

Primljen / Received: 17.11.2018.

Ispravljen / Corrected: 16.1.2019.

Prihvaćen / Accepted: 2.2.2019.

Dostupno online / Available online: 10.8.2019.

Ponašanje morta s dodatkom bazaltnog praha pri visokim temperaturama

Autor:



Doc.dr.sc. **Veysel Akyuncu**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Namık Kemal u Tekirdağ
Građevinski fakultet
vakyuncu@nku.edu.tr

Prethodno priopćenje

Veysel Akyuncu

Ponašanje morta s dodatkom bazaltnog praha pri visokim temperaturama

U radu je prikazan utjecaj temperatura do 800 °C na rezidualna fizikalna i mehaničke svojstva morta. U istraživanju se kao zamjena za standardni pijesak koristi bazaltni prah u omjeru od 20 i 40 % zbog njegove otpornosti na visoke temperature. Mješavini morta dodana su i polipropilenska ili bazaltna vlakna kako bi se izbjeglo odlamanje morta. Rezultati pokazuju da dodana količina bazaltnog praha ne utječe na smanjenje čvrstoće, te da savojna čvrstoća morta uglavnom ovisi o vrsti vlakana i temperaturi, a ne o primjeni zamjenskog bazaltnog praha.

Ključne riječi:

visoka temperatura, pojačanje vlaknima, bazaltni prah, mehanička svojstva

Research Paper

Veysel Akyuncu

Basalt powder dependent properties of mortars subjected to high temperatures

The effects of high temperatures of up to 800 °C on residual physical and mechanical properties of mortars are presented in this paper. Due to its resistance to high temperatures, basalt powder is used as a substitute to standard sand at the ratios of 20% and 40%. Polypropylene or basalt fibres have been added to mortar mixtures to avoid spalling. Results show that the ratio of basalt powder does not change the strength reduction rate, and that the flexural strength performance of mortar mainly depends on fibre type and temperature rather than on basalt powder substitution.

Key words:

High temperature, fibre reinforcement, basalt powder, mechanical properties

Vorherige Mitteilung

Veysel Akyuncu

Verhalten von Mörtel unter Zusatz von Basaltpulver bei hohen Temperaturen

Die Arbeit zeigt den Einfluss von Temperaturen bis zu 800 °C auf die restlichen physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Mörtels. In der Studie wird Basaltpulver im Verhältnis von 20 zu 40 % aufgrund seiner hohen Temperaturbeständigkeit als Standard-Sandersatz verwendet. Didan-Mörtelmischungen sind auch Polypropylen- oder Basaltfasern, um Mörtelablagerungen zu vermeiden. Die Ergebnisse zeigen, dass die zugesetzte Menge an Basaltpulver die Festigkeitsreduzierung nicht beeinflusst und dass die Biegefestigkeit des Mörtels stark von der Art der Faser und der Temperatur abhängt und nicht von der Verwendung von Basaltersatzpulver.

Schlüsselwörter:

hohe Temperatur, Faserverstärkung, Basaltpulver, mechanische Eigenschaften

1. Uvod

Svojstva trajnosti, poput otpornosti na visoke temperature uzrokovane požarom, značajni su faktori koji uvelike utječu na učestalost primjene građevnih materijala. Vjerojatnost požara u novije vrijeme postaje sve veća jer stambene zgrade postaju sve integralnije i kompaktnije a i zato što se u njihovoj izvedbi koriste kompozitni materijali [1]. Smatra se da je portlandski cement materijal s najširokom primjenom u građevinarstvu. Poznato je međutim da se beton na bazi portland cementa loše ponaša pri visokim temperaturama [2, 3]. Taj materijal počinje gubiti tlačnu čvrstoću nakon kritične temperature od otprilike 600 °C [4]. Georgali i Tsiliris [5] smatraju da do tog gubitka čvrstoće dolazi zbog razlaganja kalcijevog hidroksida (CH) u kalcijev oksid, te posljedičnog povećanja obujma nakon hlađenja uslijed rehidracije kalcijevog oksida. Handoo i dr. [6] smatraju da gubitak kristalne vode pri temperaturi većoj od 400 °C uzrokuje razlaganje proizvoda i posljedični gubitak mase. Sučeljak cementne paste i agregata slabi zbog toplinske nekompatibilnosti ta dva sastojka betona. Osim toga, na temperaturama između 480 °C i 510 °C dolazi do eksplozivnog odlamanja, što umanjuje nosivost betonskih konstrukcija [7]. Iako do odlamanja uglavnom dolazi pri visokim temperaturama, zabilježeno je da se ta pojava javlja i pri nižim temperaturama od približno 200 °C [8, 9]. Faktori koji dovode do odlamanja prouzročeni su visokim temperaturama uglavnom su brzina zagrijavanja, veličina i oblik uzoraka, udio vlage, te propusnost i čvrstoća betona [10-12]. Kao jedna od najčešćih metoda za sprečavanje pucanja spominje se dodavanje polipropilenskih (PP) vlakana, koja povećavaju propusnost betona pri visokim temperaturama te olakšavaju isparavanje vode. Prema Akturku i dr. [13], odlamanje se može djelotvorno spriječiti tako da se cementu dodaju polipropilenska vlakna u težinskom omjeru od 0,2 %.

S ciljem poboljšanja vlačne čvrstoće morta pri visokim temperaturama te smanjenja stupnja oštećenja morta, istraživanja autora [14] su pokazala da čelična vlakna doprinose navedenom.

