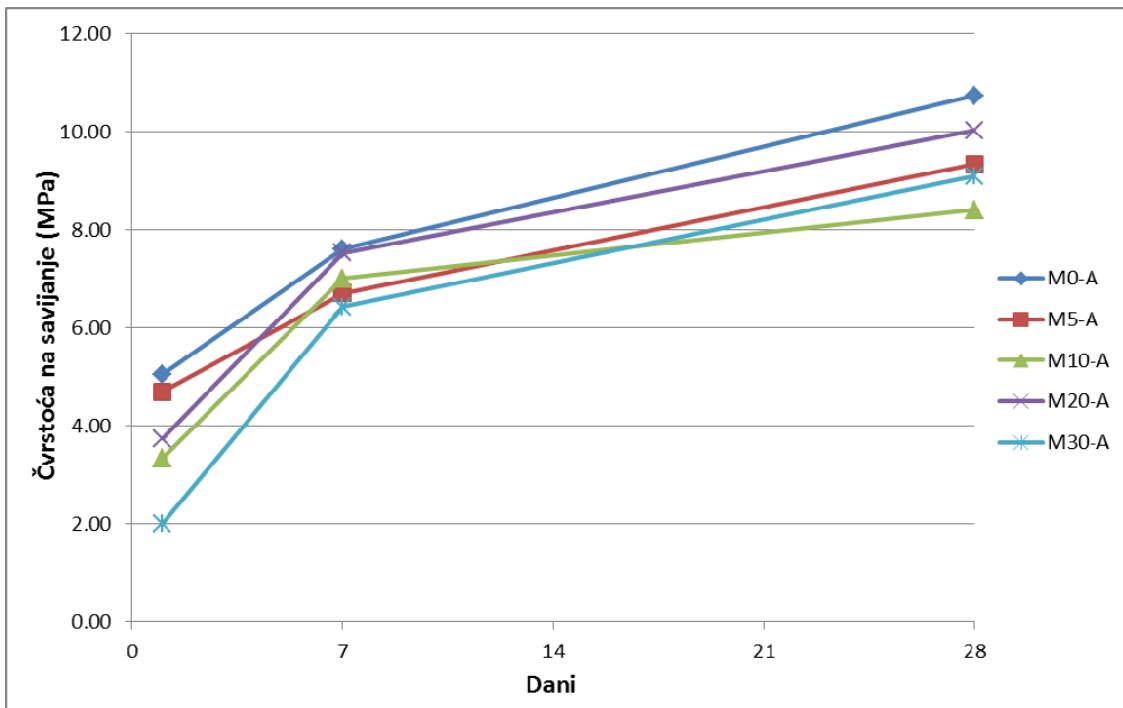


7.3 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u očvrsnulom stanju

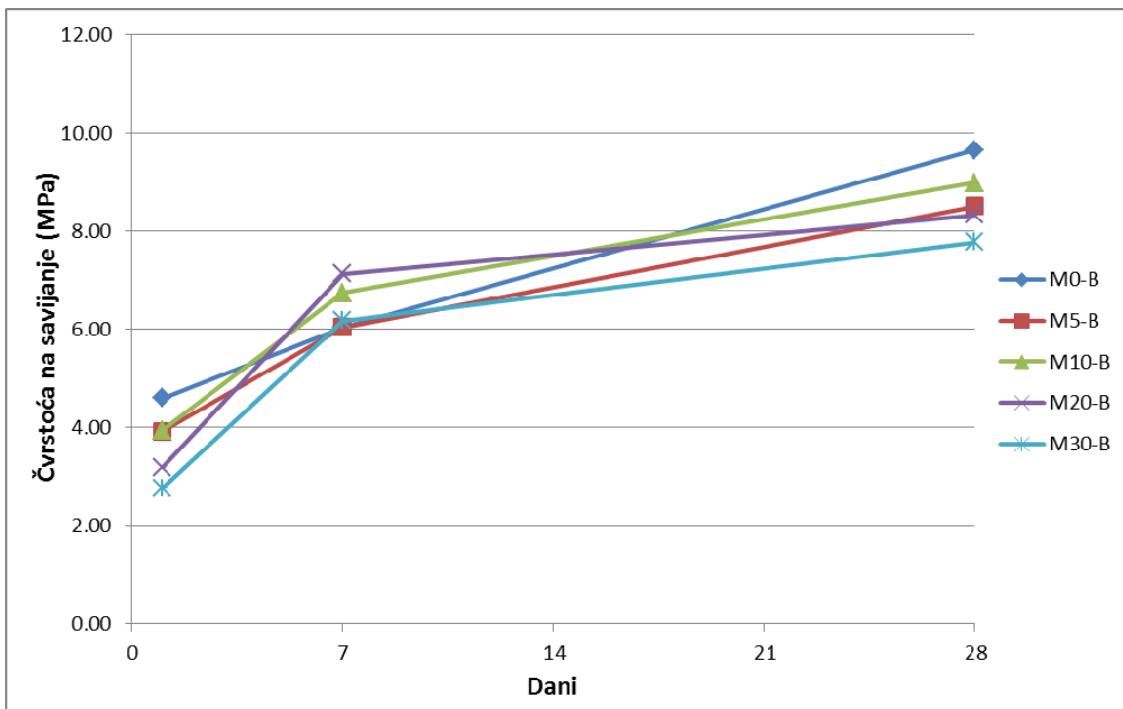
7.3.1 Mehaničke karakteristike

Tablica 5 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac na 800°C (i na referentnim mješavinama)

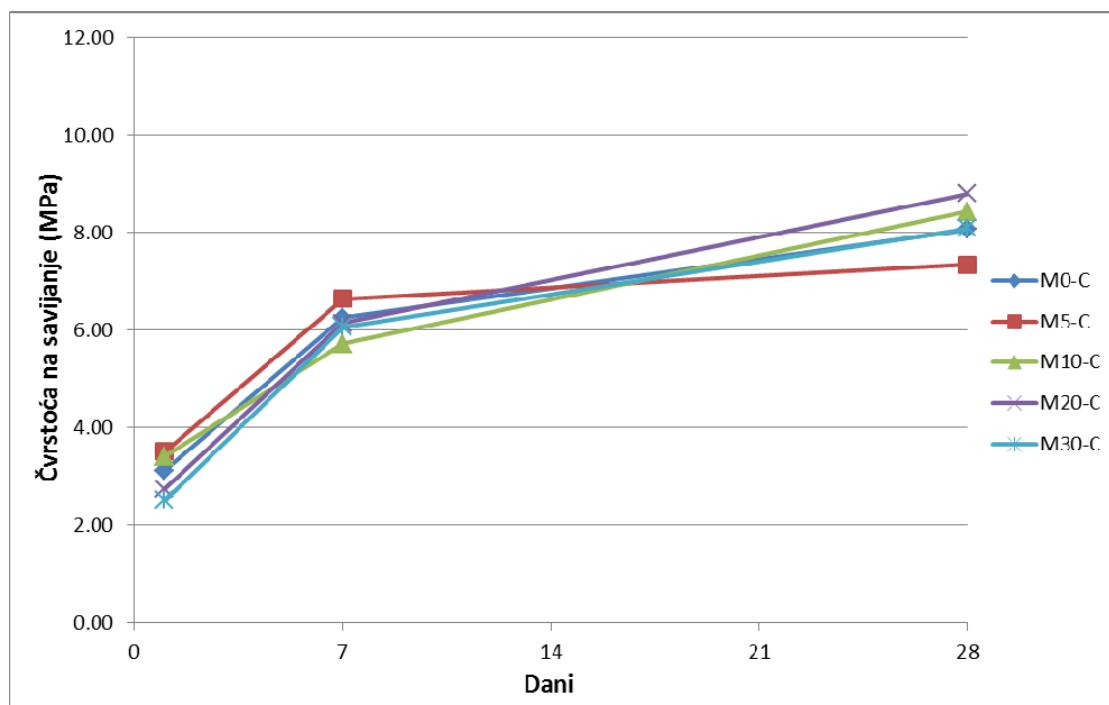
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -A	5,06	7,61	10,74	30,84	65,71	76,66
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
M ₀ -C	3,12	6,26	8,07	17,10	47,67	60,94
M ₅ -A	4,70	6,71	9,35	31,86	58,95	83,08
M ₅ -B	3,92	6,05	8,51	26,49	50,63	71,98
M ₅ -C	3,52	6,64	7,34	19,85	45,52	62,63
M ₁₀ -A	3,35	7,01	8,41	29,28	62,91	80,56
M ₁₀ -B	3,94	6,75	8,99	25,90	55,47	74,36
M ₁₀ -C	3,41	5,72	8,44	21,51	45,75	60,81
M ₂₀ -A	3,74	7,54	10,03	26,12	68,23	81,21
M ₂₀ -B	3,19	7,14	8,34	21,09	57,68	74,26
M ₂₀ -C	2,74	6,15	8,80	15,39	49,69	64,53
M ₃₀ -A	2,01	6,43	9,10	11,24	47,24	72,19
M ₃₀ -B	2,77	6,18	7,78	18,71	43,05	60,91
M ₃₀ -C	2,52	6,07	8,09	13,75	41,67	56,70



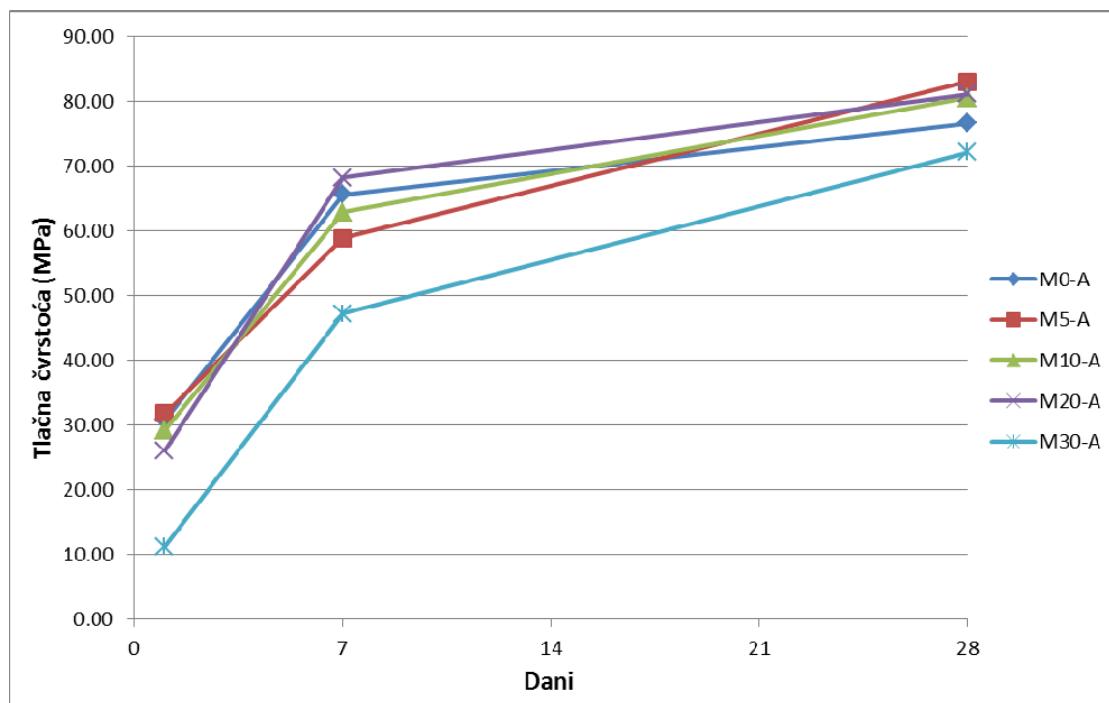
Slika 36 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,45$)



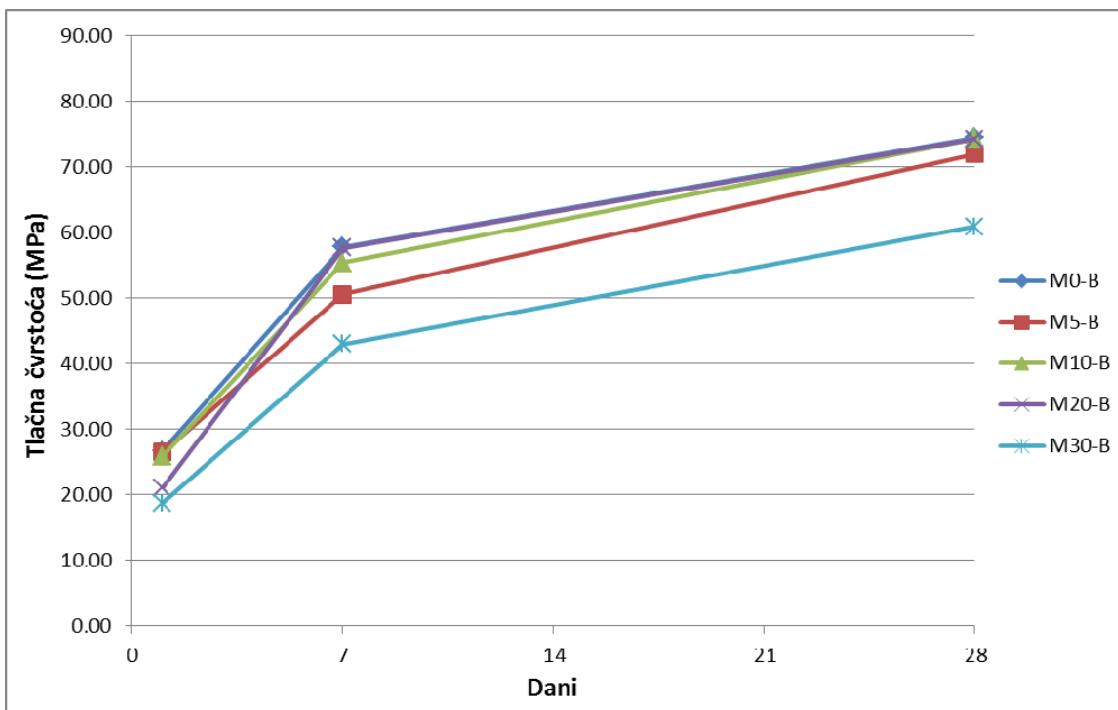
Slika 37 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,50$)



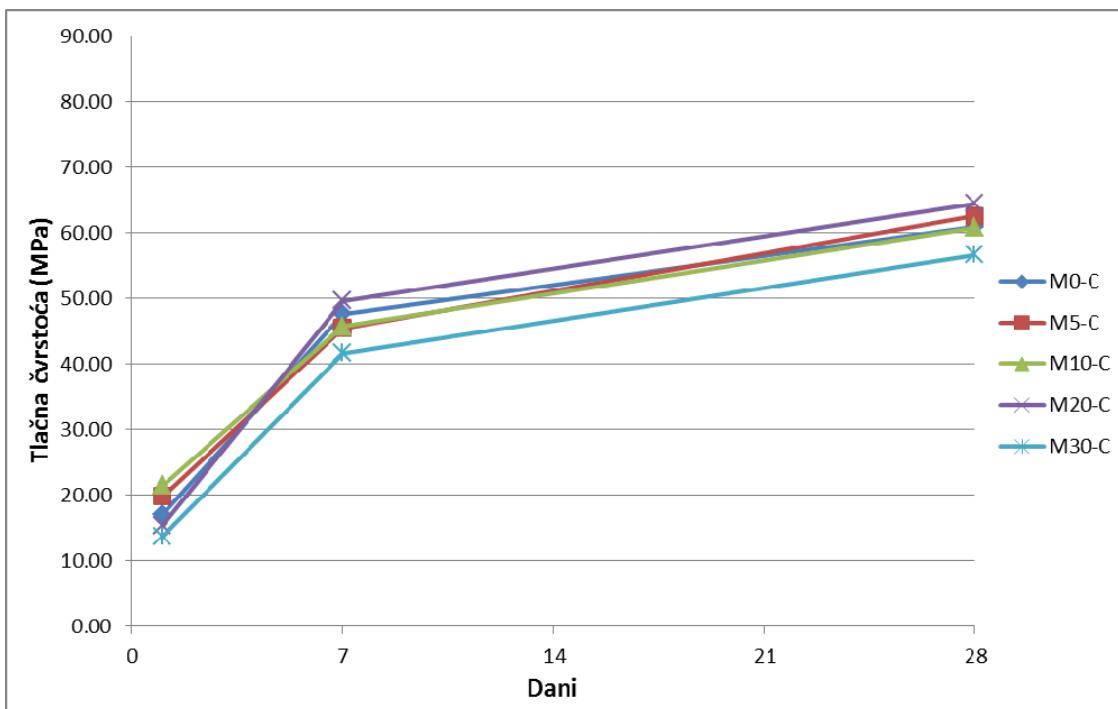
Slika 38 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,55$)



Slika 39 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,45$)



Slika 40 Tlačna čvrstoća uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,50$)

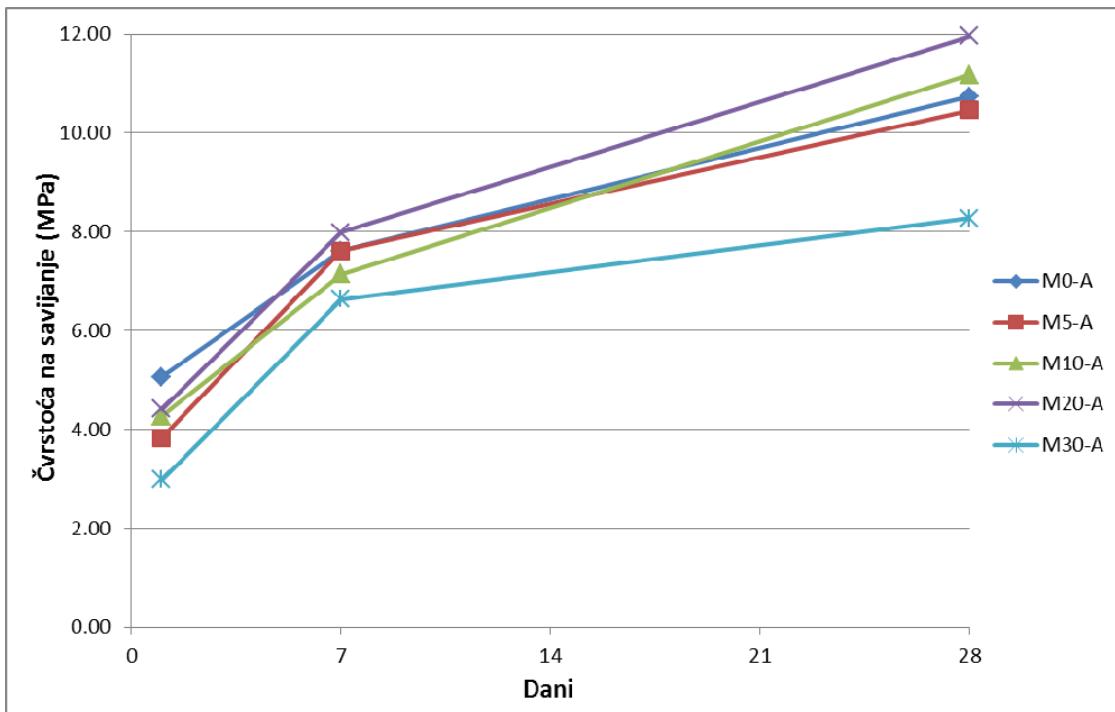


Slika 41 Tlačna čvrstoća uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,55$)

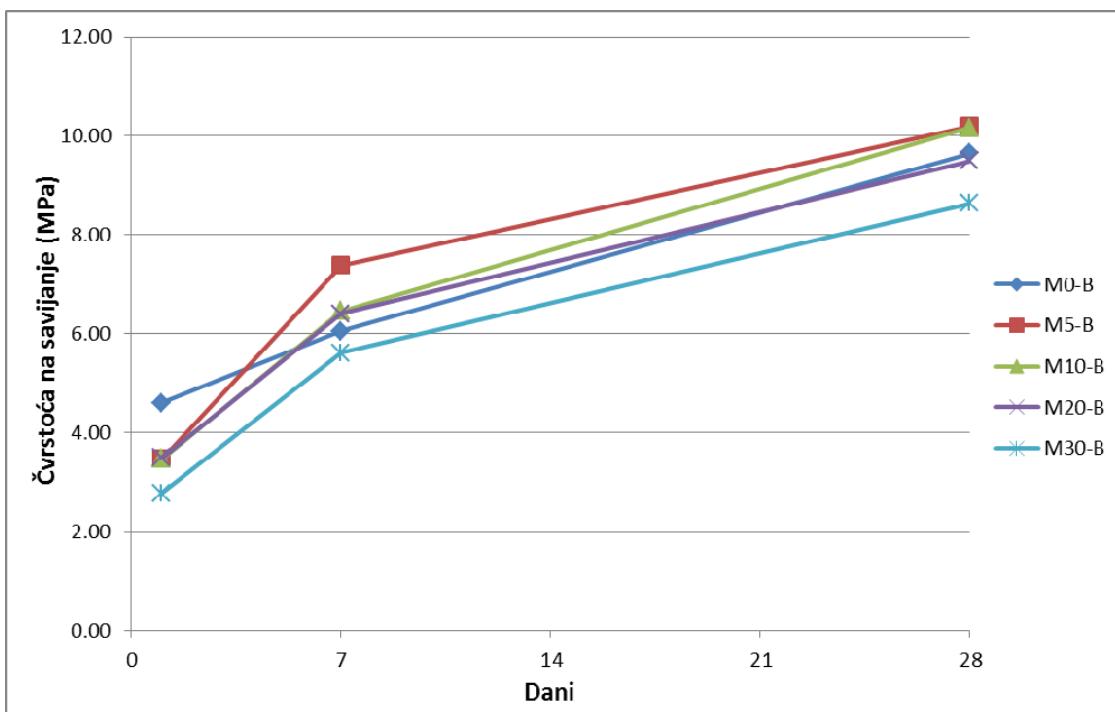


Tablica 6 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac na 900°C (i na referentnim mješavinama)

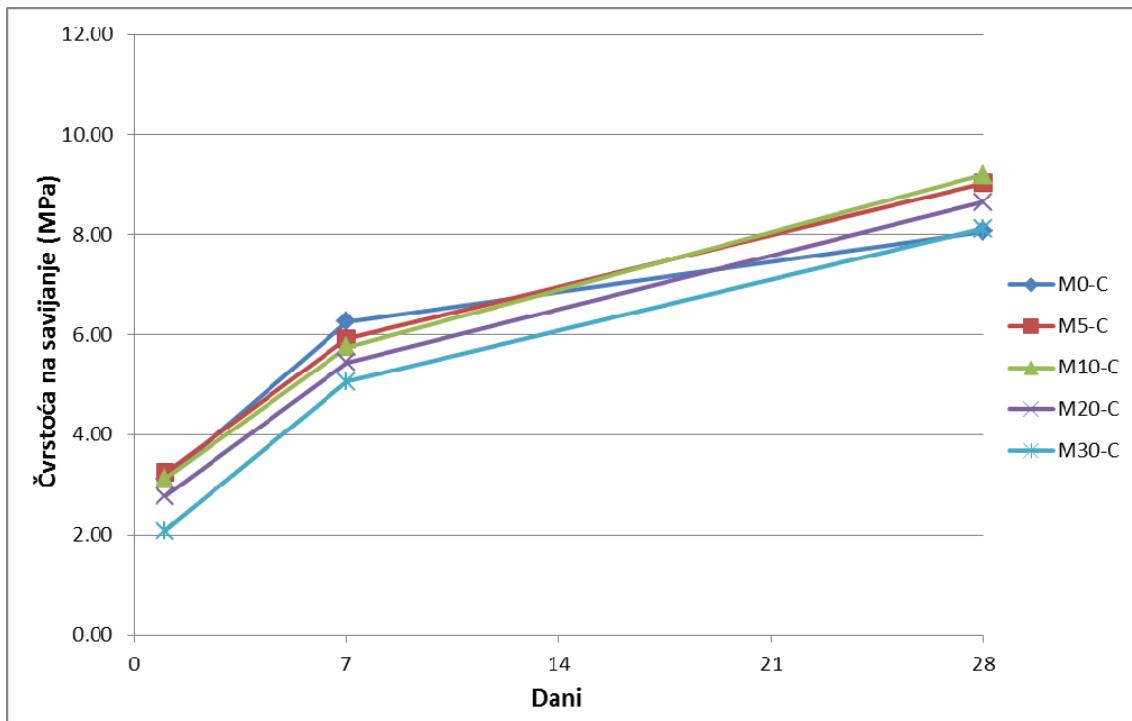
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -A	5,06	7,61	10,74	30,84	65,71	76,66
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
M ₀ -C	3,12	6,26	8,07	17,10	47,67	60,94
M ₅ -A*	3,83	7,62	10,47	28,68	68,52	92,49
M ₅ -B*	3,47	7,39	10,20	21,63	56,29	78,25
M ₅ -C*	3,25	5,92	9,04	17,79	48,60	65,10
M ₁₀ -A*	4,27	7,14	11,18	27,79	58,36	79,35
M ₁₀ -B*	3,46	6,45	10,17	22,65	48,88	68,27
M ₁₀ -C*	3,12	5,75	9,20	17,38	42,01	62,34
M ₂₀ -A*	4,41	7,99	11,96	30,93	66,45	85,26
M ₂₀ -B*	3,49	6,40	9,50	21,71	51,35	67,42
M ₂₀ -C*	2,77	5,44	8,65	15,80	41,86	61,36
M ₃₀ -A*	2,98	6,64	8,28	22,13	55,04	69,08
M ₃₀ -B*	2,78	5,62	8,64	18,63	47,37	62,86
M ₃₀ -C*	2,09	5,07	8,12	13,35	39,56	57,01



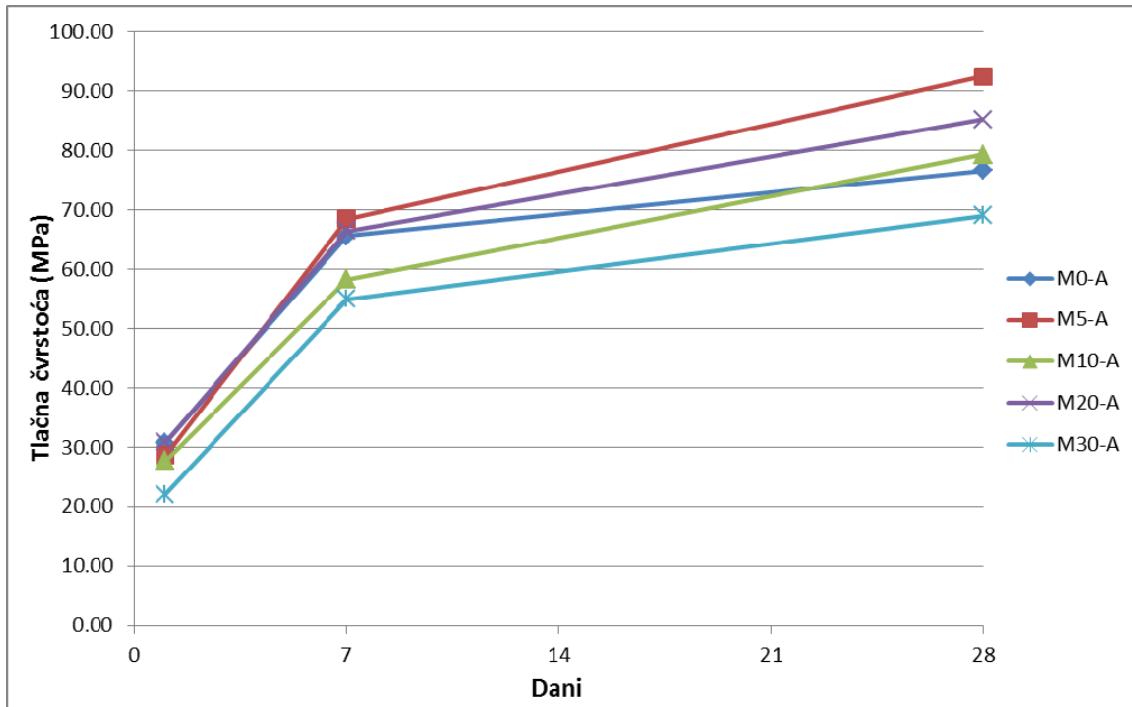
Slika 42 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,45$)



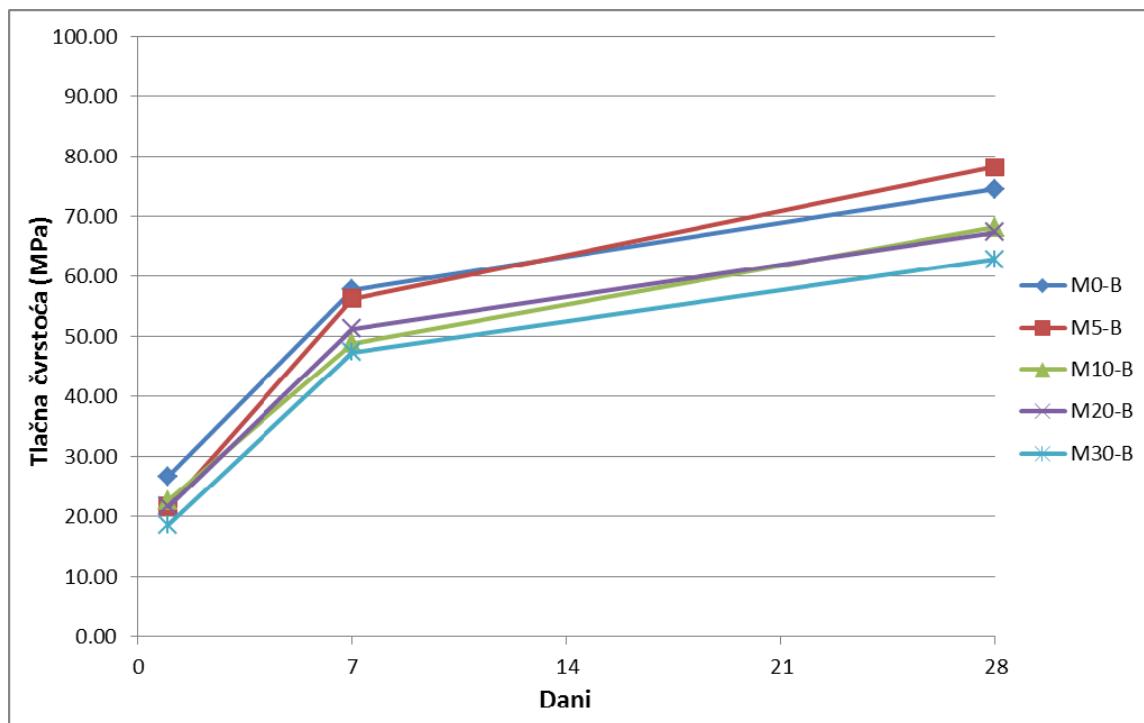
Slika 43 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,50$)



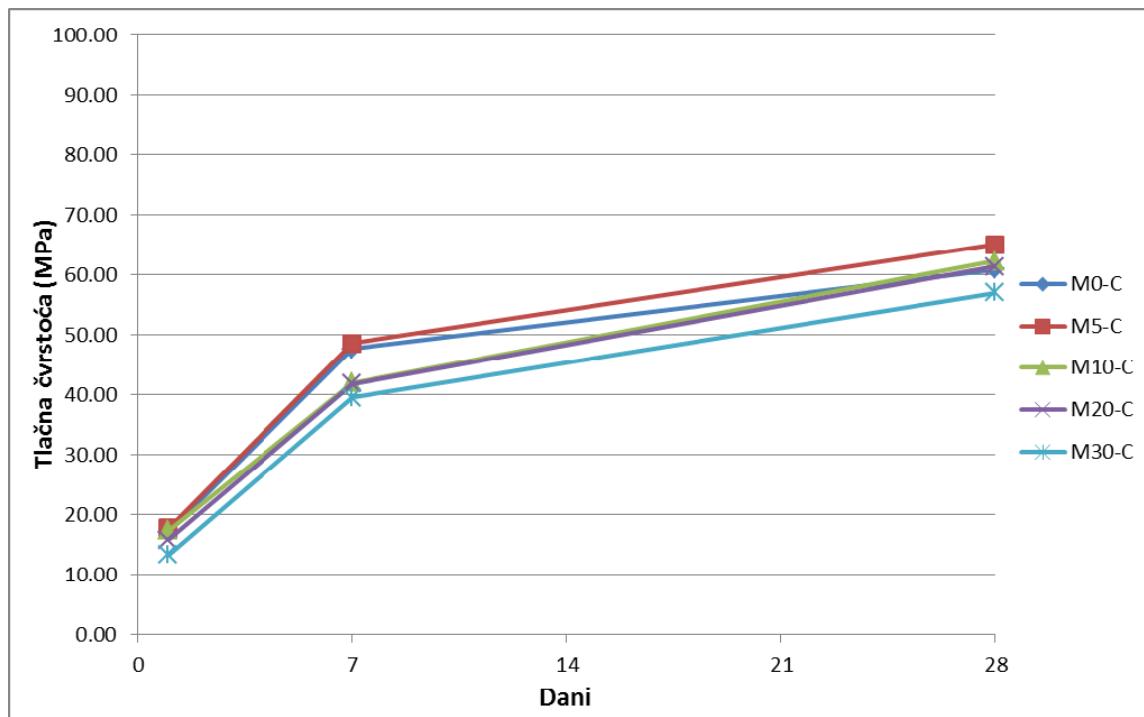
Slika 44 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,55$)



Slika 45 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,45$)



Slika 46 Tlačna čvrstoća uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,50$)

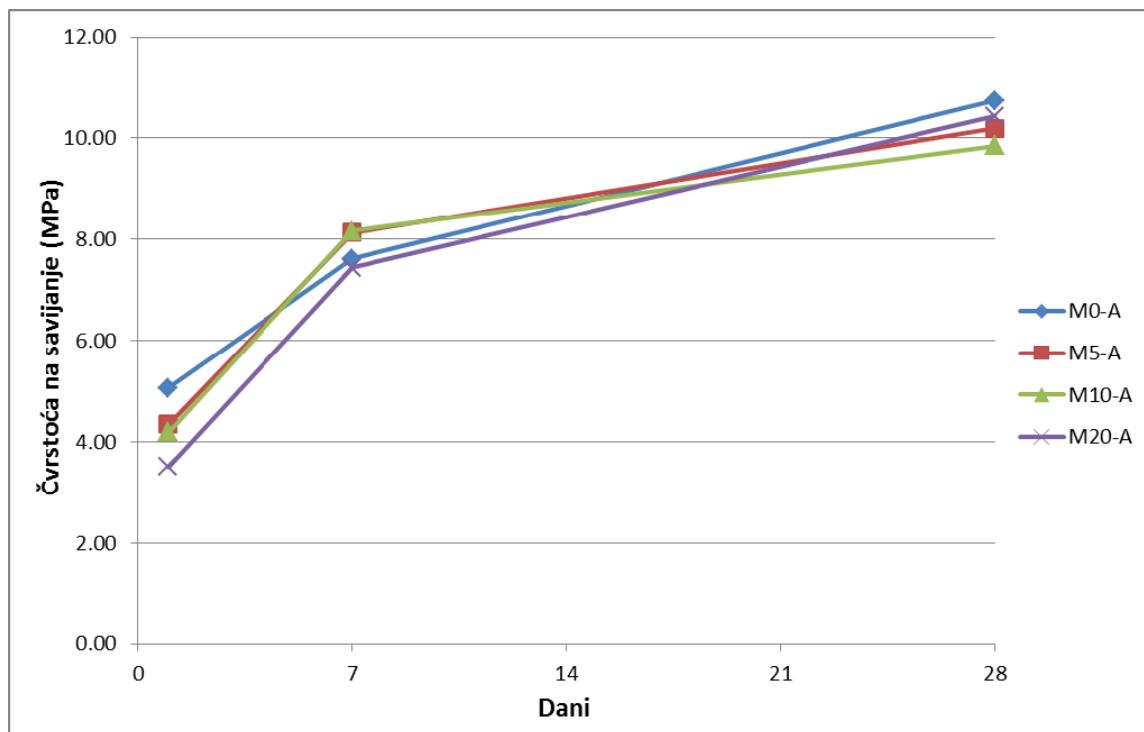


Slika 47 Tlačna čvrstoća uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,55$)

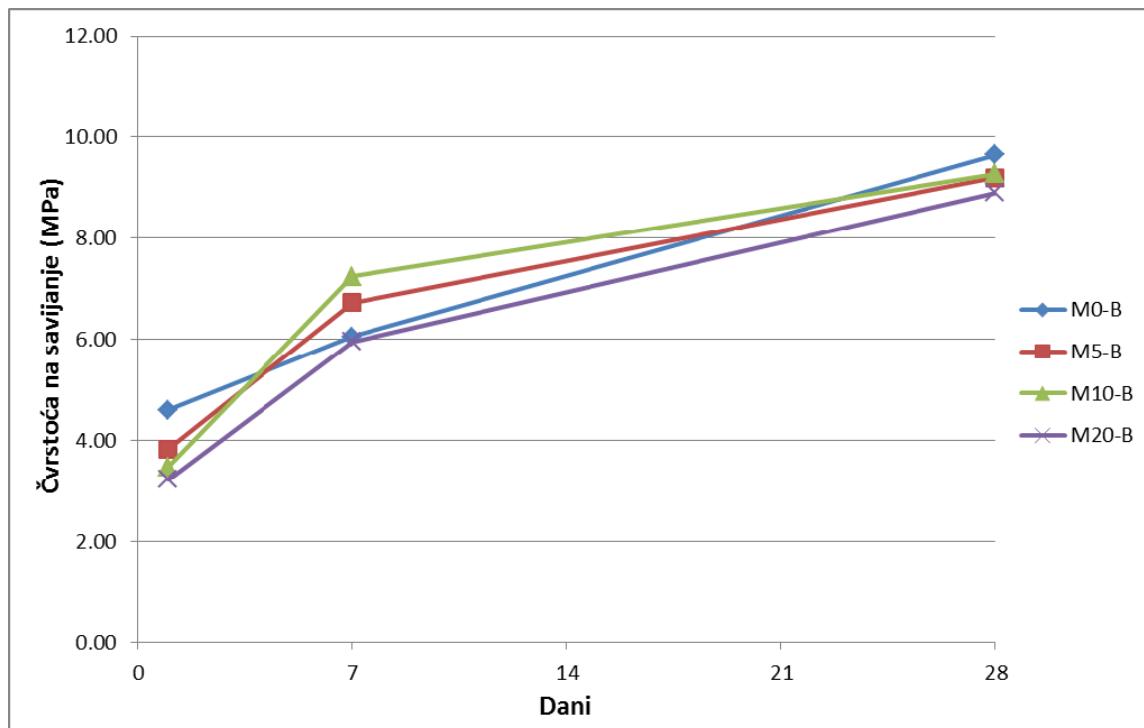


Tablica 7 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac na 1000°C (i na referentnim mješavinama)

