

Primljen / Received: 24.7.2018.

Ispravljen / Corrected: 20.11.2018.

Prihvaćen / Accepted: 11.4.2019.

Dostupno online / Available online: 31.8.2019.

Utjecaj raznih postupaka njege i dodavanja silicijskoga aerogela na svojstva morta

Autori:



Doc.dr.sc. **Levent Bostanci**, dipl.ing. građ.
Sveučilište Beykent, Istanbul, Turska
Škola naprednih strukovnih studija
leventbostanci@beykent.edu.tr



Mr.sc. **Ozlem Ustundag**, dipl.ing. građ.
Istambulsko Sveučilište Cerrahpasa
Odjel za građevinarstvo
ozlemust@istanbul.edu.tr



Izv.prof.dr.sc. **Ozlem Celik Sola**, dipl.ing. građ.
Istambulsko Sveučilište Cerrahpasa
Odjel za građevinarstvo
celik@istanbul.edu.tr



Izv.prof.dr.sc. **Mucteba Uysal**, dipl.ing. građ.
Istambulsko Sveučilište Cerrahpasa
Odjel za građevinarstvo
mucteba.uysal@istanbul.edu.tr

Prethodno priopćenje

Levent Bostanci, Ozlem Ustundag, Ozlem Celik Sola, Mucteba Uysal

Utjecaj raznih postupaka njege i dodavanja silicijskoga aerogela na svojstva morta

U ovome se radu eksperimentalno istražuju poroznost te mehanička i toplinska svojstva morta s dodatkom aerogela u raznim uvjetima njege (njege vlaženjem i sušenjem, magnezijevim sulfatom [MgSO₄] i njega vodom). Maksimalna tlačna čvrstoća morta sa sadržajem aerogela od 0,5 % iznosila je 60,8 MPa nakon njege vlaženjem i sušenjem te 44,3 MPa nakon njege magnezijevim sulfatom. Osim toga, u usporedbi s ostalim metodama njege, udio formiranih gel pora u mortovima njegovanima magnezijevim sulfatom raste s količinom dodanoga aerogela.

Ključne riječi:

aerogel, utjecaj vlaženja i sušenja, utjecaj magnezijeva sulfata, toplinska provodljivost, struktura pora

Research Paper

Levent Bostanci, Ozlem Ustundag, Ozlem Celik Sola, Mucteba Uysal

Effect of various curing methods and addition of silica aerogel on mortar properties

Mechanical and thermal properties and porosity of aerogel-incorporated mortars exposed to various curing conditions (curing by wetting-drying, curing by magnesium sulphate (MgSO₄), and water curing) are experimentally investigated in this study. Maximum compressive strengths at 0.5 % aerogel content under the effects of wetting-drying and MgSO₄ curing conditions amounted to 60.8 MPa and 44.3 MPa, respectively. In addition, compared to the other curing methods, the gel pores formation in mortars exposed to MgSO₄ effects increased with an increase in aerogel content.

Key words:

aerogel, wetting–drying effect, magnesium sulphate effect, thermal conductivity, pore structure

Vorherige Mitteilung

Levent Bostanci, Ozlem Ustundag, Ozlem Celik Sola, Mucteba Uysal

Einfluss verschiedener Pflegeprozesse und Zugabe von Silica-Aerogel auf die Mörtel Eigenschaften

In dieser Arbeit werden die Porosität sowie die mechanischen und thermischen Eigenschaften von Mörtel unter Zusatz von Aerogel unter verschiedenen Pflegebedingungen (Behandlung mit Benetzung und Trocknung, Magnesiumsulfat [MgSO₄] und Wasser) experimentell untersucht. Die maximale Druckfestigkeit des Mörtels mit einem Aerogelgehalt von 0,5 % betrug nach der Behandlung mit Benetzung und Trocknung 60,8 MPa und nach der Behandlung mit Magnesiumsulfat 44,3 MPa. Darüber hinaus steigt im Vergleich zu anderen Pflegemethoden der Anteil mit der Menge des zugesetzten Aerogels der gebildeten Gelporen in Mörteln, die mit Magnesiumsulfat behandelt werden.