Vrsta agregata bitno utječe na ponašanje betona pri visokim temperaturama, a ponašanje agregata ovisi o njegovom mineraloškom sastavu. Pri temperaturi od 570 °C α -kvarc (niska temperaturna faza) pretvara se u β -kvarc (visoka temperaturna faza) zbog polimorfne transformacije u silicijskom agregatu. To dovodi do povećanja obujma betona te do njegovog oštećenja [15]. U slučaju vapnenačkog i dolomitnog agregata, karbonati se razlažu u CaO ili MgO pri temperaturi od 800 do 900 °C [16]. Promjena u fazi ne uočava se kod bazaltnog agregata

pri temperaturama do 800 °C [17]. Hager i dr. [18] odredili su fizikalna i mehanička svojstva betona s raznim vrstama agregata kao što su bazalt, granit, dolomit i riječni šljunak. Ti autori navode da vrsta agregata utječe na mehanička svojstva pri temperaturama do 400 °C. Iznad te temperature, razlaganje portlandita pridonosi smanjenju čvrstoće. Drugi autori [19] smatraju da beton koji sadrži bazalni agregat ima niži koeficijent toplinskog širenja od betona s vapnenačkim agregatom, te se stoga bolje ponaša pri visokim temperaturama.

U ovom istraživanju za proizvodnju morta otpornog na visoke temperature koristi se mješavina bazaltnog praha i silicijskog pijeska. Bazalni se prah dodaje mješavini zbog njegove otpornosti na visoke temperature. Međutim, sitne čestice tog praha dovode do povećanja gustoće morta zbog njegovog svojstva popunjavanja pora u betonu. Stoga se mješavini dodaju PP vlakna kako bi se izbjeglo odlamanje. Za usporedbu su drugoj mješavini morta umjesto PP vlakana dodana bazaltna vlakna koja mogu podnijeti visoke temperature.

2. Eksperimentalna analiza

2.1 Materijali i mješavine

Referentni mort (R) pripremljen je pomoću cementa tipa CEM I 42.5 R, superplastifikatora tipa na bazi polikarboksilata i standardnog RILEM Cembureau pijeska. Bazalni je prah ($d_{50} \approx 30 \mu\text{m}$) zamijenjen s 20 % i 40 % pijeska po obujmu, a dobivene mješavine morta nose oznake B20 tj. B40. Gustoće čestica pijeska i bazaltnog praha iznosile su 2,68 kg/m³ tj. 2,73 kg/m³. Osim toga, za pripremu mješavina morta ojačanog vlaknima dodane su i dvije različite vrste vlakana u postotku od 0,5 % od obujma morta, a to su polipropilenska vlakna (PP) i bazaltna vlakna (BF). Detaljna svojstva vlakana iskazana su u tablici 1. Mješavine morta ojačanih vlaknima označene su prema vrsti vlakana. Na primjer, referentna skupina morta s PP vlaknima obilježena je oznakom RF, a skupina referentnih morta s BF vlaknima dobila je oznaku RBF. Sastav mješavina i njihova svojstva u svježem stanju iskazana su u tablici 2.

2.2. Postupak zagrijavanja i ispitivanje

Nakon 28 dana njega u vodi, tri su uzorka za svaku mješavinu i temperaturu sušena u sušioniku 24 sata na temperaturi od 105 °C prije grijanja. Zatim su uzorci stavljeni u peč gdje su grijani dva sata na temperaturama od 300 °C, 600 °C i 800 °C s brzinom zagrijavanja od 6 do 10 °C/min. Nakon grijanja uzorci su izvađeni iz peći i ohlađeni na sobnoj temperaturi.

Tablica 1. Svojstva polipropilenskih i bazaltnih vlakana

Vrsta vlakana	Dužina [mm]	Promjer [μm]	Modul elastičnosti [GPa]	Produljenje [%]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Gustoća [g/cm ³]	Točka otapanja [°C]
PP	6	--	3,5	25	350-700	0,91	160
BF	6	13-20	89	3,15	4100-4800	2,80	1280

Tablica 2. Sastavi mješavina i svojstva u svježem stanju

Mješavine	Cement [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Pijesak [kg/m ³]	Bazalni prah [kg/m ³]	Udio vlakana [%, po objemu]	Superplastifikator [kg/m ³]	Tečenje [cm]	Gustoća u svježem stanju [kg/m ³]
R	500	250	1500	--	--	--	17,0	2254
B20	500	250	1200	306	--	1,5	17,8	2233
B40	500	250	900	611	--	2,5	16,5	2328
RF	500	250	1500	--	0,5	5	17,2	2157
RBF	500	250	1500	--	0,5	5	16,7	2202
B20F	500	250	1200	306	0,5	6,5	17,0	2160
B20BF	500	250	1200	306	0,5	6,5	16,8	2203
B40F	500	250	900	611	0,5	7,5	16,5	2115
B40BF	500	250	900	611	0,5	7,5	15,0	2159

Obujam propusnog pornog prostora određen je prema normi ASTM C642 [20] na dijelu prizmatičnih uzoraka koji su preostali nakon ispitivanja savojne čvrstoće. Nakon sušenja u sušioniku i vaganja, uzorci su uronjeni u vodu gdje su kuhani 5 sati. Nakon toga je određena njihova masa u zasićenom stanju. Postotak pornog prostora izračunan je prema izrazu (1):

$$Porni\ prostor, \% = \frac{C - A}{C - D} \times 100 \quad (1)$$

gdje je A masa uzorka na zraku nakon sušenja u sušioniku (g), C je masa uzorka u zraku nakon uranjanja i kuhanja (g), a D je prividna masa uzorka u vodi nakon uranjanja i kuhanja (g).

Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa provedeno je prema normi EN 12504-4 [21]. Ispitivanje je provedeno na tri uzorka dimenzija 40x40x160 mm za svaku seriju morta.

Savojna i tlačna čvrstoća morta ispitana je na uzorcima dimenzija 40x40x160 mm nakon 28 dana prema normi EN 196-1 [22]. Mehanička ispitivanja provedena su na po tri uzorka za svaku temperaturu nakon postupka grijanja kako bi se dobile rezidualne čvrstoće. Žilavost uzoraka određena je na uzorcima dimenzija 40x40x160 mm ispitivanjem savijanja u tri točke. Ispitivanje je provedeno u postupku kontroliranog progiba, a dužina efektivnog raspona iznosila je 100 mm. Progib u sredini izmjeren je pomoću videoekstenzometra.