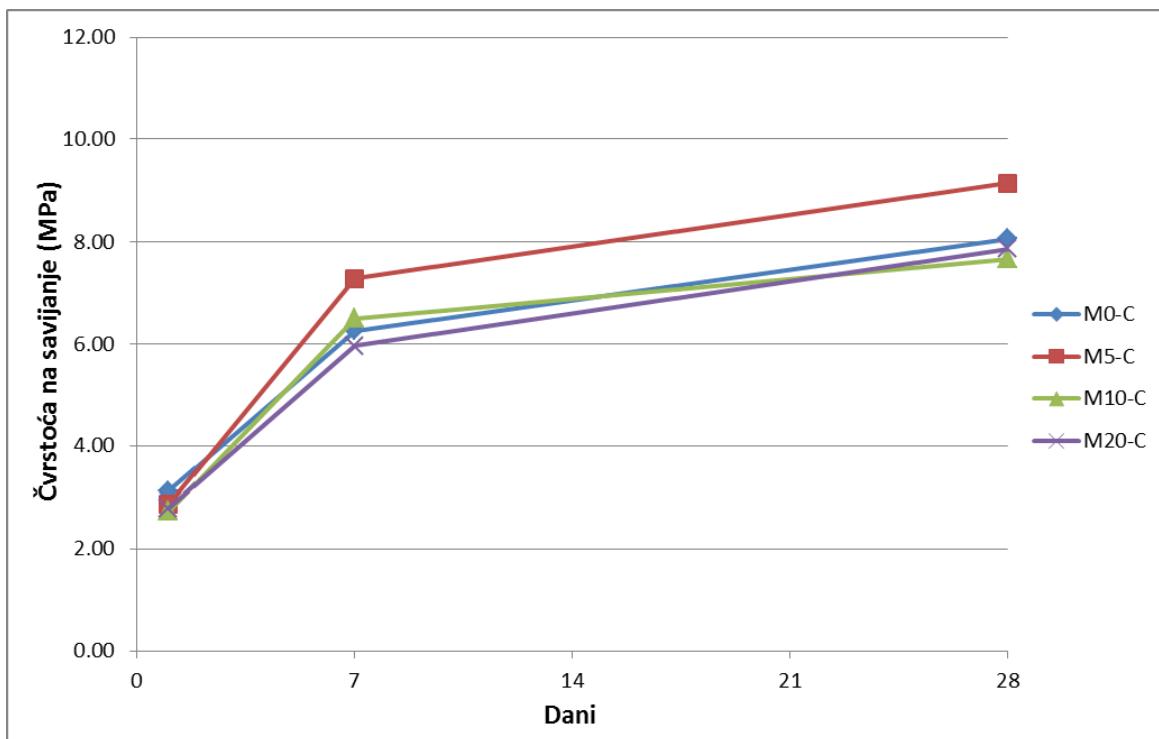
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -A	5,06	7,61	10,74	30,84	65,71	76,66
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
M ₀ -C	3,12	6,26	8,07	17,10	47,67	60,94
M ₅ -A**	4,35	8,13	10,19	29,16	67,42	80,02
M ₅ -B**	3,83	6,73	9,20	22,21	54,23	70,08
M ₅ -C**	2,87	7,28	9,16	15,98	47,04	60,23
M ₁₀ -A**	4,20	8,17	9,85	26,36	68,34	81,16
M ₁₀ -B**	3,47	7,24	9,28	21,28	56,75	70,77
M ₁₀ -C**	2,74	6,51	7,67	15,10	46,91	62,45
M ₂₀ -A**	3,50	7,44	10,43	23,90	58,16	76,70
M ₂₀ -B**	3,22	5,95	8,91	19,41	46,18	64,23
M ₂₀ -C**	2,80	5,97	7,86	14,38	41,28	56,62



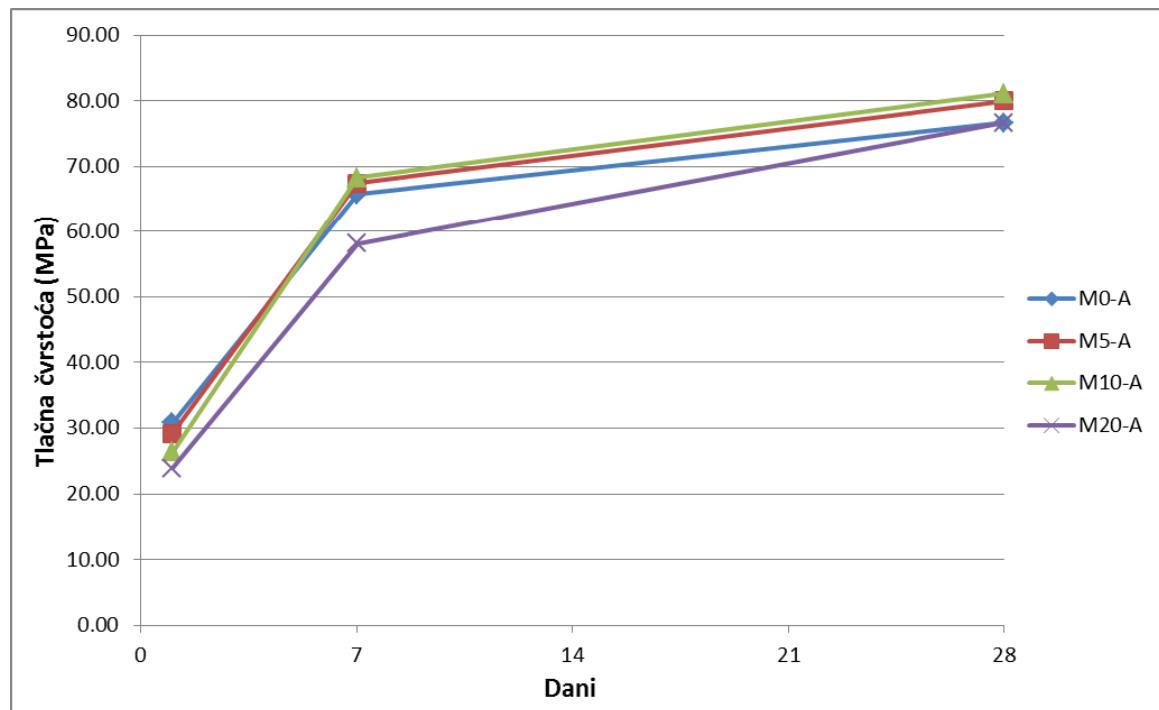
Slika 48 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,45$)



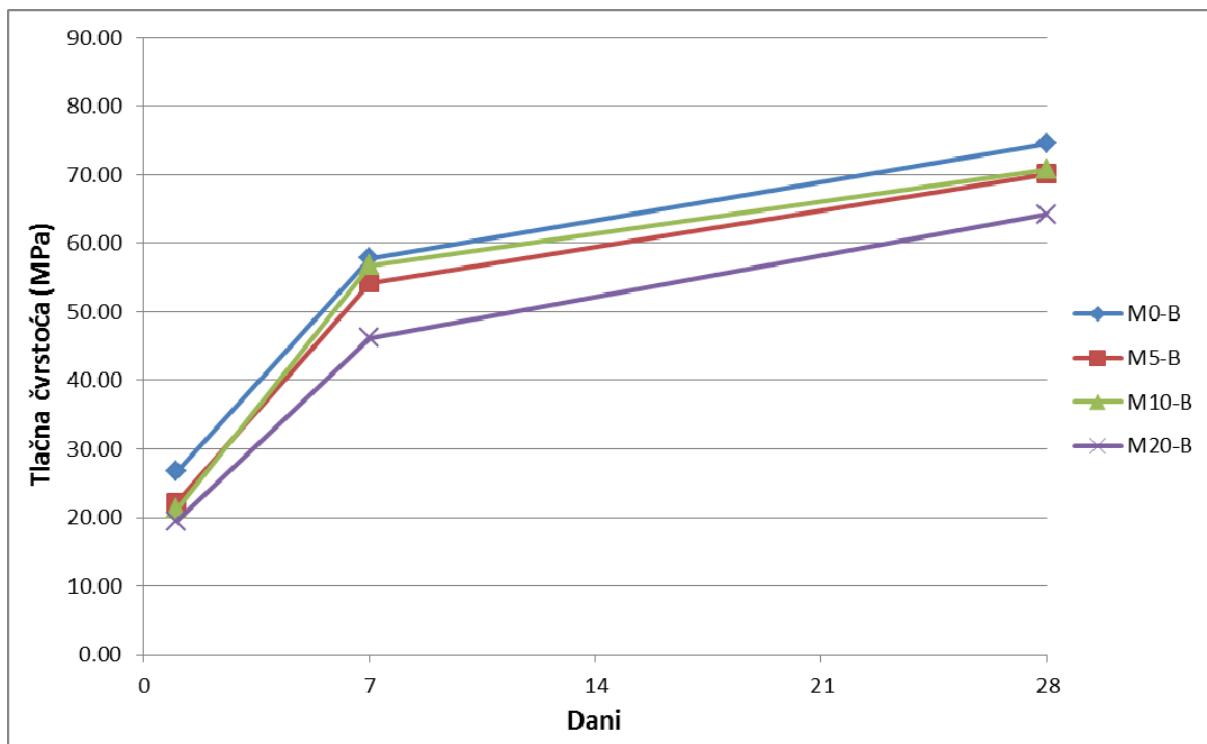
Slika 49 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,50$)



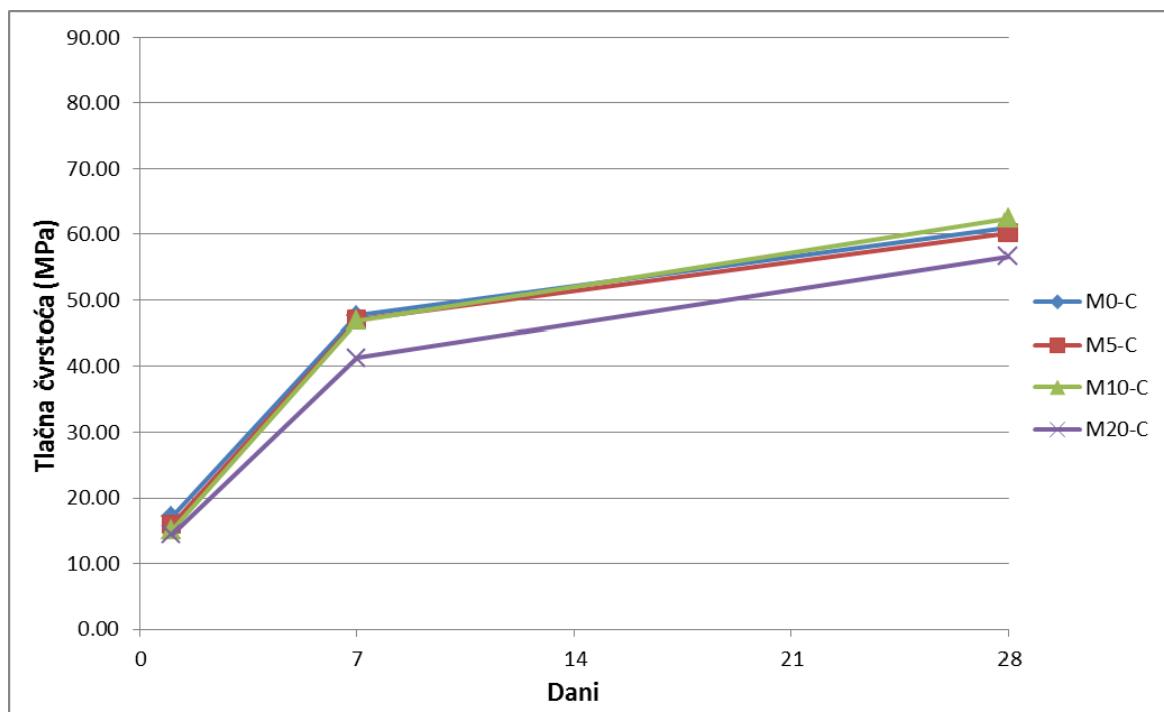
Slika 50 Čvrstoća na savijanje uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,55$)



Slika 51 Tlačna čvrstoća uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,45$)



Slika 52 Tlačna čvrstoća uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,50$)



Slika 53 Tlačna čvrstoća uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Karlovac spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,55$)



7.3.2 Plinopropusnost

Tablica 8 Rezultati ispitivanja plinopropusnosti na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac na 800, 900 i 1000°C (i na referentnim mješavinama)

Referentna mješavina – koef. plinopropusnosti ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$) i ocjena otpornosti	Koeficijent plinopropusnosti ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$) i ocjena otpornosti			
	Udio pepela (%)	800°C	900°C	1000°C
$v/v_e = 0,45$	5	643 (mala)	596 (mala)	315 (mala)
	10	608 (mala)	520 (mala)	238 (srednja)
	20	457 (mala)	330 (mala)	420 (mala)
	30	apsolutno plinopropusno	319 (mala)	-
$v/v_e = 0,50$	5	747 (mala)	780 (mala)	393 (mala)
	10	340 (mala)	771 (mala)	276 (srednja)
	20	271 (srednja)	367 (mala)	349 (mala)
	30	280 (srednja)	187 (srednja)	-



$v/v_e = 0,55$	1408 (vrlo mala)	5	938 (mala)	958 (mala)	786 (mala)
		10	560 (mala)	1347 (vrlo mala)	1372 (vrlo mala)
		20	507 (mala)	1011 (vrlo mala)	833 (mala)
		30	500 (mala)	685 (mala)	-



7.4 Analiza rezultata ispitivanja na cementnom mortu u očvrsnulom stanju (uz ugradnju pepela s UPOV Karlovac)

Vrijednosti čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće rastu s porastom vremena hidratacije za sve analizirane uzorke što je znak da u mortovima s dodanim pepelom dolazi do pucolanskih reakcija i posljedičnih pozitivnih učinaka na mehaničke karakteristike. Rane čvrstoće (1-dnevne) pokazale su se posebice osjetljivim na dodatak pepela te su tako najveće vrijednosti 1-dnevne čvrstoće na savijanje dobivene za referentne mješavine, dok je najveća vrijednost 1-dnevne tlačne čvrstoće pokazala mješavina M₅-A, dakle mješavina s minimalnim udjelom dodanog pepela. Najlošiji rezultati 1-dnevnih čvrstoća dobiveni su za mješavinu M₃₀-A (čvrstoća na savijanje i tlačna čvrstoća iznose svega oko 65% čvrstoća referentne mješavine).

Najbolje vrijednosti kasnih čvrstoća (28-dnevna) pokazale su mješavine M₂₀-A* (za tlačnu čvrstoću) i M₅-A* (za čvrstoću na savijanje) i to na razini preko 120% čvrstoća referentne mješavine.

U skladu s očekivanim, najveće čvrstoće razvile su mješavine s najmanjim (0,45), a najslabije s najvećim (0,55) vodovezivnim omjerom.

Iz prikazanog seta podataka ne može se izvesti generalni zaključak o utjecaju temperature spaljivanja mulja na mehaničke karakteristike morta s ugrađenim pepelom te su potrebna daljnja ispitivanja u ovom području. Unatoč navedenom, može se zaključiti da su zadovoljavajući rezultati dobiveni za sve primjenjene temperature spaljivanja pa tako i za najnižu od 800°C.

Unutar prikazanih rezultata, posebno se ističe mješavina M₂₀-A* koja je u gotovo svim fazama hidratacije (1, 7 i 28 dana) pokazala vrijednosti čvrstoća (i tlačne i čvrstoće na savijanje) veće od onih referentne mješavine te se stoga nameće zaključak da je po pitanju mehaničkih karakteristika upravo ova mješavina optimalna.

Posebno je pozitivna činjenica da su svi analizirani uzorci zadovoljili klasu korištenog cementa (42,5 MPa), tj. sve 28-dnevne tlačne čvrstoće nadišle su ovu vrijednost.

Analizirajući prikazane rezultate ispitivanja plinopropusnosti za mješavine s vodovezivnim omjerima 0,50 i 0,55 (B i C mješavine) može se uočiti generalni trend pada vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti, tj. povećanje otpornosti morta s povećanjem udjela pepela (i sve mješavine s dodanim pepelom imaju manji koef. plinopropusnosti u odnosu na referentnu mješavinu). Za A mješavine s najmanjim vodovezivnim omjerom (0,45) ne može se primjetiti generalni trend smanjenja koeficijenta plinopropusnosti s povećanjem udjela pepela, a neke mješavine pokazuju i veću plinopropusnost od referentne. Uzrok ovomu leži u činjenici da su pojedine mješavine s najmanjim vodovezivnim omjerom bile izrazito smanjene obradljivosti što je dovelo do otežane i lošije ugradnje. Primjerice mješavina M₃₀-A apsolutno je plinopropusno, a to je upravo mješavina s kojom je bilo najviše problema pri ugradnji, a pokazala je i određene devijacije po pitanju ekstremno povećane poroznosti.

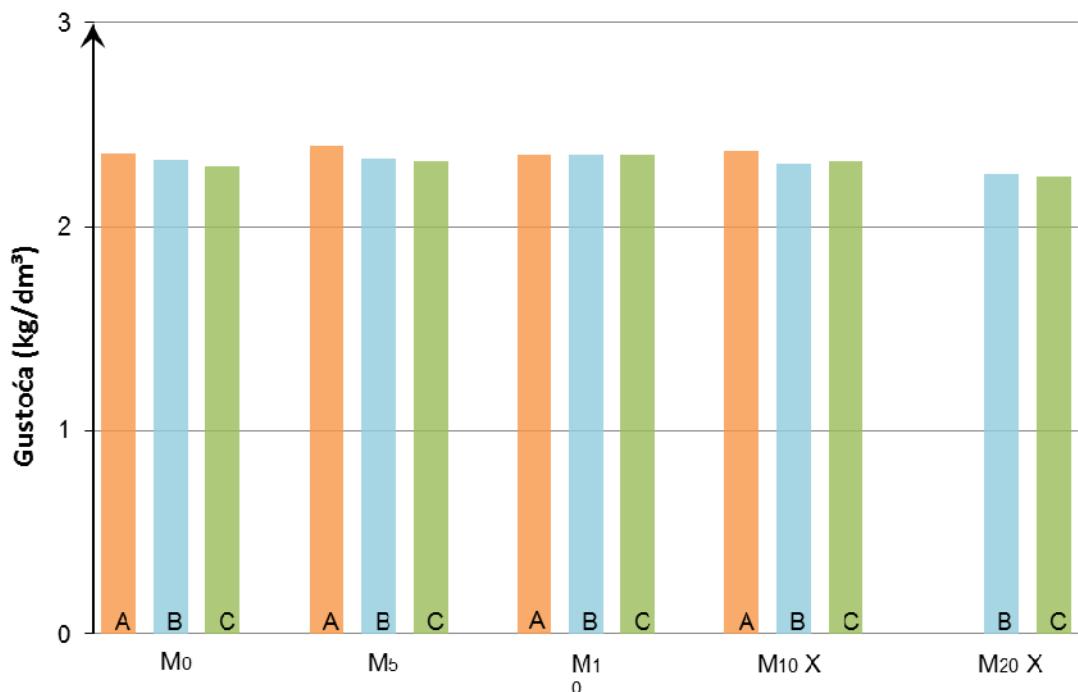
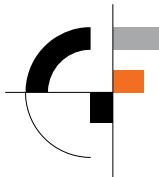


8. Rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV-a Koprivnica

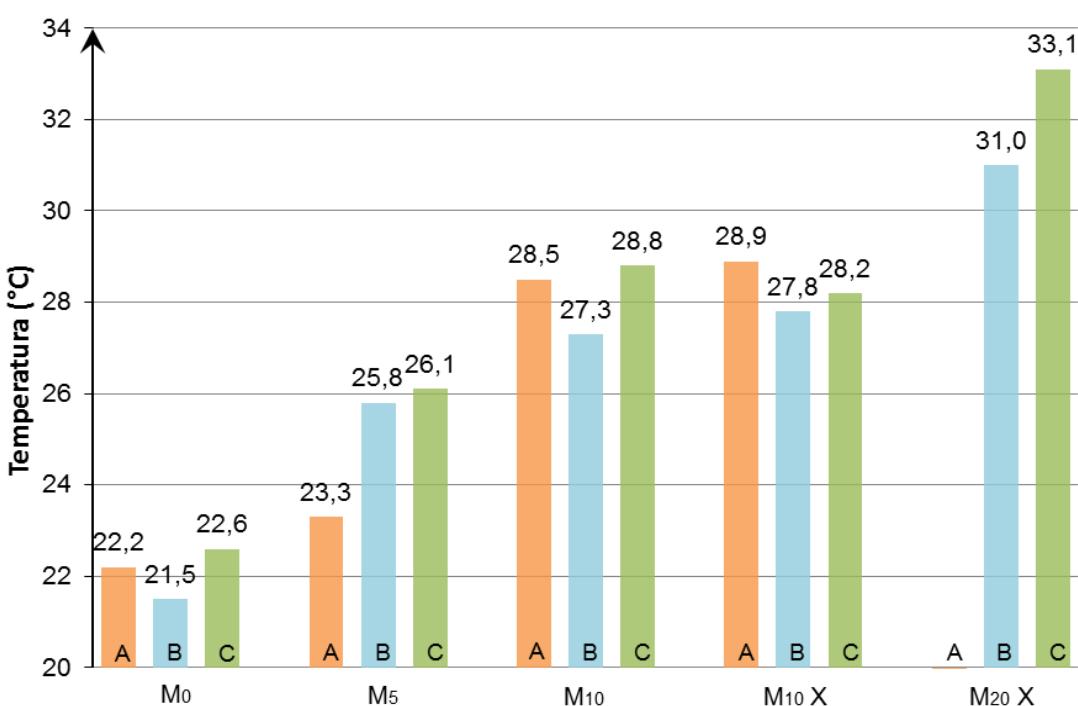
8.1 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju

Tablica 9 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 800°C (i na referentnim mješavinama)

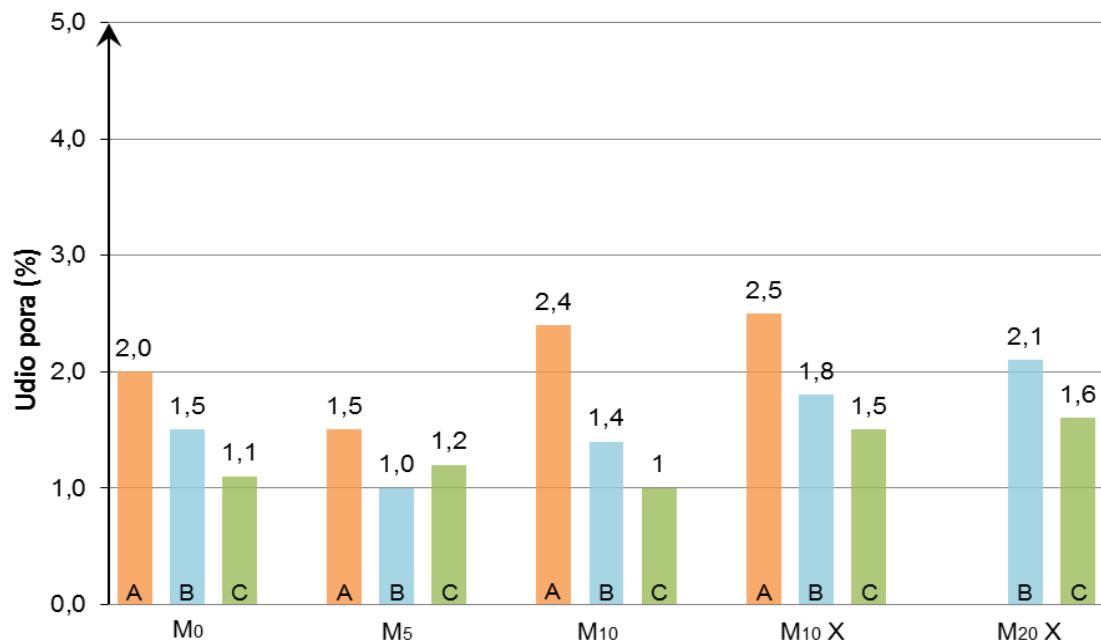
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -A	2,354	22,2	2,0	40	85	113,5
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
M ₀ -C	2,295	22,6	1,1	105	160	189,8
M ₅ -A	2,40	23,3	1,5	40	130	117,5
M ₅ -B	2,33	25,8	1,0	45	105	162,5
M ₅ -C	2,32	26,1	1,2	95	170	195,0
M ₁₀ -A	2,35	28,5	2,4	0	80	100,0
M ₁₀ -B	2,35	27,3	1,4	30	100	125,0
M ₁₀ -C	2,35	28,8	1,0	60	120	160,0
M ₁₀ -AX	2,37	28,9	2,5	15	105	116,0
M ₁₀ -BX	2,31	27,8	1,8	80	140	165,0
M ₁₀ -CX	2,32	28,2	1,5	80	180	191,0
M ₂₀ -BX	2,26	31,0	2,1	25	115	162,5
M ₂₀ -CX	2,25	33,1	1,6	60	125	172,5



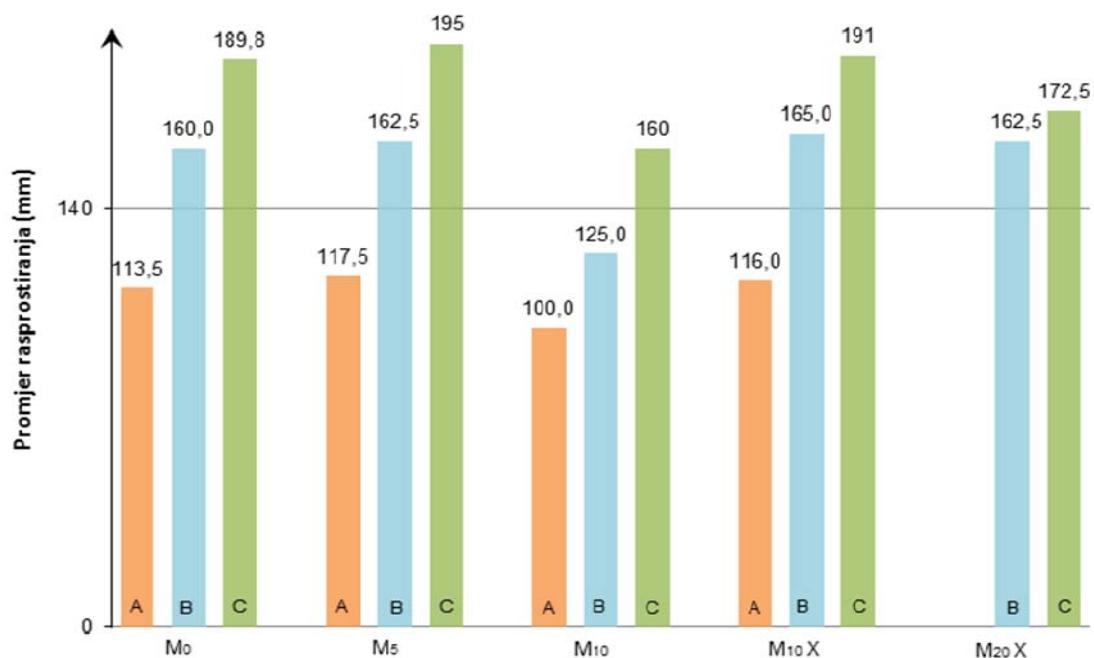
Slika 54 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800°C



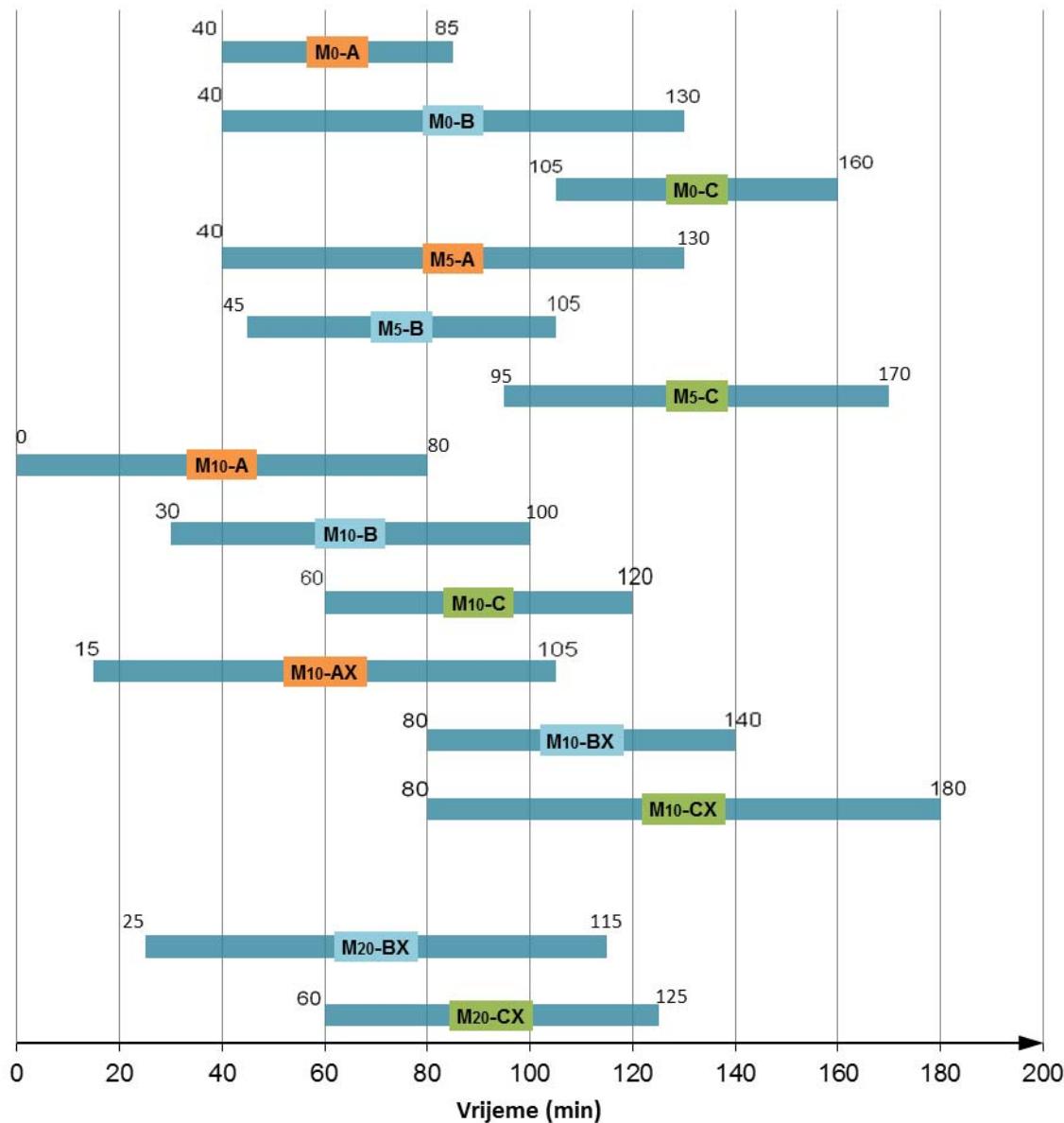
Slika 55 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800°C



Slika 56 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800°C



Slika 57 Konzistencija (promjer rasprstiranja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800°C

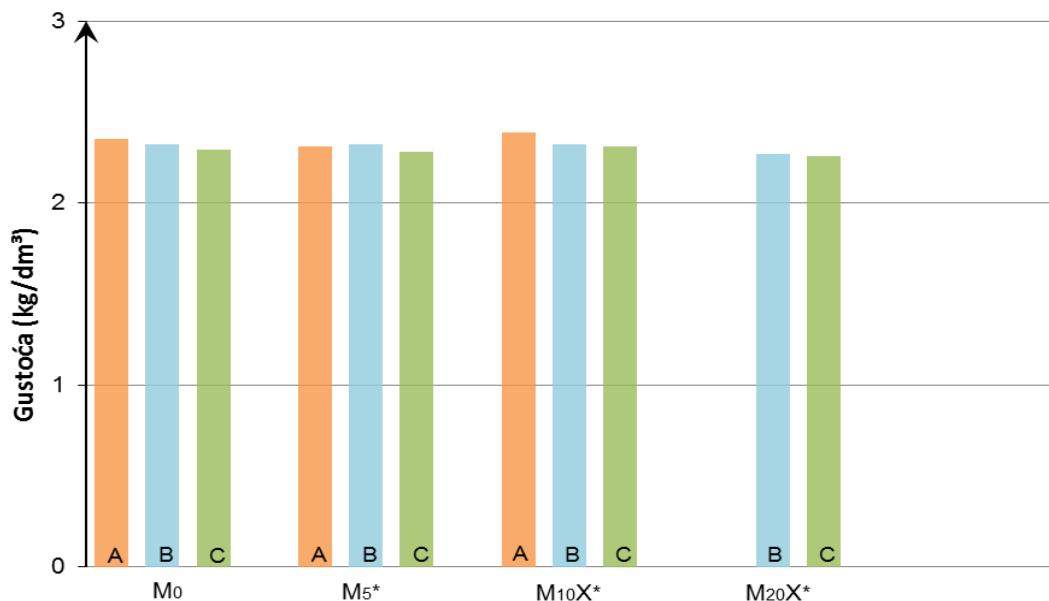
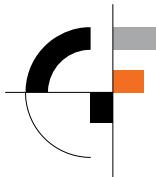


Slika 58 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800°C

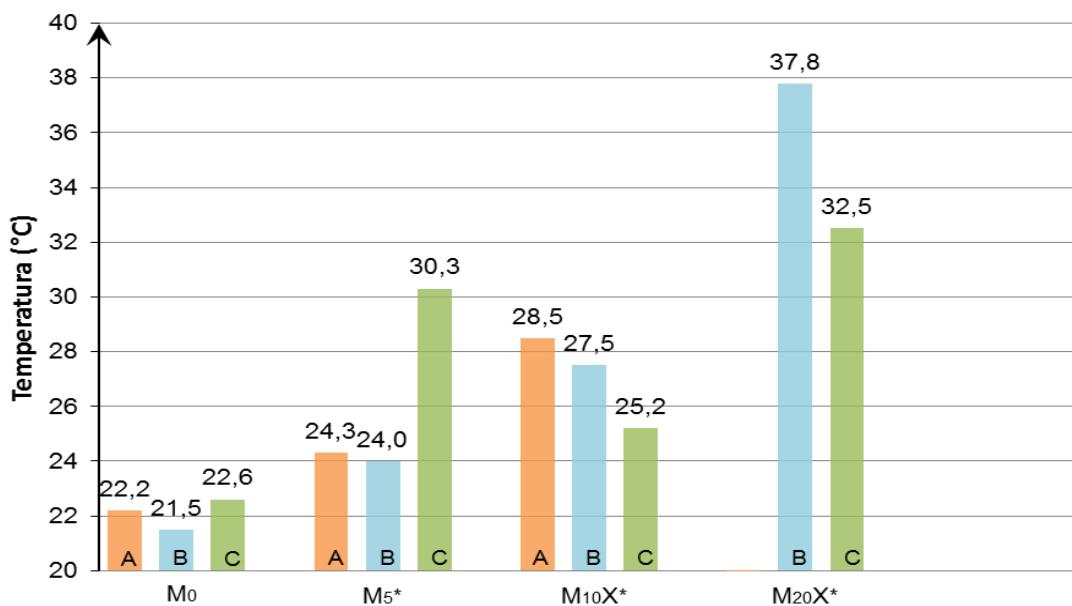


Tablica 10 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 900°C (i na referentnim mješavinama)

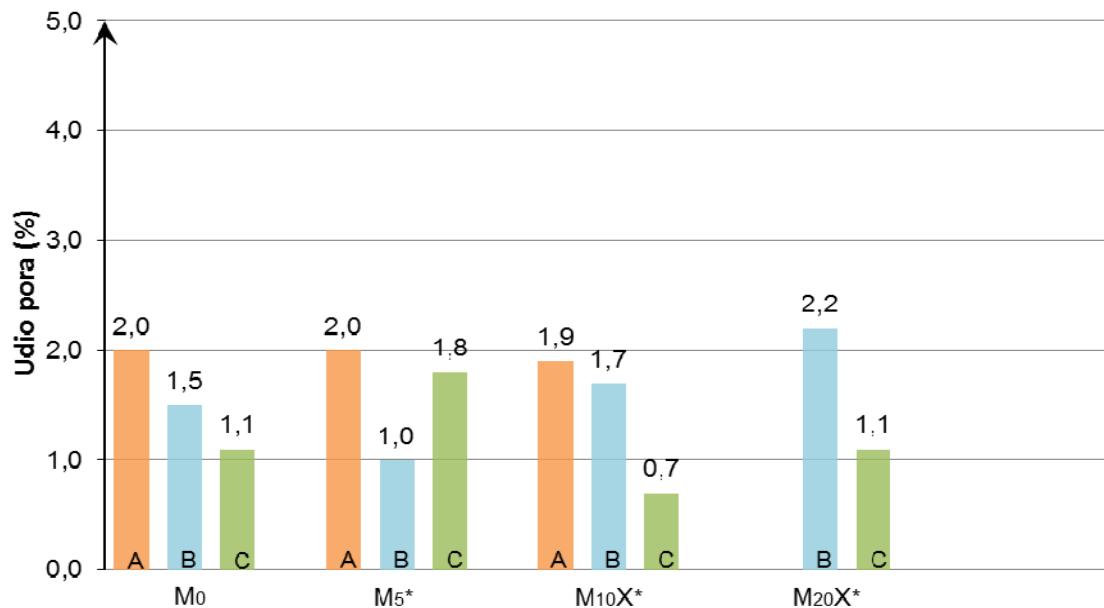
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -A	2,354	22,2	2,0	40	85	113,5
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
M ₀ -C	2,295	22,6	1,1	105	160	189,8
M ₅ -A*	2,31	24,3	2,0	60	100	130,0
M ₅ -B*	2,32	24,0	1,0	60	150	160,0
M ₅ -C*	2,28	30,3	1,8	80	165	189,5
M ₁₀ -AX*	2,39	28,5	1,9	40	115	125,5
M ₁₀ -BX*	2,32	27,5	1,7	80	150	170,0
M ₁₀ -CX*	2,31	25,2	0,7	100	170	167,5
M ₂₀ -BX*	2,27	37,8	2,2	60	105	162,5
M ₂₀ -CX*	2,26	32,5	1,1	75	120	185,0



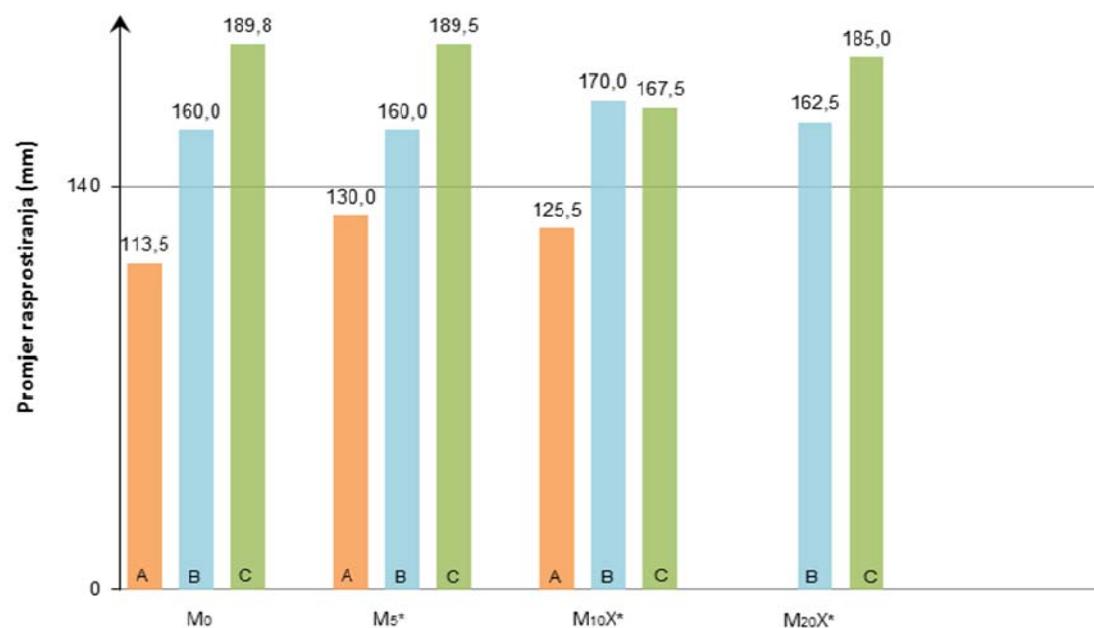
Slika 59 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 900°C