Schlüsselwörter:

Aerogel, Einfluss der Benetzung und Trocknung, Einfluss von Magnesiumsulfat, Wärmeleitfähigkeit, Porenstruktur

1. Uvod

Velik broj znanstvenih i tehnoloških promjena u sektoru građevnih materijala, ali i u svim ostalim sektorima, neminovno dovodi do proizvodnje tehnoloških materijala poboljšanih svojstava te do znatnoga razvitka postojećih materijala. U tome smislu ideja o poboljšanju toplinske izolacije kroz razvoj strukture pora u materijalima na bazi cementa ima važnu ulogu u inovacijskim strategijama kao sredstvo za ograničavanje potrošnje energije, imajući u vidu globalni trend pretjeranoga iskorištavanja izvora energije. Kako bi se postigla unapređenja u tome području, trenutačno se provode brojne eksperimentalne studije o dodacima kao što su mineralna vuna, ekspandirani polistiren, ekstrudirani polistiren, poliuretan, aerogelovi i nanoizolacijski materijali [1].

Poboljšanje toplinske izolacije dodavanjem silicijskoga aerogela, kako bi se modificirala struktura kalcijeva silikatnoghidrata (C-S-H) u materijalu, tema je koja posljednjih godina sve više plijeni pozornost stručne javnosti. Silicijski aerogelovi, koje je prvi puta proizveo Kistler 1931., smatraju se jednim od najlakših krutih materijala te su u tehničkome smislu atraktivni jer se zbog svoje velike površine, ukupne poroznosti koja doseže do 99 % i niske gustoće mogu koristiti za razne namjene [2, 3].

Aerogel se općenito koristi kao dodatak za poboljšanje termoizolacijskih svojstava mortova i betona. U eksperimentalnim analizama provedenima na mješavinama morta ili betona s dodatkom silicijskoga aerogela težište se uglavnom stavlja na zamjenu znatne količine pijeska (50 – 90 %) aerogelom. Obuhvat tih studija, koje se provode u svrhu smanjenja koeficijenta toplinske provodljivosti, često je ograničen na proizvodnju nenosivih elemenata malih mehaničkih čvrstoća te na primjenu izolacijskih plastičnih materijala. Znatna povezanost između željene toplinske izolacije i mehaničke čvrstoće ograničava mogućnosti primjene cementnih materijala u nosivim konstrukcijama [1, 4, 5]. Ratke je 2008. [6] proveo prvu eksperimentalnu studiju u kojoj su zrnati silicijski aerogelovi ugrađeni u cementnu matricu.

Ratke je u svojoj studiji koristio cemente CEM II 32.5 R, CEM I 42.5R i CEM I 52.5R u mješavinama s obujamskim udjelom aerogela od 50 % do 70 %. Kada je obujamski udio silicijskoga aerogela iznosio 70 %, tlačna je čvrstoća varirala od 0,6 do 1,5 MPa, s odgovarajućim koeficijentom toplinske provodljivosti od 0,010 W/mK [7].

Hub i dr. izmjerili su tlačne čvrstoće u rasponu od 1,4 do 2,5 MPa na mješavinama s obujamskim udjelom aerogela od 65 % do 75 %, s rasponom koeficijenata toplinske provodljivosti od 0,10 do 0,14 W/mK [8].

Gao i dr. istraživali su promjenu mehaničke čvrstoće i koeficijenta toplinske provodljivosti na betonskim mješavinama s dodatkom aerogela u obujamskome postotku od 0 % do 60 %. Oni su utvrdili to da se pri povećanju sadržaja aerogela koeficijenti toplinske provodljivosti smanjuju sa smanjenjem gustoće i mehaničke čvrstoće. Također su utvrdili da pri obujamskome sadržaju

aerogela od 60 % tlačna čvrstoća iznosi 8,3 MPa, a koeficijent toplinske provodljivosti 0,26 W/mK [4].

U sklopu ispitivanja betona visoke učinkovitosti s dodatkom aerogela Fickler i dr. pripremili su razne mješavine u kojima je obujamski sadržaj aerogela varirao od 60 % naviše. Oni su dokazali to da tlačna čvrstoća iznosi 10,0 MPa u mješavini s optimalnim rezultatima, s koeficijentom toplinske provodljivosti od 0,17 W/mK [6].