3. Rezultati i rasprava

3.1. Fizikalna svojstva

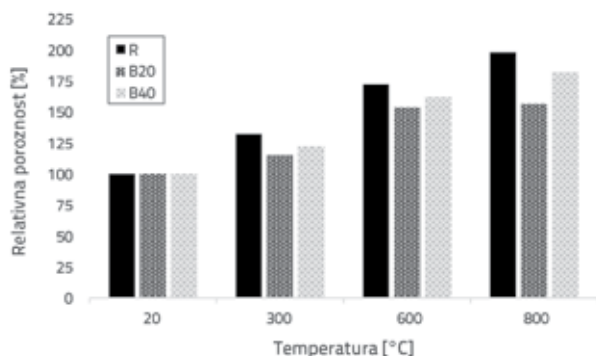
Fizikalna svojstva morta izloženog visokim temperaturama istraživana su određivanjem poroznosti i brzine ultrazvučnog impulsa (eng. *ultrasonic pulse velocity* - UPV).. Promjena poroznosti i UPV-a morta pod utjecajem visokih temperatura prikazana je na slikama 1. do 4.

Relativna poroznost morta izračunana je kao postotak preostale poroznosti morta u odnosu na poroznost referentnog morta koji nije bio izložen djelovanju visokih temperatura. Kao što vidimo na slikama 1. i 2., relativna se poroznost postupno povećava kada

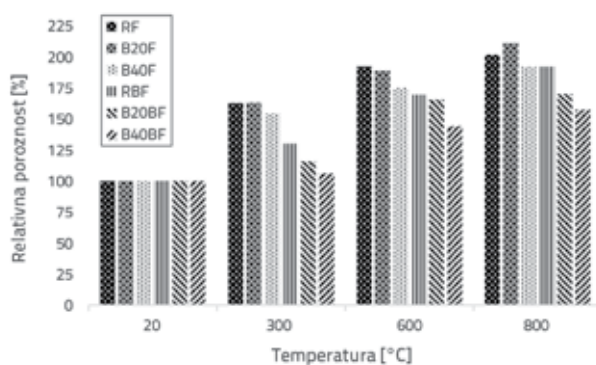
se mort zagrijava na temperaturu od 800 °C i to bez obzira na količinu bazalnog praha i vrstu vlakana. Zamjena 20 % silicijskog agregata s bazaltnim prahom rezultirala je pozitivnim učinkom pri svim temperaturama. Ustanovljeno je da je povećanje poroznosti kod uzoraka B20 manje nego kod referentnih uzoraka i morta B40, a razlika se bitno povećava pri temperaturi od 800 °C. Postotak poroznosti referentnog morta bio je tek nešto veći nego kod morta B40 u temperaturnom rasponu od 300 °C do 800 °C. To znači da 40-postotna zamjena bazalnog praha nije bitno utjecala na otpornost morta na visoke temperature u rasponu do 800 °C. To se može pripisati doprinosu bazalnog praha mikrostrukтури morta; gušća mikrostruktura dovela je do manje migracije vodene pare. Dakle, zbog manje migracije vodene pare dolazilo je do povećanja tlaka pare te, posljedično, do formiranja pukotina u cementnoj matrici. Ova se poteškoća može riješiti generiranjem dodatne poroznosti te formiranjem mikrokanala i to uvođenjem PP vlakana u cementnu matricu, koji se otapaju kod otprilike 160-170 °C. Rezultati ispitivanja prikazani na slici 2. mogu poslužiti kao potvrda ovog objašnjenja. Mortovi sa 40 % bazalnog praha i PP vlakana najbolje su se ponašali pri svim temperaturama (slika 2.). Mješavine B40 imale su se veću poroznost u odnosu na mješavine B20 bez dodatka vlakana. S druge strane, mortovi sa 40 % bazalnog praha odlikuju se nižom poroznošću ako se usporede s mortovima B20 bez PP vlakana. Na primjer, poroznost morta B20 povećala se za 156 %, dok je kod morta B40 zabilježeno povećanje od 192 % pri temperaturi od 800 °C. Međutim, ovaj se trend potpuno neočekivano mijenja s dodatkom PP vlakana pri istim temperaturama. Poroznost B40F povećala se za 192 %, a povećanje kod B20BF iznosilo je 211 %. Kako bi se shvatio pozitivan utjecaj vlakana u seriji B40, u obzir se trebaju uzeti dodatne pore koje proizlaze iz otapanja vlakana. Poroznost uzoraka bez vlakana donekle se povećala, ali je zato zabilježen iznimno velik porast kod uzoraka s polipropilenskim vlaknima pri temperaturi od 300 °C, koja je iznad točke otapanja vlakana.

Dodavanjem bazaltnih vlakana mijenja se ponašanje morta pri visokim temperaturama. Iako je porast poroznosti mješavina bez bazalnog praha (R) bio nešto manji od porasta zabilježenog

kod ostalih mješavina (slika 2.), mortovi s bazaltnim prahom bolje su se ponašali s dodatkom BF. Pri temperaturi od 300 °C nije zabilježen bitan utjecaj na uzorke B20BF i B40BF. Iznad te temperature, poroznost je znatno porasla, ali je porast bio niži nego kod referentnih mortova ili mortova ojačanih PP vlaknima. Razlog tome možda leži u višoj točki otapanja BF vlakana u odnosu na PP vlakna.