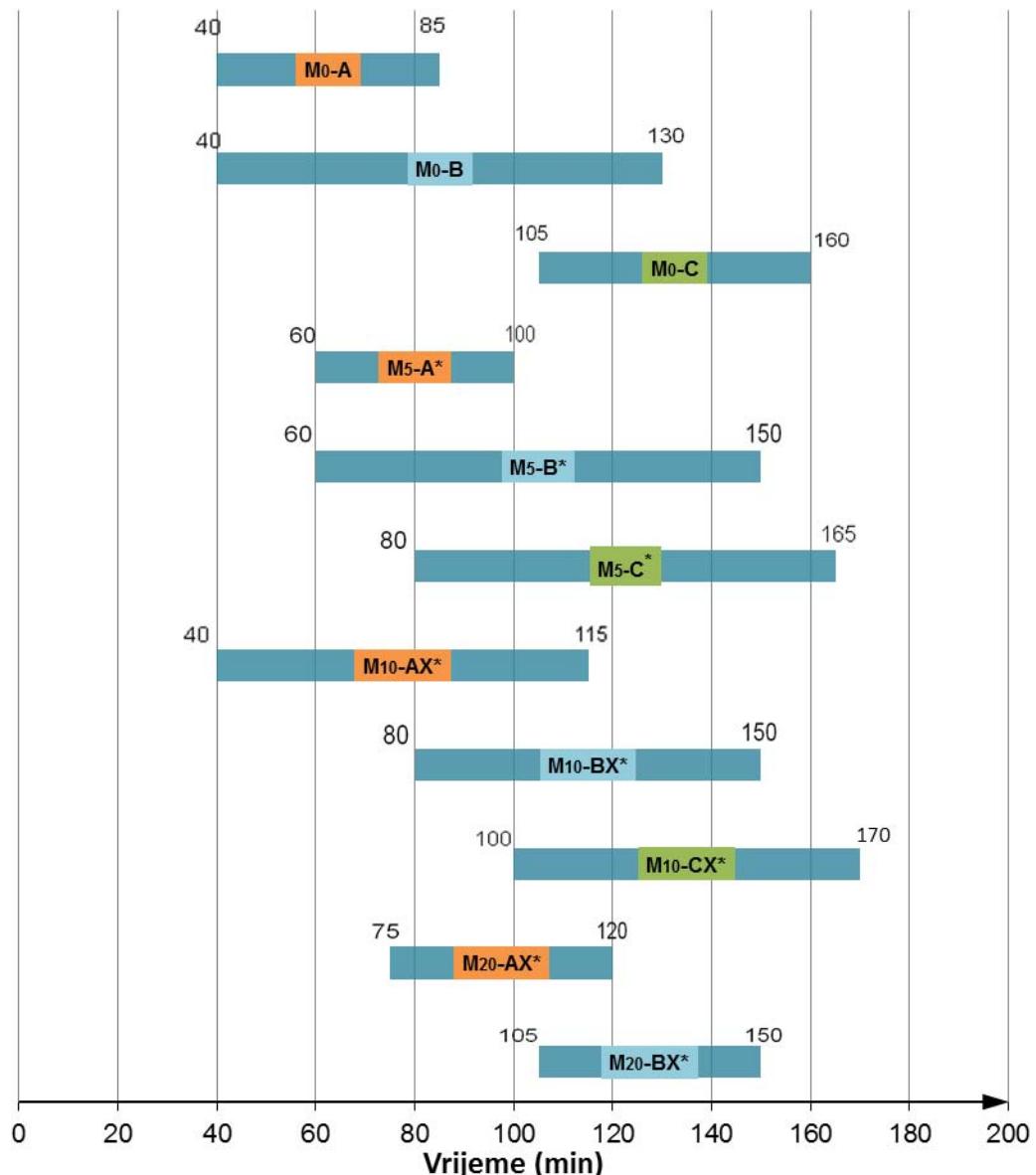
Slika 60 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 900°C



Slika 61 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 900°C



Slika 62 Konzistencija (promjer rasprostiranja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 900°C

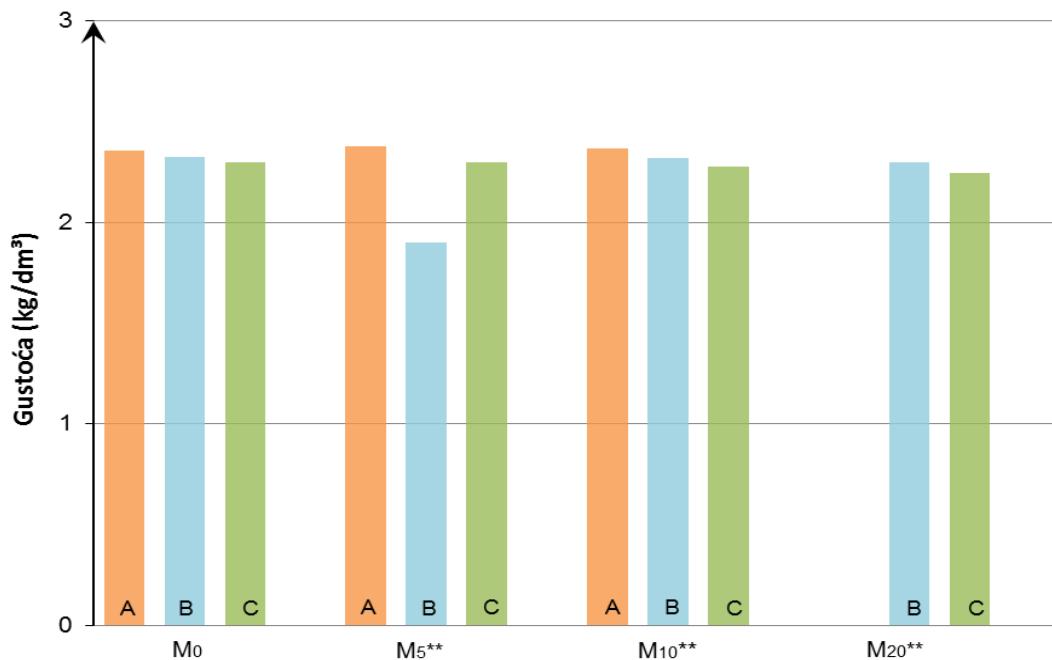
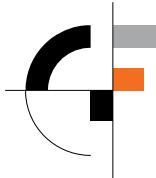


Slika 63 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 900°C

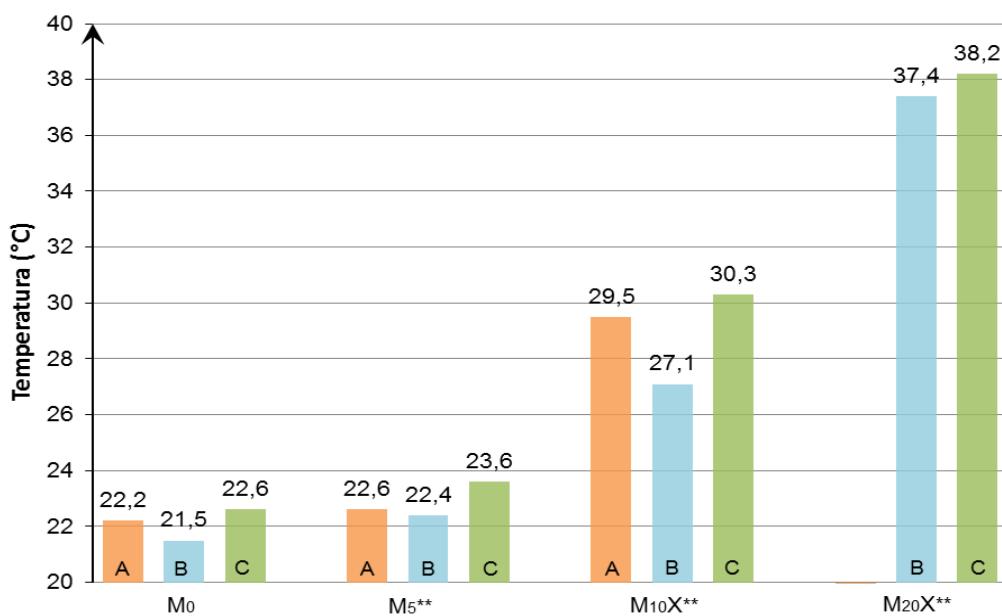


Tablica 11 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 1000°C (i na referentnim mješavinama)

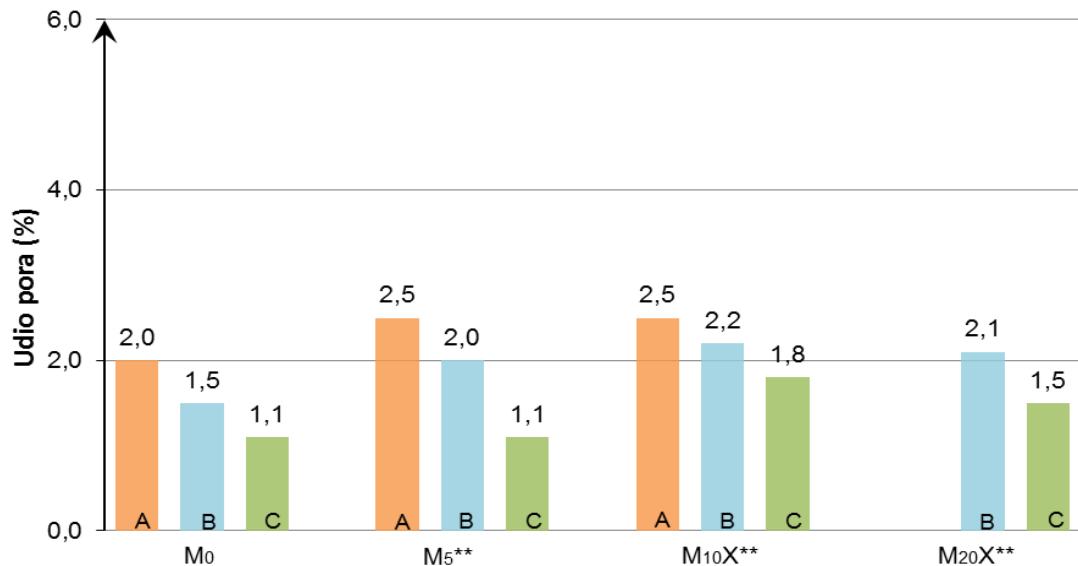
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -A	2,354	22,2	2,0	40	85	113,5
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
M ₀ -C	2,295	22,6	1,1	105	160	189,8
M ₅ -A**	2,378	22,6	2,5	60	140	127,5
M ₅ -B**	1,900	22,4	2,0	80	180	159,0
M ₅ -C**	2,296	23,6	1,1	100	160	187,5
M ₁₀ -AX**	2,367	29,5	2,5	20	100	105,0
M ₁₀ -BX**	2,316	27,1	2,2	80	120	150,0
M ₁₀ -CX**	2,275	30,3	1,8	80	140	185,0
M ₂₀ -BX**	2,298	37,4	2,1	40	80	155,0
M ₂₀ -CX**	2,244	38,2	1,5	80	100	182,5



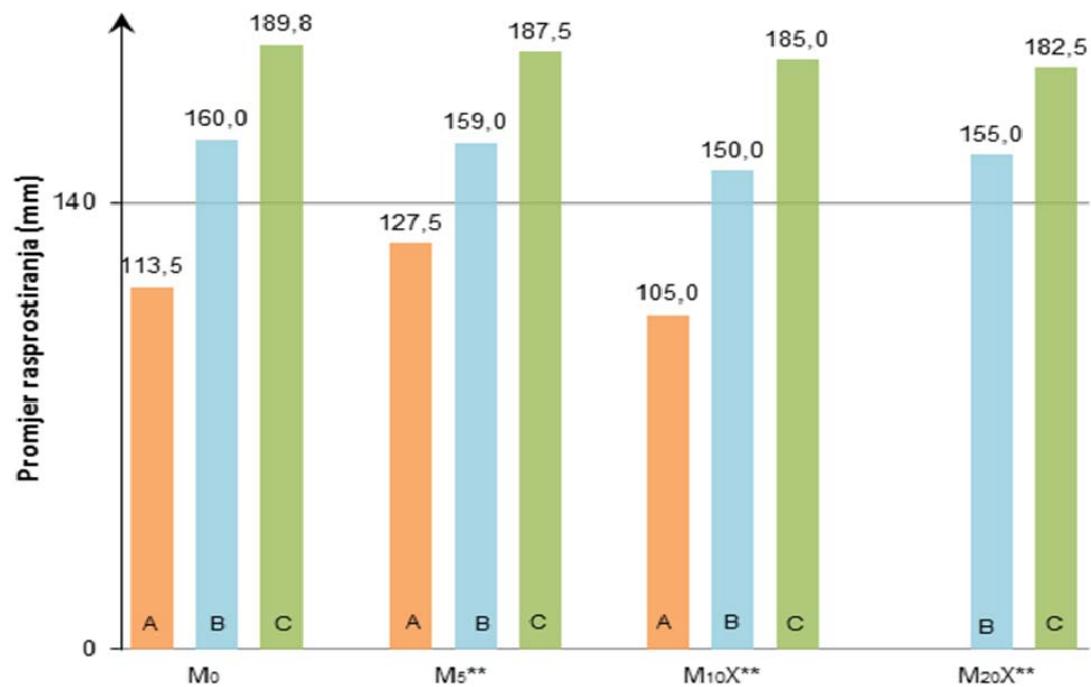
Slika 64 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 1000°C



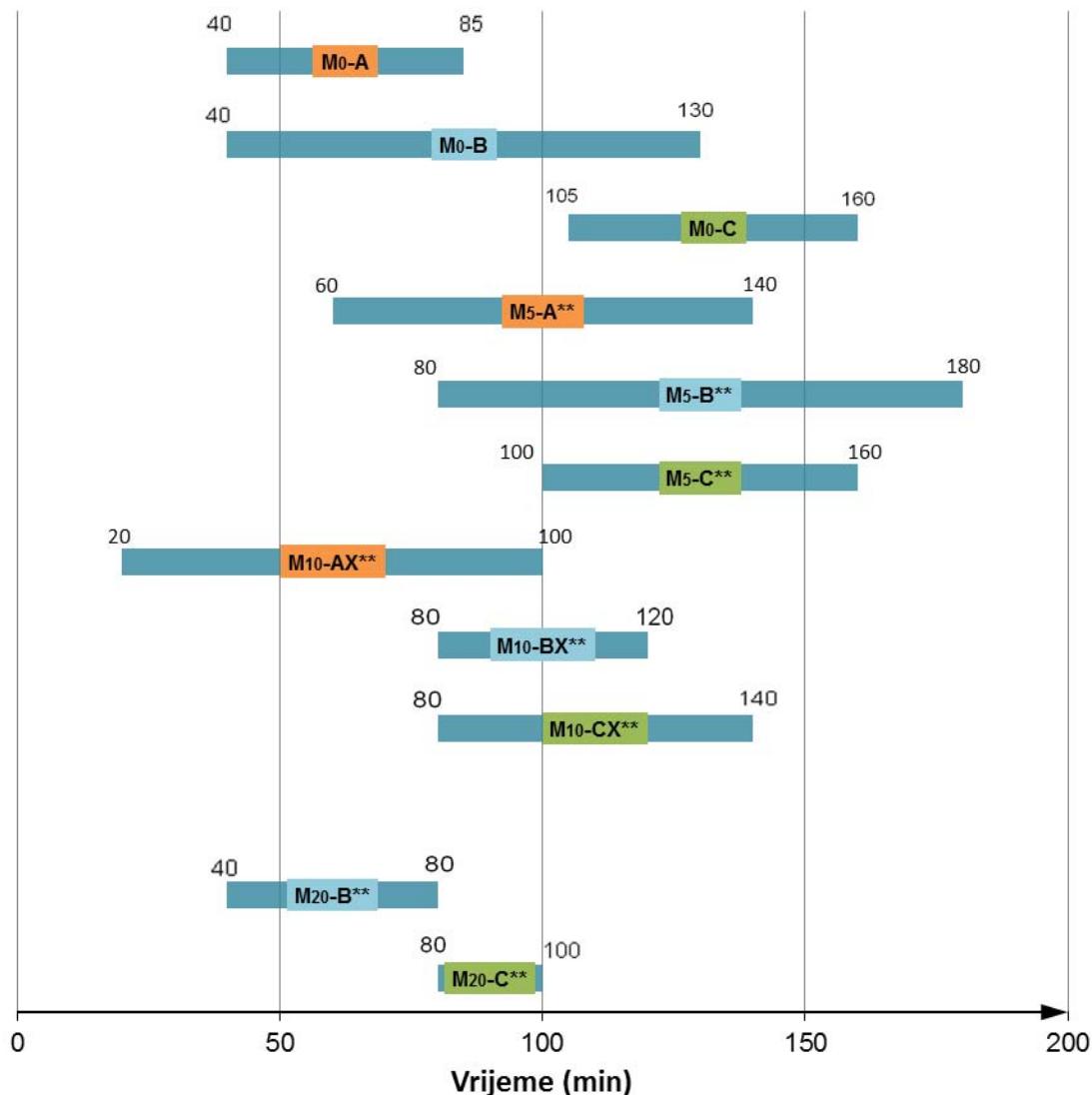
Slika 65 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 1000°C



Slika 66 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 1000°C



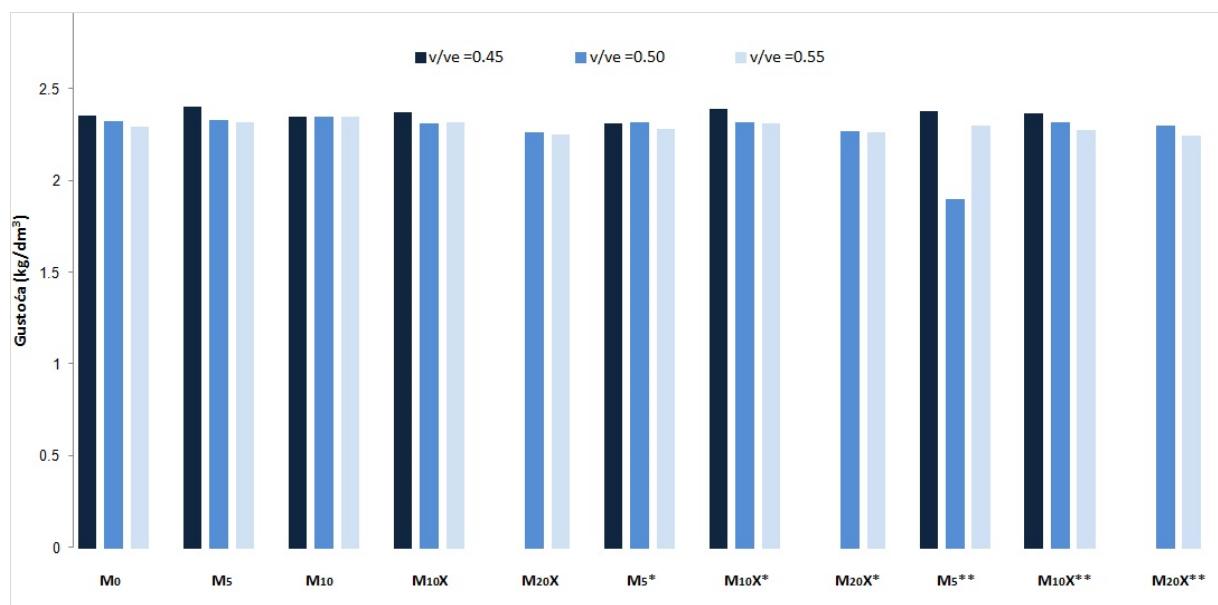
Slika 67 Konzistencija (promjer rasprostiranja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 1000°C



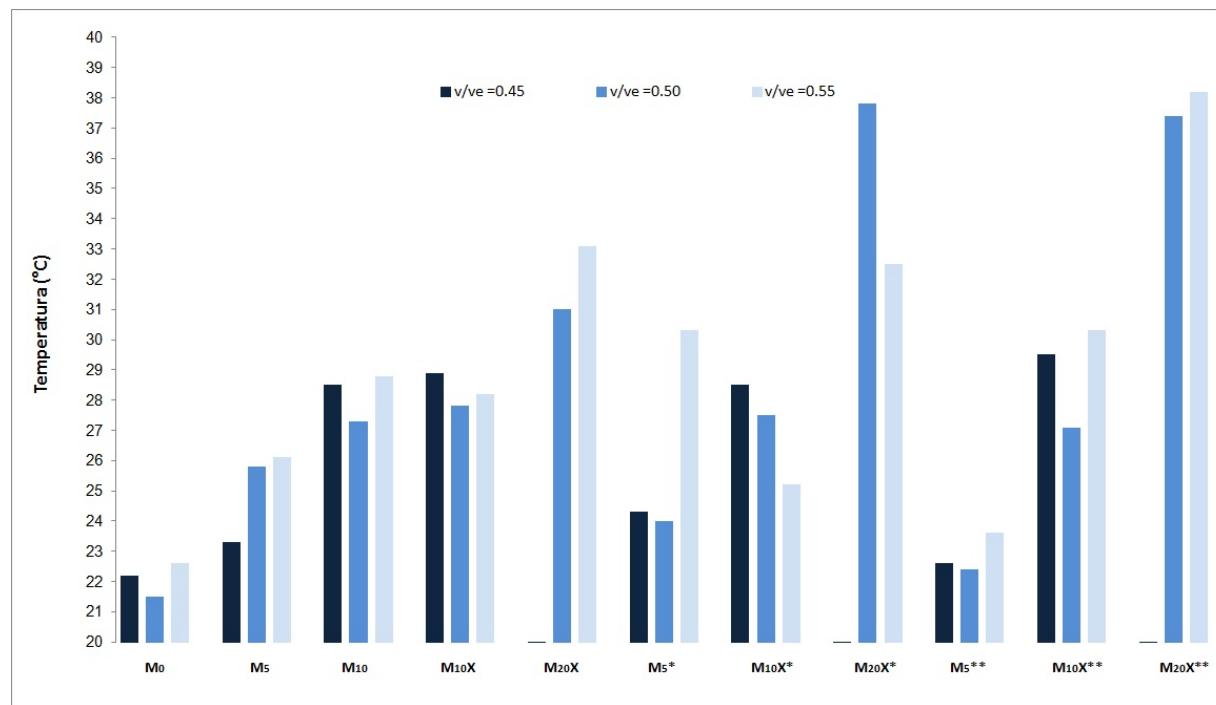
Slika 68 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 1000°C



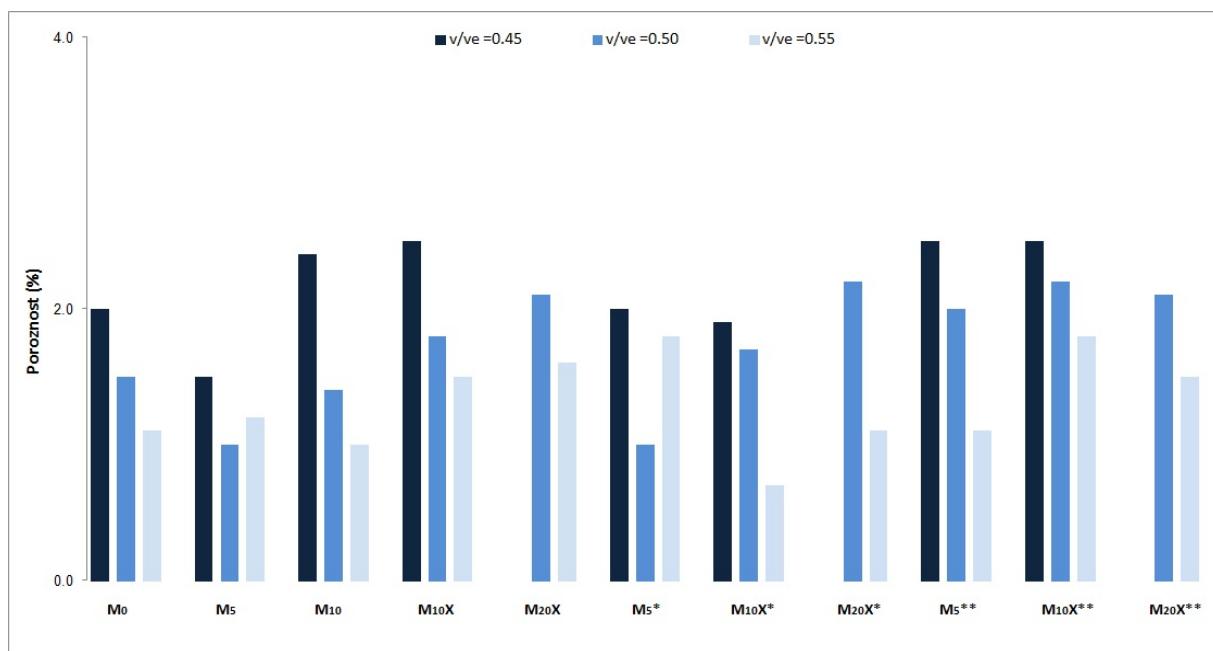
8.2 Analiza rezultata ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju



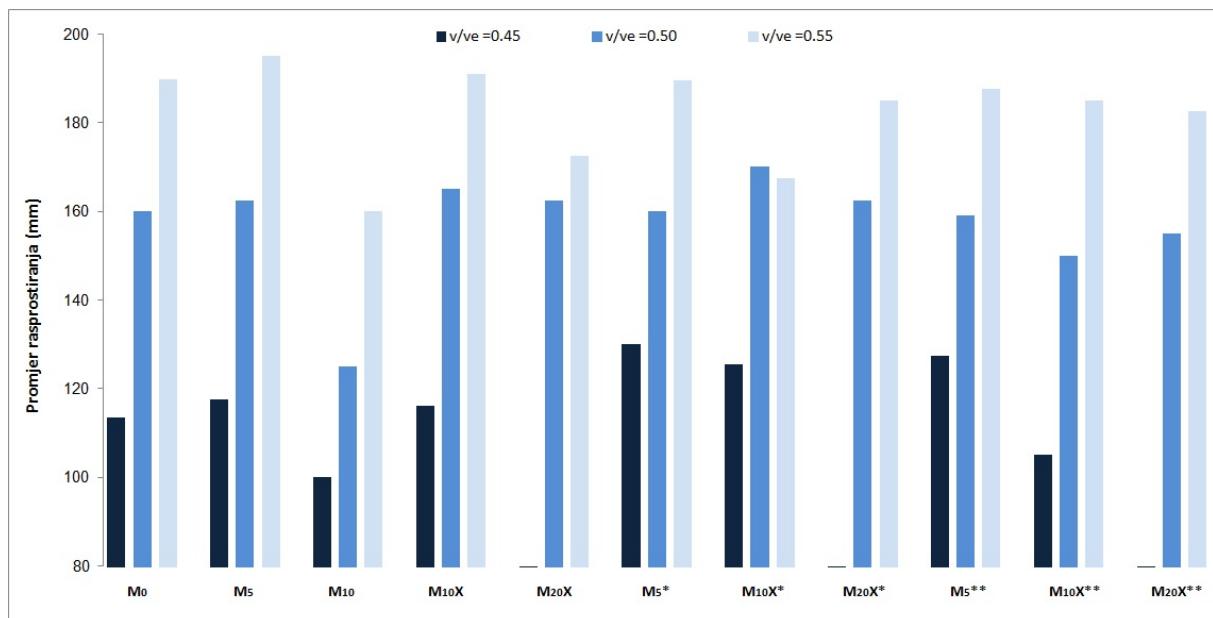
Slika 69 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



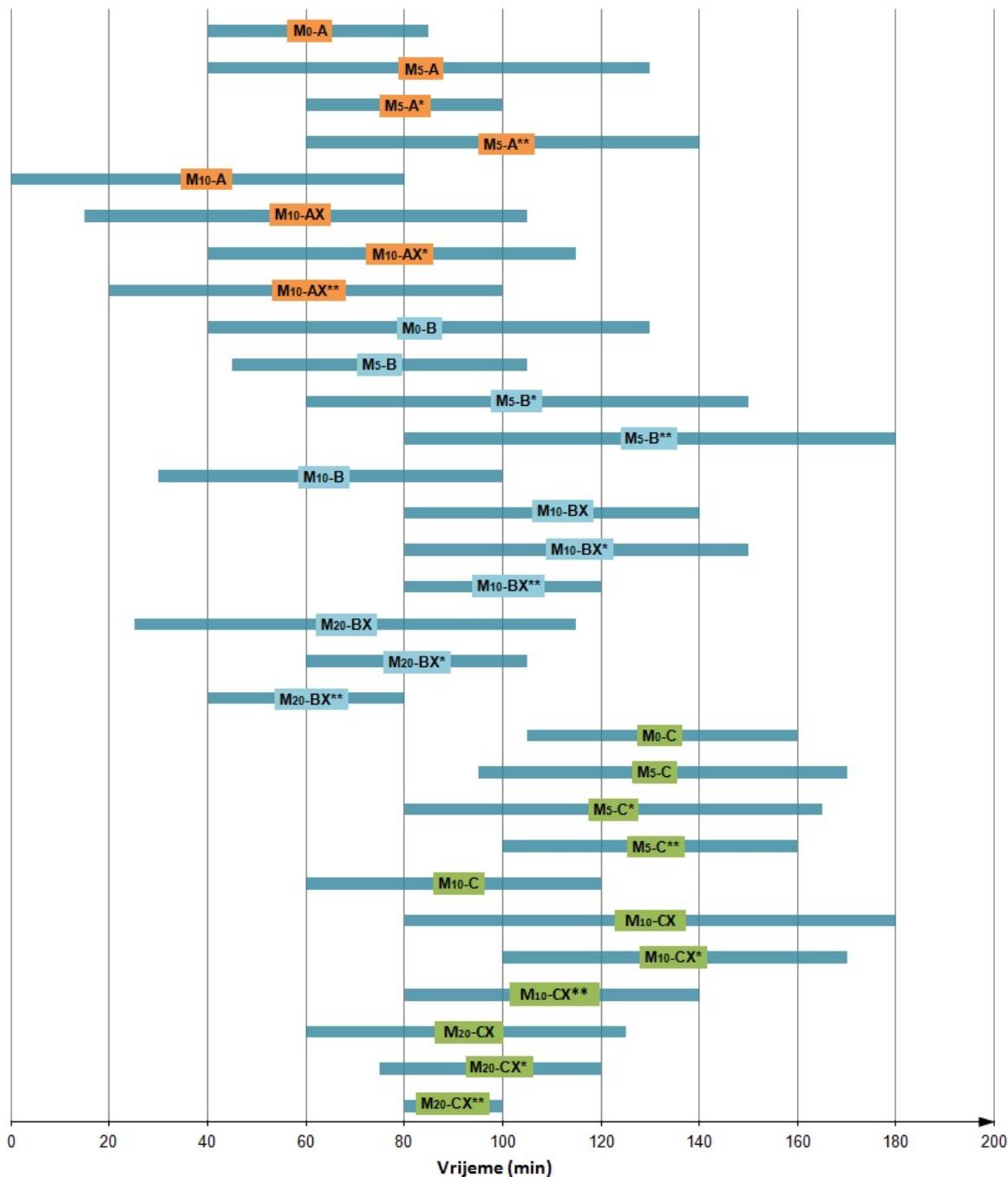
Slika 70 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 71 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 72 Konzistencija (promjer raspršivanja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 73 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) – zbirni rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Karlovac dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C



Analizom dobivenih vrijednosti gustoća cementnog morta (u svežem stanju) s dodatkom pepela dobivene su minimalne razlike s obzirom na udio dodanog pepela i primijenjenu temperaturu spaljivanja mulja. Najniže vrijednosti gustoće morta u svježem stanju dobivene su za mješavinu s 5%-tним udjelom pepela dobivenog spaljivanjem na 1000°C. Budući da su sve ostale vrijednosti uglavnom podjednake i u rangu s onima referentnih mješavina, generalno se može zaključiti da gustoća morta u svježem stanju ne ovisi značajnije 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%-tним udjelima pepela dobivenog na 900 i 1000°C. Ove razvijene temperature značajno su više od onih referentnih mješavina, a ova pojava pridonosila je i bržim reakcijama ovih mješavina kao i otežanoj ugradnji.

Rezultati dobiveni na mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica potvrđuju generalni trend povećanja poroznosti s povećanjem udjela dodanog pepela. Međutim, s obzirom na temperature spaljivanja mulja nisu zabilježene značajnije razlike u poroznosti analiziranih mješavina.

Potvrđeni su i povećani zahtjevi za vodom te smanjena obradljivost mortova s povećanjem udjela dodanog pepela. Zbog problema s ugradnjom mješavina s udjelima pepela od 10% i 20% dodana je voda s ciljem postizanja zadovoljavajuće obradljivosti (razred rasprostiranja jednak onom referentnih mješavina). Stoga je prikazane rezultate potrebno uzeti s rezervom budući da pojedine mješavine (označene s "X" sadrže dodatne količine vode). Mješavine s 30%-tним udjelima ovog pepela nisu ni analizirane, budući je ugradnja bila praktički nemoguća uslijed vrlo loše konzistencije, ali i značajne brzine reakcije.

Iz prikazanih rezultata ne može se izvesti generalni zaključak o utjecaju dodanog pepela i primjenjene temperature spaljivanja mulja na početno i krajnje vrijeme vezivanja.