Prilikom ispitivanja mješavina morta s obujamskim postotkom aerogela od 50 % Serina i dr. izmjerili su tlačnu čvrstoću od 20 MPa te koeficijent toplinske provodljivosti od 0,55 W/mK. Ipak, ne preporučuje se primjena aerogela u težinskome udjelu većem od 50 % – 60 % zbog utjecaja na mehaničku čvrstoću [9].

U sklopu svojega eksperimentalnoga istraživanja Julio i dr. pripremili su lagane cementne žbuke s dodatkom 60 % aerogela, 40 % zrnatoga ekspandiranog pluta, ekspandirane gline i perlita. Izmjereni su tlačna čvrstoća od 0,92 MPa te koeficijent toplinske provodljivosti od 0,084 W/mK, pri čemu je ukupna poroznost uzoraka iznosila 60 % [10].

Primjenom metanola Kim i dr. pripremili su aerogelove u obliku gela kako bi ublažili poteškoće pri miješanju zrnatih aerogelova, ali i zbog pojave kapilarnih pukotina u toku hidratacije. U mješavinama morta koristili su aerogelove u obliku gela u težinskome omjeru od 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % i 2,0 % te su ostvarili tlačne čvrstoće u iznosima od 13,1 MPa, 8,0 MPa i 5,9 MPa, dok je tlačna čvrstoća referentnoga uzorka iznosila 26,3 MPa [11].

Na temelju studija prikazanih u navedenim radovima može se zaključiti to da se uz poboljšanje termoizolacijskih svojstava, koje proizlazi iz djelovanja aerogela, mijenja i struktura pora u mortu. Općenito, u cementnoj se matrici treba osigurati porozna struktura kako bi se postigla kvalitetna termoizolacijska svojstva. Međutim, za postizanje odgovarajuće mehaničke čvrstoće potrebna je upravo suprotna struktura pora [1, 4, 5].

Prilikom istraživanja utjecaja aerogela na strukturu pora u betonu utvrđeno je to da se dodavanjem aerogela u obujamskome udjelu od 20 % ukupna poroznost može povećati 8,63 % jer se tako stvara dodatni obujam pora, osobito u rasponu poroznosti od 10 nm do 30 nm [12].

Do sada je objavljen tek manji broj studija u kojima je analizirana trajnost morta s dodatkom aerogela u ovisnosti o strukturi pora u mortu. U radu [13] utvrđeno je to da ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja u velikoj mjeri negativno utječu na koeficijent toplinske provodljivosti morta za žbukanje s dodatkom aerogela. U studiji koju su 2016. proveli Ng i dr. utvrđeno je to da uvjeti njege bitno utječu na koeficijent toplinske provodljivosti i na tlačnu čvrstoću uzoraka s dodatkom aerogela. U uzorcima s aerogelom koji su prva 24 sata tretirani u kalupu pri temperaturi od 80 °C te zatim njegovani 28 dana u vodi prekriveni aluminijskom folijom pri temperaturi od 80 °C, tlačna se čvrstoća povećala 10 % u odnosu na referentni uzorak, dok je zabilježen 35-postotni pad koeficijenta toplinske provodljivosti [14].

Magnezijev sulfat, koji se nalazi u podzemnoj vodi, morskoj vodi ili u tekućemu industrijskom otpadu, utječe na postupak hidratacije i na formiranje hidratacijskih produkata u

materijalima na bazi kalcijeva silikatnog hidrata (C-H-S), i to djelovanjem iona Mg i SO_4 koji su sastavni dio njegove strukture. S obzirom na to da negativno utječe na hidratacijski proces, magnezijev sulfat smatra se jednom od opasnih soli koje utječu na smanjenje vijeka trajanja konstruktivnih elemenata. U ranijim eksperimentalnim studijama uočen je znatan pad vrijednosti modula elastičnosti, krutosti te tlačne i savojne čvrstoće konstruktivnih elemenata izloženih djelovanju magnezijeva sulfata. Kao rezultat hidratacijskoga procesa formira se struktura C-S-H gela koja bitno utječe na povećanje mehaničke čvrstoće. Međutim, na tu strukturu negativno utječu magnezijeve soli pa je formiranje C-S-H djelomično zamijenjeno strukturom magnezijeva silikatnog hidrata (M-S-H) koja je vrlo krhka i ne posjeduje sposobnost vezivanja [15]. Kako bi se smanjio negativni utjecaj $MgSO_4$ na strukturu C-S-H gela, često se materijali niske poroznosti tretiraju primjenom alternativnih rješenja kao što su visok sadržaj cementa, nizak vodovezivni faktor i primjena raznih mineralnih veziva otpornih na djelovanje soli. Kod mješavine mortova s reguliranom poroznošću, u kojima se koriste dodatni aditivi kako bi se pod utjecajem $MgSO_4$ poboljšala trajnost, općenito je utvrđen gubitak mehaničke čvrstoće morta, bez obzira na promjenu njegove ukupne poroznosti.