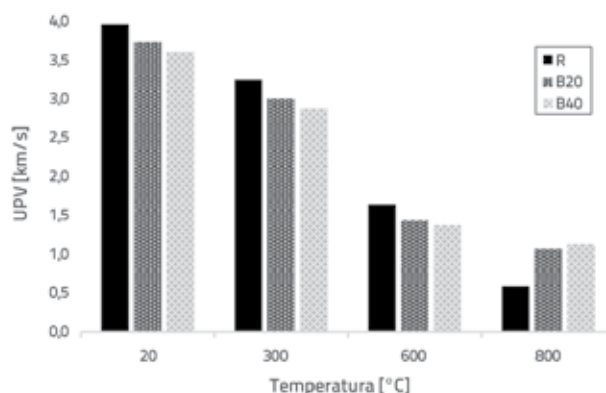
Slika 1. Relativna poroznost referentnih mortova i mortova s bazaltnim prahom



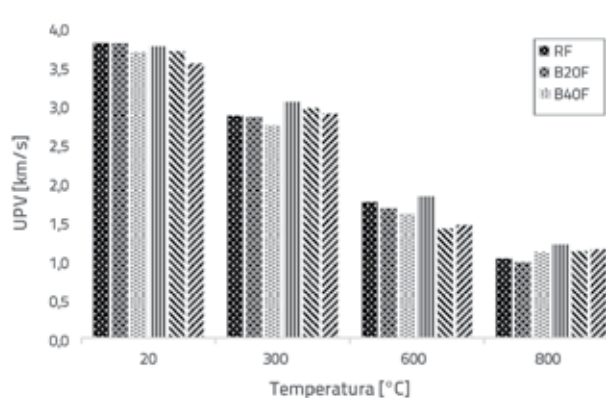
Slika 2. Relativna poroznost mortova pojačanih vlaknima

Ultrazvučna mjerenja provedena su na svim serijama nakon izlaganja visokim temperaturama. Prije mjerenja brzine ultrazvučnog impulsa (UPV), uzorci su ohlađeni na sobnu temperaturu. Na slikama 3. i 4. prikazani su rezultati ispitivanja UPV za mortove izložene visokim temperaturama. Iako je primjena bazalnog praha i vlakana dovela do manjeg smanjenja vrijednosti UPV uzoraka morta prije izlaganja visokim temperaturama, na svim su serijama zabilježene vrijednosti UPV veće od 3,5 km/s, što se prema [23] može smatrati odličnim rezultatom. S povećanjem temperature uočava se naglo smanjenje vrijednosti UPV. Povoljan utjecaj bazalnog praha zabilježen je iznad temperature od 600 °C. To se može objasniti razlikom u mineraloškom sastavu silicijskog pijeska i bazalnog praha. Poznato je da kvarc polimorfno prelazi iz alfa kvarca u beta kvarc u temperaturnom rasponu od 550 °C do 600 °C, što dovodi do povećanja obujma i oštećenja strukture cementne matrice. U tom se smislu može reći da veća zamjena pijeska bazaltnim prahom dovodi do veće otpornosti pri temperaturi od 800 °C. Dodavanje vlakana nije bitno utjecalo na vrijednosti UPV.

Jedina značajna promjena zbog dodavanja vlakana zabilježena je u referentnim serijama pri temperaturi od 800 °C. Vrijednosti UPV za referentne uzorke pojačane bazaltnim i polipropilenskim vlaknima pri temperaturi od 800 °C bile su gotovo dva puta više od vrijednosti zabilježenih kod običnih mortova. To se može pripisati temperaturi izlaganja koja je viša od točke otapanja PP vlakana i negativno djeluje na sučeljak između BF vlakana i matrice.



Slika 3. Vrijednosti UPV referentnih mortova i mortova s bazaltnim prahom



Slika 4. Vrijednosti UPV mortova pojačanih vlaknima

3.2. Mehanička svojstva

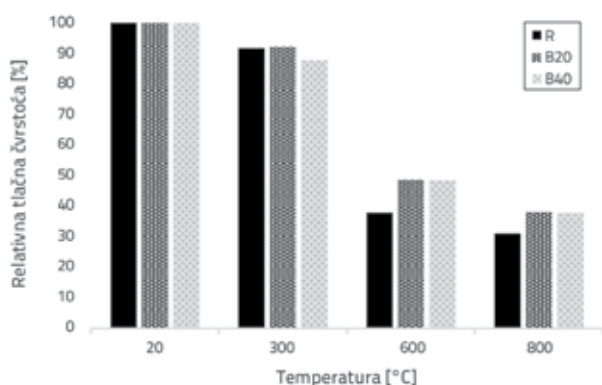
3.2.1. Tlačna čvrstoća

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće prikazani su u tablici 3. Promjena tlačne čvrstoće mortova ovisi o sastavu mješavine i temperaturi na kojoj su ispitani uzorci. Rezultati ispitivanja pokazuju da je tlačna čvrstoća mortova prije grijanja varirala između 40 MPa i 47 MPa. Postotak unosa bazalnog praha nije bitno utjecao na tlačnu čvrstoću. Međutim dodavanje bazaltnih vlakana uzrokovalo je, u manjoj mjeri, povećanje tlačne čvrstoće. Ovaj je nalaz u skladu s rezultatima istraživanja koje su proveli Kizilkanat i dr. [24], objašnjavajući utjecaj bazaltnih vlakana na tlačnu čvrstoću. Utvrđeno je da mješavina B20BF ima najvišu tlačnu čvrstoću (47 MPa), a mješavina B20 najnižu (40 MPa).