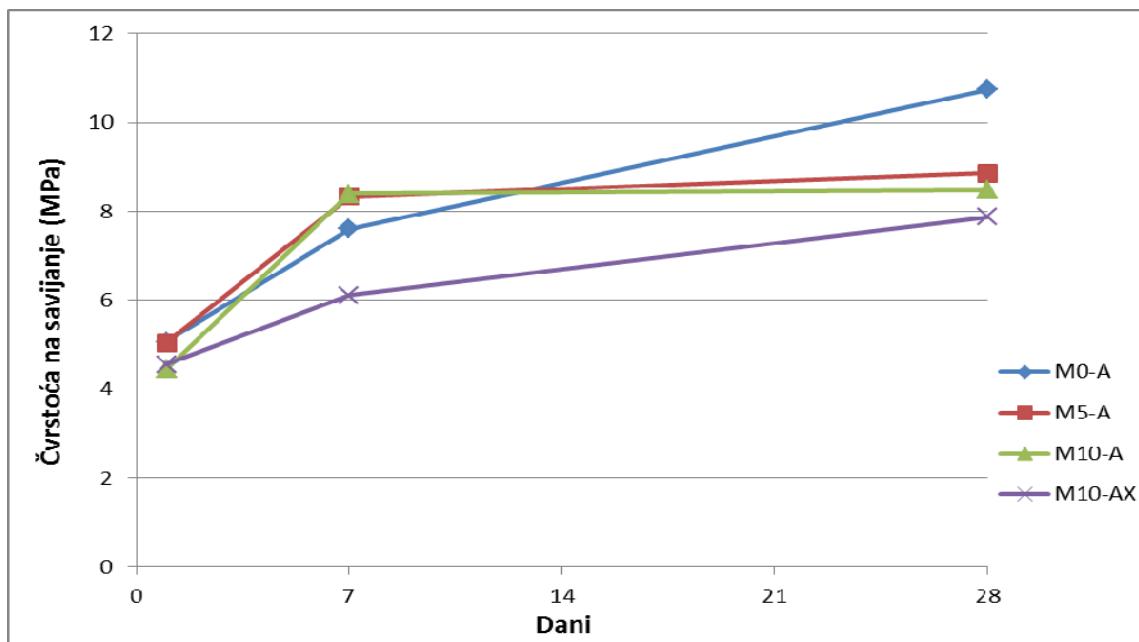


8.3 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u očvrsnulom stanju

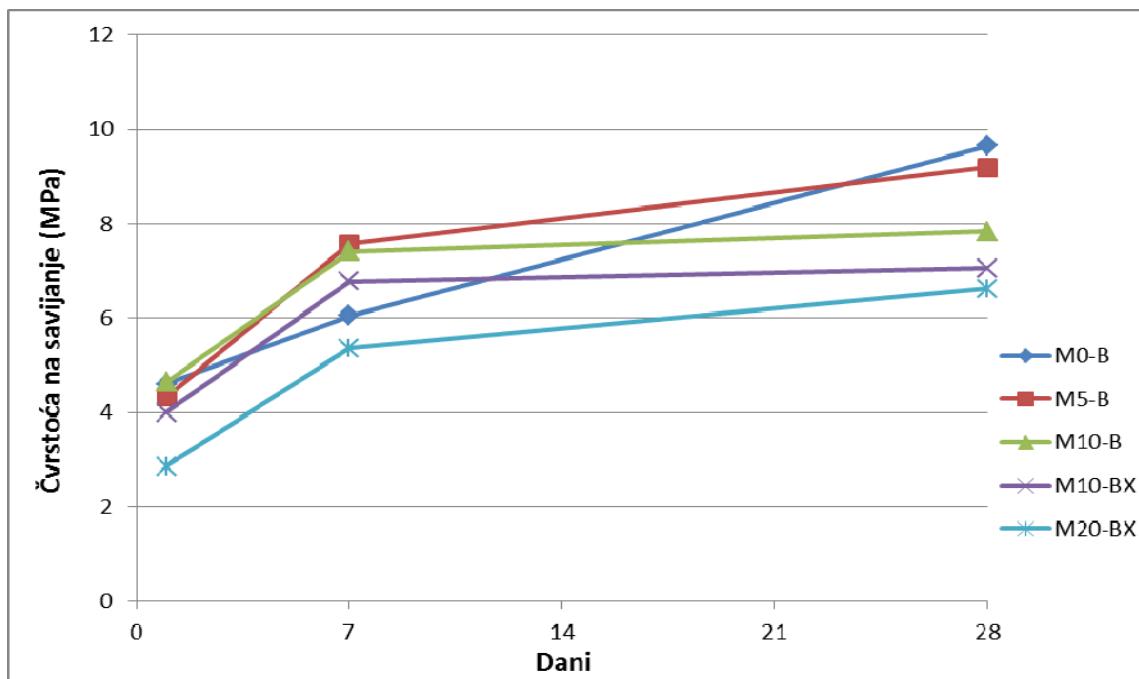
8.3.1 Mehaničke karakteristike

Tablica 12 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 800°C (i na referentnim mješavinama)

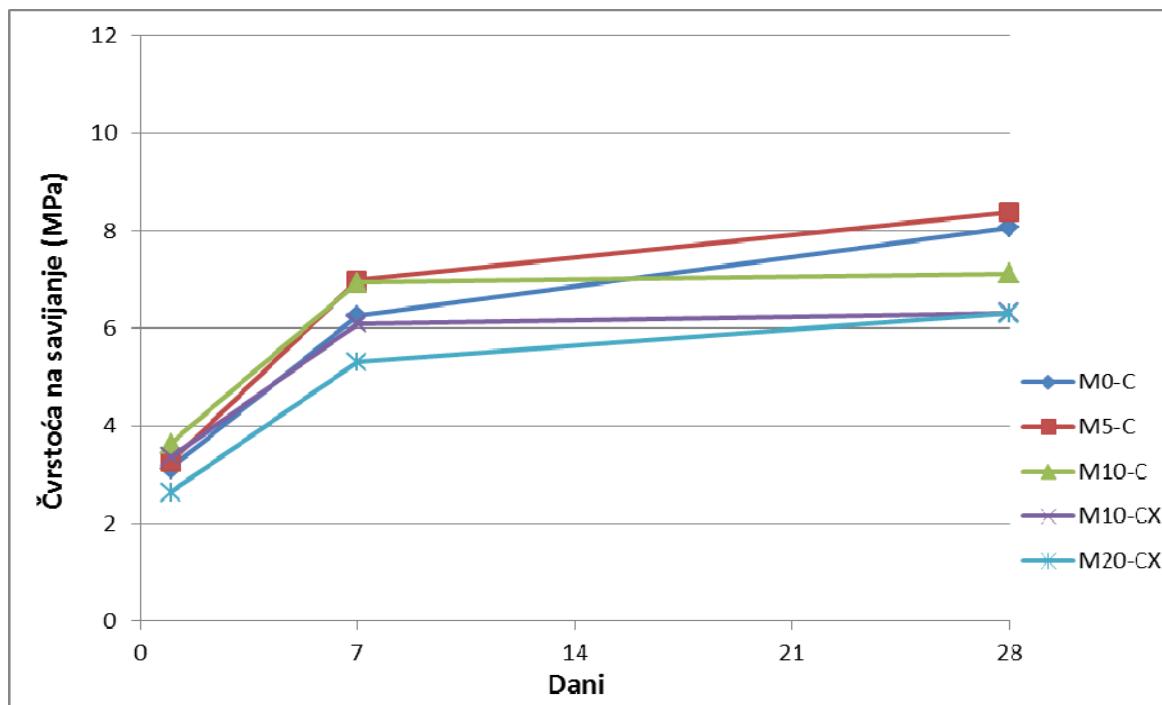
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -A	5,06	7,61	10,74	30,84	65,71	76,66
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
M ₀ -C	3,12	6,26	8,07	17,10	47,67	60,94
M ₅ -A	5,04	8,33	8,86	34,17	63,84	82,38
M ₅ -B	4,33	7,57	9,19	27,56	53,93	70,46
M ₅ -C	3,25	6,98	8,38	17,63	46,72	63,84
M ₁₀ -A	4,45	8,39	8,48	32,23	67,61	82,95
M ₁₀ -B	4,64	7,41	7,84	28,26	56,83	73,55
M ₁₀ -C	3,63	6,94	7,12	19,38	46,13	58,38
M ₁₀ -AX	4,55	6,11	7,87	32,23	67,61	82,95
M ₁₀ -BX	4,00	6,78	7,06	23,36	48,59	57,27
M ₁₀ -CX	3,35	6,10	6,32	16,52	40,41	51,72
M ₂₀ -BX	2,86	5,36	6,62	15,55	37,86	49,19
M ₂₀ -CX	2,63	5,31	6,31	14,87	35,98	46,20



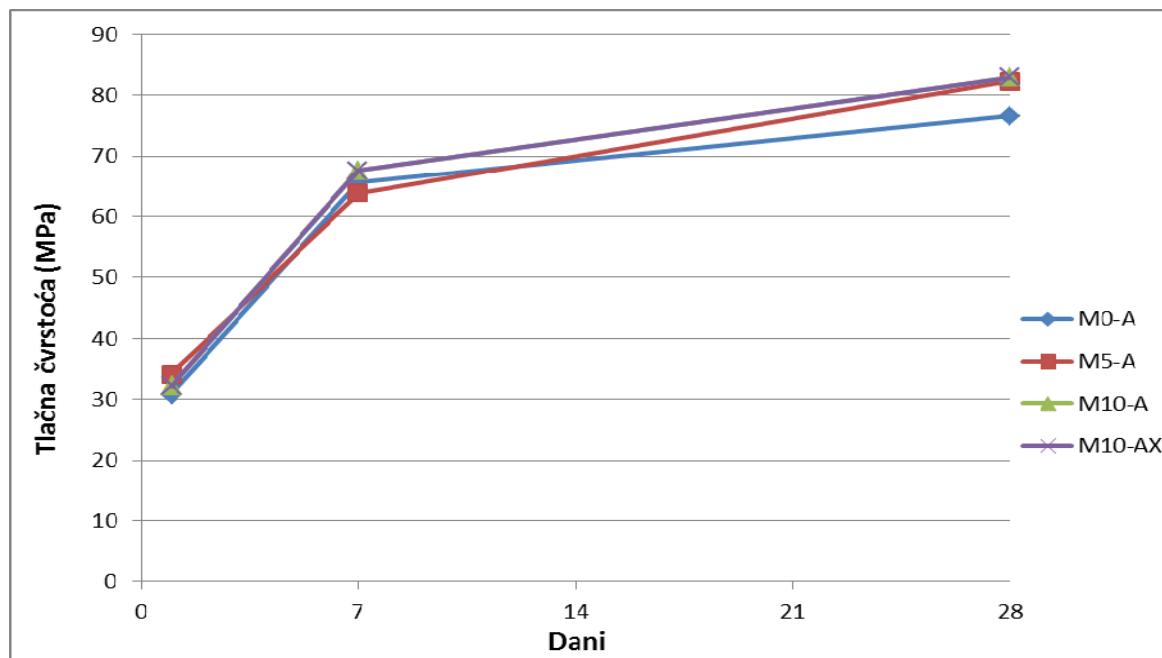
Slika 74 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,45$)



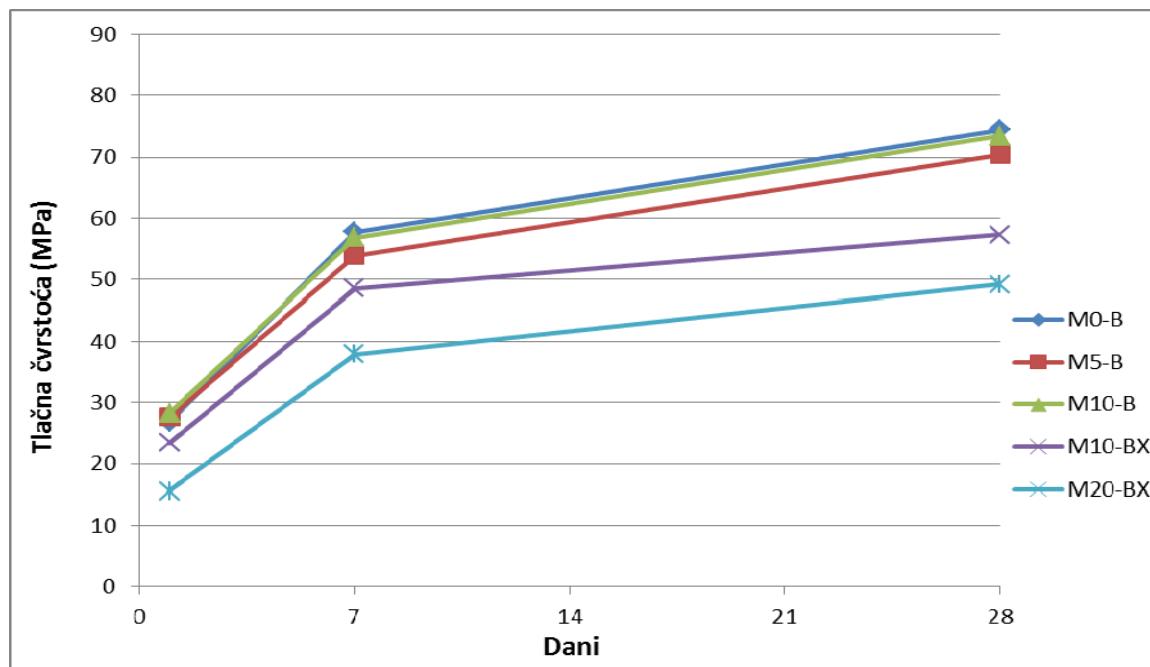
Slika 75 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,50$)



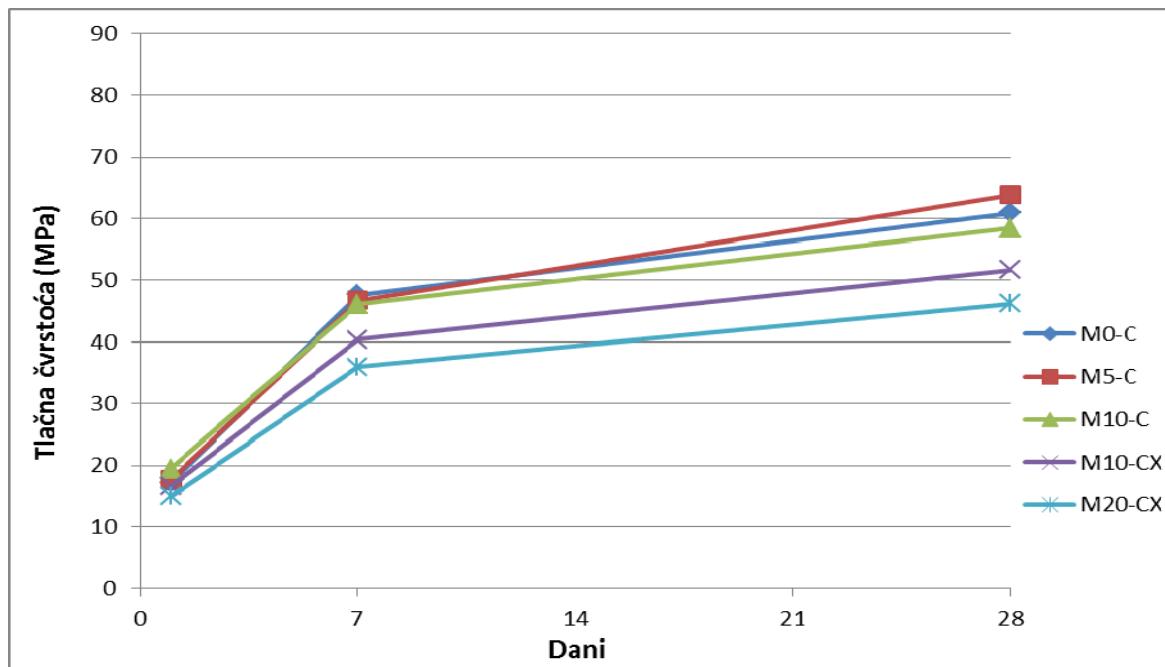
Slika 76 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,55$)



Slika 77 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,45$)



Slika 78 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,50$)

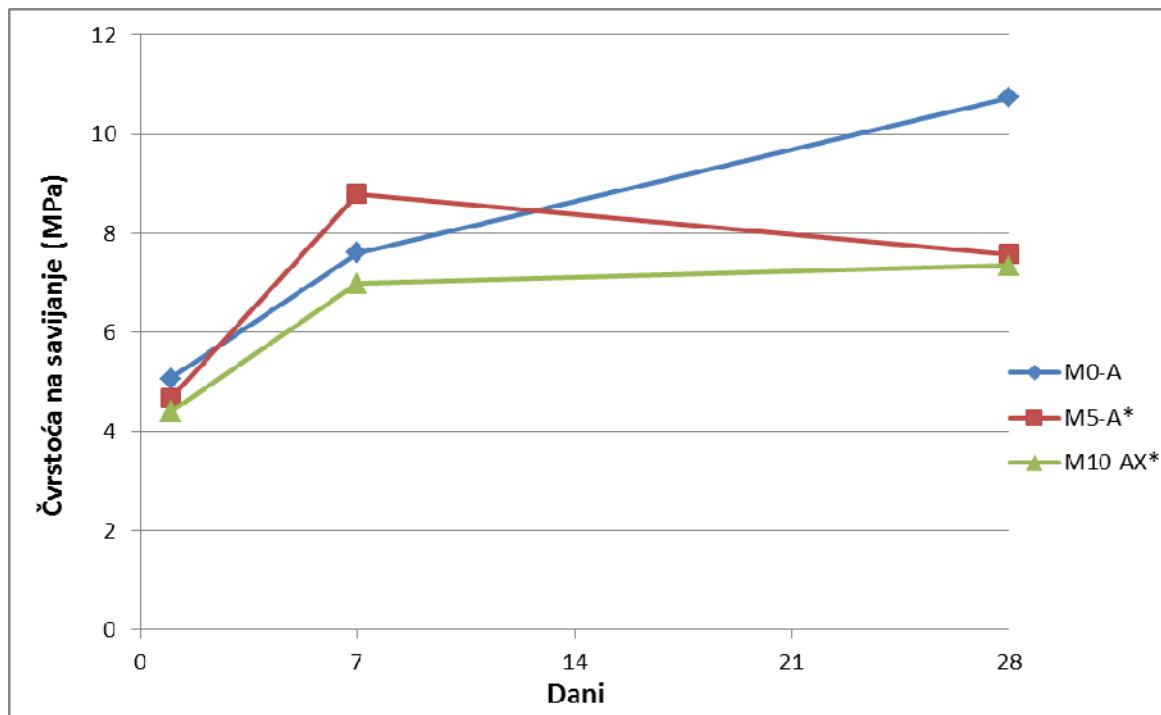


Slika 79 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,55$)

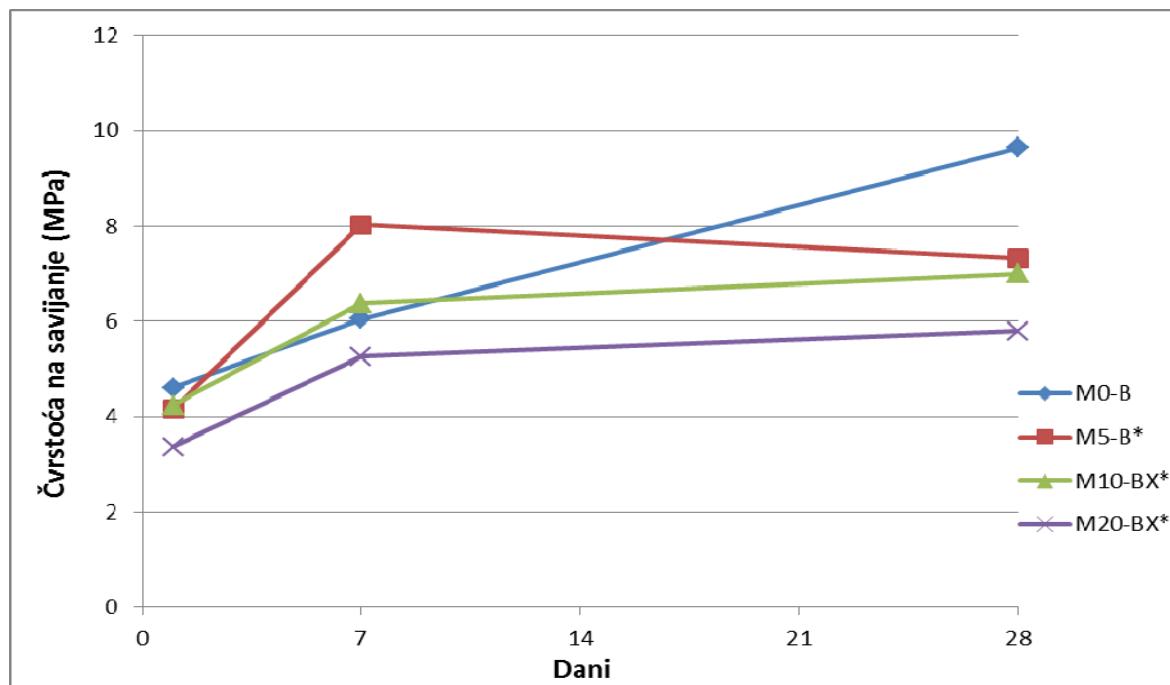


Tablica 13 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 900°C (i na referentnim mješavinama)

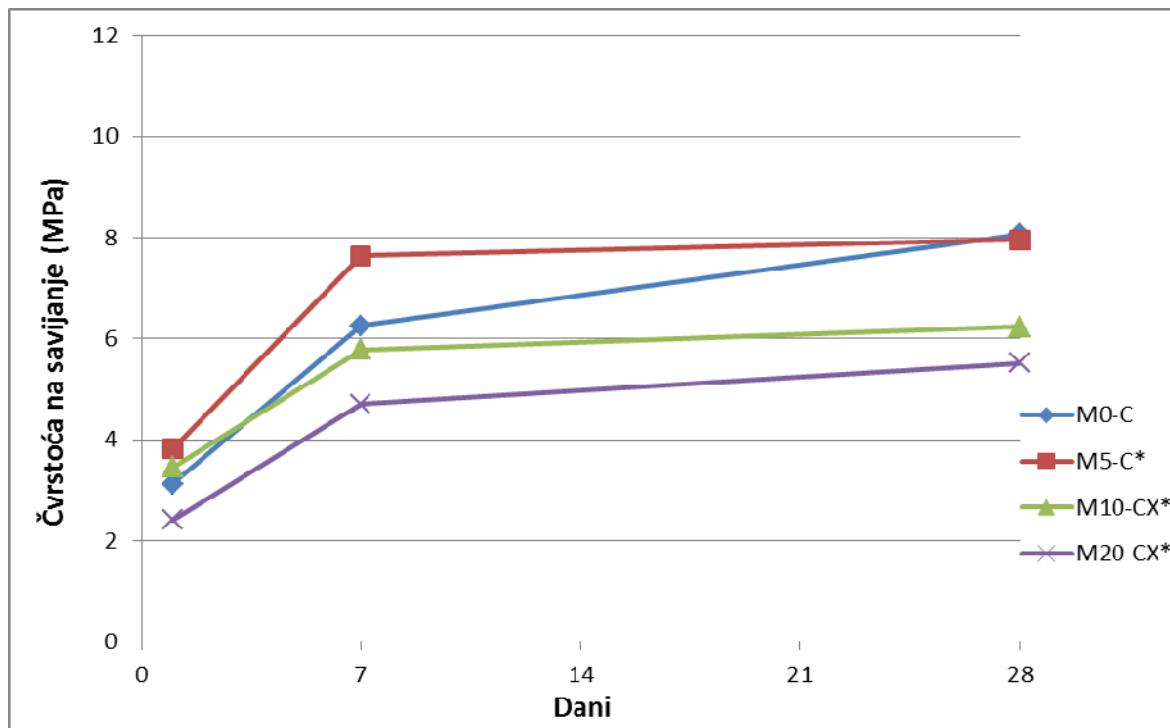
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -A	5,06	7,61	10,74	30,84	65,71	76,66
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
M ₀ -C	3,12	6,26	8,07	17,10	47,67	60,94
M ₅ -A*	4,67	8,79	7,58	29,32	53,82	69,64
M ₅ -B*	4,15	8,03	7,32	23,49	49,65	61,30
M ₅ -C*	3,81	7,64	7,96	17,96	42,65	54,36
M ₁₀ -AX*	4,40	6,98	7,35	25,51	51,27	62,46
M ₁₀ -BX*	4,24	6,38	7,00	22,04	42,49	54,66
M ₁₀ -CX*	3,45	5,78	6,23	16,73	35,62	45,34
M ₂₀ -BX*	3,36	5,26	5,79	17,27	37,38	48,51
M ₂₀ -CX*	2,40	4,70	5,51	12,64	30,47	41,03



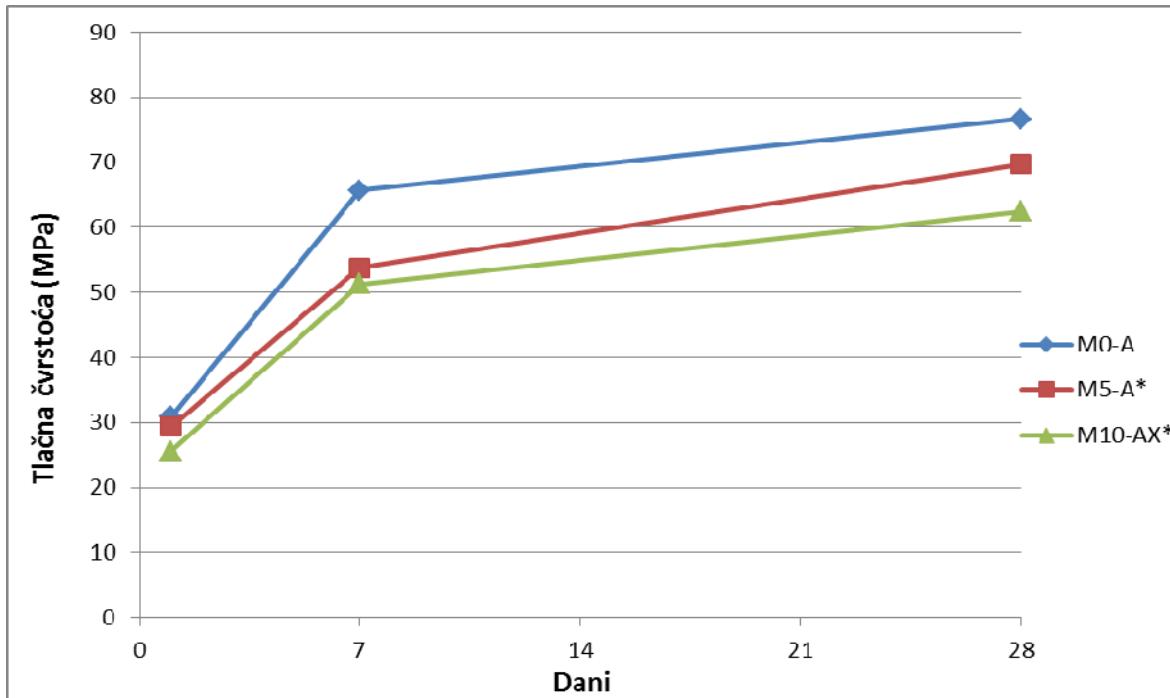
Slika 80 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,45$)



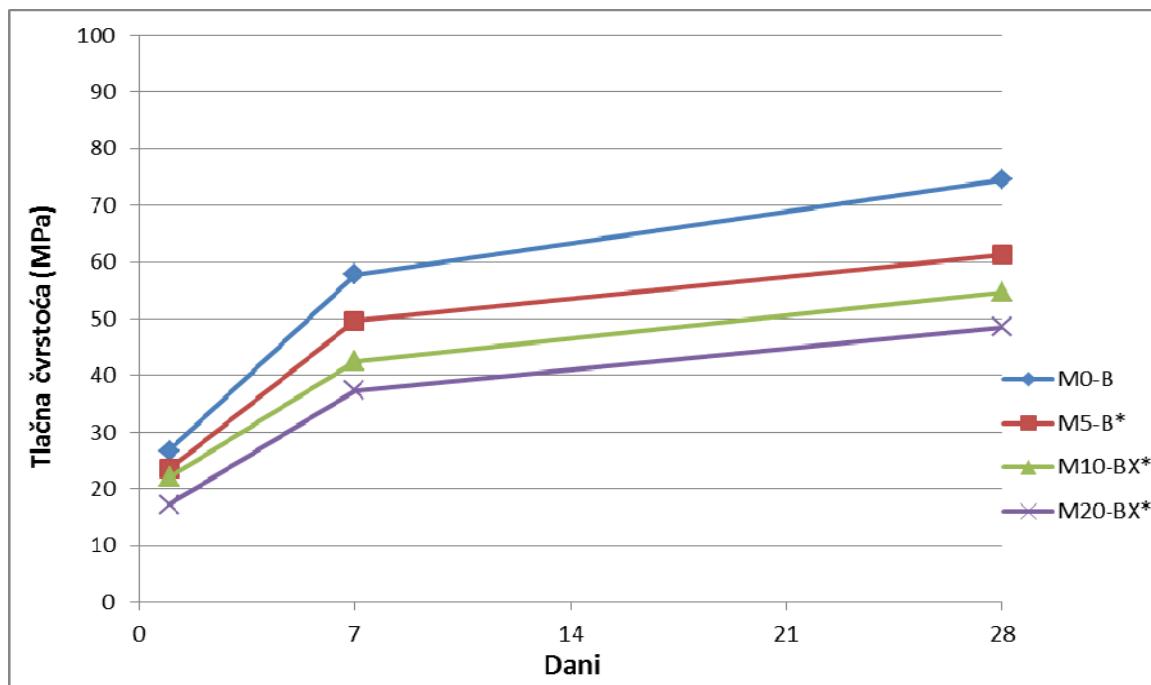
Slika 81 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,50$)



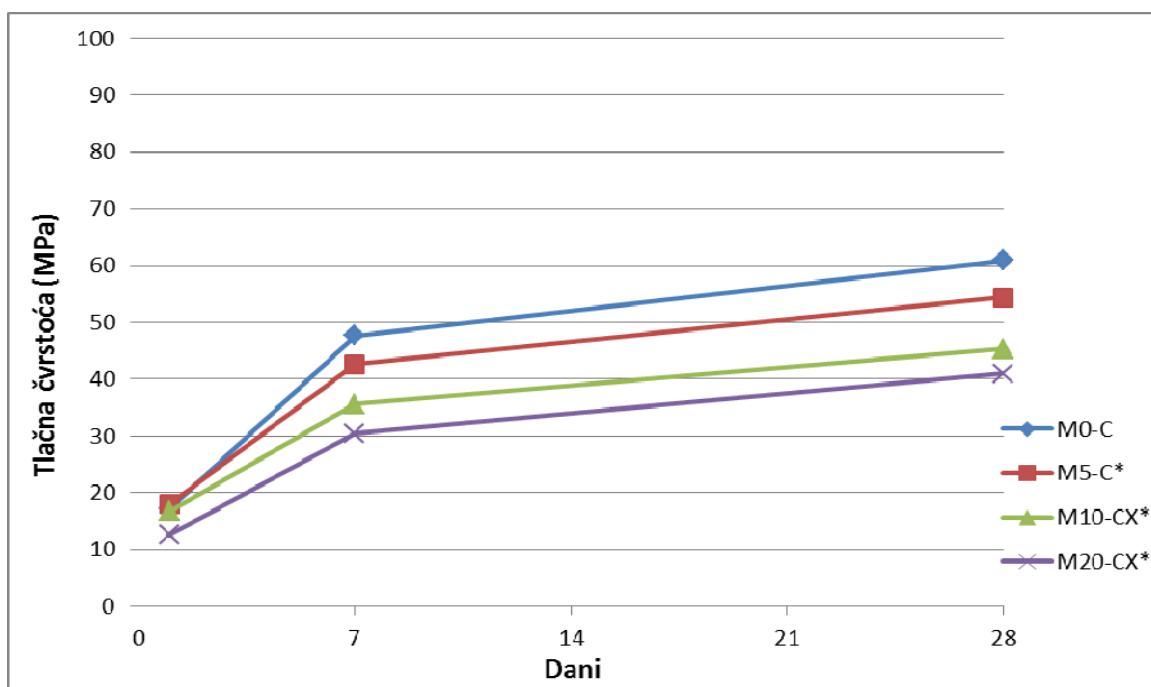
Slika 82 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,55$)



Slika 83 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,45$)



Slika 84 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,50$)

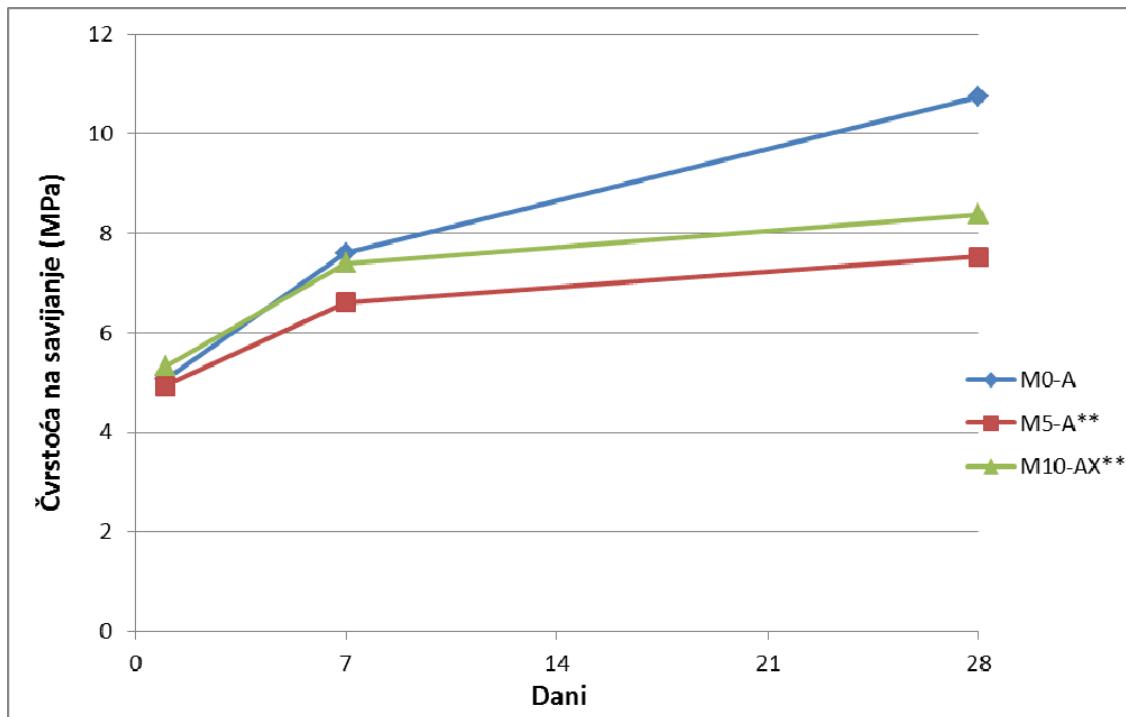


Slika 85 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,55$)

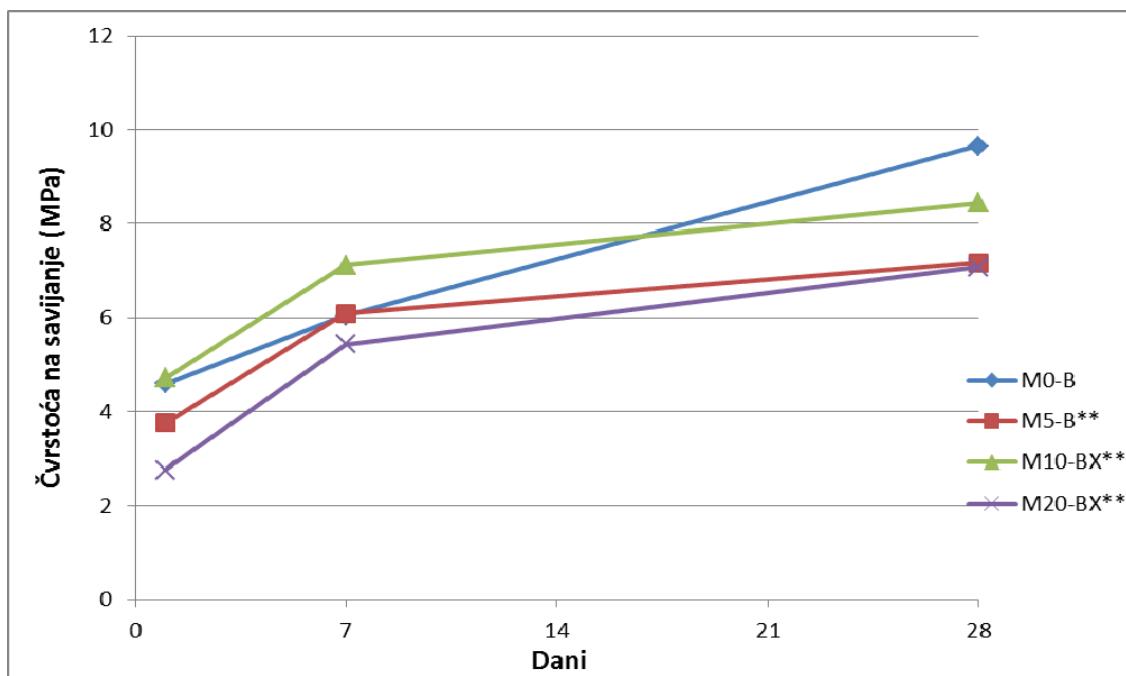


Tablica 14 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 1000°C (i na referentnim mješavinama)

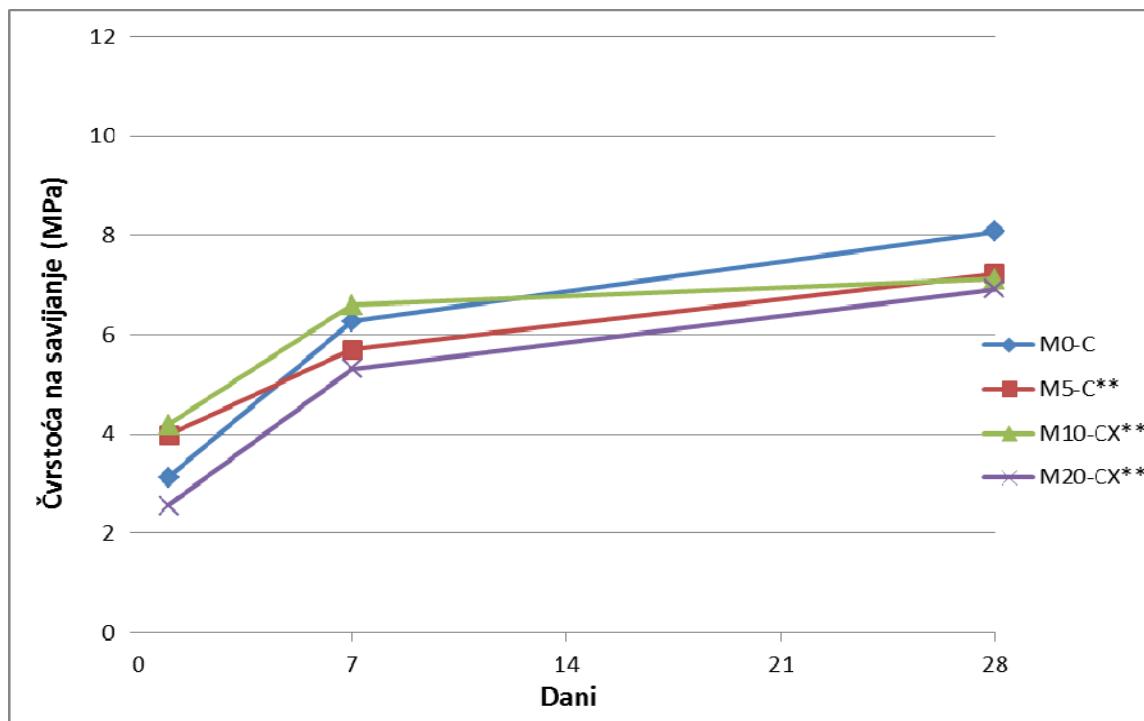
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -A	5,06	7,61	10,74	30,84	65,71	76,66
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
M ₀ -C	3,12	6,26	8,07	17,10	47,67	60,94
M ₅ -A**	4,93	6,61	7,53	31,59	58,92	73,47
M ₅ -B**	3,75	6,09	7,17	20,24	47,91	57,34
M ₅ -C**	3,97	5,70	7,22	22,09	43,12	56,80
M ₁₀ -AX**	5,33	7,40	8,38	32,45	63,86	77,58
M ₁₀ -BX**	4,72	7,12	8,43	27,94	54,80	66,95
M ₁₀ -CX**	4,18	6,59	7,12	22,84	46,20	59,25
M ₂₀ -BX**	2,76	5,44	7,08	18,08	43,47	52,63
M ₂₀ -CX**	2,55	5,31	6,91	15,97	35,85	47,29



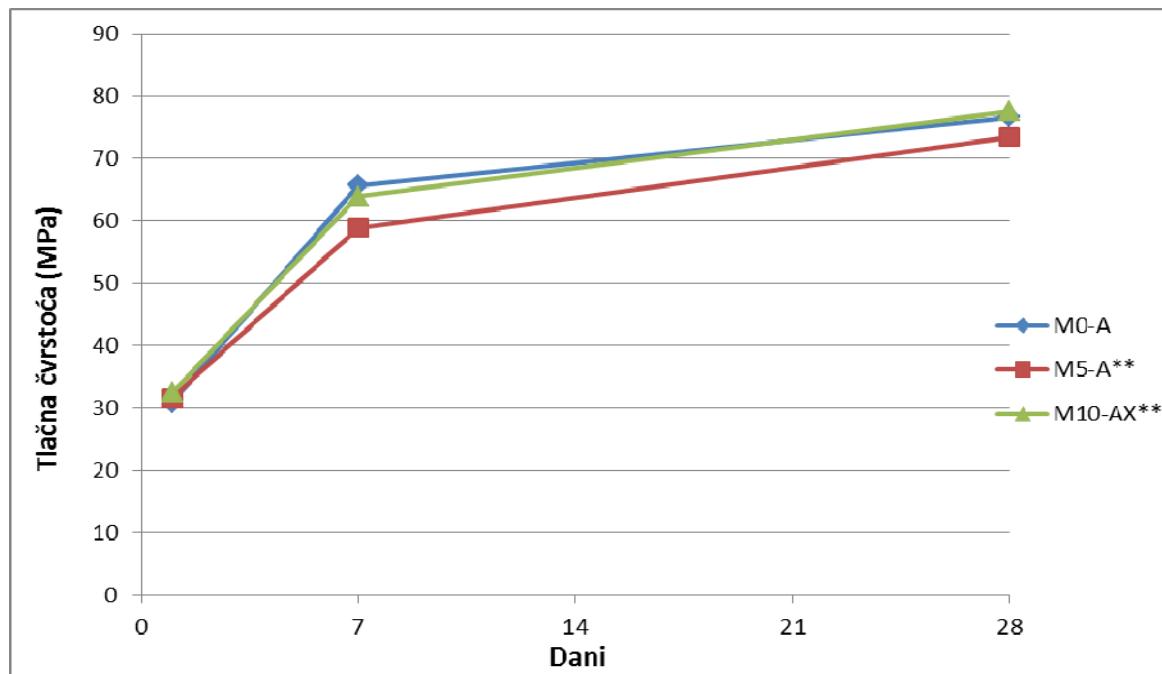
Slika 86 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,45$)



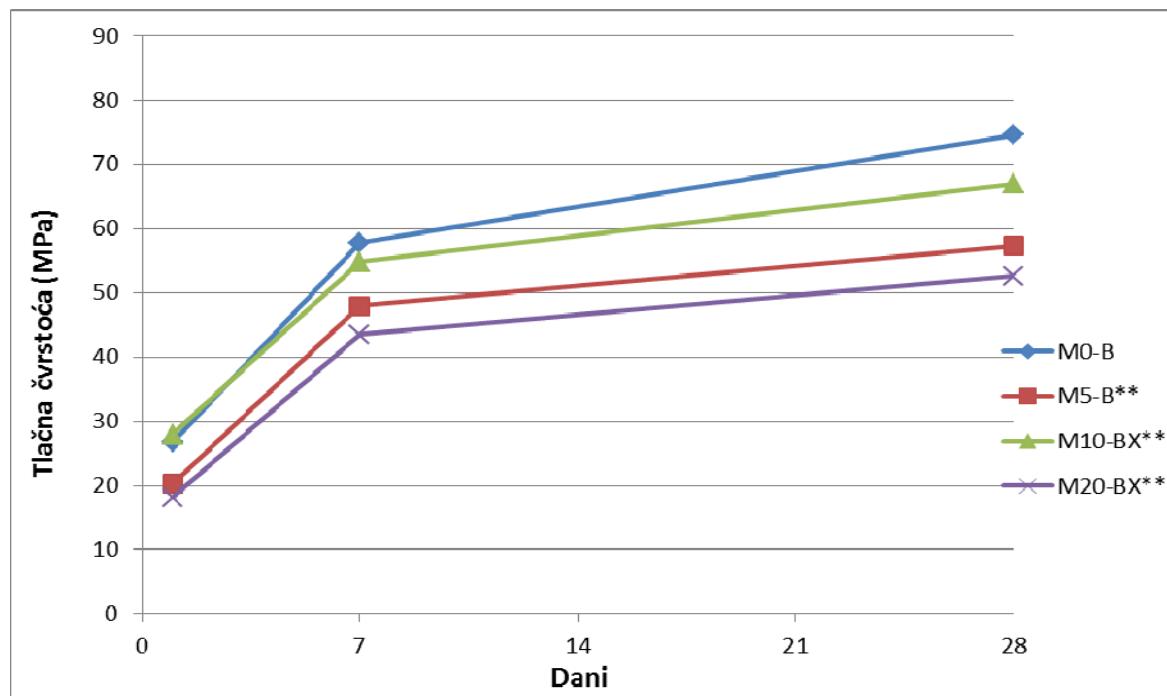
Slika 87 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,50$)