Originalnost ovog istraživanja leži u otkrivanju važnih mehaničkih svojstava, toplinske provodljivosti i porozimetrijskih svojstava morta s dodatkom silicijskoga aerogela izlaganjem uzoraka raznim uvjetima njege kao što su njega vlaženjem i sušenjem te njega uz pomoć $MgSO_4$.

2. Materijali i metode

2.1. Materijali

U mješavinama morta koje su izrađene za potrebe ovog istraživanja korišteni su portlandski cement tipa CEM I 42.5 R, koji proizvodi *Limak Cement Co.*, te standardizirani pijesak CEN. Kemijski sastav i fizikalna svojstva cementa prikazani su u tablici 1. Silicijski aerogel, koji se često koristi kao aditiv za poboljšanje svojstava toplinske izolacije mortova, nabavljen je za potrebe studije od tvrtke *Alison Aerojel Co.* Aerogel je proizveden prema tehničkim specifikacijama koje su istaknute u tablici 2. Fizikalna svojstva aerogela korištenoga u ovoj studiji prikazana su u tablici 2.

Tablica 3. Udjeli u mješavini morta s dodatkom aerogela

Oznaka mješavine	Sadržaj aerogela [%]	Sadržaj cementa [%]	Aerogel [g]	Cement [g]	Vodocementni faktor	Voda [ml]	Pijesak [g]
A1	0,1	100	0,45	450	0,50	225	1350
A2	0,3		1,36	450			
A3	0,5		2,25	450			
A4	0,7		3,16	450			
A5	1,0		4,50	450			

Tablica 1. Kemijska i fizikalna svojstva CEM I 42.5

Kemijski sastav (tež. / % tež)		
SiO ₂ (otopljena tvar)		18,99
Al ₂ O ₃		4,77
Fe ₂ O ₃		3,15
CaO		63,69
MgO		1,12
SO ₃		2,96
K ₂ O		0,64
Na ₂ O		0,17
Cl -		0,0099
Gubitak žarenjem		3,70
Neotopivi ostatak		0,38
Ukupna količina alkalija		0,59
C ₃ A		7,32
Fizikalna svojstva		
Vrijeme vezivanja [min]	Početno	150
	Konačno	195
Specifična težina		3,11
Specifična površina [cm ² /g]		3769
Volumenska stabilnost [mm]		1

Tablica 2. Fizikalna svojstva silicijskoga aerogela

Svojstva	Aerogel
Promjer pora	8 – 10 nm
Prividna gustoća	90 – 100 kg/m ³
Površina	790 – 840 m ² /g
Poroznost	> 94 %
Površinske skupine	OH-

2.2. Miješanje i pripremanje uzoraka

Kako bi se istražila mehanička, toplinska i porozimetrijska svojstva morta s dodatkom silicijskoga aerogela, pripremljene su tri mješavine morta s dodatkom aerogela za pet udjela

Tablica 4. Program ispitivanja

Ispitivanje	Broj uzoraka	Dimenzije [mm]	Normativni dokumenti
Tlačna čvrstoća	45	40 x 40 x 160	TS EN 196-1
Čvrstoća na savijanje	45	40 x 40 x 160	TS EN 196-2
Toplinska provodljivost	15 x 5 puta	40 x 40 x 160	ASTM C-518
Živina porozimetrija	15	40 x 40 x 160	ASTM D-7984

aerogela, koje su zatim njegovane na tri različita načina. Mortovi s dodatkom aerogela pripremljeni su dodavanjem aerogela u udjelima od 0,1 %, 0,3 %, 0,5 %, 0,7 % i 1,0 % u odnosu na masu cementa. Pojedinačni udjeli u mješavini morta s dodatkom aerogela prikazani su u tablici 3.