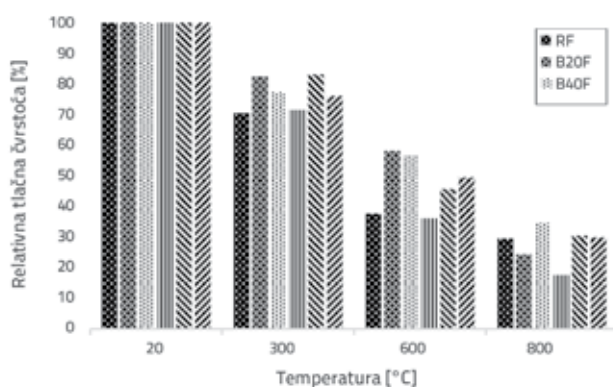
Tablica 3. Rezultati tlačne čvrstoće mortova [MPa]

Temperatura [°C]	R	B20	B40	RF	RBF	B20F	B20BF	B40F	B40BF
20	42,8	39,5	42,3	42,6	46,5	46,4	47,0	41,7	41,3
300	39,3	36,4	37,0	30,0	33,2	38,2	39,0	32,2	31,4
600	16,2	19,2	20,4	16,1	16,8	26,9	21,4	23,6	20,4
800	13,3	15,1	16,0	12,6	8,2	11,3	14,3	14,4	12,4

Relativna rezidualna (preostala) tlačna čvrstoća mortova izloženih djelovanju visokih temperatura prikazana je na slikama 5. i 6. Do smanjenja tlačne čvrstoće došlo je kada su uzorci grijani na temperaturi od 300 °C, a rezidualna tlačna čvrstoća bitno se smanjila s dodatnim porastom temperature. Na primjer, tlačna čvrstoća smanjila se za otprilike pola vrijednosti pri temperaturi od 600 °C i to zbog toplinske nekompatibilnosti između agregata i cementne matrice.



Slika 5. Relativna rezidualna tlačna čvrstoća mortova s bazaltnim prahom pri visokim temperaturama



Slika 6. Relativna rezidualna tlačna čvrstoća mortova pojačanih vlaknima pri visokim temperaturama

Pri temperaturi od 300 °C zabilježen je manji gubitak čvrstoće ($\approx 10\%$) kod mortova bez vlakana u odnosu na mortove ojačane vlaknima (između 17% i 31%). Iako pri temperaturi od 300 °C nije uočen očekivani pozitivan utjecaj bazalnog praha, povoljno djelovanje tog praha uočeno je pri višim temperaturama od 600 °C i 800 °C. Serije B20 i B40 zadržale su otprilike 49%

od svoje prvobitne tlačne čvrstoće pri 600 °C, te 38% pri 800 °C, dok su pri istim temperaturama referentni mortovi (R) zadržali 38% i 31% prvobitne tlačne čvrstoće. Različiti postoci zamjene pijeska u mješavinama bez vlakana nisu doveli do promjene u dinamici smanjenja čvrstoće. Ustanovljeno je da je negativni utjecaj bazalnog praha (gušća mikrostruktura) manji od njegovog pozitivnog utjecaja (stabilnost pri visokim temperaturama) kod mortova koji su ispitani pri visokim temperaturama. Kako udio bazalnog praha od 20 i 40 posto ne utječe bitno na tlačnu čvrstoću pri višim temperaturama, može se usvojiti 20% zamjene pijeska kao vrijednost koja je prikladna za mortove koji su u realnim uvjetima osjetljivi na visoke temperature.

Kako bi se smanjilo očekivano negativno djelovanje bazalnog praha, mortovima su dodana polipropilenska i bazalna vlakna. U takvim je slučajevima uočeno da zamjena pijeska bazaltnim prahom dovodi do povećanja trajnosti morta izloženog djelovanju visokih temperatura. Iako se tlačna čvrstoća morta ojačanog vlaknima postupno smanjuje usporedno sa zagrijavanjem, rezidualna čvrstoća uzoraka R i B20 pada ispod vrijednosti zabilježenih za mort pojačan vlaknima pri temperaturi od 600 °C. S druge strane, zanimljivo je napomenuti da je pri temperaturi od 800 °C preostala tlačna čvrstoća morta bez vlakana viša od odgovarajućih vrijednosti morta pojačanog vlaknima.

Ako usporedimo različite tipove vlakana, vidimo da pri temperaturi od 300 °C nema bitne razlike između mortova s polipropilenskim i mortova s bazaltnim vlaknima. Kada se temperatura poveća na 600 °C, bolje se ponašaju uzorci s polipropilenskim vlaknima. Pri temperaturi od 800 °C čvrstoća pada u rasponu od 18 do 35%, a najviša rezidualna čvrstoća zabilježena je kod mješavine B40F.

3.2.2. Savojna čvrstoća

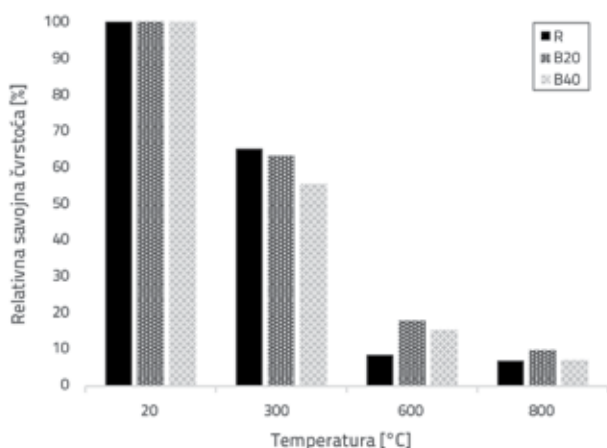
Rezultati dobiveni ispitivanjem savojne čvrstoće iskazani su u tablici 4. Može se uočiti ista tendencija kao i u slučaju ispitivanja tlačne čvrstoće. Iz tablice 4. proizlazi da savojna čvrstoća morta uglavnom ovisi o vrsti vlakana i temperaturi a ne o dodavanju bazalnog praha. Rezultati pokazuju da savojna čvrstoća morta varira između 6,4 MPa i 8,4 MPa prije zagrijavanja. Prema očekivanjima, na savojnu čvrstoću pozitivno djeluje i dodavanje bazalnog praha i dodavanje vlakana.