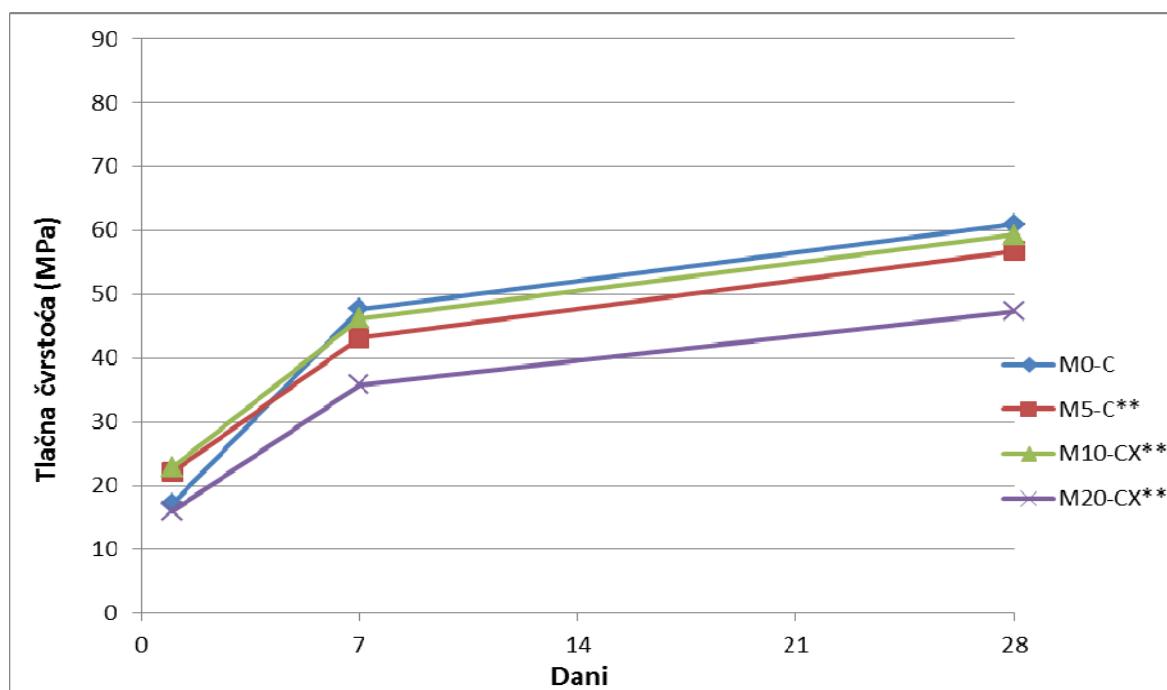
Slika 88 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,55$)



Slika 89 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,45$)



Slika 90 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,50$)



Slika 91 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Koprivnica spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,55$)



8.3.2 Plinopropusnost

Tablica 15 Rezultati ispitivanja plinopropusnosti na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Koprivnica na 800, 900 i 1000°C (i na referentnim mješavinama)

Referentna mješavina – koef. plinopropusnosti ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$) i ocjena otpornosti	Koeficijent plinopropusnosti ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$) i ocjena otpornosti				
	Udio pepela (%)	800°C	900°C	1000°C	
v/ve = 0,45	480 (mala)	5	262 (srednja)	522 (mala)	429 (mala)
		10	304 (mala)	752 (mala)	238 (mala)
		10x	563 (mala)	-	-
v/ve = 0,50	804 (mala)	5	563 (mala)	633 (mala)	536 (mala)
		10	339 (mala)	-	-
		10x	652 (mala)	880 (mala)	276 (srednja)
		20	941 (mala)	973 (mala)	253 (srednja)
v/ve = 0,55	1408 (vrlo mala)	5	864 (mala)	1365 (vrlo mala)	888 (mala)
		10	228 (srednja)	-	-
		10x	1116 (vrlo mala)	1308 (vrlo mala)	659 (mala)
		20	1969 (vrlo mala)	1056 (vrlo mala)	542 (mala)

^x mješavine u koje je dodana voda kako bi se postigla konzistencija koja odgovara referentnim mješavinama



8.4 Analiza rezultata ispitivanja na cementnom mortu u očvrsnulom stanju

Vrijednosti čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće rastu s porastom vremena hidratacije za gotovo sve analizirane uzorke što je znak da u mortovima s dodanim pepelom dolazi do pucolanskih reakcija i posljedičnih pozitivnih učinaka na mehaničke karakteristike. Međutim, ovaj rast čvrstoća između 7-dnevnih i 28-dnevnih nije značajan kao na ranije analiziranim uzorcima s dodatkom pepela s UPOV Karlovac. Naime, pojedini uzorci pokazali su i niže 28-dnevne čvrstoće na savijanje u odnosu na 7-dnevne. Rane čvrstoće (1-dnevne) pokazale su se manje osjetljivima na dodatak pepela (u odnosu na provedene analize s dodatkom pepela s UPOV Karlovac), a uzrok tome leži i u povećanoj temperaturi mješavina s dodatkom pepela s UPOV Koprivnica i bržoj reakciji što je već spomenuto.

U skladu s očekivanim, najveće čvrstoće razvile su mješavine s najmanjim (0,45), a najslabije s najvećim (0,55) vodovezivnim omjerom.

Iz prikazanog seta podataka moglo bi se zaključiti da je optimalna temperatura spaljivanja mulja, sa stajališta postizanja najboljih mehaničkih karakteristika mortova s ugrađenim pepelom, 1000°C jer su mješavine s pepelom dobivenim na 1000°C razvile nešto veće čvrstoće u odnosu na ostale mješavine.

Čvrstoće generalno opadaju s povećanjem udjela dodanog pepela. Također, ovaj pad čvrstoća je nešto veći u odnosu na analizirane uzorke s UPOV Karlovac. Ipak, pozitivna je činjenica da su svi analizirani uzorci osim jednog (mješavina M₂₀-CX*) zadovoljili klasu korištenog cementa (42,5 MPa), odnosno sve 28-dnevne tlačne čvrstoće bile su veće od 42,5 MPa.

Analizirajući prikazane rezultate ispitivanja plinopropusnosti može se uočiti generalni trend povećanja koeficijenta plinopropusnosti, odnosno smanjenja otpornosti morta s povećanjem udjela dodanog pepela. S obzirom na temperaturu spaljivanja mulja primjetne su znatno veće vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti uzorka s ugrađenim pepelom dobivenim na 900°C . Drugim riječima otpornost uzorka morta s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja na 900°C je lošija u odnosu na one s pepelom dobivenim na 800 i 1000°C .

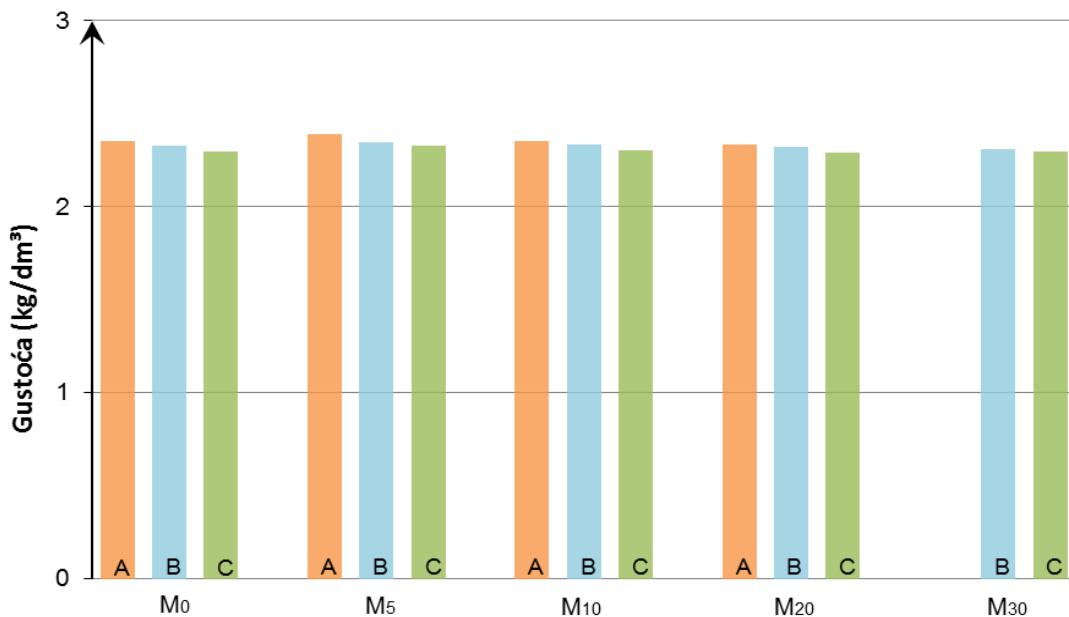


9. Rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb

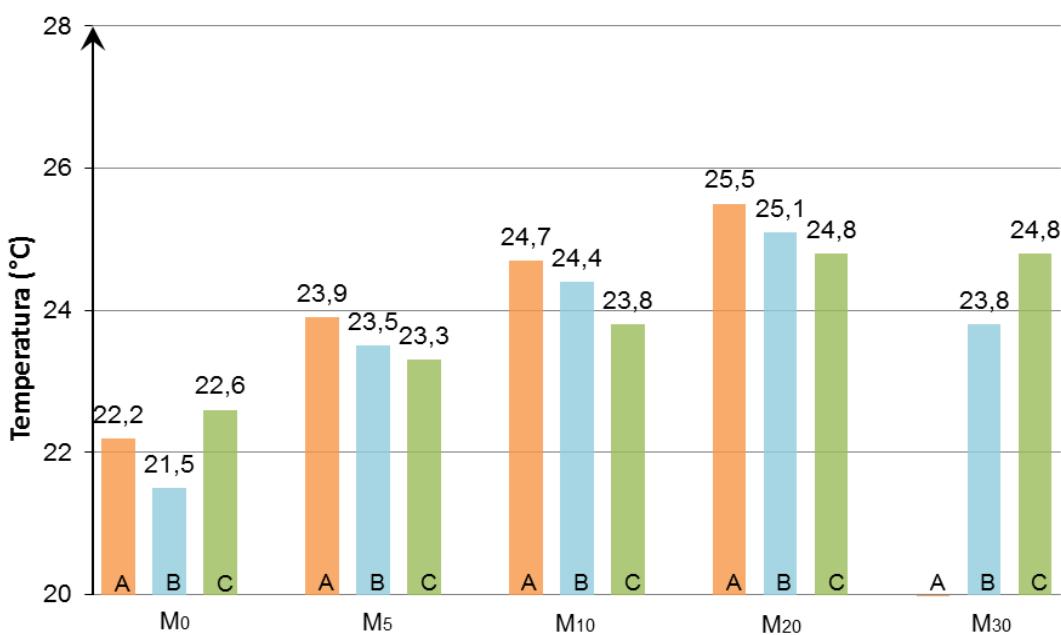
9.1 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju

Tablica 16 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb na 800°C (i na referentnim mješavinama)

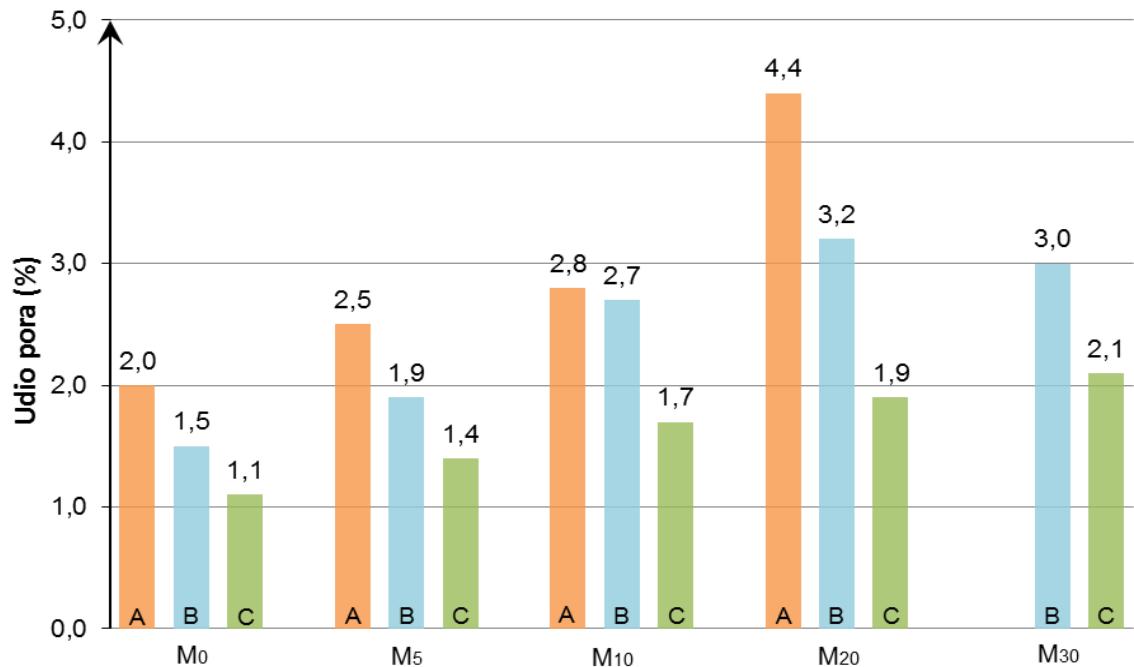
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -A	2,354	22,2	2,0	40	85	113,5
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
M ₀ -C	2,295	22,6	1,1	105	160	189,8
M ₅ -A	2,387	23,9	2,5	15	60	115,0
M ₅ -B	2,346	23,5	1,9	35	70	151,0
M ₅ -C	2,325	23,3	1,4	50	90	169,0
M ₁₀ -A	2,352	24,7	2,8	25	40	109,0
M ₁₀ -B	2,334	24,4	2,7	45	80	146,0
M ₁₀ -C	2,302	23,8	1,7	55	105	176,5
M ₂₀ -A	2,331	25,5	4,4	10	30	106,0
M ₂₀ -B	2,324	25,1	3,2	40	65	129,0
M ₂₀ -C	2,291	24,8	1,9	55	90	165,0
M ₃₀ -B	2,306	23,8	3,0	25	65	116,5
M ₃₀ -C	2,294	24,8	2,1	45	105	165,0



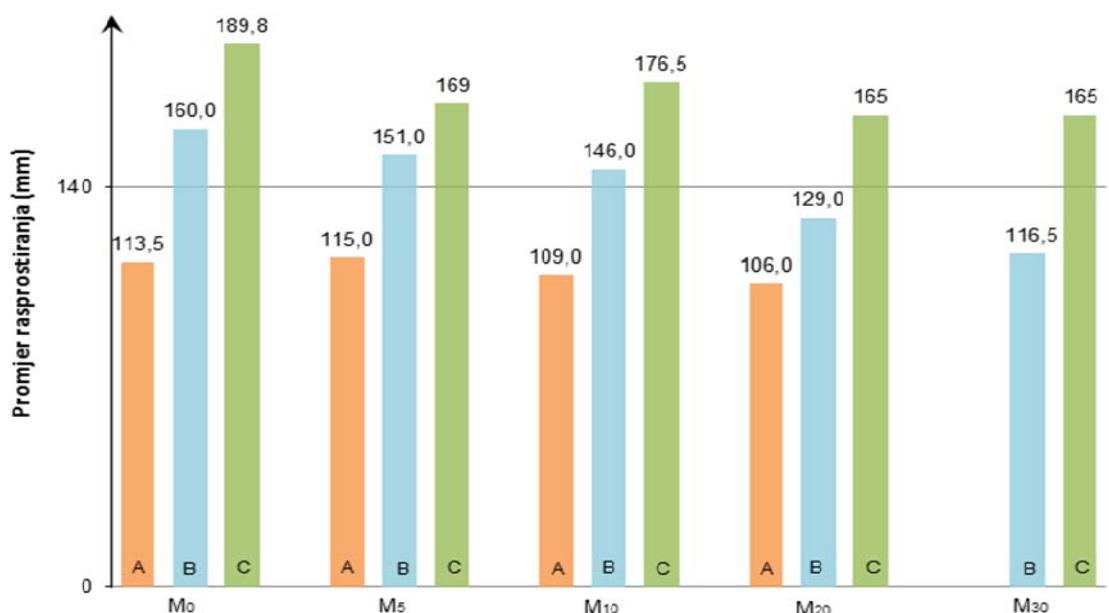
Slika 92 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800°C



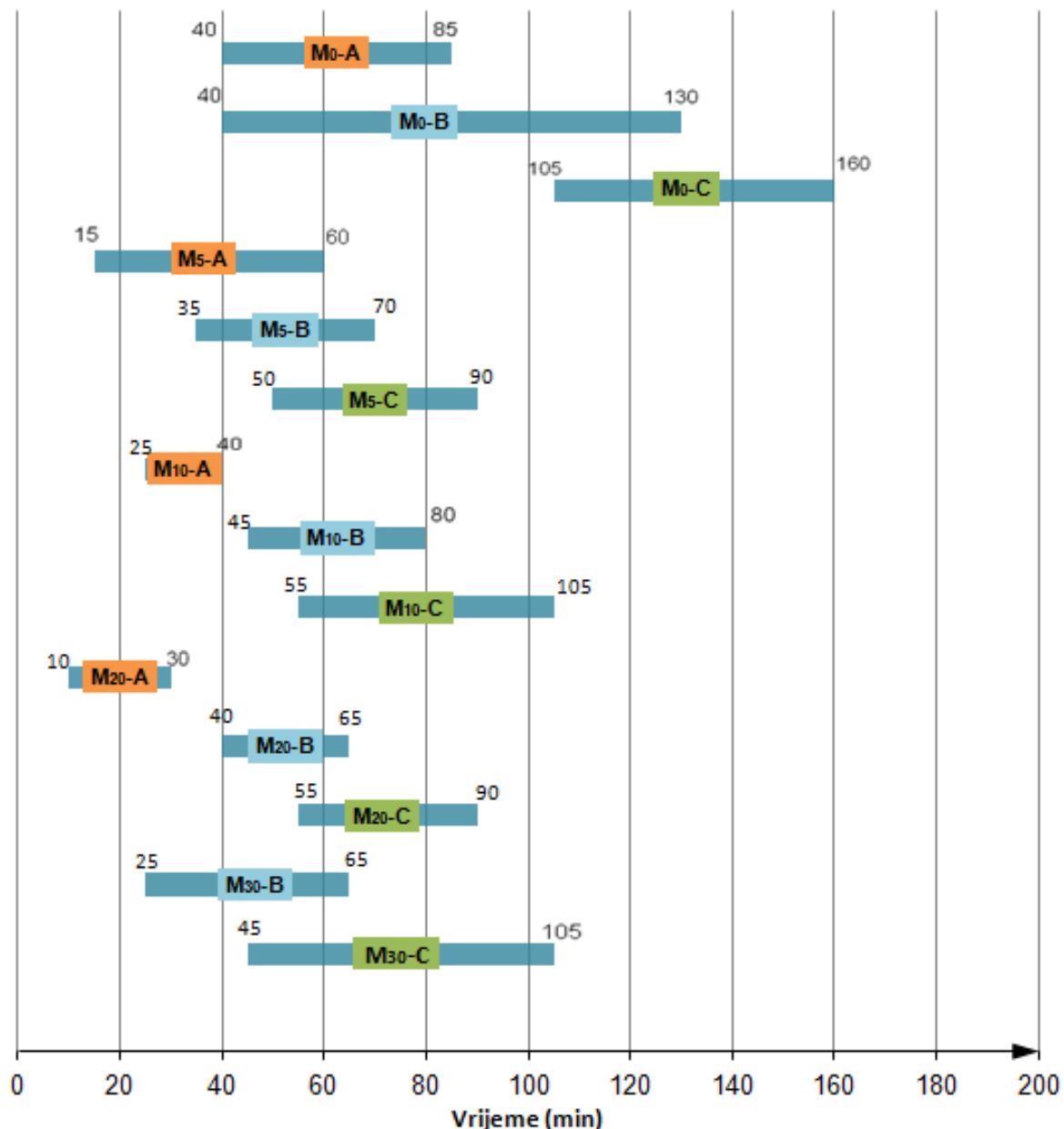
Slika 93 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800°C



Slika 94 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800°C



Slika 95 Konzistencija (promjer rasprostiranja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800°C



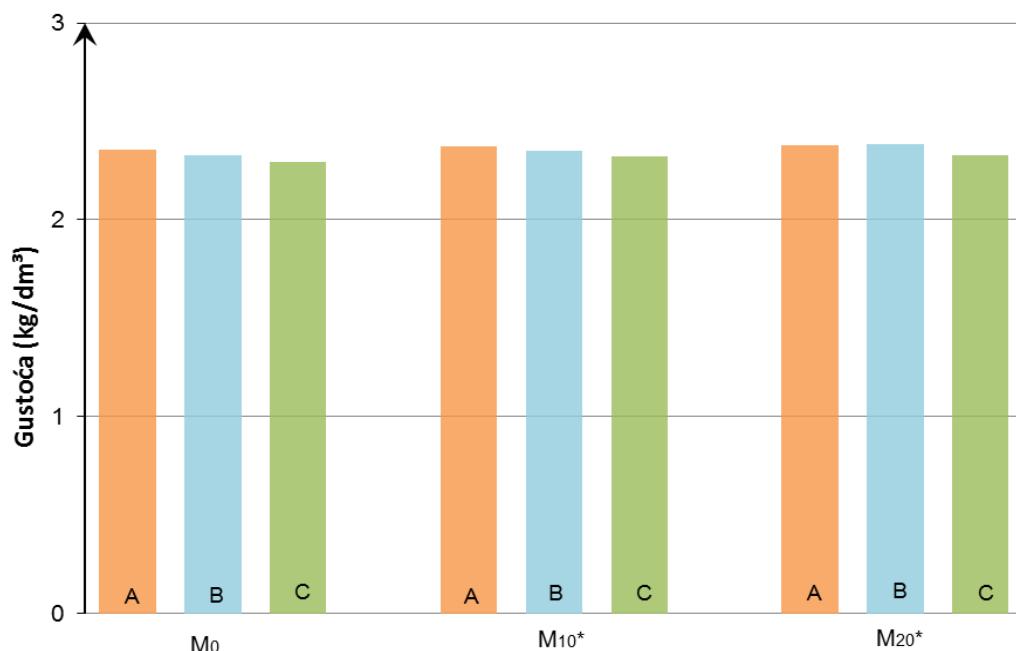
Slika 96 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800°C



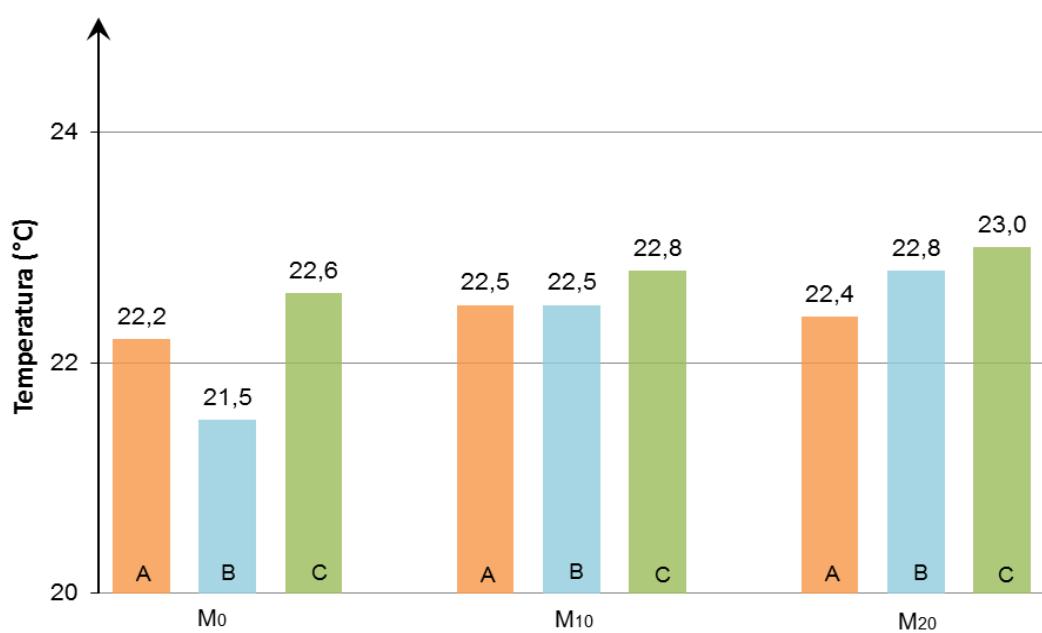
Tablica 17 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb na 900°C (i na referentnim mješavinama)

Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -A	2,354	22,2	2,0	40	85	113,5
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
M ₀ -C	2,295	22,6	1,1	105	160	189,8
M ₁₀ -A*	2,370	22,5	-	10	40	101,0
M ₁₀ -B*	2,349	22,5	-	40	65	129,0
M ₁₀ -C*	2,324	22,8	-	65	100	181,0
M ₂₀ -A*	2,378	22,4	-	20	30	100,5
M ₂₀ -B*	2,384	22,8	-	35	55	119,0
M ₂₀ -C*	2,325	23,0	-	55	75	158,0

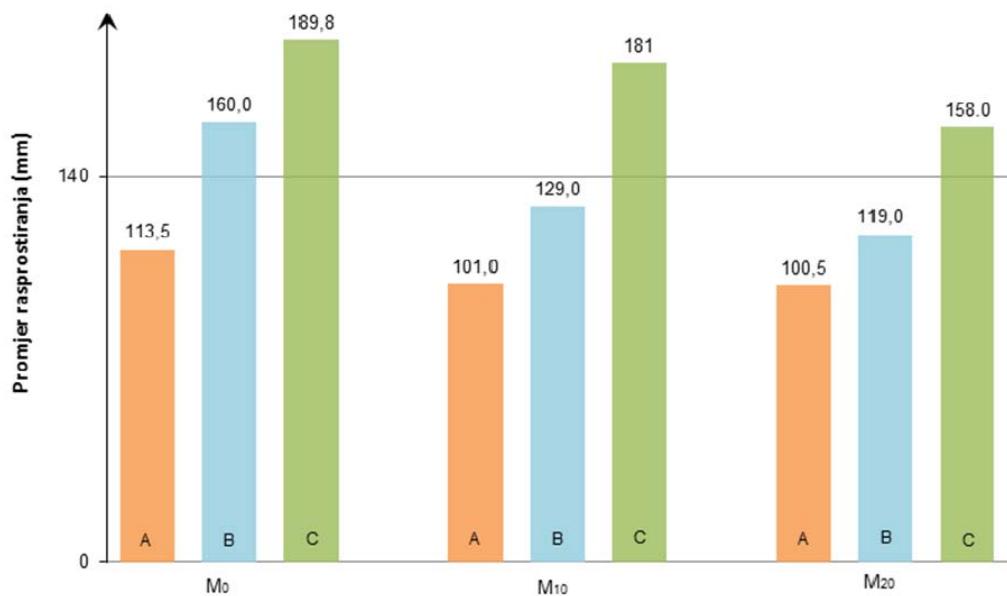
*zbog kvara porometra nije bilo moguće odrediti udio pora



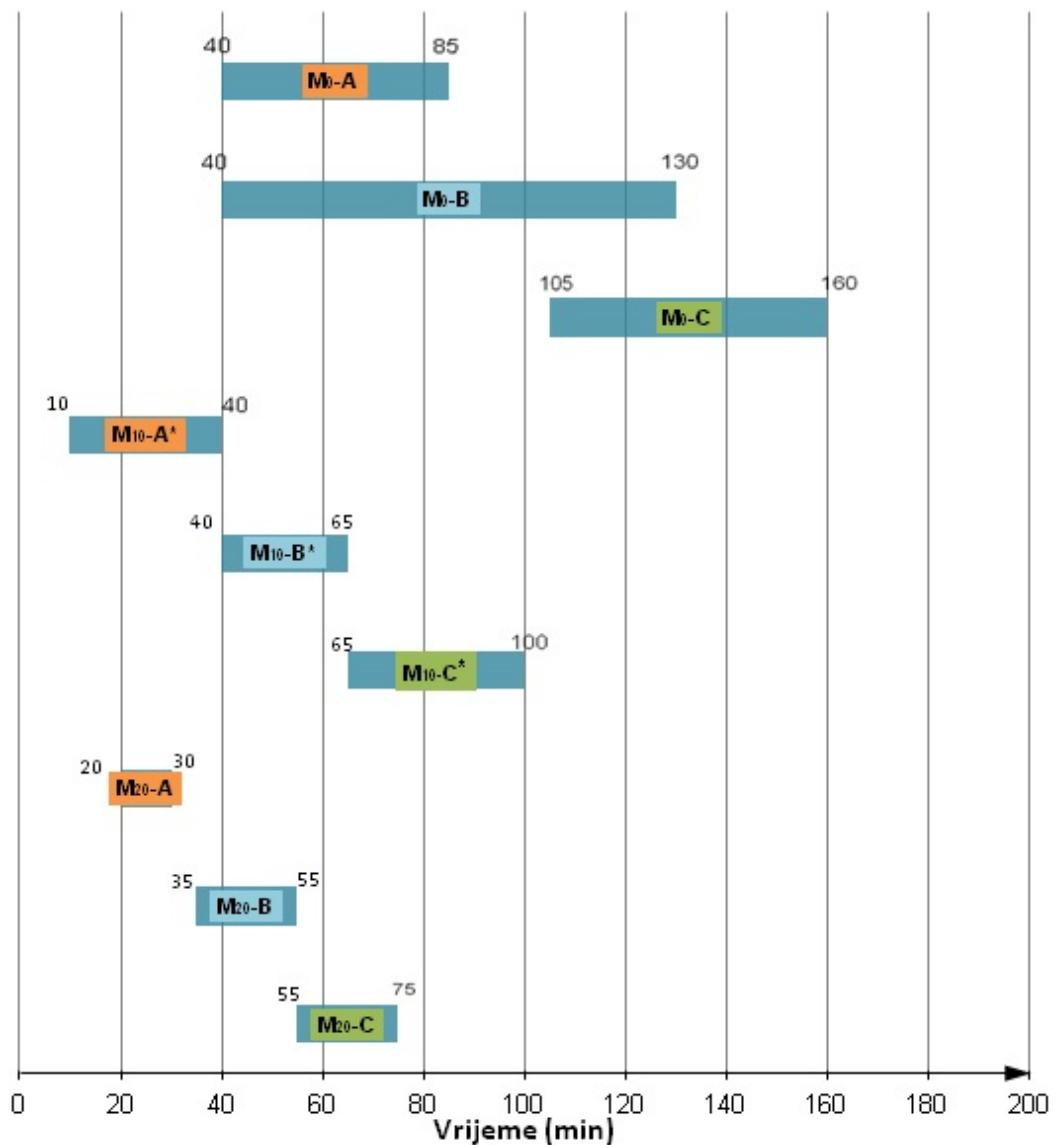
Slika 97 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 900°C



Slika 98 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 900°C



Slika 99 Konzistencija (promjer rasprostiranja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 900°C

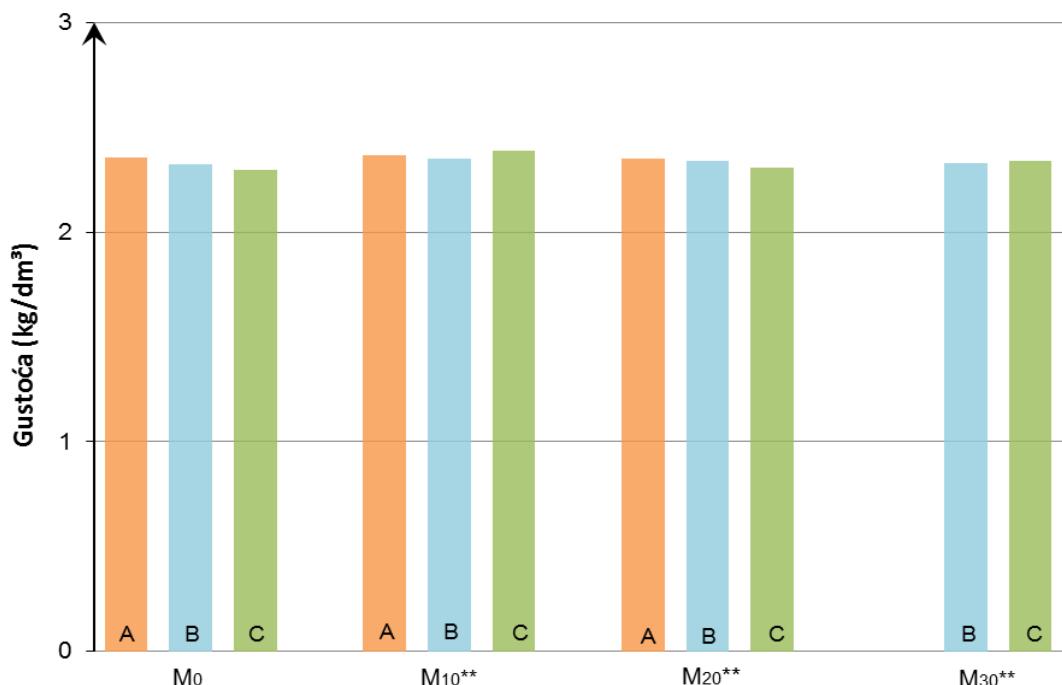


Slika 100 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 900°C

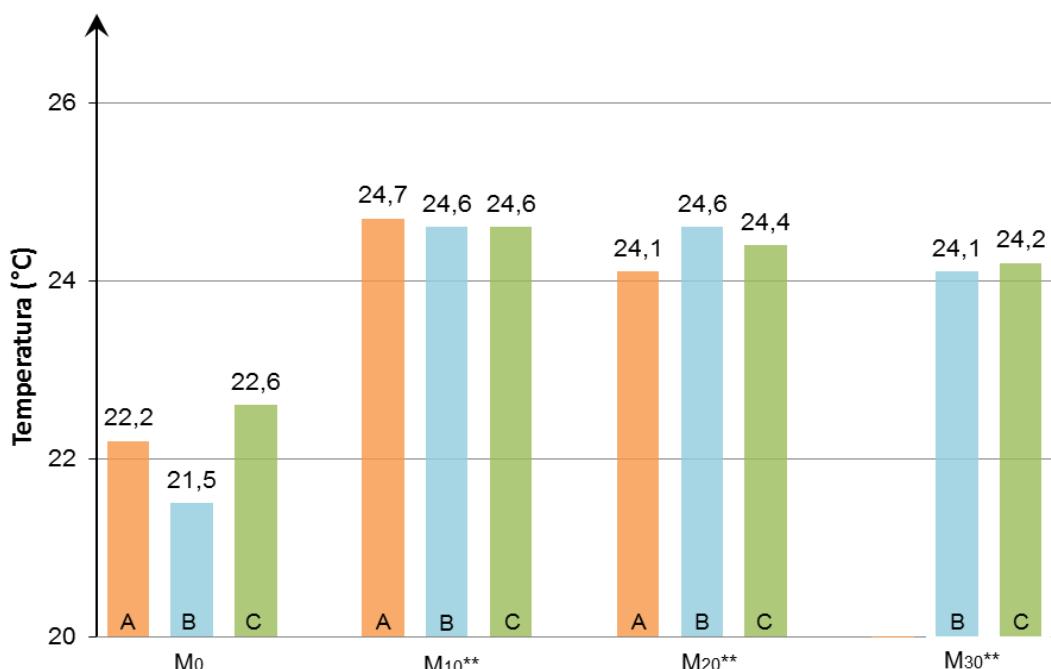


Tablica 18 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb na 1000°C (i na referentnim mješavinama)

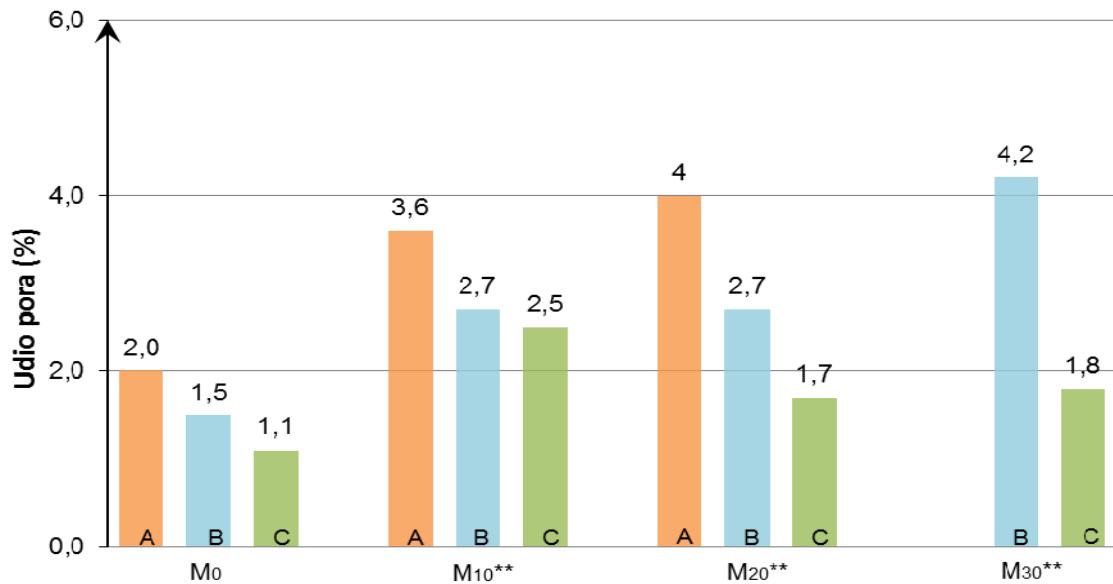
Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -A	2,354	22,2	2,0	40	85	113,5
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
M ₀ -C	2,295	22,6	1,1	105	160	189,8
M ₁₀ -A**	2,366	24,7	3,6	10	25	107,0
M ₁₀ -B**	2,349	24,6	2,7	40	80	129,5
M ₁₀ -C**	2,390	24,6	2,5	55	90	170,0
M ₂₀ -A**	2,351	24,1	4,0	10	60	101,5
M ₂₀ -B**	2,340	24,6	2,7	30	75	117,0
M ₂₀ -C**	2,307	24,4	1,7	55	100	162,0
M ₃₀ -B**	2,331	24,1	4,2	20	60	112,5
M ₃₀ -C**	2,299	24,2	1,8	40	65	140,0