Mješavine su pripremljene tako da su na početku pomiješani suhi sastojci, odnosno cement, standardni pijesak i čestice aerogela. Nakon toga postupno se dodavala voda kako bi se omogućilo ravnomjerno raspoređivanje čestica aerogela. U mješavinama primijenjen je vodocementni faktor od 0,50. Ukupna količina cementa i aerogela u smjesi smatra se ukupnim sadržajem veziva.

Po završetku miješanja cementni mort ugrađen je u čelične kalupe te su tako dobiveni standardni uzorci dimenzija 40 mm x 40 mm x 160 mm za savojna ispitivanja. Zatim je provedeno vibriranje kako bi se spriječila segregacija pojedinih segmenata mješavine. Uzorci mješavina su nakon 24 sata izlaganja temperaturi od 21 ± 2 °C izvađeni iz kalupa. Uzorci su njegovani na tri različita načina: vlaženjem i sušenjem, dodavanjem $MgSO_4$ te u vodi.

2.3. Metode njege

Uz uobičajenu njegu vodom provedene su i njega vlaženjem i sušenjem te njega dodavanjem $MgSO_4$. Uzorci su pripremljeni posebno za svaku mješavinu, pri čemu su izrađena tri uzorka kako bi se dobila aritmetička sredina uzoraka za tri različita postupka njege.

Uzorci su tijekom njegovanja vodom uronjeni u spremnik s vodom, gdje se njega kontinuirano provodila 14 tjedana pri temperaturi od 21 ± 2 °C.

Za razliku od uobičajenoga postupka njege u vodi, u sklopu studije proveden je alternativni postupak kako bi se ispitalo ponašanje uzorka na utjecaj vlaženja i sušenja. Uzorci morta s dodatkom aerogela izvađeni su iz spremnika za njegu nakon tjedan dana vlaženja i sušenja te su u narednome tjednu njegovani pri sobnoj temperaturi od 21 ± 2 °C. Postupak njege u trajanju od 14 tjedana proveden je u sedam uzastopnih ciklusa. Druga alternativa uobičajenome postupku njege vodom bila je njega uzoraka uz pomoć $MgSO_4$. Uzorci su pohranjeni u spremnik za njegu u koju je prethodno uneseno 13 % $MgSO_4$ u težinskome omjeru te su se u toj posudi uzorci njegovali tjedan dana pri temperaturi od 21 ± 2 °C. U narednom su se tjednu uzorci sušili u sušioniku pri temperaturi od 105 °C. Postupak njege u trajanju od 14 tjedana proveden je u sedam uzastopnih ciklusa.

2.4. Ispitivanje

Nakon 14 tjedana njegovanja uzoraka (vodom, vlaženjem i sušenjem te primjenom $MgSO_4$) na uzorcima su provedena ispitivanja čvrstoće na savijanje, tlačne čvrstoće, koeficijenta toplinske provodljivosti te ispitivanje živinim porozimetrom (MIP) za određivanje poroznosti. Program ispitivanja prikazan je u tablici 4.

Ispitivanje savijanja u tri točke provedeno je na standardnim uzorcima morta dimenzija 40 mm x 40 mm x 160 mm, pri čemu se opterećenje nanosilo brzinom od 50 ± 10 N/s. Čvrstoća na savijanje i tlačna čvrstoća ispitane su prema normama TS EN 196-1 i TS EN 196-2. Čvrstoća na savijanje mješavine određena je izračunom aritmetičke sredine pojedinačnih čvrstoća određenih na sva tri uzorka iz svake mješavine.

Ispitivanja tlačne čvrstoće provedena su na kontaktnoj površini dimenzija 40 mm x 40 mm, pri čemu su korištena dva dijela dobivena nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje. Na uzorke je nanoseno vertikalno tlačno opterećenje od 2400 ± 100 N/s, a vrijednost tlačne čvrstoće mješavine dobivena je izračunom aritmetičke sredine pojedinačnih tlačnih čvrstoća definiranih na ukupno šest uzoraka.