Odnos između smanjenja relativne čvrstoće i temperature prikazan je na slikama 7. i 8. Iz tih se slika vidi da se savojna čvrstoća naglo smanjuje pri zagrijavanju do 600 °C, ali i da

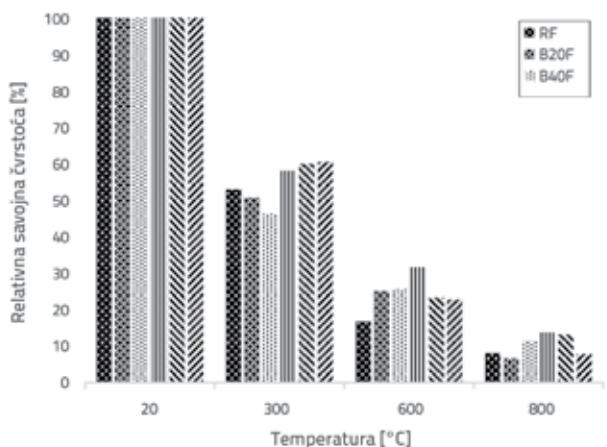
Tablica 4. Rezultati savojne čvrstoće morta [MPa]

Temperatura [°C]	R	B20	B40	RF	RBF	B20F	B20BF	B40F	B40BF
20	6,4	7,2	8,1	7,0	8,0	8,4	7,7	7,9	7,4
300	4,0	4,6	4,6	3,7	4,6	4,1	4,6	3,5	4,5
600	0,6	1,3	1,4	1,2	2,5	2,1	1,8	1,8	1,7
800	0,5	0,7	0,6	0,6	1,1	0,6	1,0	0,9	0,6

čvrstoća pada mnogo postupnije nakon dodatnog zagrijavanja. Što se tiče zamjene pijeska, iako bazaltni prah dovodi do povećanja savojne čvrstoće negrijanih uzoraka, ipak se povoljno djelovanje na tu čvrstoću ne bilježi nakon grijanja. Zamjena silicijskog agregata s 20 do 40 % bazalnog praha dovodi pri temperaturi od 300 °C do većeg gubitka čvrstoće nego kod uzoraka bez bazalnog praha. Međutim, suprotan se trend glede zamjene bazaltnim prahom bilježi kod temperature od 600 °C. Na toj je temperaturi zabilježen pad relativne rezidualne čvrstoće od 18 i 15 % za serije B20 i B40, dok je referentna serija zadržala samo 9 % od početne čvrstoće.



Slika 7. Relativna rezidualna savojna čvrstoća morta s bazaltnim prahom pri visokim temperaturama

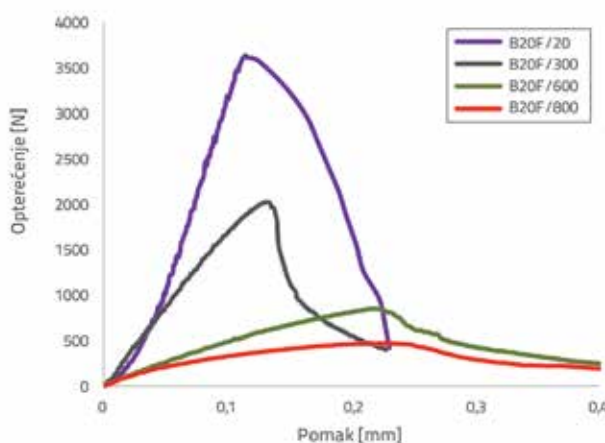


Slika 8. Relativna rezidualna savojna čvrstoća morta pojačanog vlaknima pri visokim temperaturama

Budući da bazaltni prah dovodi do pojave visokog pornog tlaka koji može prouzročiti eksplozivno odlamanje zbog čestica sitnijih od pijeska, u ovoj su studiji korištena polipropilenska vlakna kako bi se izbjegla ta negativna pojava. Utjecaj polipropilenskih i bazaltnih vlakana na savojnu čvrstoću morta varirao je ovisno o temperaturi. Bazaltna su vlakna dominantna pri temperaturama od 300 i 800 °C, a polipropilenska su vlakna značajnija za savojnu čvrstoću pri temperaturi od 600 °C kada zbog pornog tlaka elastična deformacija postiže svoju maksimalnu vrijednost [25]. Tome je razlog ponašanje polipropilenskih vlakana pri visokim temperaturama, kako je objašnjeno u točki 3.1. Pad čvrstoće morta s bazaltnim vlaknima iznosio je otprilike 40 % pri temperaturi od 300 °C. S druge strane, pad čvrstoće morta s polipropilenskim vlaknima varirao je od 47 do 54 posto pri istoj temperaturi. Kada je temperatura povećana na 600 °C, pretpostavlja se da su polipropilenska vlakna ipak bila djelotvornija od bazaltnih vlakana. Kada se uspoređi s mortom bez vlakana, mort s vlaknima imao je manji gubitak čvrstoće pri temperaturi od 600 °C. Utjecaj vlakana je zanemariv iznad te temperature.

3.2.3. Energija loma

Reprezentativne krivulje opterećenja i pomaka, dobivene tijekom ispitivanja savojne čvrstoće uzoraka morta B20F, prikazane su na slici 9. za svaku analiziranu temperaturu.