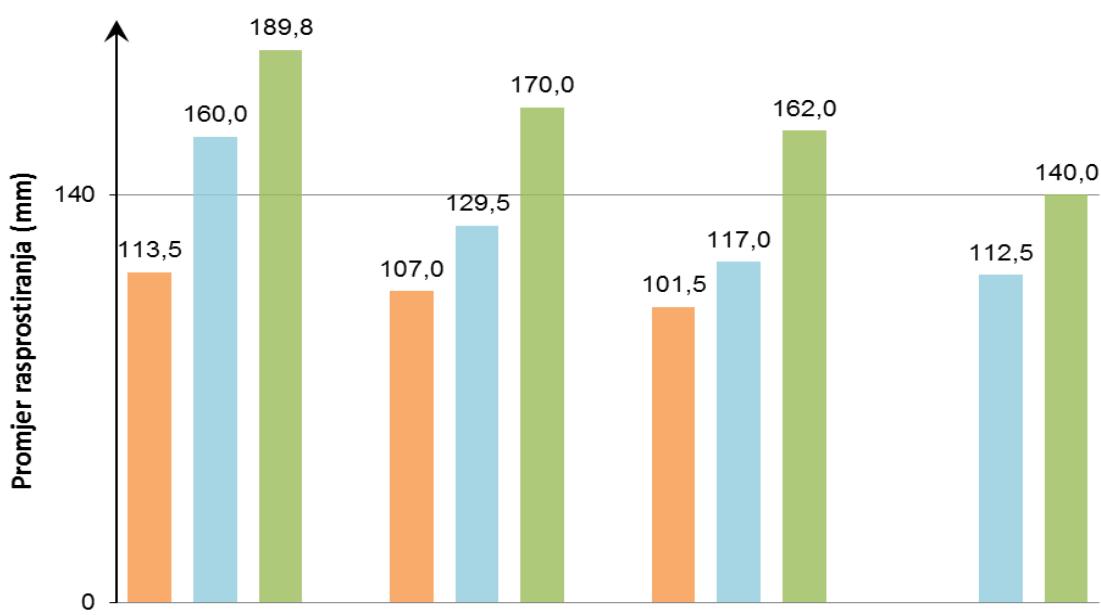
Slika 101 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 1000°C



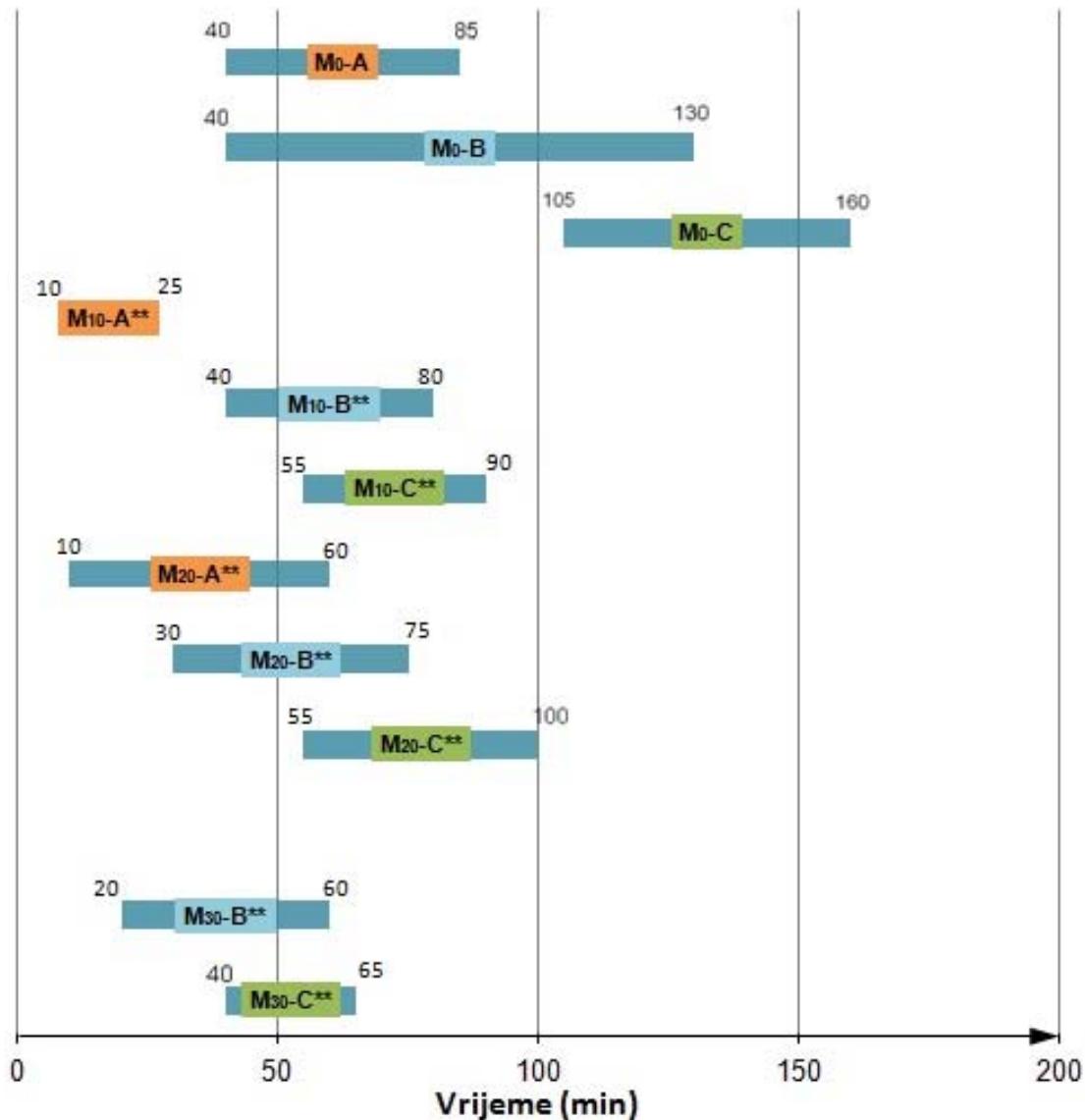
Slika 102 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 1000°C



Slika 103 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 1000°C



Slika 104 Konzistencija (promjer rasprstiranja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 1000°C



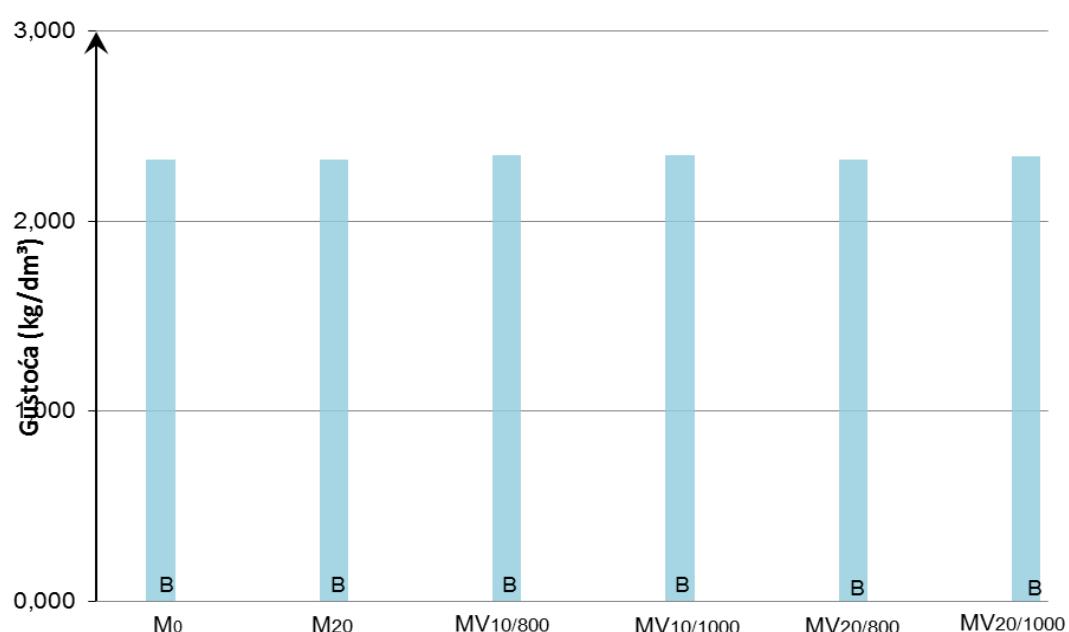
Slika 105 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 1000°C



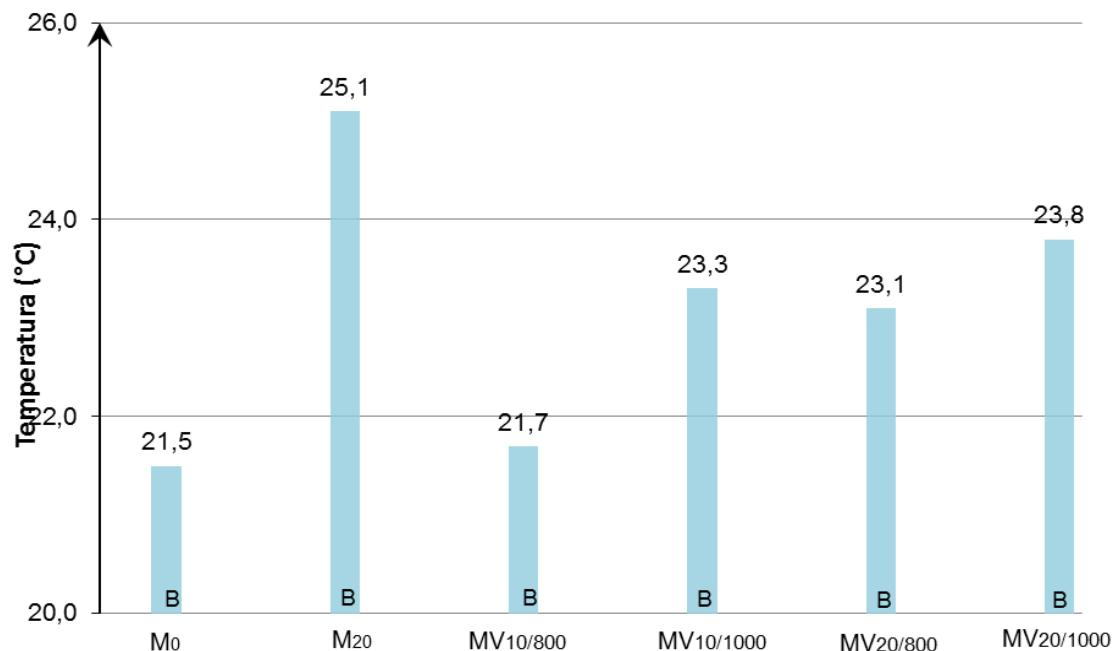
Tablica 19 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju s ugrađenih 20% pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb uz 10 i 20%-tni dodatak vapna pri spaljivanju, na temperaturama 800 i 1000°C (i rezultati na referentnoj mješavini) – $v/v_e=0,50$

Oznaka mješavine	Gustoća (kg/dm ³)	Temperatura (°C)	Udio pora (%)	Vrijeme vezivanja (min)		Konzistencija (promjer rasprostiranja) (mm)
				početak	kraj	
M ₀ -B	2,325	21,5	1,5	40	130	160,0
MV10/800	2,345	21,7	-	40	105	153,0
MV10/1000	2,348	23,3	-	60	135	147,5
MV20/800	2,326	23,1	-	80	130	154,0
MV20/1000	2,342	23,8	-	40	80	137,0

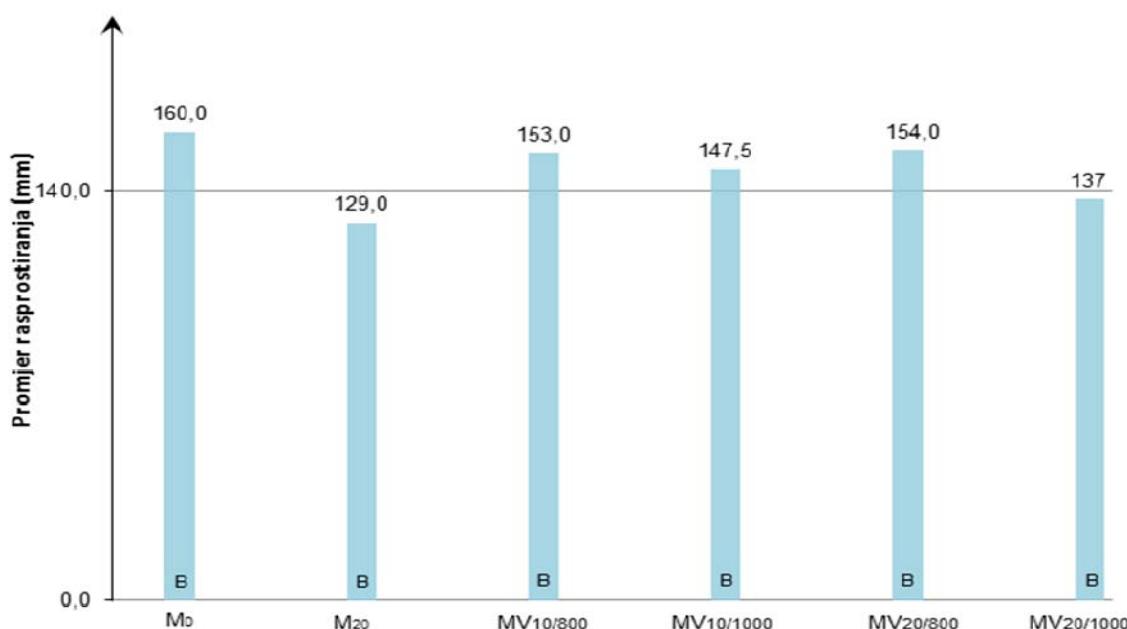
*zbog kvara porometra nije bilo moguće odrediti udio pora



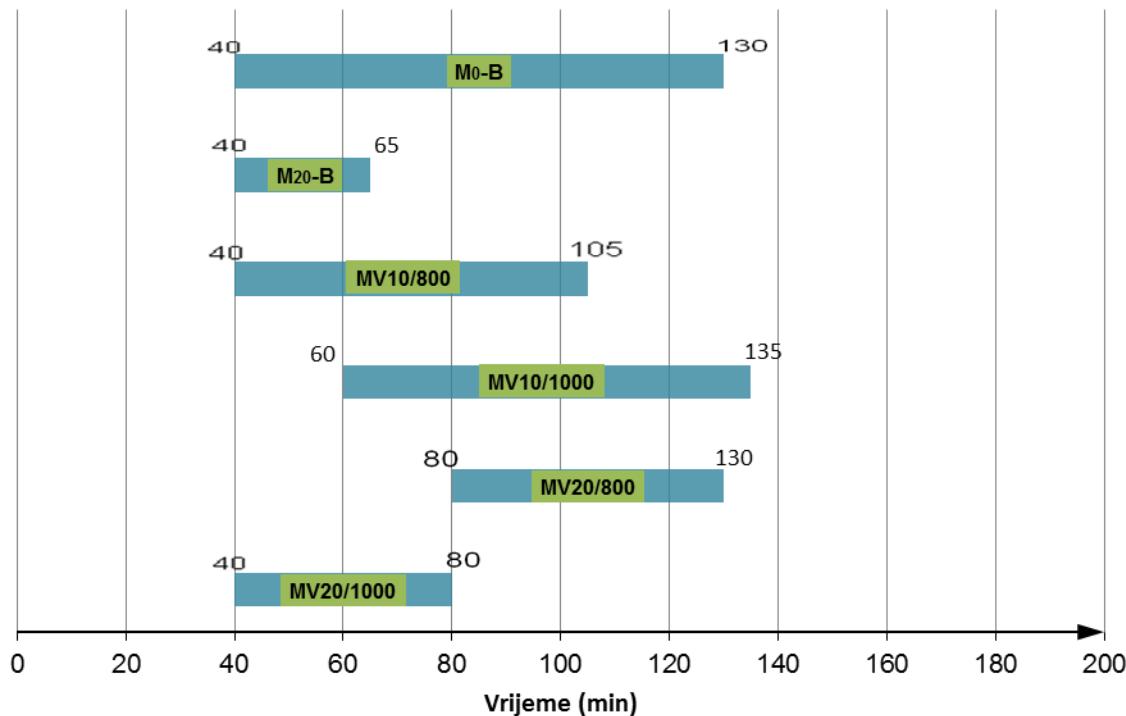
Slika 106 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenih 20% pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb uz 0, 10 i 20% dodanog vapna, na temperaturama 800 i 1000°C ($v/v_e=0,50$)



Slika 107 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenih 20% pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb uz 0, 10 i 20% dodanog vapna pri spaljivanju, na temperaturama 800 i 1000°C (v/ve=0,50)



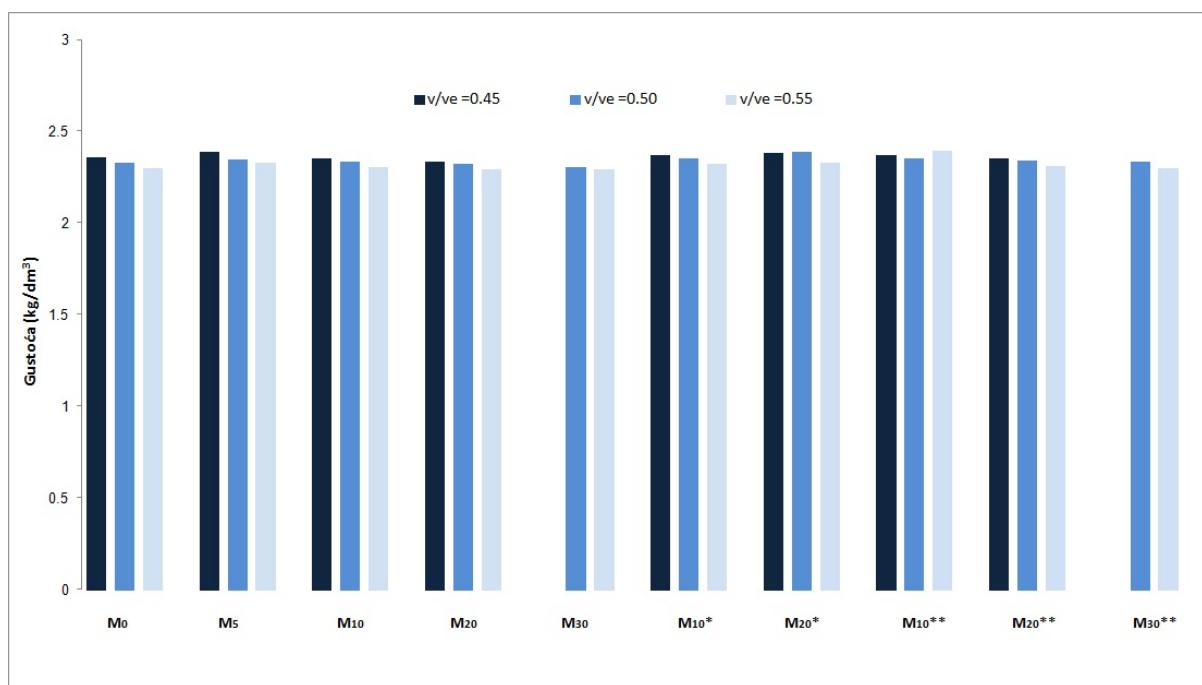
Slika 108 Konzistencija (promjer rasprostiranja) svježeg cementnog morta s ugrađenih 20% pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb uz 0, 10 i 20% dodanog vapna pri spaljivanju, na temperaturama 800 i 1000°C (v/ve=0,50)



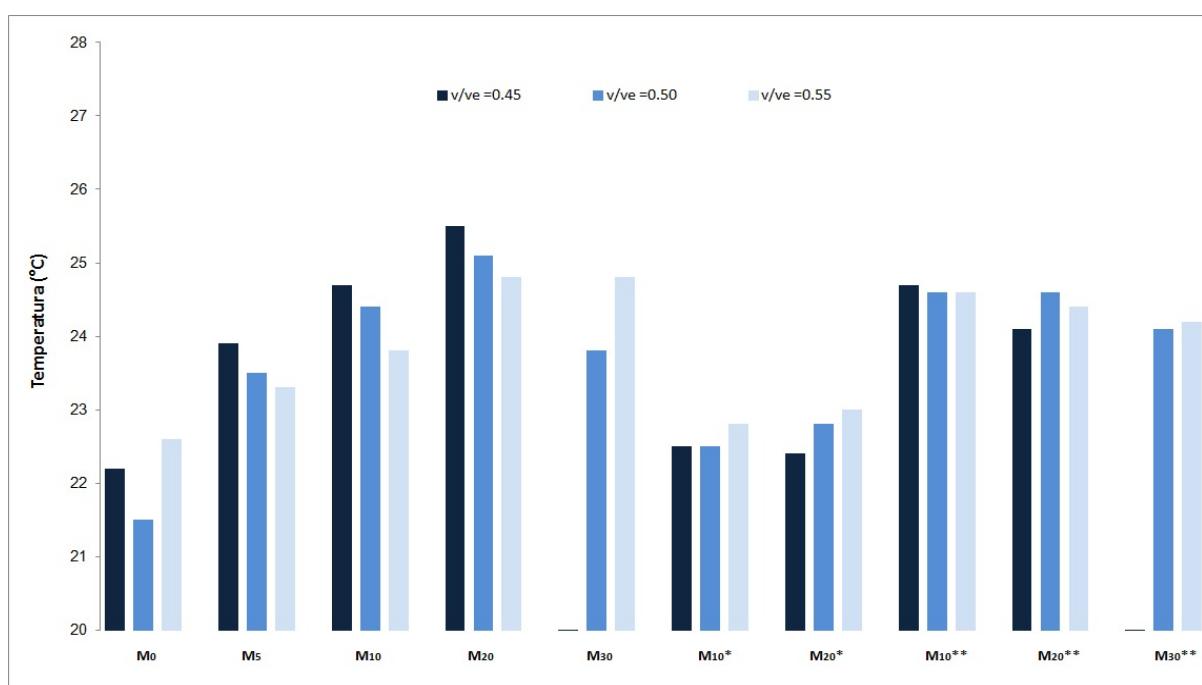
Slika 109 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenih 20% pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb uz 0, 10 i 20% dodanog vapna, na temperaturama 800 i 1000°C ($v/v_e=0,50$)



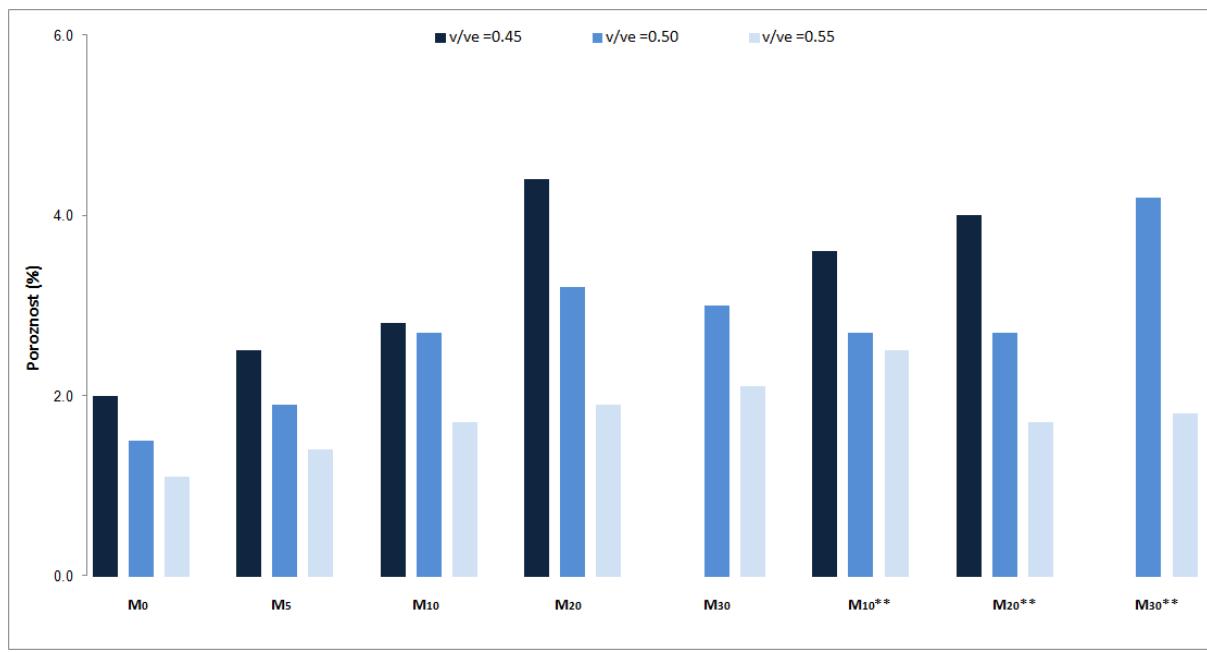
9.2 Analiza rezultata ispitivanja na cementnom mortu u svježem stanju



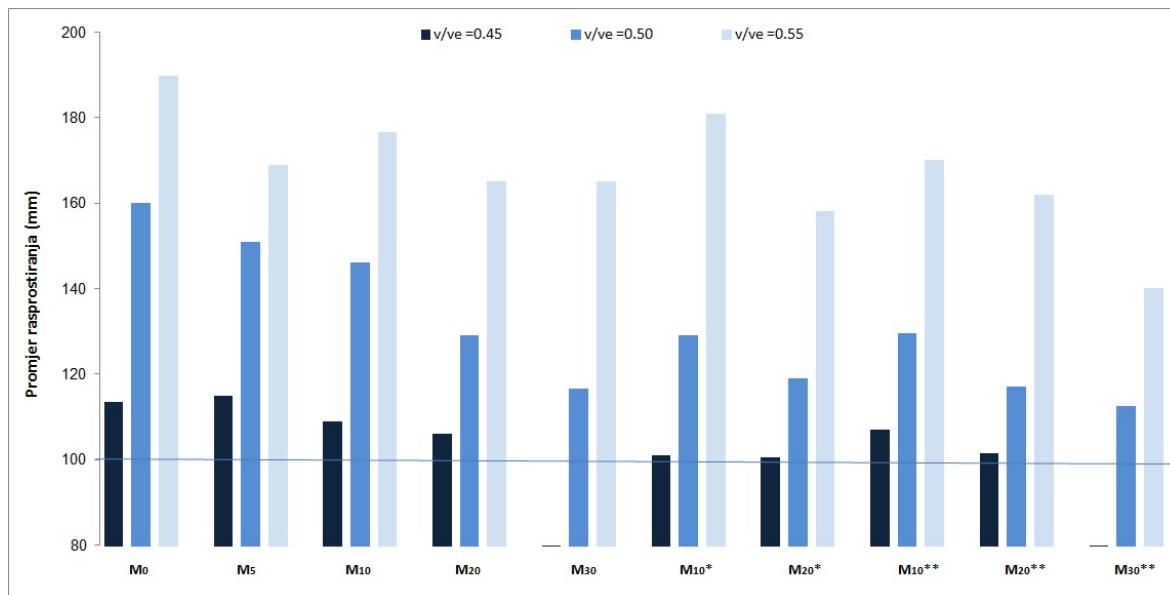
Slika 110 Gustoća svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbrini rezultati



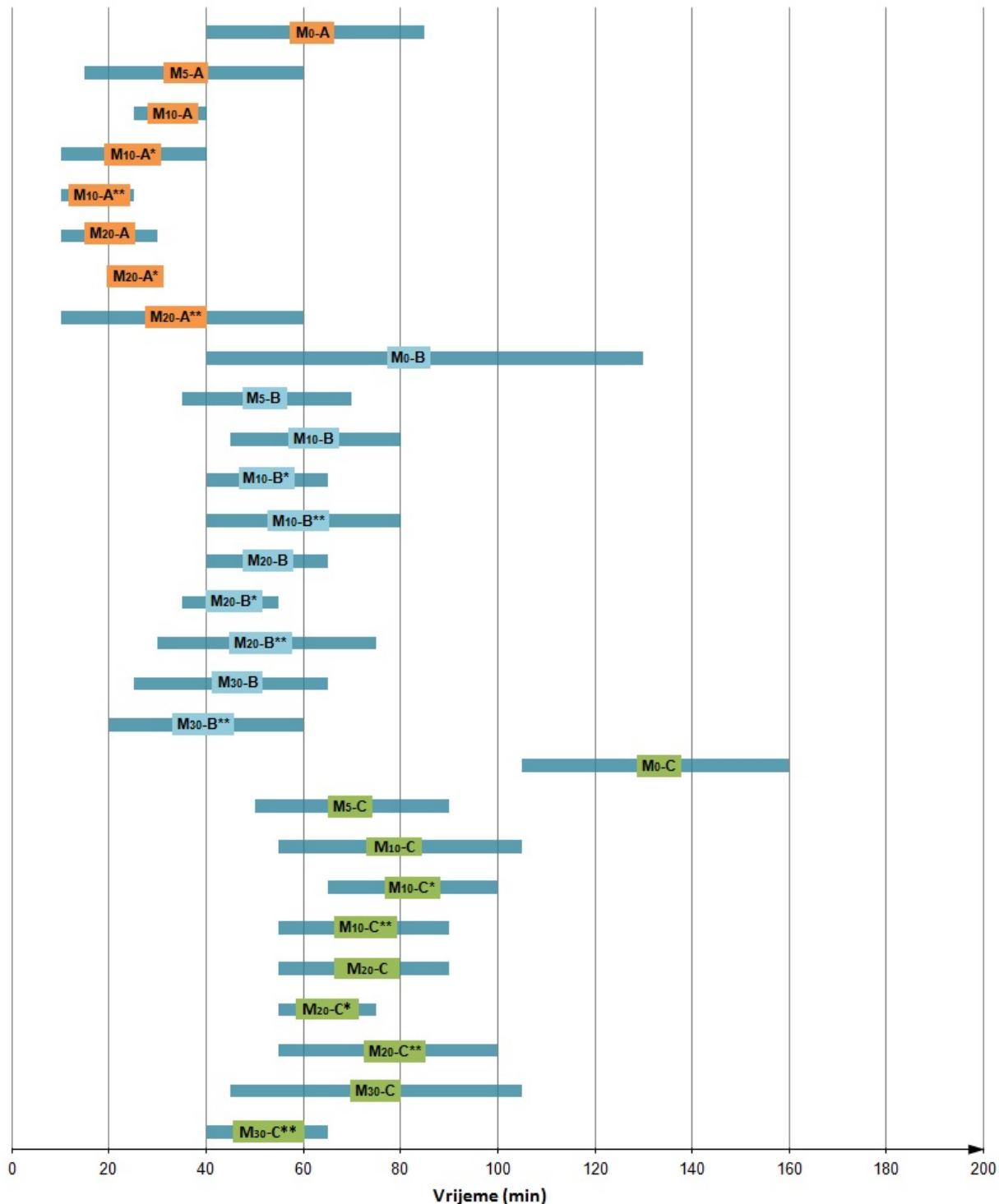
Slika 111 Temperatura svježeg cementnog morta s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbrini rezultati



Slika 112 Udio pora - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800 i 1000°C – zbirni rezultati (tijekom ispitivanja na mješavinama s pepelom dobivenim na 900°C porometar je bio u kvaru)



Slika 113 Konzistencija (promjer rasprostiranja) - rezultati ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C – zbirni rezultati



Slika 114 Vrijeme vezivanja (početak i kraj) – zbirni rezultati ispitivanja na cementnom mortaru s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb dobivenim spaljivanjem na 800, 900 i 1000°C



Analizom dobivenih vrijednosti gustoća cementnog morta (u svježem stanju) s dodatkom pepela dobivene su minimalne razlike s obzirom na udio dodanog pepela i primijenjenu temperaturu spaljivanja mulja.

U mješavinama s dodanim pepelom generalno su se razvile veće temperature u odnosu na referentne mješavine (bez dodanog pepela). Također, može se primijetiti da su se u mješavinama s pepelom dobivenim spaljivanjem mulja na 900°C razvile najniže temperature, dok su se u mješavinama s pepelom dobivenim na 800 i 1000°C razvile nešto niže temperature. Najviša temperatura razvila se u mješavini M₂₀-A.

Rezultati dobiveni na mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV Zagreb potvrđuju generalni trend povećanja poroznosti s povećanjem udjela dodanog pepela. U skladu s očekivanim veći udio pora pokazale su mješavine s najmanjim vodovezivnim omjerima, budući je njihova ugradnja bila nešto zahtjevnija. Budući da je pri ispitivanju mješavina s dodanim pepelom dobivenim na 900°C porometar bio u kvaru, ova serija podataka nedostaje te nije moguće izvući detaljnije zaključke o utjecaju temperature spaljivanja mulja na udio pora, dok se može zaključiti da značajnih razlika u poroznosti između mješavina s dodanim pepelom dobivenim na 800 i 1000°C nema.

Potvrđeni su povećani zahtjevi za vodom te smanjena obradljivost mortova s povećanjem udjela dodanog pepela. S povećanjem temperature spaljivanja mulja primijećeno je blago smanjenje obradljivosti, odnosno najbolji rezultati po pitanju obradljivosti dobiveni su za mješavine s pepelom dobivenim spaljivanjem mulja na 800°C. Ovo posljednje u suprotnosti je s trendom koji je bio prisutan pri ispitivanju mješavina s dodatkom pepela iz mulja s UPOV Karlovac, odnosno u tom je slučaju bio prisutan trend poboljšanja obradljivosti s povećanjem temperature spaljivanja mulja.

Analizirajući prikazane rezultate može se uočiti generalni trend bržeg početka i kraja vezivanja s povećanjem udjela dodanog pepela. U skladu s očekivanim mješavine s najvećim vodovezivnim omjerima imale su najdulje vrijeme vezivanja. Također, mješavine s dodanim pepelom generalno su pokazale nešto kraće vrijeme između početka i kraja vezanja u odnosu na referentne mješavine.

Analizom svježeg cementnog morta s dodatkom pepela dobivenog suspaljivanjem s vapnom zabilježeno je sljedeće:

- zanemarive razlike u gustoćama
- temperature mješavina s dodanim pepelom od suspaljivanja mulja s vapnom nešto su više od temperature referentne mješavine, ali su niže od temperature koju je razvila mješavina s količinskim jednakim dodatkom pepela dobivenog iz samog mulja (bez vapna)
- konzistencija mješavina s pepelom od suspaljivanja mulja s vapnom lošija je od konzistencije referentne mješavine, ali bolja od one mješavine s jednakim udjelom pepela iz čistog mulja
- vrijeme vezivanja mješavina s pepelom od suspaljivanja mulja s vapnom nešto je duže od vremena vezivanja mješavine s jednakim udjelom pepela iz čistog mulja, ali je kraće u odnosu na referentnu mješavinu.



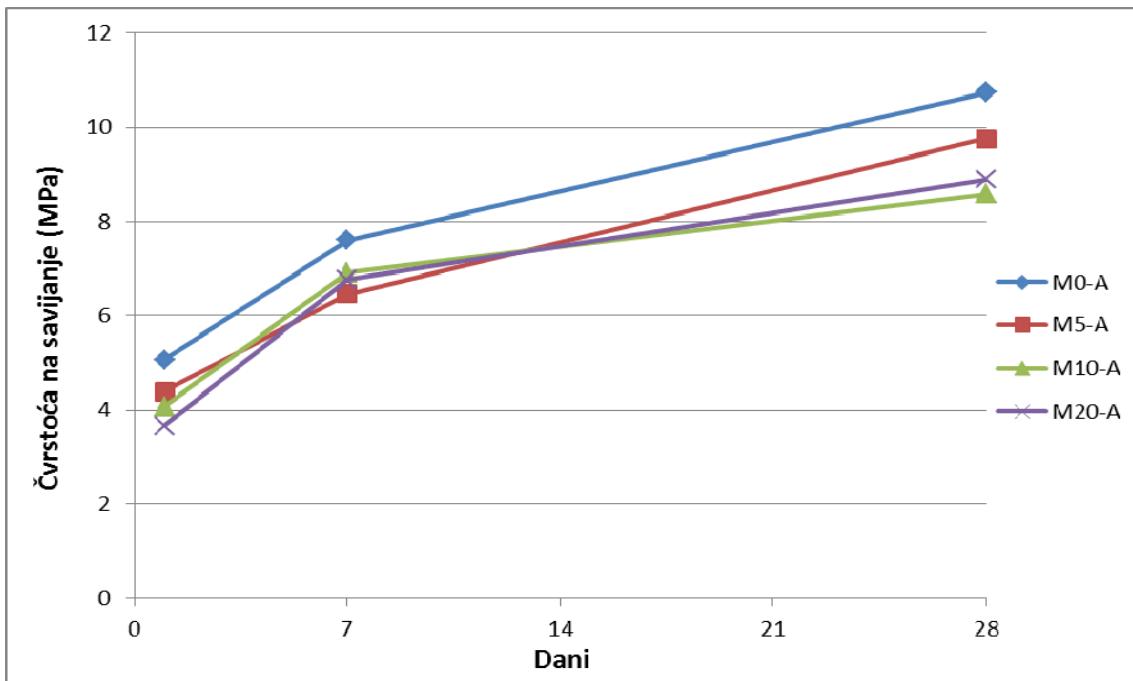
Drugim riječima, dodatak vapna pri spaljivanju mulja snizio je temperaturu mješavine, poboljšao konzistenciju i u blagoj mjeri produljio vrijeme vezivanja.