Nakon što su provedena ispitivanja čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće, određen je koeficijent toplinske provodljivosti te je provedeno ispitivanje poroznosti živinim porozimetrom (MIP) na odgovarajućim dijelovima uzorka koji su dobiveni nakon mehaničkih ispitivanja.

Mjerenje koeficijenta toplinske provodljivosti uzoraka morta s dodatkom aerogela provedeno je u različitim uvjetima njege uz pomoć uređaja C-Therm, koji je razvila tvrtka *TCi*. Tim se uređajem mjeri koeficijent toplinske provodljivosti malih uzoraka modificiranom metodom vrućega diska (engl. *modified transient plane source* – MTPS) kojom se brzo i na praktičan način može izmjeriti koeficijent toplinske provodljivosti materijala u krutom, tekućemu, praškastome i izmiješanome stanju, i to drugačije od ostalih uređaja. Osim toga, koeficijent toplinske provodljivosti može se odrediti tim uređajem korištenjem samo jedne strane uzorka. Mjerenje koeficijenta toplinske provodljivosti provedeno je za svaki prizmatični uzorak morta pet puta na različitim dijelovima uzoraka. Tom vrlo praktičnom metodom koeficijent toplinske provodljivosti može se izmjeriti unutar jedne do tri sekunde.

Ispitivanje metodom MIP provedeno je uz pomoć uređaja Micromeritics. Rezultati dobiveni tim ispitivanjem koriste se za izračunavanje ukupne poroznosti i rasporeda pora u materijalu.

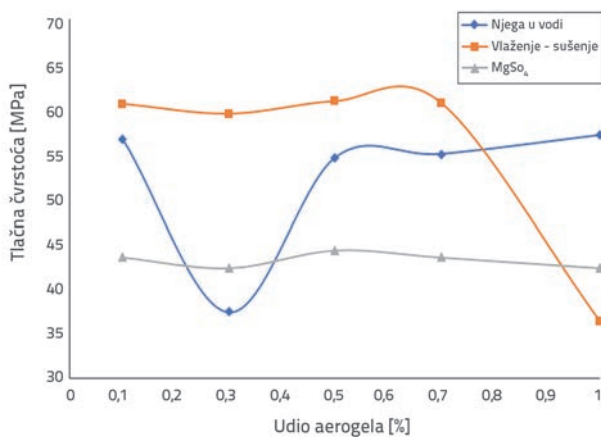
Uređaj djeluje u rasponu tlaka od 0,35 MPa do 414 MPa i omogućuje određivanje promjera pora u rasponu od 3 nm do 360 mikrometara.

Za svaku od metoda njege uzorci s 0,1 % aerogela usvojeni su kao referentni uzorci za odgovarajuće uvjete njege.

3. Rezultati i rasprava

3.1. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Na slici 1. prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće za mort s dodatkom aerogela ovisno o postupku njege (njege u vodi, njega postupkom vlaženja i sušenja te njega pod utjecajem magnezijeva sulfata). Što se tiče tlačne čvrstoće, vrijednost čvrstoće je u skupinama uzoraka koje su njegovane u vodi pri dodavanju aerogela od 0,1 % do 1,0 % varirala u rasponu od 37,4 MPa do 57 MPa, dok je čvrstoća nakon njege vlaženjem i sušenjem varirala u rasponu od 36,3 MPa do 60,8 MPa. U slučaju njege magnezijevim sulfatom djelomične promjene tlačne čvrstoće zabilježene su u rasponu od 42,3 MPa do 44,3 MPa za sve sadržaje aerogela.



Slika 1. Odnos između sadržaja aerogela i tlačne čvrstoće za mortove s dodatkom aerogela

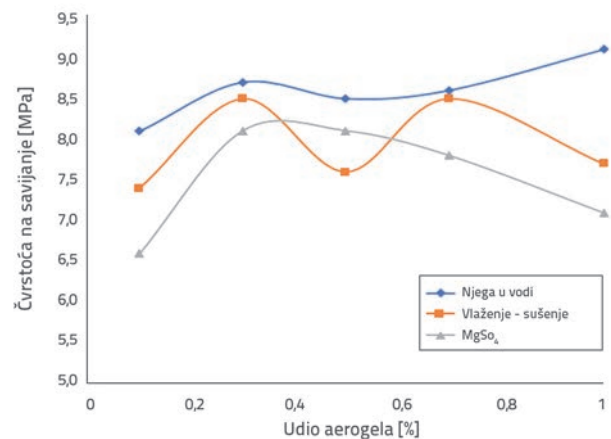
Općenito, najveće vrijednosti tlačne čvrstoće dobivaju se na uzorcima njegovanima vlaženjem i sušenjem. U tome postupku njege slične tlačne čvrstoće od oko 60 MPa dobivene su pri sadržaju aerogela od 0,1 % do 0,7 %, dok je kod sadržaja aerogela od 1,0 % tlačna čvrstoća pala na samo 36,3 MPa, što znači da u tome slučaju čvrstoća pada 40 %.