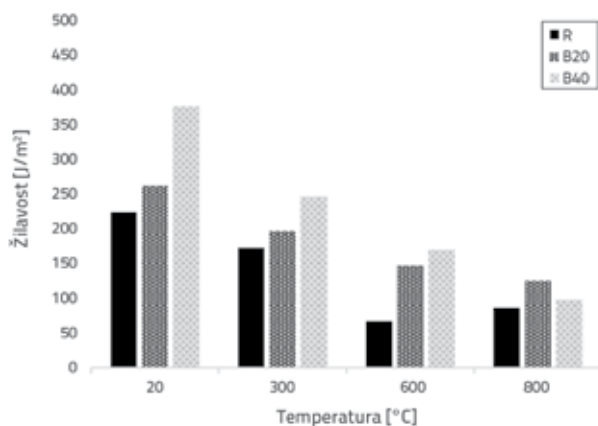


Slika 9. Krivulje opterećenja i pomaka mješavine B20F nakon izlaganja visokim temperaturama

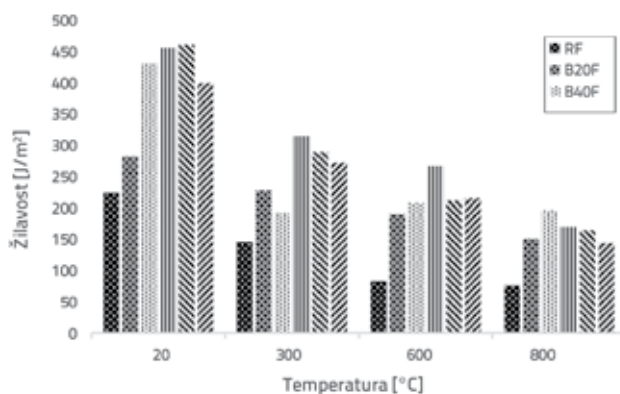
Precizna krivulja prosječnog opterećenja i pomaka dobivena je pomoću postupka koji se predlaže u [24, 26, 27]. Energija

loma izračunana je prema području koje se nalazi ispod krivulje opterećenja i pomaka, a prema RILEM-ovim preporukama [28]. Prema slici 9., u početku se bilježi pad krivulje opterećenja i pomaka, i to usporedno s porastom temperature, što znači da temperatura u velikoj mjeri utječe na krutost morta. Tome je razlog pojava mikropukotina na mortu usporedno s porastom temperature.

Promjena stanja žilavosti uslijed promjene temperature prikazana je na slici 10. Žilavost uzoraka varirala je pri sobnoj temperaturi od 224 J/m² do 462 J/m². Uočeno je da je utjecaj bazaltnih vlakana veći od utjecaja polipropilenskih vlakana. To se može objasniti bržim odzivom bazaltnih vlakana na porast opterećenja i to zbog veće čvrstoće i krutosti [29].



Slika 10. Krivulje opterećenja i pomaka mješavine B20F nakon izlaganja visokim temperaturama



Slika 11. Krivulje opterećenja i pomaka mješavine B20F nakon izlaganja visokim temperaturama

Pri visokim je temperaturama u svim serijama žilavost bila niža od žilavosti izmjerene na sobnoj temperaturi. Utjecaj polipropilenskih i bazaltnih vlakana na žilavost morta pri visokim temperaturama prikazan je na slici 11. Na toj se slici jasno vidi da dodavanje bazaltnih vlakana bitno pridonosi žilavosti pri visokim temperaturama. S druge strane, utjecaj polipropilenskih vlakana nije bitan nakon temperature od 300 °C zbog niske temperature

rastapanja. Sličan je trend zabilježen i kod mješavina u kojima je pijesak zamijenjen bazaltnim prahom.

4. Zaključak

U ovom je radu istražen utjecaj visokih temperatura na uzorke morta. Uzorci morta raznih sastava ispitani su pri visokim temperaturama od 300, 600 i 800 °C. Analizirana je promjena poroznosti, brzine ultrazvučnog impulsa, tlačne čvrstoće, savojne čvrstoće i energije loma. Nakon provedbe eksperimentalnog istraživanja izvedeni su sljedeći zaključci:

- Poroznost uzoraka postupno je rasla pri zagrijavanju do temperature od 800 °C i to bez obzira na količinu bazalnog praha i vrstu vlakana. Ponašanje mortova poboljšano je pri svim temperaturama nakon što je 20 % pijeska zamijenjeno bazaltnim prahom.
- Pri udjelu bazalnog praha od 40 % zabilježen je viši stupanj poroznosti pri visokim temperaturama nego kod 20-postotnog udjela tog praha. Dodavanjem polipropilenskih vlakana postignut je niži porast poroznosti kod B40F u usporedbi s mješavinama B20. Dodavanje bazaltnih vlakana nije bitno utjecalo na poroznost.
- Vrijednosti UPV naglo su rasle usporedno s povećanjem temperature. Povoljan utjecaj bazalnog praha zabilježen je na temperaturama višim od 600 °C. Dodavanje vlakana nije bitno utjecalo na vrijednosti UPV.
- Smanjenje tlačne čvrstoće zabilježeno je pri temperaturi od 300 °C, a rezidualna tlačna čvrstoća bitno se smanjivala usporedno s povećanjem temperature.
- Različiti udjeli bazalnog praha u mješavinama bez vlakana nisu utjecali na brzinu pada čvrstoće. Uzorci s polipropilenskim vlaknima bolje su se ponašali pri temperaturi do 600 °C.
- Rezultati dobiveni ispitivanjem na savijanje upućuju na slične trendove kao i kod tlačnog ispitivanja. Uočeno je da savojna čvrstoća morta uglavnom ovisi o vrsti vlakana i temperaturi, a ne o udjelu bazalnog praha. Savojna čvrstoća naglo se smanjivala do temperature 600 °C, a iznad te temperature smanjenje je bilo postupnije.
- Pad savojne čvrstoće u serijama mortova s bazaltnim vlaknima iznosio je otprilike 40 % pri temperaturi od 300 °C. Pad čvrstoće u serijama mortova s polipropilenskim vlaknima varirao je pri istoj temperaturi od 47 do 54 %. Kada je temperatura povećana na 600 °C, uočeno je da se polipropilenska vlakna ponašaju povoljnije od bazaltnih vlakana za serije mortova s bazaltnim prahom.
- Utvrđeno je da bazalna vlakna više pridonose žilavosti morta od polipropilenskih vlakana. Dodavanjem bazaltnih vlakana bitno je povećana žilavost pri visokim temperaturama. S druge strane, kod polipropilenskih vlakana nije uočena bitna razlika iznad temperature od 300 °C.