9.3 Rezultati ispitivanja na cementnom mortu u očvrsnulom stanju

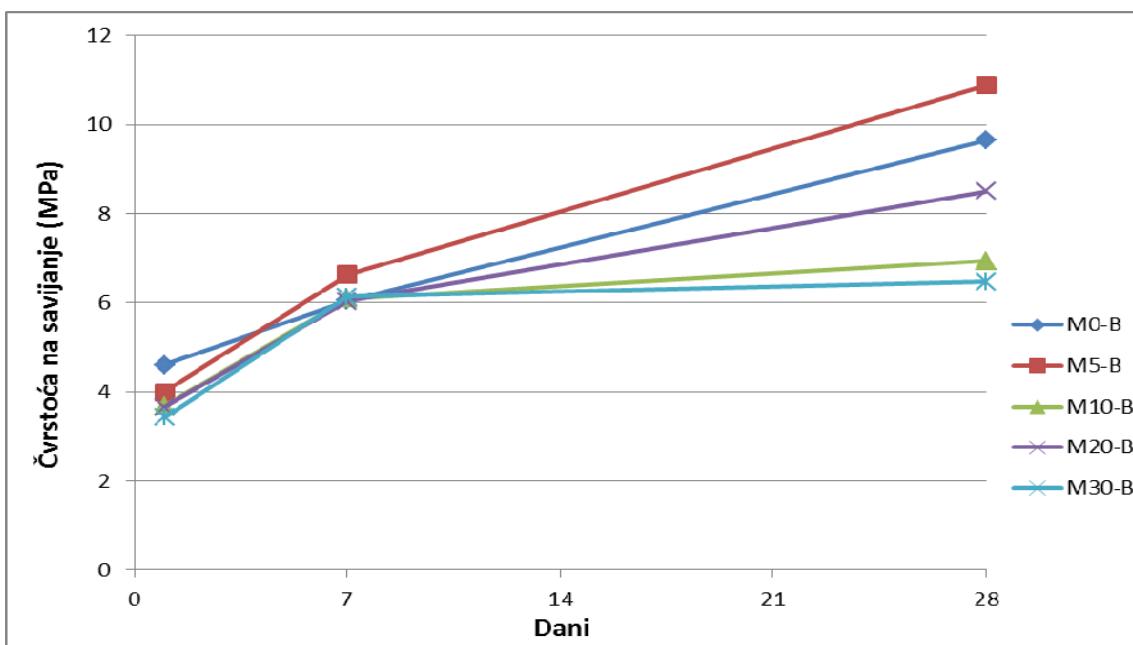
9.3.1 Mehaničke karakteristike

Tablica 20 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb na 800°C (i na referentnim mješavinama)

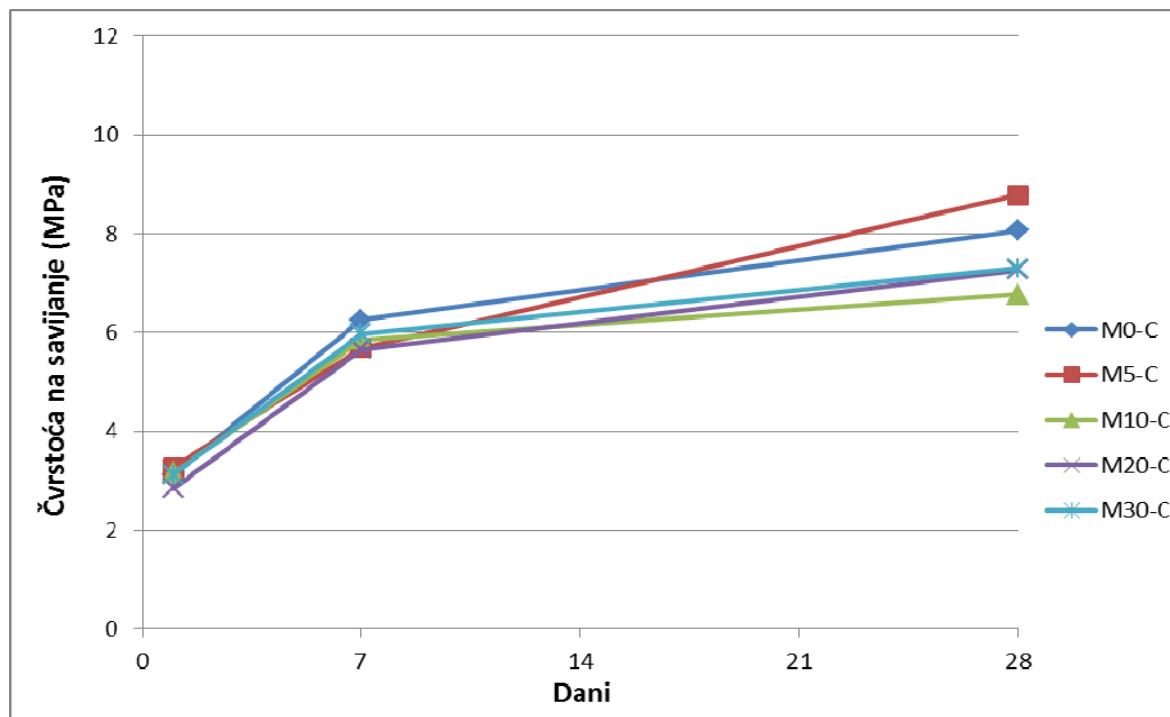
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -A	5,06	7,61	10,74	30,84	65,71	76,66
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
M ₀ -C	3,12	6,26	8,07	17,10	47,67	60,94
M ₅ -A	4,38	6,46	9,75	27,06	58,77	70,72
M ₅ -B	4,00	6,638	10,89	24,49	54,66	66,72
M ₅ -C	3,27	5,68	8,78	19,61	42,40	52,81
M ₁₀ -A	4,07	6,91	8,58	25,03	53,98	79,42
M ₁₀ -B	3,68	6,10	6,94	22,08	50,55	68,38
M ₁₀ -C	3,16	5,86	6,76	17,28	40,24	61,09
M ₂₀ -A	3,65	6,77	8,89	22,55	51,03	67,34
M ₂₀ -B	3,65	6,04	8,50	20,90	45,14	63,03
M ₂₀ -C	2,84	5,66	7,26	16,53	39,65	50,29
M ₃₀ -B	3,43	6,14	6,47	20,80	45,34	53,50
M ₃₀ -C	3,12	5,98	7,30	17,34	41,90	47,50



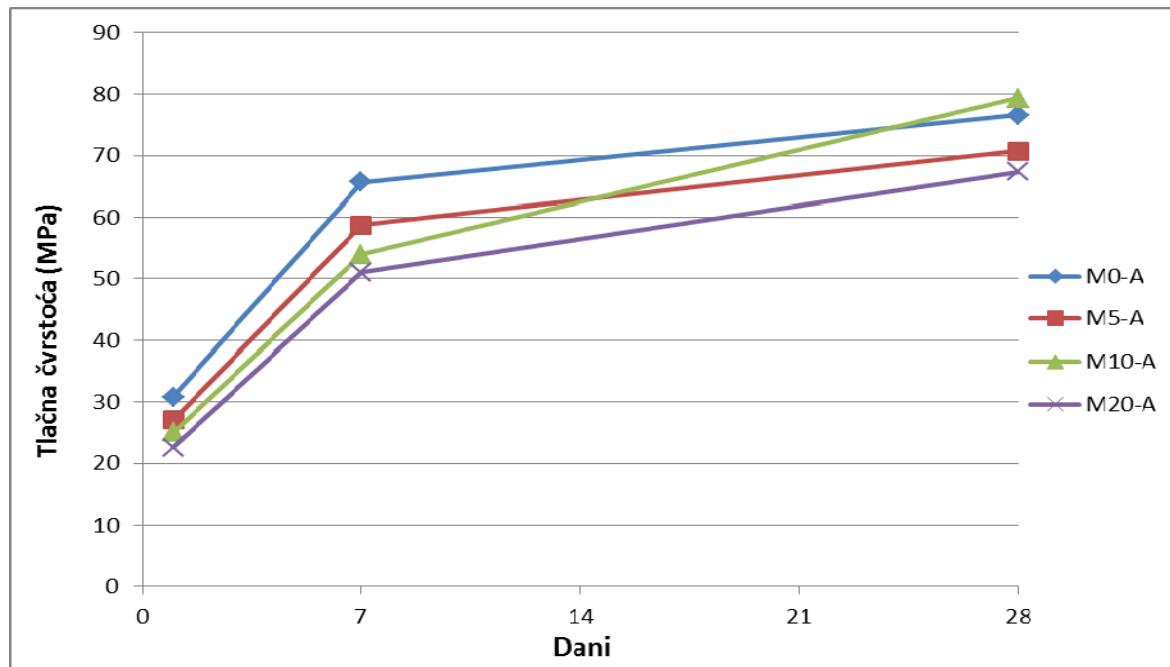
Slika 115 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,45$)



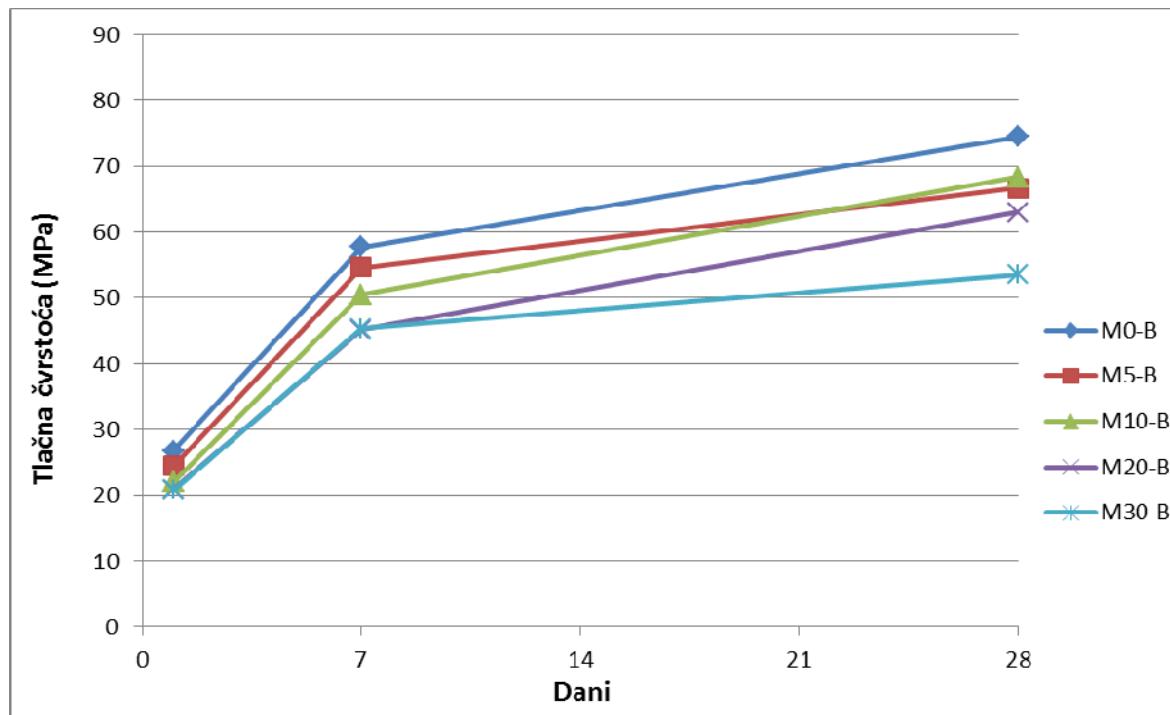
Slika 116 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,50$)



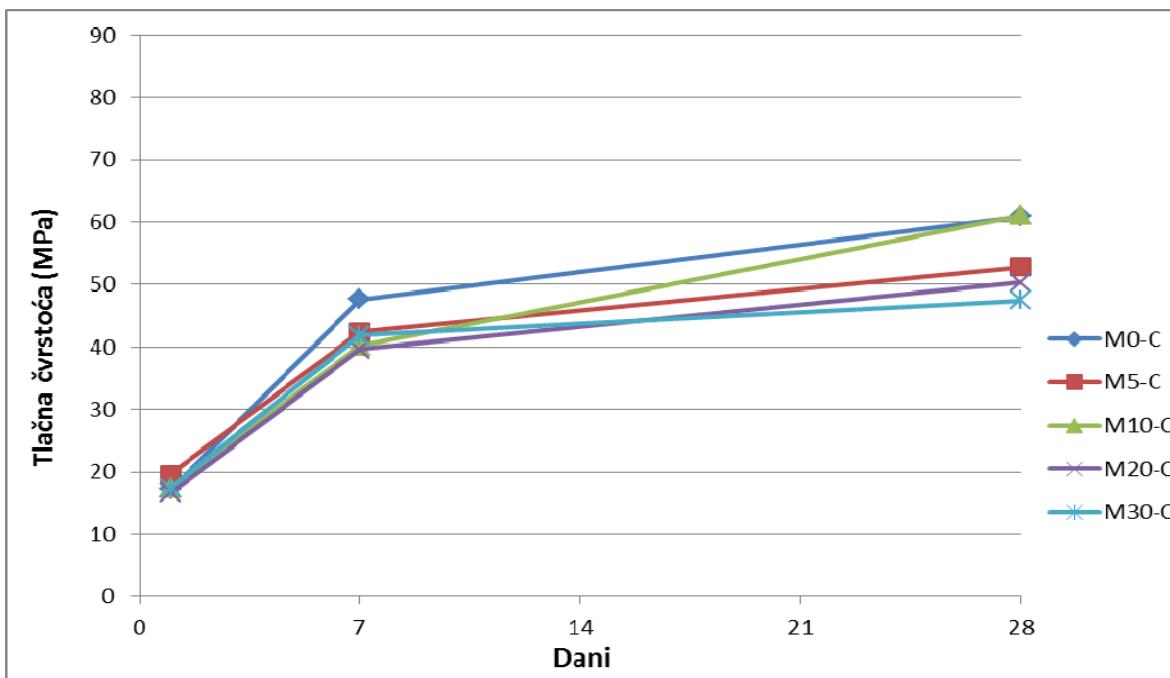
Slika 117 Čvrstoća na savijanje uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,55$)



Slika 118 Tlačna čvrstoća uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,45$)



Slika 119 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,50$)

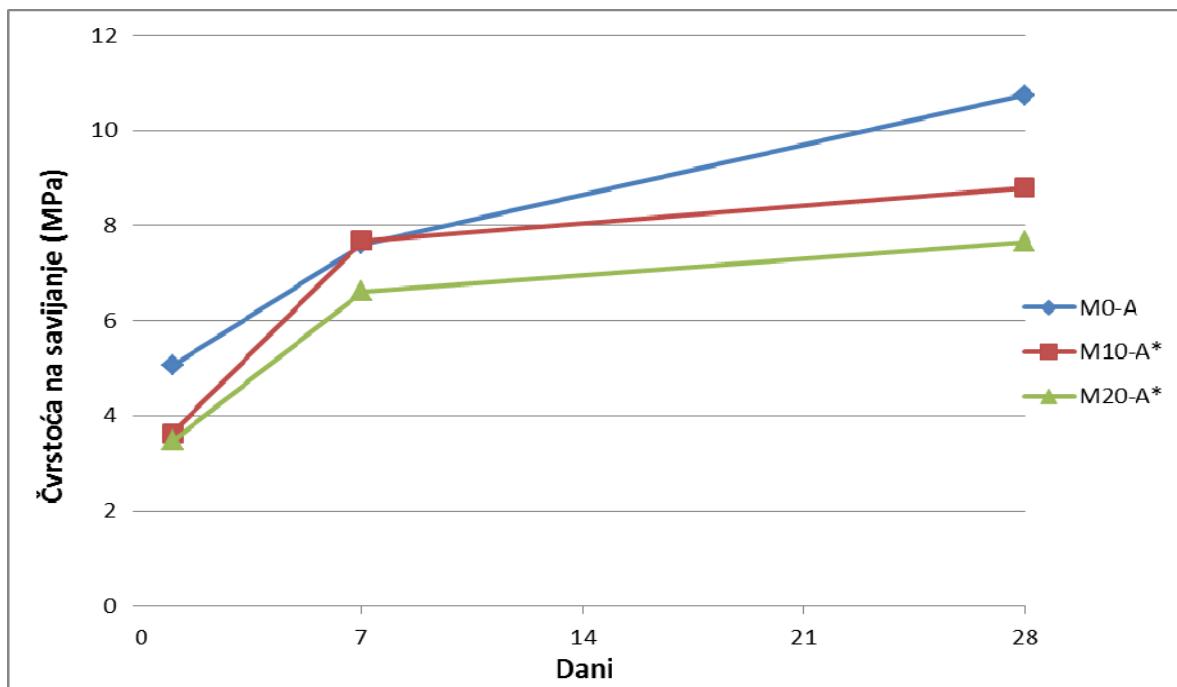


Slika 120 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 800°C ($v/v_e=0,55$)

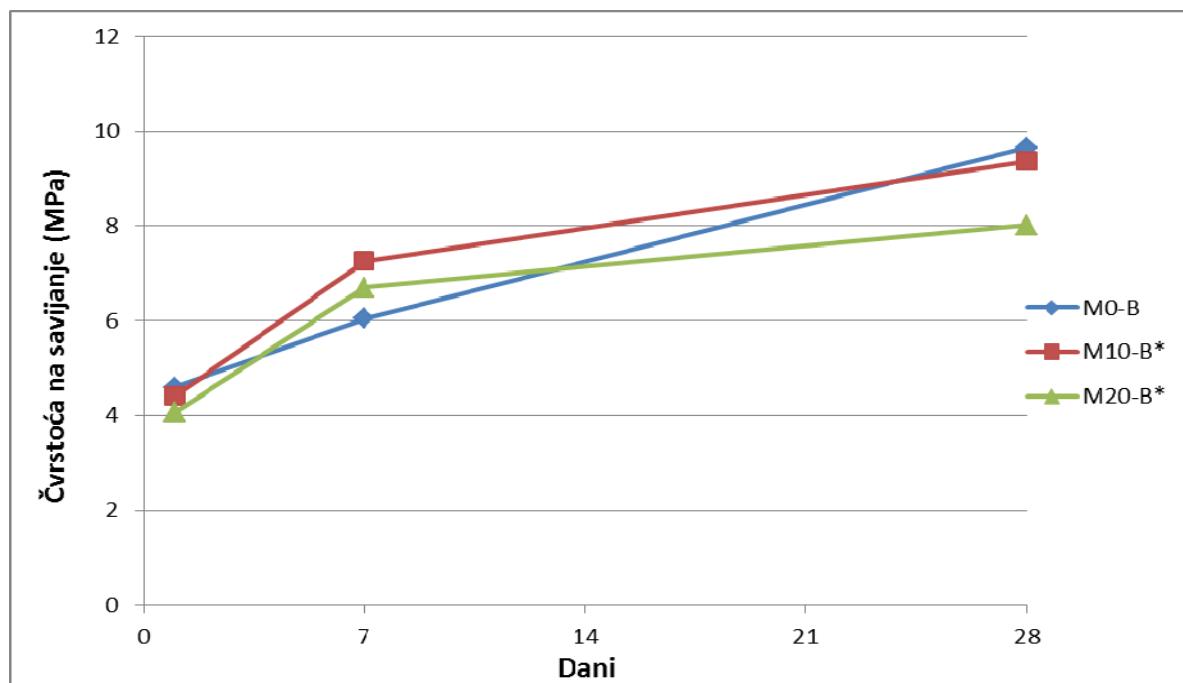


Tablica 21 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb na 900°C (i na referentnim mješavinama)

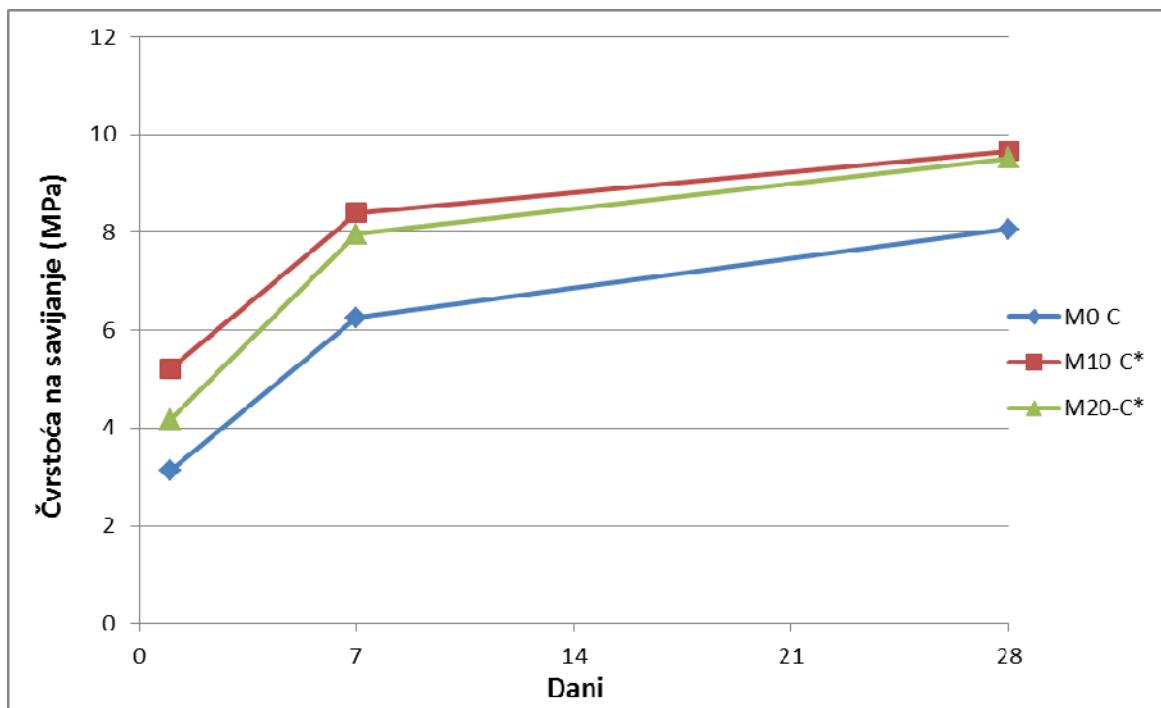
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -A	5,06	7,61	10,74	30,84	65,71	76,66
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
M ₀ -C	3,12	6,26	8,07	17,10	47,67	60,94
M ₁₀ -A*	3,63	7,68	8,79	20,27	48,46	67,48
M ₁₀ -B*	4,41	7,26	9,37	27,94	56,17	71,78
M ₁₀ -C*	5,20	8,40	9,66	35,97	66,91	78,63
M ₂₀ -A*	3,47	6,61	7,65	19,50	46,49	64,80
M ₂₀ -B*	4,06	6,70	8,02	23,32	52,67	66,17
M ₂₀ -C*	4,16	7,96	9,51	30,38	63,62	75,39



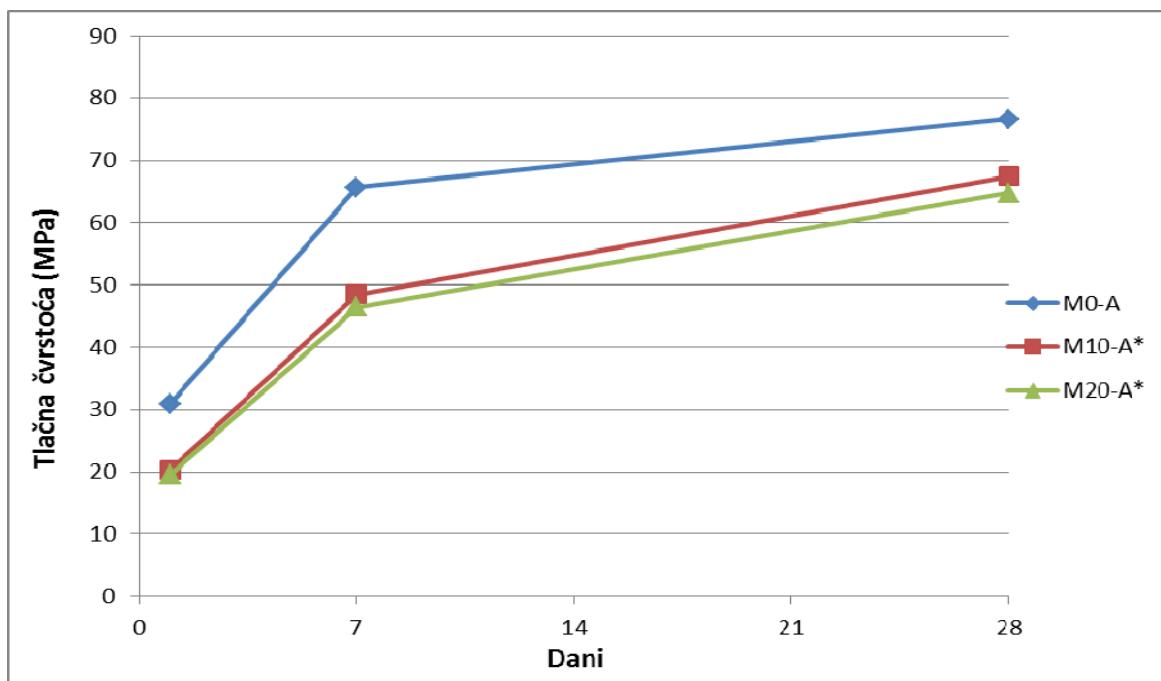
Slika 121 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,45$)



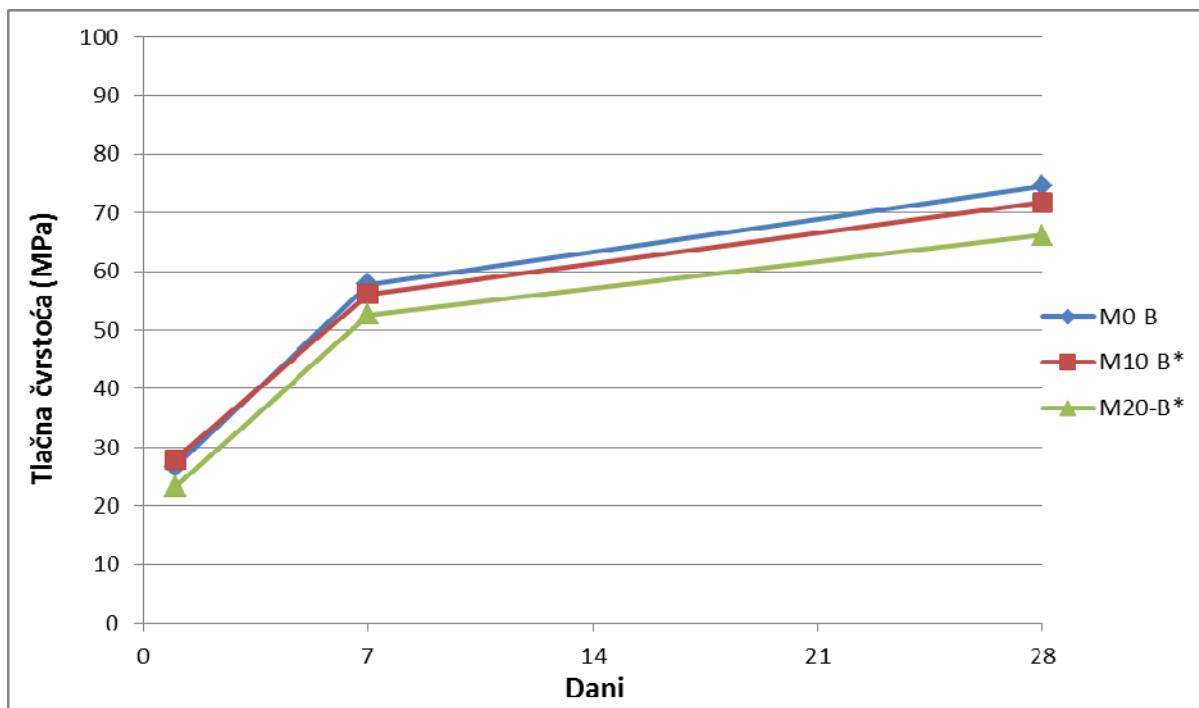
Slika 122 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,50$)



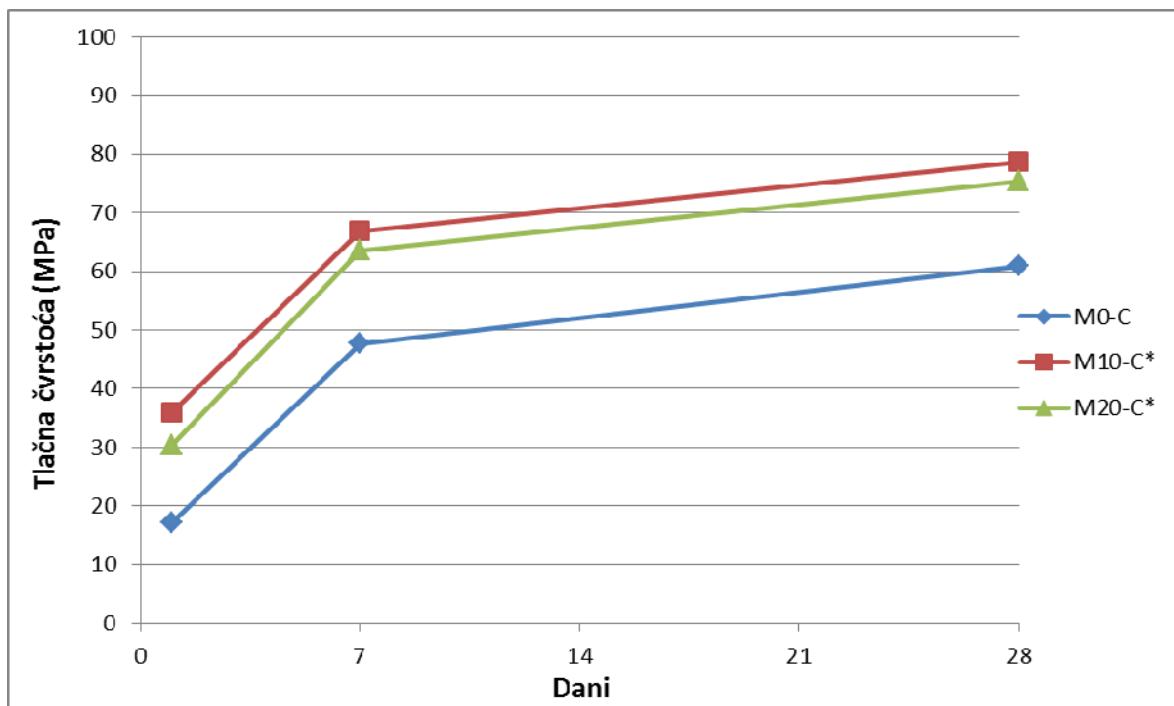
Slika 123 Čvrstoća na savijanje uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,55$)



Slika 124 Tlačna čvrstoća uzorka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,45$)



Slika 125 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,50$)

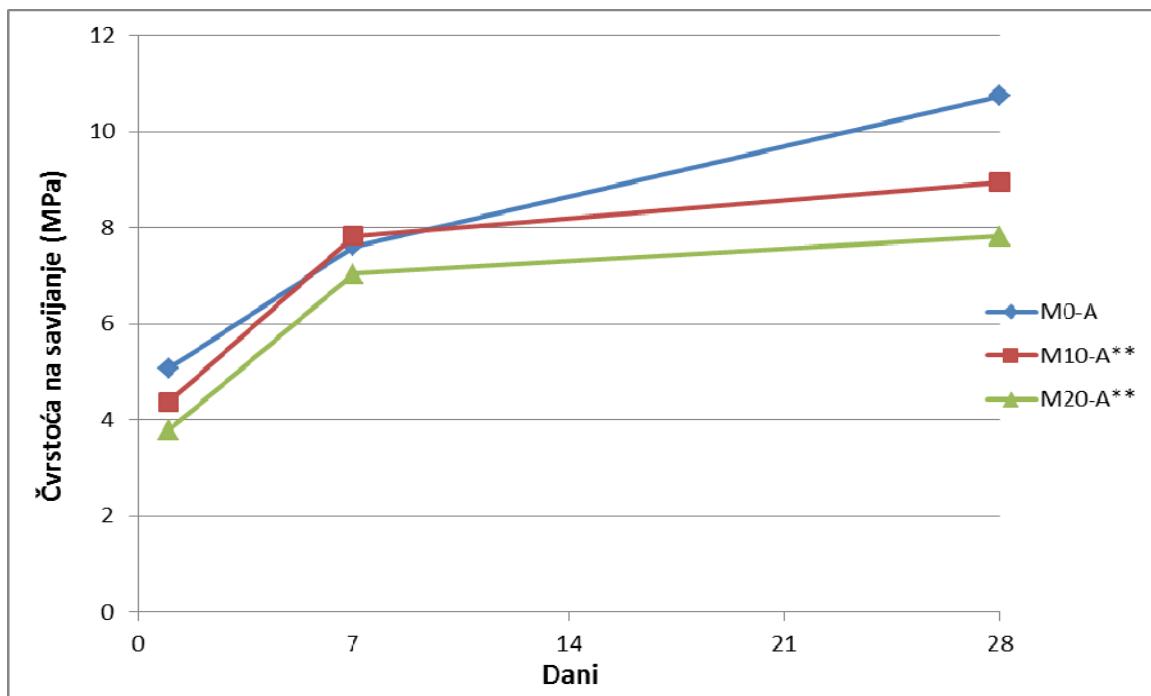


Slika 126 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 900°C ($v/v_e=0,55$)

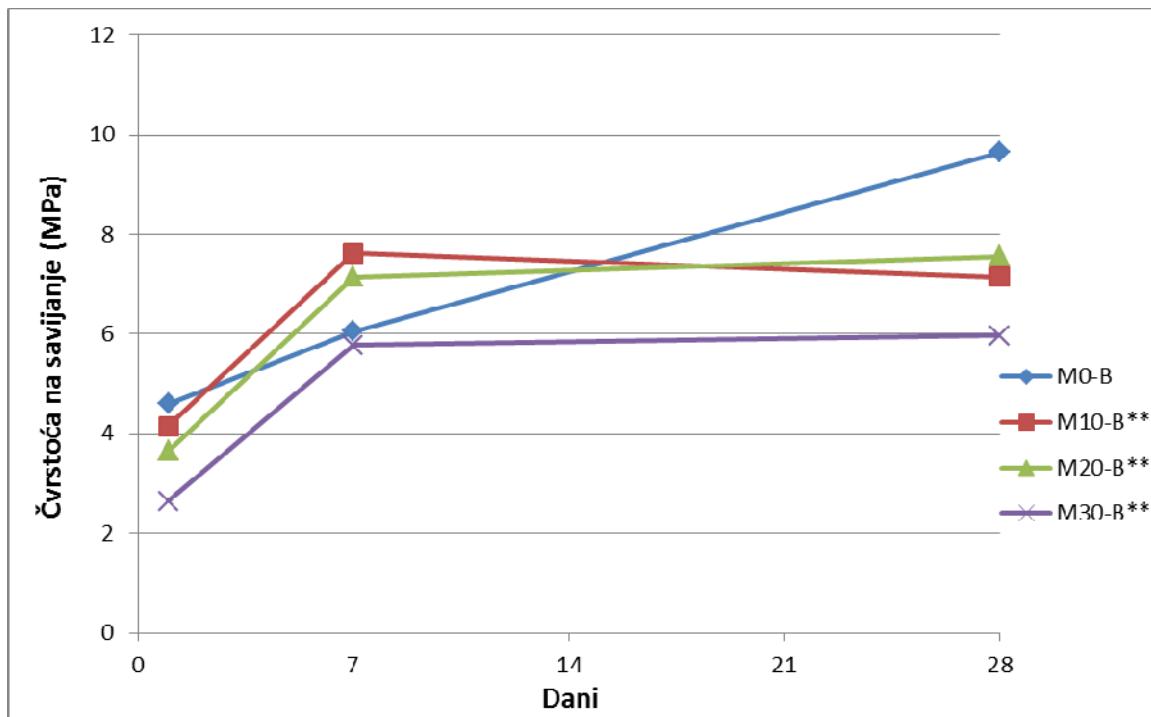


Tablica 22 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb na 1000°C (i na referentnim mješavinama)

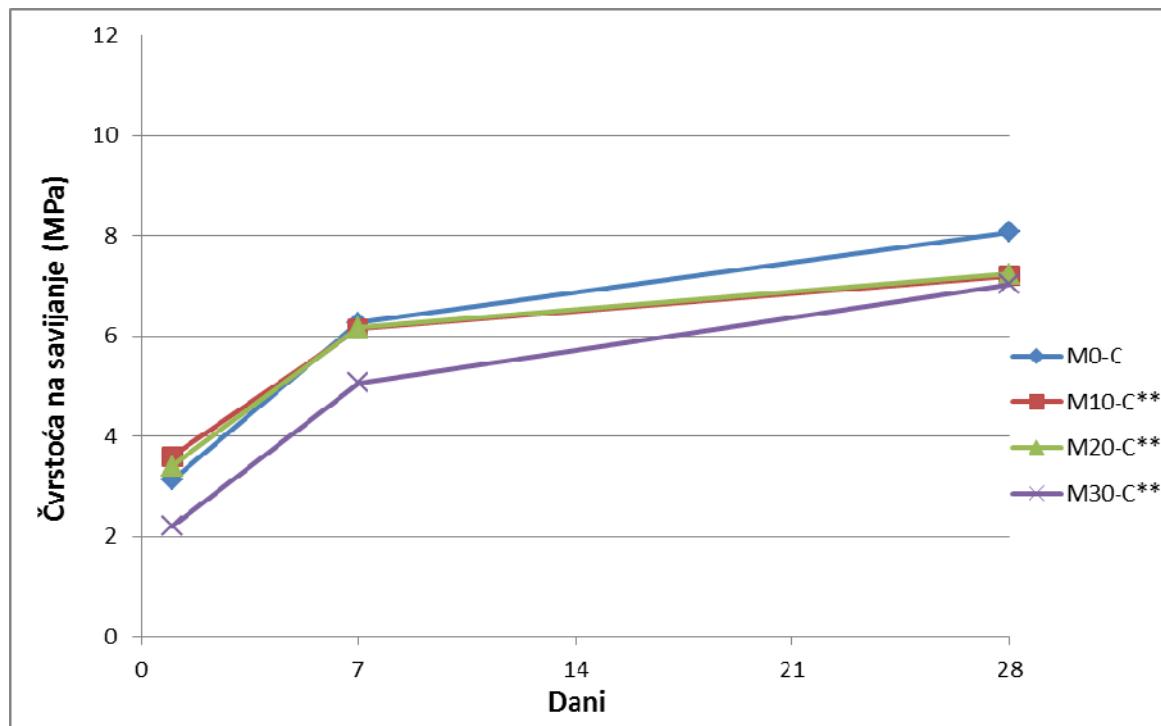
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -A	5,06	7,61	10,74	30,84	65,71	76,66
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
M ₀ -C	3,12	6,26	8,07	17,10	47,67	60,94
M ₁₀ -A**	4,36	7,83	8,95	34,72	66,25	78,97
M ₁₀ -B**	4,15	7,62	7,15	28,17	60,03	66,98
M ₁₀ -C**	3,60	6,14	7,20	24,61	47,97	55,68
M ₂₀ -A**	3,78	7,04	7,82	26,20	58,90	68,88
M ₂₀ -B**	3,65	7,15	7,56	23,18	49,05	61,36
M ₂₀ -C**	3,40	6,17	7,23	18,97	43,40	55,80
M ₃₀ -B**	2,64	5,78	5,97	16,62	41,11	56,25
M ₃₀ -C**	2,20	5,06	7,03	14,12	39,61	56,59



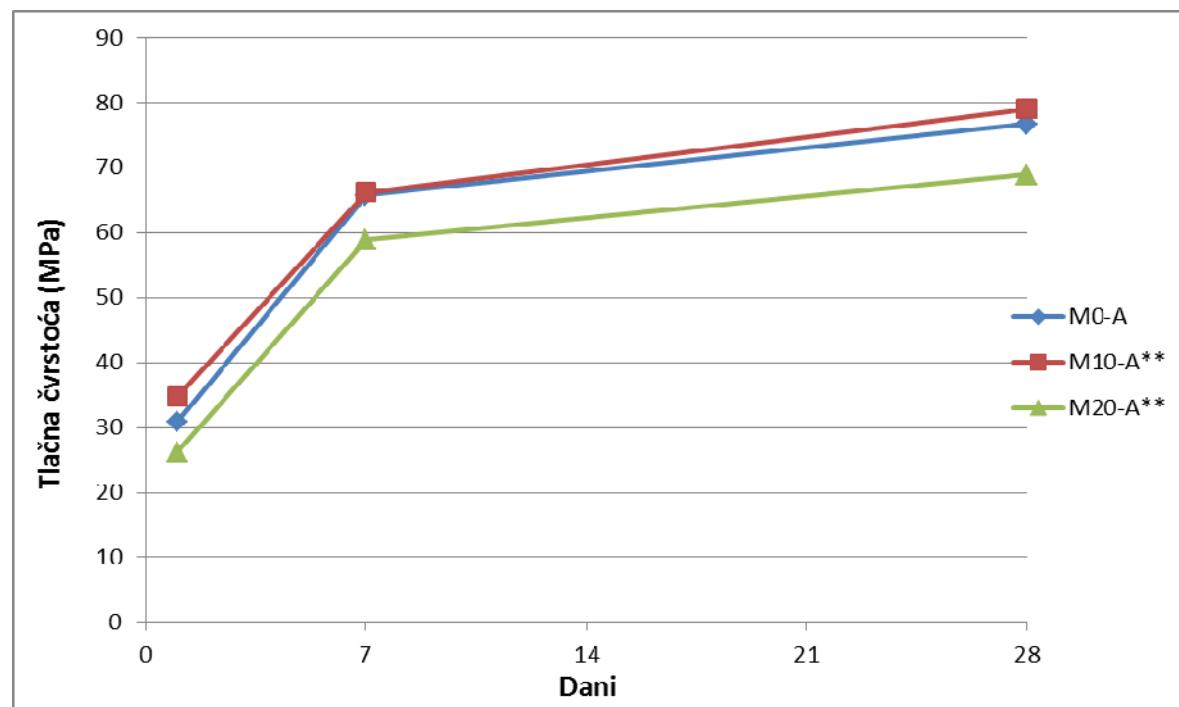
Slika 127 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,45$)