U skupini uzoraka njegovanih u vodi tlačna čvrstoća od 56,5 MPa postignuta je pri najnižem sadržaju aerogela (0,1 %). Veći sadržaj aerogela nije negativno utjecao na tlačnu čvrstoću pa su pri 0,5 %, 0,7 % i 1,0 % zabilježene tlačne čvrstoće od 54,5 MPa, 54,9 MPa i 57 MPa. Minimalna tlačna čvrstoća od 37,4 MPa dobivena je pri sadržaju aerogela od 0,3 %, što znači da je čvrstoća bila niža 33,8 % u odnosu na referentni uzorak. Vrijednosti čvrstoće manje-više odgovaraju onima koje su zabilježene kada su uzorci njegovani vlaženjem i sušenjem. Međutim, tu su vrijednosti ipak niže. Iako bitno smanjenje čvrstoće nije zabilježeno kod uzoraka njegovanih magnezijevim sulfatom (maksimalna vrijednost:

2,75 %), vrijednosti čvrstoće niže su od vrijednosti zabilježenih kod uzoraka njegovanih preostalim dvjema metodama.

3.2. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje

Na slici 2. prikazane su čvrstoće na savijanje uzoraka mortova s aerogelom njegovanih u vodi, vlaženjem i sušenjem te magnezijevim sulfatom. Analiza postignutih rezultata pokazuje to da su u skupini u kojoj je njega provedena vodom za sadržaj aerogela od 0,1 % do 1,0 % zabilježene čvrstoće u rasponu od 6,6 MPa do 8,1 MPa, dok je čvrstoća varirala od 8,1 MPa do 9,1 MPa tijekom njege vlaženjem i sušenjem. U slučaju njege magnezijevim sulfatom čvrstoća na savijanje varirala je u rasponu od 7,4 MPa do 8,5 MPa u spomenutom rasponu sadržaja aerogela.



Slika 2. Odnos između sadržaja aerogela i čvrstoće na savijanje mortova s dodatkom aerogela

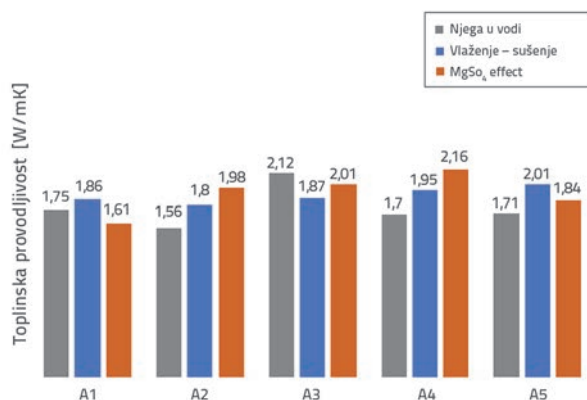
Usporedba skupina uzoraka prema vrsti njege pokazuje to da se uzorci njegovani vlaženjem i sušenjem odlikuju najvećim vrijednostima čvrstoća na savijanje. Pri sadržaju aerogela od 0,3 %, 0,5 % i 0,7 % savojna čvrstoća porasla je na 8,7 MPa, 8,5 MPa i 8,6 MPa. Maksimalna čvrstoća iznosila je 9,1 MPa pri najvišem sadržaju aerogela (1,0 %) te je uočeno povećanje vrijednosti čvrstoće na savijanje do 12,3 % s povećanjem količine aditiva.