LITERATURA

- [1] Zhang, H.: Residential and commercial complex building fire safety measures of risk assessment studies and fire evacuation, ABRI research report; 2005.
- [2] Petzold, A., Rohrs, M.: Concrete for high temperature, 2nd Ed. Maclaren and sons Ltd, London, 1970.
- [3] Wang, W.C., Wang, H.Y., Lo, M.H.: The engineering properties of alkali activated slag pastes exposed to high temperature, *Construction and Building Materials*, 68 (2014), pp. 409-415, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.016>.
- [4] Yuzer, N., Akbas, B., Kizilkanat, A.B.: Predicting the high temperature effect on mortar compressive strength by neural network, *Computers & Concrete*, 8 (2011) 5, pp. 491-510, DOI: 10.12989/cac.2011.8.5.491.
- [5] Georgali, B., Tsakiridis, P.E.: Microstructure of fire-damaged concrete, A case study, *Cement & Concrete Composites*, 27 (2005) 2, pp. 255-259, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.022>.
- [6] Handoo, S.K., Agarwal, S., Agarwal, S.K.: Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures, *Cement Concrete Research*, 32 (2002), pp. 009-18, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00736-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00736-0)
- [7] Chan, S.Y.N., Peng, G.F., Anson, M., Peng, G.F., Anson, M.: Fire behaviour of high performance concrete made with silica fume at various moisture contents, *ACI Mater. J.*, 96 (1999) 3, pp. 405-409.
- [8] Canisius, T.D.G., Waleed, N., Mattews, S.L.: A Preliminary Study of the Cardington Concrete Building under a Compartment Fire, In: *Proc structural faults & repair conf.* 2003.
- [9] Both, C., van de Haar, P., Tan, G., Wolsink, G.: Evaluation of Passive Fire Protection Measures for Concrete Tunnel Linings. In: *International Conference & One Day Seminar 'Tunnel Fires and Escape from Tunnels*, Lyon, France, 5-7 May, 10, 1999.
- [10] Majarona, C.E., Salomoni, V.A., Mazzuccoa, G., Khoury, G.A.: An approach for modeling concrete spalling infinite strains, *Mathematics Computers in Simulation*, 80 (2010) 8, pp. 1694-1712, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2009.05.011>.
- [11] Phan, L.T., Lawson, J.R., Davis, F.L.: Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete, *Materials and Structures* 34 (2001) 2, pp. 83-91.
- [12] Hertz, K.D.: Limits of spalling of fire exposed concrete, *Fire Safety Journal*, 38 (2003) 2, pp. 103-116, [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6).
- [13] Akturk, B., Yuzer, N., Kabay, N.: Usability of raw rice husk instead of polypropylene fibres in high-strength concrete under high temperature, *Journal Materials in Civil Engineering*, 28 (2016) 1, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001341](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001341)
- [14] Mohammed, E., Molez, L., Kadri, T., Jauberthie, R.: Properties of fibre mortars after exposure to high temperatures, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 5, pp. 425-431, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1014.2014>
- [15] Hayden H. W. et al.: *The Structure and Properties of Materials*, Vol. 3. John Wiley & Son. Inc, USA. 1965.
- [16] Khoury, G.A.: Compressive strength of concrete at high temperatures: reassessment, *Magazine of Concrete Research*, 44 (1992) 161, pp. 291-309, <https://doi.org/10.1680/mac.1992.44.161.291>.
- [17] Zhang, B., Bicanic, N., Pearce C. J., Balabanic, G., Purkiss, J. A.: Residual fracture properties of normal- and high-strength concrete subject to elevated temperatures, *Magazine of Concrete Research*, 53(3) (2001), pp. 221-224.
- [18] Hager, I., Tracz, T., Śliwiński, J., Krzemień, K.: The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature, *Fire and Materials*, 40 (2016), pp. 668-682, DOI: 10.1002/fam.2318.
- [19] Hager, I.: Behaviour of cement concrete at high temperature, *Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 61(1) (2013), pp. 145-154, <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0013>.
- [20] ASTM C642-13 Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, 2013.
- [21] EN 12504-4, Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity, 2004.
- [22] EN 196-1, Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength, 2016.
- [23] Neville, A.M.: *Properties of Concrete*, 4th edition, Longman Scientific and Technical, New York, USA, 2000.
- [24] Kizilkanat, A.B., Kabay, N., Akyuncu, V., Chowdhury, S., Akca, A.: Mechanical properties and fracture behaviour of basalt and glass fibre reinforced concrete: An experimental study, *Construction and Building Materials*, 100 (2015), pp.218-224, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006>
- [25] Zhaoa, J., Zheng, J.J., Peng, G.F., Van Breugel, K.: Numerical analysis of heating rate effect on spalling of high-performance concrete under high temperature conditions, *Construction and Building Materials*, 152 (2017), pp. 456-466, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.023>.
- [26] Zhao, Z., Kwon, S.H., Shah, S.P.: Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiment sand fracture energy, *Cement and Concrete Research*, 38 (2008), pp.1049-1060, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.017>.
- [27] Yoo, D.Y., Zi, G., Kang, S.T., Yoon, Y.S.: Biaxial flexural behaviour of ultra-high performance fibre-reinforced concrete with different fibre length sand placement methods, *Cement and Concrete Composites*, 63 (2015), pp. 51-66, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.011>.
- [28] RILEM FMC-50, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend tests on notched beams, *Materials Structures*, 18 (1985) 4, pp. 287-290.
- [29] Sukontasukkul, P., Pomchiengpin, W., Songpiriyakij, S.: Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fibre reinforced concrete after exposure to high temperature, *Construction and Building Materials*, 24 (2010), pp. 1967-1974, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.003>.