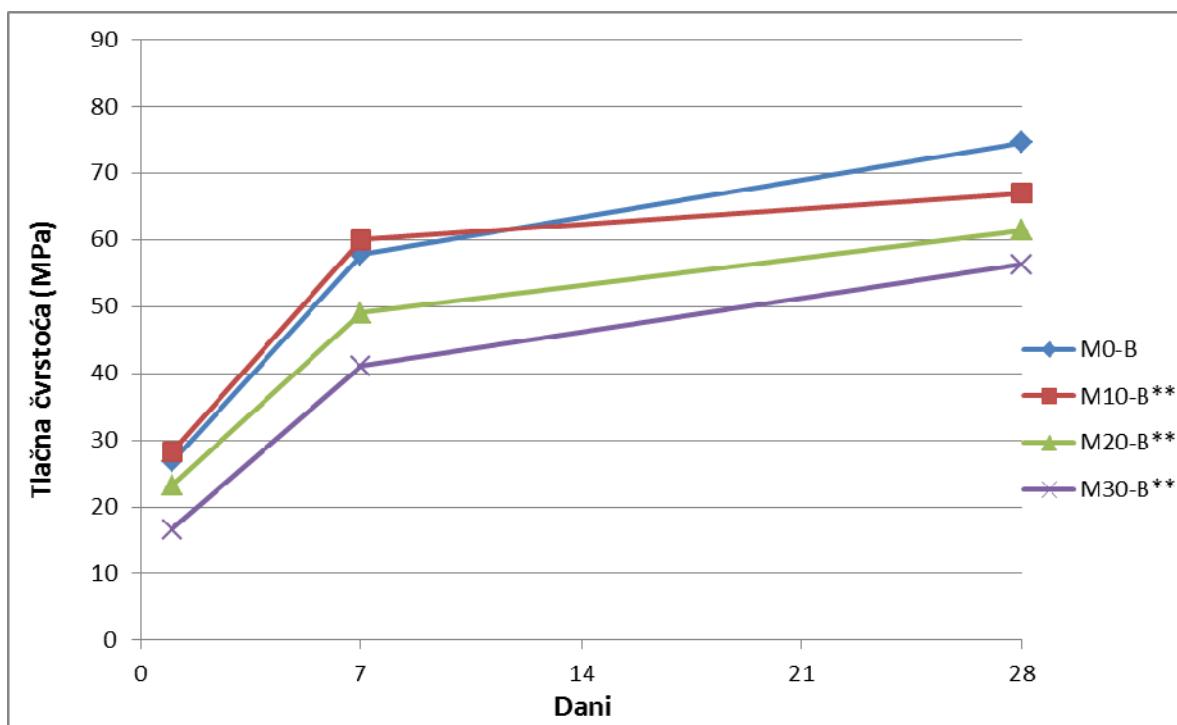
Slika 128 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,50$)



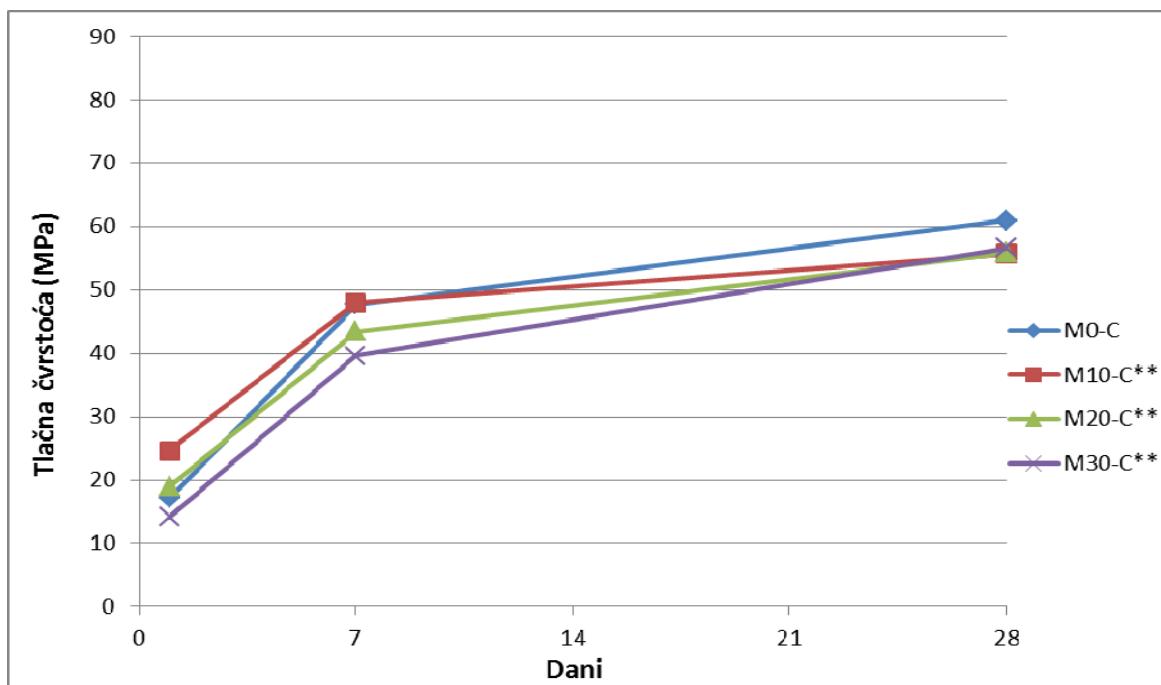
Slika 129 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,55$)



Slika 130 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,45$)



Slika 131 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,50$)

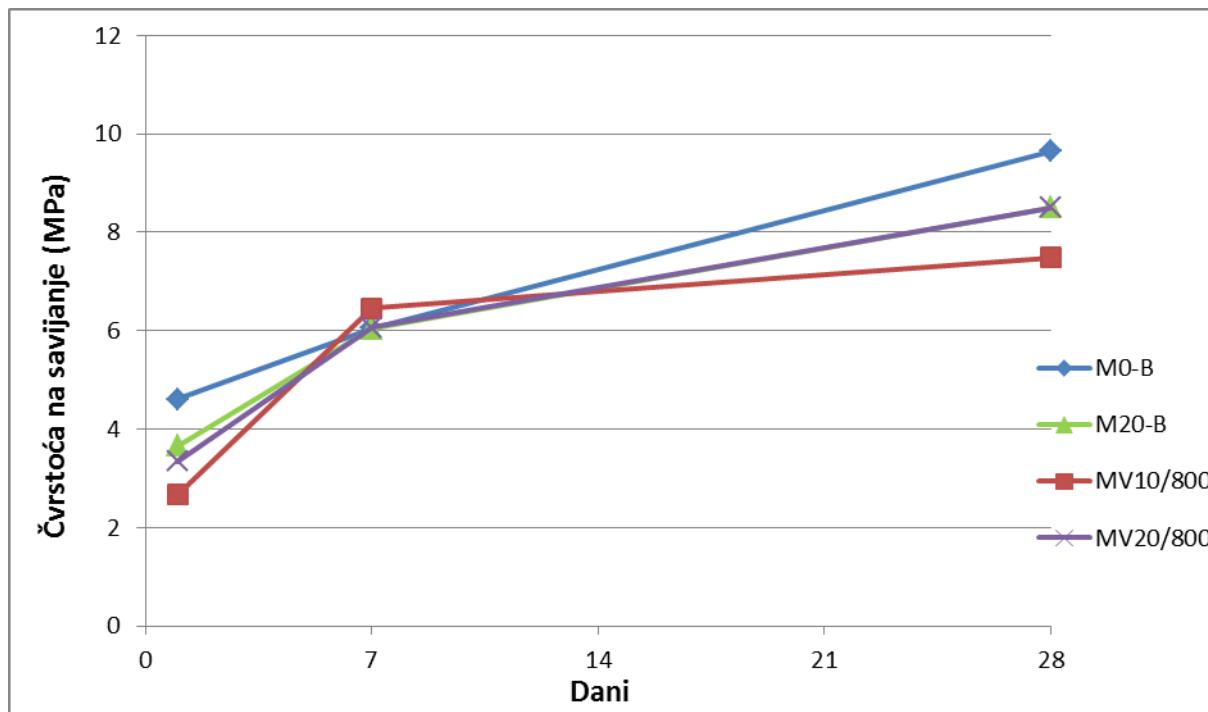


Slika 132 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta u ovisnosti o udjelu ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem na 1000°C ($v/v_e=0,55$)

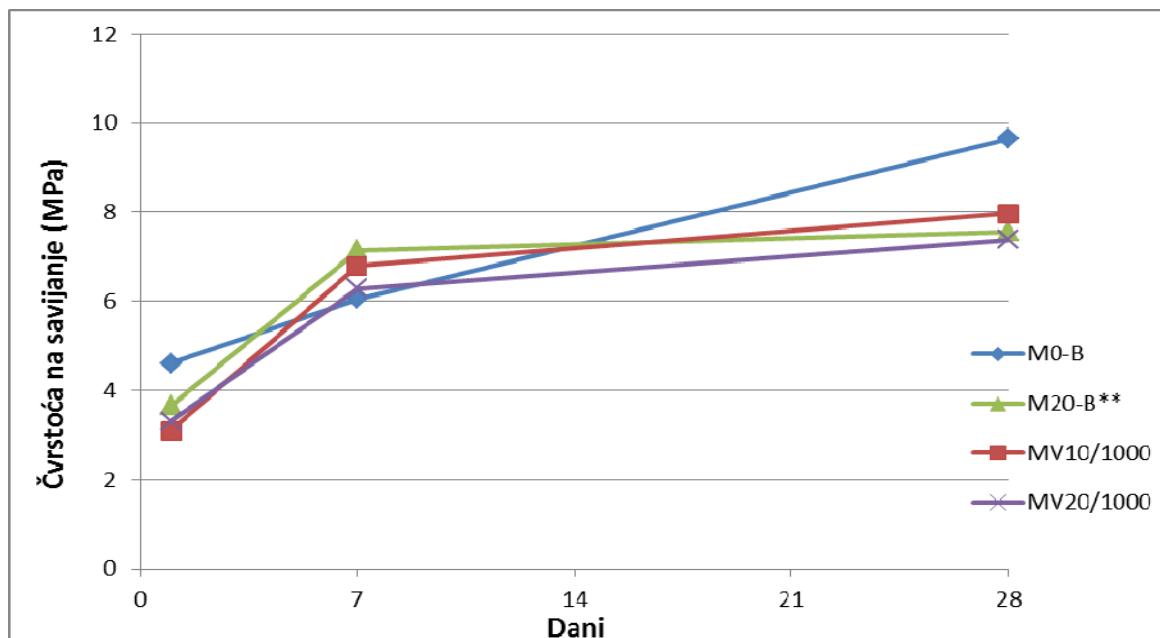


Tablica 23 Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenih 20% pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb uz 10 i 20%-tni dodatak vapna pri spaljivanju, na temperaturama 800 i 1000°C (i rezultati na referentnoj mješavini) – $v/v_e=0,50$

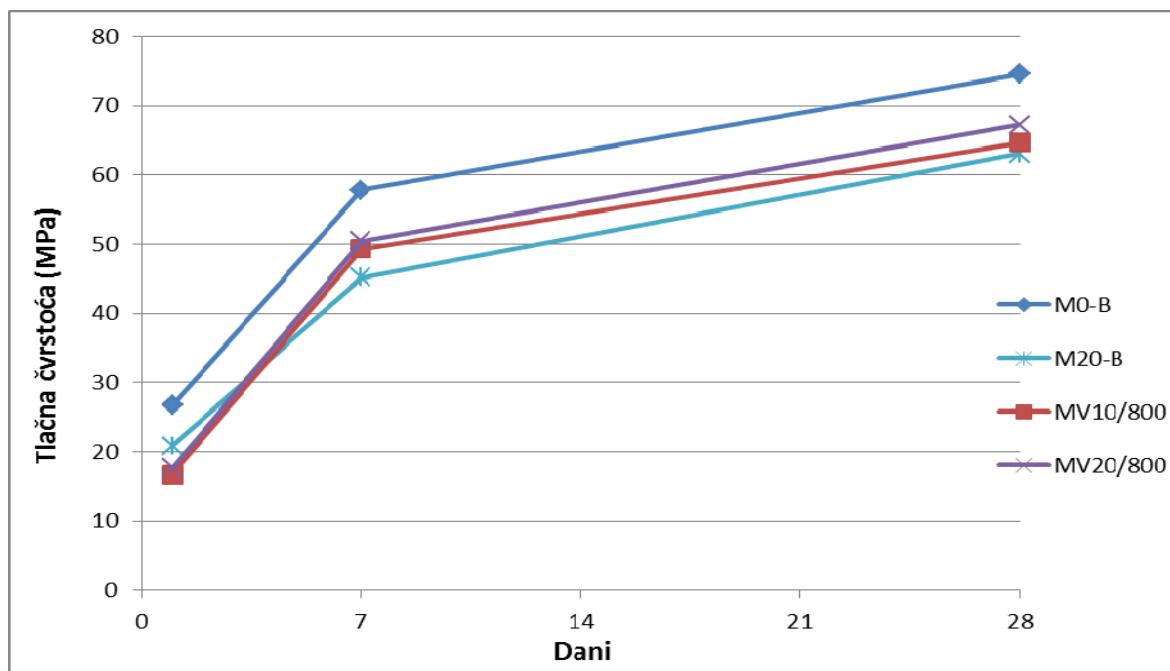
Oznaka mješavine	Čvrstoća na savijanje (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
M ₀ -B	4,60	6,05	9,65	26,75	57,81	74,54
MV10/800	2,66	6,45	7,49	16,75	49,28	64,64
MV10/1000	3,10	6,80	7,97	20,29	52,76	62,94
MV20/800	3,34	6,06	8,50	17,62	50,48	67,16
MV20/1000	3,31	6,28	7,38	19,94	50,57	58,00



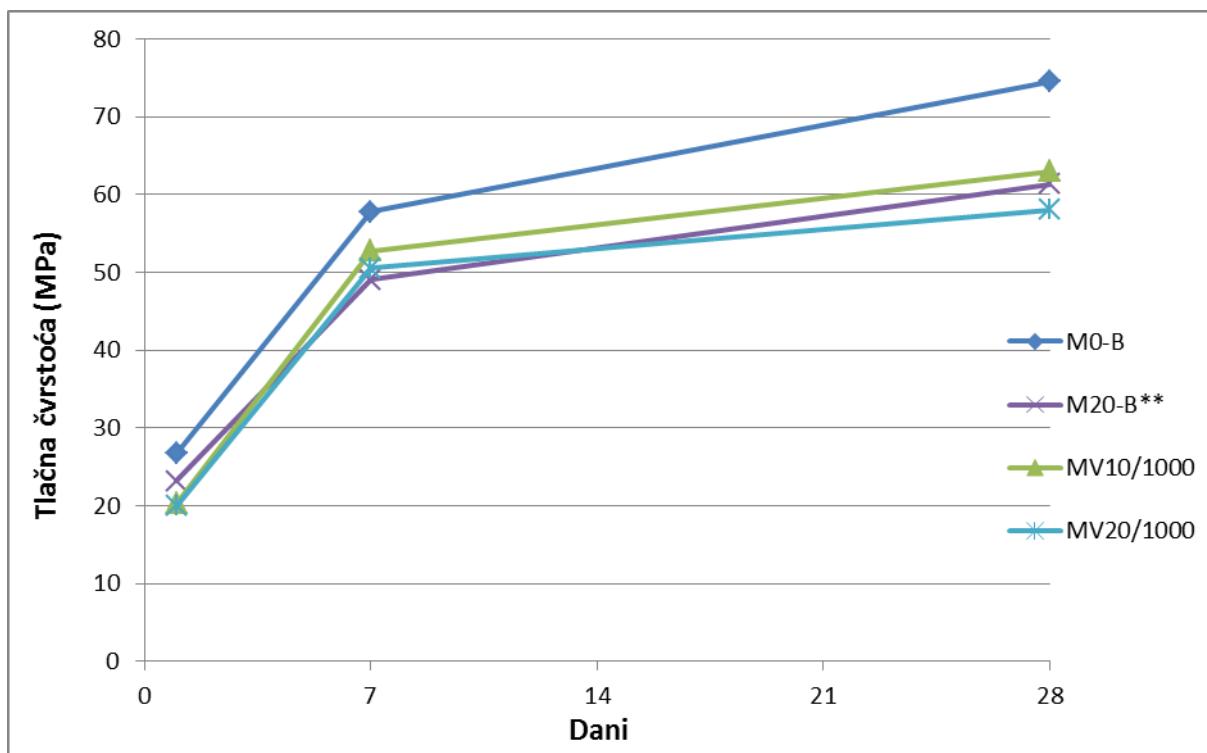
Slika 133 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta s 20%-tним udjelom ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem s 0, 10 i 20% vapna na 800°C ($v/v_e=0,50$)



Slika 134 Čvrstoća na savijanje uzoraka cementnog morta s 20%-tним udjelom ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem s 0, 10 i 20% vapna na 1000°C ($v/v_e=0,50$)



Slika 135 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta s 20%-tnim udjelom ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem s 0, 10 i 20% vapna na 800°C ($v/v_e=0,50$)



Slika 136 Tlačna čvrstoća uzoraka cementnog morta s 20%-tним udjelom ugrađenog pepela dobivenog iz mulja s UPOV Zagreb spaljivanjem s 0, 10 i 20% vapna na 1000°C ($v/v_e=0,50$)



9.3.2 Plinopropusnost

Tablica 24 Rezultati ispitivanja plinopropusnosti na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenim pepelom dobivenim spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb na 800, 900 i 1000°C (i na referentnim mješavinama)

Referentna mješavina – koef. plinopropusnosti (x 10-18 m ²) i ocjena otpornosti	Koeficijent plinopropusnosti (x 10-18 m ²) i ocjena otpornosti				
	Udio pepela (%)	800°C	900°C	1000°C	
v/ve = 0,45	480 (mala)	5	603 (mala)	-	-
		10	526 (mala)	532 (mala)	340 (mala)
		20	672 (mala)	336 (mala)	781 (mala)
v/ve = 0,50	804 (mala)	5	634 (mala)	-	-
		10	494 (mala)	572 (mala)	361 (mala)
		20	887 (mala)	491 (mala)	680 (mala)
		30	776 (mala)	-	870 (mala)
v/ve = 0,55	1408 (vrlo mala)	5	1023 (vrlo mala)	-	-
		10	2085 (vrlo mala)	1434 (vrlo mala)	1507 (vrlo mala)
		20	1446 (vrlo mala)	883 (mala)	898 (mala)
		30	1672 (vrlo mala)	-	1452 (vrlo mala)

Tablica 25 Rezultati ispitivanja plinopropusnosti na cementnom mortu u očvrsnulom stanju s ugrađenih 20% pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Zagreb uz 10 i 20%-tni dodatak vapna pri spaljivanju, na temperaturama 800 i 1000°C (i rezultati na referentnoj mješavini)

Referentna mješavina – koef. plinopropusnosti (x 10-18 m ²) i ocjena otpornosti	Koeficijent plinopropusnosti (x 10-18 m ²) i ocjena otpornosti			
	Udio dodanog vapna (%)	800°C	1000°C	
v/ve = 0,50	804 (mala)	10	700 (mala)	407 (mala)
		20	579 (mala)	445 (mala)



9.4 Analiza rezultata ispitivanja na cementnom mortu u očvrsnulom stanju

Vrijednosti čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće rastu s porastom vremena hidratacije za sve analizirane uzorke što je znak da u mortovima s dodanim pepelom dolazi do pucolanskih reakcija i posljedičnih pozitivnih učinaka na mehaničke karakteristike.

Najbolje vrijednosti čvrstoća u odnosu na referentne mješavine pokazale su mješavine $M_{10}\text{-}C^*$ i $M_{20}\text{-}C^*$. Vrijednosti čvrstoća ovih dviju mješavina nadilaze vrijednosti čvrstoća referentne mješavine za sva razdoblja hidratacije (1, 7 i 28 dana). Kasne (28d) čvrstoće na savijanje ovih mješavina iznose 120%, odnosno 118% čvrstoće na savijanje referentne mješavine, dok su tlačne čvrstoće na razini 129%, odnosno 124% čvrstoće referentne mješavine.

U skladu s očekivanim, najveće čvrstoće razvile su mješavine s najmanjim (0,45), a najslabije s najvećim (0,55) vodovezivnim omjerom.

Iz prikazanog seta podataka moglo bi zaključiti da je optimalna temperatura spaljivanja mulja sa stajališta dobivanja što boljih mehaničkih karakteristika morta s ugrađenim pepelom ona od 900°C budući da su sve mješavine s pepelom dobivenim na ovoj temperaturi razvile veće čvrstoće od referentnih mješavina (izuzev mješavina s najmanjim vodovezivnim omjerom, odnosno s oznakom „A“). Unatoč navedenom, potrebno je istaknuti da su zadovoljavajući rezultati dobiveni za sve primjenjene temperature spaljivanja pa tako i za najnižu od 800°C.

Posebno je pozitivna činjenica da su svi analizirani uzorci zadovoljili klasu korištenog cementa (42,5 MPa), odnosno sve 28-dnevne tlačne čvrstoće nadišle su ovu vrijednost.

Analizom uzorka morta s dodatkom pepela dobivenog suspaljivanjem mulja s vapnom nisu primijećene značajnije razlike u razvijenim čvrstoćama u odnosu na mješavine s jednakim dodatkom pepela iz čistog mulja. Iako su čvrstoće ovih mješavina uglavnom nešto niže od onih referentne mješavine, dobiveni rezultati su zadovoljavajući i istog reda veličine te je u svim slučajevima zadovoljena klasa korištenog cementa (42,5 MPa).

Analizirajući prikazane rezultate ispitivanja plinopropusnosti može se uočiti trend rasta rasta vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti, odnosno smanjenje otpornosti morta s povećanjem udjela pepela, ali ima i rezultata koji odstupaju od ovog pravila. Ovaj trend poklapa se s onim dobivenim za mješavine s dodanim pepelom s UPOV Zagreb, dok je u suprotnosti s onim dobivenim ispitivanjima na mortu s pepelom iz mulja s UPOV Karlovac. Iz ovog seta podataka nema očiglednog trenda kretanja vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti s obzirom na primjenjenu temperaturu spaljivanja mulja, ali se može primijetiti da veći vodovezivni omjeri uzrokuju i veće koeficijent plinopropusnosti, odnosno manju otpornost mortova.



10. Studija uzorka čistog morta te morta s dodacima pepela, odnosno termički obrađenog mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda metodom rendgenske difrakcijske analize

Uzorci i mjerjenje

Na analizu je dostavljeno 8 praškastih uzorka očvrnulog morta. Osim uzorka čistog morta u uzorke je prilikom priprave bila dodana različita količina pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac pri različitim temperaturama. Uzorci su četvrtanjem smanjeni na količinu potrebnu za analizu, smješteni u nosač te podvrgnuti rendgenskoj difrakcijskoj analizi (XRD) na difraktometru Shimadzu XRD-6000 sa CuK α zračenjem, uz ubrzavajući napon od 40 kV i struju 30 mA, u području 5 – 80 2 θ ° s korakom 0.02 2 θ ° i vremenom zadržavanja od 0.6 sekundi. Rezultati su grafički prikazani kao funkcija intenziteta difrakcijskih maksimuma o kutu difrakcije. Kvalitativna analiza provedena je korištenjem ICDD baze difrakcijskih podataka i literurnih podataka te računalnog programskog paketa X'PertHighScore Plus.

Tablica 26 Denominacija uzorka morta sa različitim količinama i vrstom dodatka

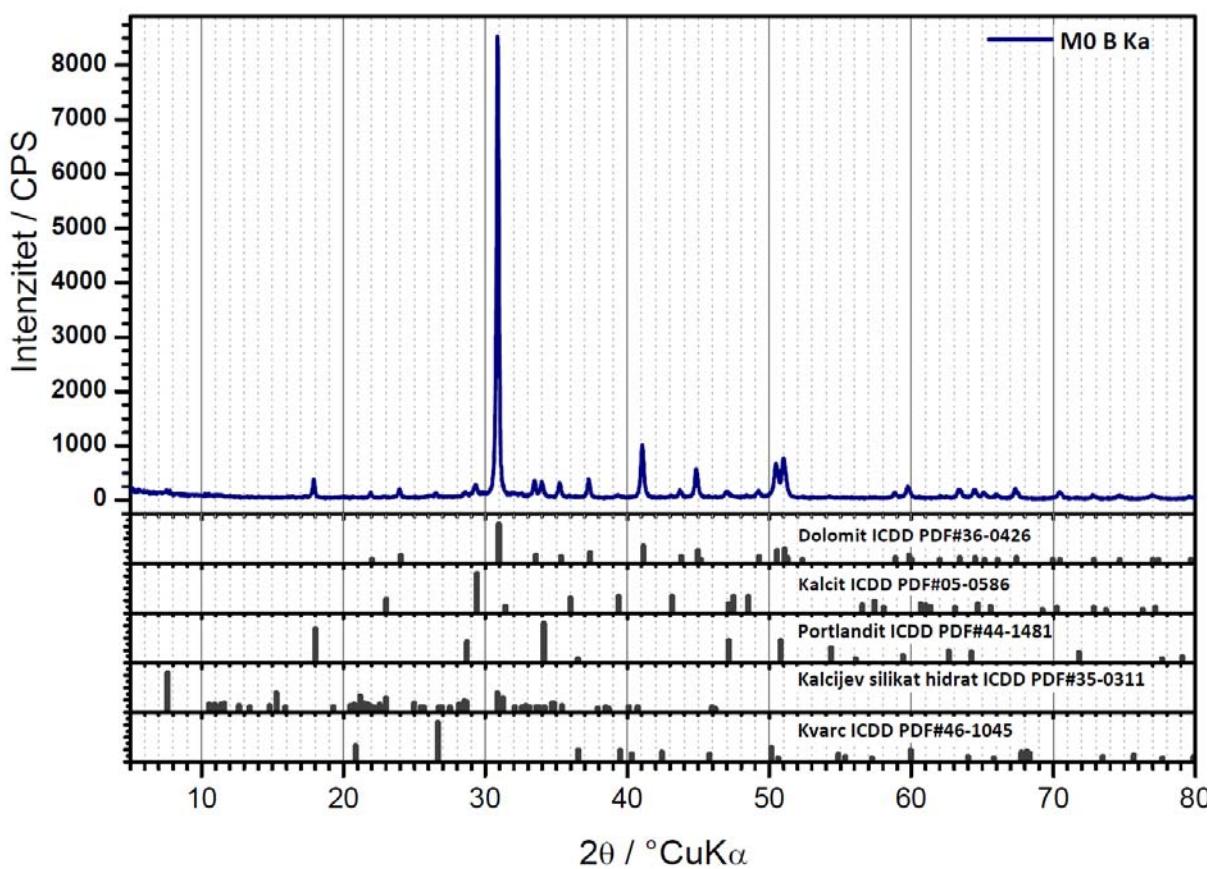
Lokalitet mulja otpadnih voda	Karlovac		
Vodovezivni faktor	0.5		
Temperatura termičke obrade mulja	800 °C	900 °C	1000 °C
Udio pepela (%)	0	M0 B Ka (referentna mješavina)	
	10	M10 B Ka	M10 B* Ka
	20	M20 B Ka	M20 B** Ka

Rezultati

Kod uzorka morta bez ikakvih dodataka (M0 B Ka) uočava se difraktogram karakterističan za dobro kristalinične uzorke s minimalnom količinom amorfne faze. Dolomit, CaMg(CO₃)₂ je glavna kristalna faza, koja u potpunosti dominira. Prisutnost dolomita je u skladu sa kemijskim sastavom pri čemu je sav prisutan magnezij utrošen za kristalizaciju dolomita. Ostatak, odnosno suvišak kalcija prisutan je u kristalnim fazama portlanditu, Ca(OH)₂ i kalcitu, CaCO₃ što je opet u skladu s kemijskim sastavom. Prisutna je čak i manja količina kalcijevog silikat hidrata, Ca₇Si₁₆O₃₈(OH)₂ što je rjeđe uočen produkt hidratacije cementnog materijala. Uočena je i manja količina kvarca, SiO₂. Općenito se kvalitativni kristalni sastav uzorka može okarakterizirati kao tipičan za produkte hidratacije cementnog materijala.



Kod ostalih uzoraka u smjesu morta dodavane su različite količine pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV Karlovac pri različitim temperaturama. Kvalitativni kristalni sastav tih uzorka može se okarakterizirati kao tipičan za proizvode hidratacije cementa. Difraktogrami tih uzorka u velikoj mjeri sliči uzorku morta bez dodatka, ačak i nisu istovjetni. Iako nije uobičajeno, difraktogrami su prikazani sa skalom intenziteta u drugom krojenu kako bi manje intenzivni maksimumi bolje došli do izražaja. Kvantitativno se uočavaju tek manje razlike i prvenstveno se te razlike očituju u različitom udjelu kvarca. Do istog dolazi kao posljedice različite količine dodatka termički obrađenog mulja koji je poprilično bogat na silicij. Sastav termički obrađenog mulja (udio magnezija) vjerojatno također utječe i na manje razlike u udjelu najzastupljenije faze, dolomita, koji i dalje u potpunosti dominira.



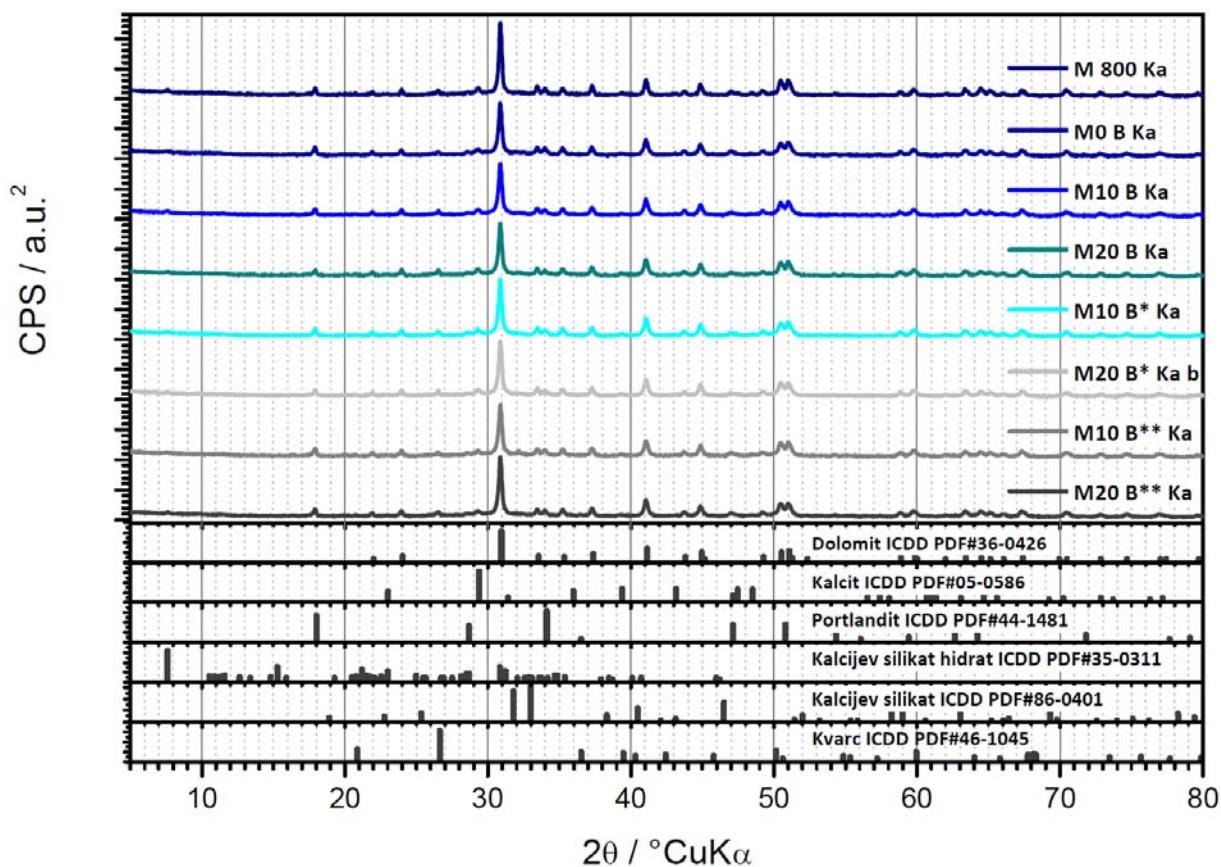
Slika 137 Difraktogrami uzorka čistog morta (bez dodatka pepela)

Evidentno je da je termički obrađeni mulj kao dodatak kompatibilan cementnom materijalu, odnosno sudjeluje u reakcijama hidratacije, naime termički obrađeni mulj sadrži značajan udio kalcija. No u formiranom mortu nije moguće razlikovati porijeklo kristalnih faza, odnosno nije moguće razlikovati koji produkti potječu od morta, a koje od dodataka. To bi bilo moguće tek za elemente (oksidne faze koje proizlaze iz tih elemenata) koji se ne nalaze u mortu, a nalaze se u termički obrađenom mulju. No isti su i u termički obrađenom mulju zastupljeni u vrlo malim količinama. Potrebno je voditi računa i o granici za uspješno kvalitativno određivanje faza u sustavu pomoću XRD metode koja iznosi



oko 2%. Stoga eventualne fazno sastavne bi svakako trebale biti manje od 2%. Upitno je da li tako mala količina eventualnih sporednih faza može utjecati na primjenska svojstva morta u značajnijoj mjeri ili se različita svojstva temelje npr. na morfološkim različitostima.

Iako se kod uzorka generalno mogu primijetiti samo kvantitativne različitosti u faznom sastavu, kod uzorka M10 B** Ka prisutna je minimalna količina kalcijevog silikata, $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ (ICDD PDF#86-0401).



Slika 138 Difraktogrami uzorka morta s dodatkom termički obrađenog mulja (pepela)

Zaključak

Uzorak ukazuje na reakciju cementnog morta pri čemu dodatci termički obrađenog mulja minimalno utječu tek na kvantitativni sastav produkata hidratacije u uzorcima. Može se reći da se difraktogrami uzorka suštinski ne razlikuju.



11. Rezultati ispitivanja izluživanja iz uzorka cementog morta

Ispitivanje izluživanja iz uzorka cementog morta s dodatkom pepela provedeno je u suradnji s Laboratorijem za geokemijski okoliš Geotehničkog fakulteta, Varaždin i to na samo 6 uzoraka zbog ograničenih sredstava za ovu namjenu.

Tablica 27 Rezultati ispitivanja izluživanja teških metala iz uzorka cementnog morta

Ispitni parametar	Jedinica mjere	Oznaka uzorka					
		KA M ₁₀ -B	KA M ₂₀ -B	KA M ₂₀ -B**	KC M ₂₀ -B	ZG M ₂₀ -B	ZG M ₂₀ -B**
Cl ⁻	mg/L	6,7	8,3	14,9	17,5	14	10
F ⁻	mg/L	0,34	0,54	0,33	0,10	0,35	0,37
S ²⁻	µg/L	1	< DL	1	3	2	15
Cu	mg/L	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Zn	mg/L	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Pb	µg/L	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Cd	µg/L	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Ni	µg/L	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
As	µg/L	0,245	0,107	0,188	< DL	< DL	< DL
Cr	µg/L	18,78	8,57	35,34	27,35	16,85	21,87
Se	µg/L	2,238	4,033	8,927	19,85	9,983	9,459
Co	µg/L	< DL	0,123	0,947	< DL	< DL	< DL
Mo	µg/L	29,34	22,74	121,4	24,38	24,38	27,07
Sr	µg/L	2,980	5,134	15,35	5,508	3,559	4,333

*DL- manje od granice detekcije



12. Zaključak

Iz provedenih ispitivanja na cementnom mortu s ugrađenim pepelom iz mulja s različitih UPOV u Hrvatskoj 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“.

Također, u drugoj godini istraživanja obavit će se i ispitivanja s pepelom dobivenim iz mulja s UPOV Varaždin 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 cementnog morta za sve analizirane uzorke uglavnom je podjednaka i ne ovisi značajnije o udjelu dodanog pepela kao ni o primjenjenoj temperaturi spaljivanja mulja.
- Temperatura svježeg cementnog morta generalno raste s povećanjem udjela dodanog pepela što je posebice karakteristično za pepeo iz mulja s UPOV Koprivnica.
- Udio pora povećava se s povećanjem udjela dodanog pepela.
- Obradljivost se smanjuje s povećanjem udjela dodanog pepela, prije svega zbog povećanih potreba za vodom što se pokazalo posebno značajnim kod mješavina s pepelom iz mulja s UPOV Koprivnica.
- Vrijeme vezivanja varira s obzirom na udio dodanog pepela, kao i primjenjene temperature spaljivanja mulja i iz obrađenog seta podataka se ne može izvesti generalni zaključak o ovim utjecajima budući da su zabilježeni suprotni trendovi pri korištenju pepela iz različitih izvora i dobivenog spaljivanjem na različitim temperaturama.
- Mehaničke karakteristike cementnog morta (čvrstoća na savijanje i tlačna čvrstoća) generalno opadaju s povećanjem udjela dodanog pepela, ali su za sve analizirane mješavine dobiveni relativno zadovoljavajući rezultati koji zadovoljavaju klasu korištenog cementa. Međutim, potrebno je istaknuti i da su pojedini uzorci s dodanim pepelom (10% i 20%) pokazali bolje mehaničke karakteristike u odnosu na referentne mješavine. Iz prikazanih rezultata moglo bi se zaključiti da se najbolje vrijednosti čvrstoća dobivaju korištenjem pepela dobivenog na 900°C, ali je navedenu konstataciju potrebno dodatno ispitati u sklopu budućih istraživanja.
- Povećanjem udjela pepela u cementnom mortu primijećeno je generalno povećanje koeficijenta plinopropusnosti, odnosno smanjenje otpornosti morta, ali pojedini rezultati pokazuju suprotno. Ovisnost kretanja vrijednosti koeficijenta plinopropusnosti o temperaturi spaljivanja mulja nije dokazana provedenim ispitivanjem. Ovisnost plinopropusnosti i vodovezivnog omjera je dokazana ovim ispitivanjem. Naime, veći vodovezivni omjeri rezultiraju većim koeficijentom plinopropusnosti, odnosno rezultiraju manjom otpornosti mortova.
- Rezultati ispitivanja mikrostrukture uzorka cementnog morta s dodanim pepelom (XRD analize) ukazuju na reakciju cementnog morta pri čemu dodatci termički obrađenog mulja minimalno



utječu tek na kvantitativni sastav produkata hidratacije u uzorcima. Može se zaključiti da dodatak pepela ne utječe na promjene difraktograma u uzorcima cementnog morta.



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