U skupini uzoraka njegovanoj vodom zabilježena je savojna čvrstoća od 6,6 MPa pri najnižem sadržaju aerogela (0,1 %), a to je ujedno najniža vrijednost čvrstoće dobivena među uzorcima njegovanima u vodi. Pri sadržajima aerogela od 0,3 %, 0,5 % i 0,7 % odgovarajuće savojne čvrstoće iznosile su 8,1 MPa, 8,1 MPa i 7,8 MPa. Pri sadržaju aerogela od 1,0 % čvrstoća je smanjena na 7,1 MPa, ali i ta je vrijednost 7,5 % viša od vrijednosti zabilježene kod referentnoga uzorka.

U skupni uzoraka njegovanoj magnezijevim sulfatom čvrstoće na savijanje više su od čvrstoća zabilježenih kod uzoraka njegovanih vodom, osim kod sadržaja aerogela od 0,5 %. Iako je najniža čvrstoća na savijanje iznosila 7,4 MPa pri sadržaju aerogela od 0,1 %, ta je čvrstoća porasla na 8,5 MPa pri sadržaju aerogela od 0,3 % i 0,7 %, što je porast od 14,8 % u odnosu na referentni uzorak.

3.3. Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti

Na slici 3. prikazani su rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti, odnosno koeficijenti toplinske provodljivosti mortova s aerogelom njegovanih u vodi, vlaženjem i sušenjem te magnezijevim sulfatom. Najmanja vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti nakon njege u vodi iznosila je 1,56 W/mK pri sadržaju aerogela od 0,3 %. Najmanja vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti nakon njege vlaženjem i sušenjem iznosila je 1,80 W/mK pri sadržaju aerogela od 0,3 %, dok je najmanja vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti za uzorke njegovane magnezijevim sulfatom iznosila 1,61 W/mK pri sadržaju aerogela od 0,1 %.



Slika 3. Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti za mortove s dodatkom aerogela

U skupini uzoraka njegovanoj vodom koeficijent toplinske provodljivosti iznosio je 1,75 W/mK pri sadržaju aerogela od 0,1 %. Pri sadržaju aerogela od 0,3 % koeficijent toplinske provodljivosti smanjen je 10,8 % u odnosu na referentni uzorak, pri čemu je provodljivost iznosila 1,56 W/mK. Pri sadržaju aerogela od 0,7 % i 1,0 % koeficijenti provodljivosti iznosili su 1,70 W/mK, odnosno 1,71 W/mK, a te vrijednosti, koje su vrlo bliske, ukazuju na ograničen pad provodljivosti od 2 do 3 % u odnosu na referentni uzorak. Koeficijent toplinske provodljivosti od 2,13 W/mK pri sadržaju aerogela od 0,5 % najviši je koeficijent provodljivosti u skupini njegovanoj vodom. Čini se da je sadržaj

aerogela od 0,3 % optimalna količina aerogela u odnosu na koeficijent toplinske provodljivosti skupine njegovane u vodi.

U skupini uzoraka njegovanoj vlaženjem i sušenjem koeficijent provodljivosti iznosio je 1,86 W/mK pri sadržaju aerogela od 0,1 %. U skupini uzoraka njegovanoj vodom najveće smanjenje provodljivosti zabilježeno je pri sadržaju aerogela od 0,3 %. Međutim, u slučaju njege vlaženjem i sušenjem koeficijent provodljivosti smanjen je samo 3,3 % uz isti sadržaj aerogela. Koeficijent provodljivosti od 1,87 W/mK zabilježen pri sadržaju aerogela od 0,5 % gotovo u cijelosti odgovara koeficijentu zabilježenome pri sadržaju aerogela od 0,1 %. Smanjenje nije zabilježeno pri relativno visokim udjelima aerogela.

U skupini uzoraka njegovanoj magnezijevim sulfatom zabilježene su veće vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti kod udjela aerogela većih od 0,1 %. Iako povećanje udjela aerogela dovodi do povećanja toplinske provodljivosti pod utjecajem magnezijeva sulfata, koeficijent toplinske provodljivosti od 1,61 W/mK zabilježen pri udjelu aerogela od 0,1 % svakako je znatan jer je taj koeficijent drugi među svim vrijednostima zabilježenima primjenom raznih postupaka njege.

3.4. Rezultati ispitivanja metodom MIP (metoda porozimetrije živom)

U tablici 5. prikazani su rezultati porozimetrijske analize uzoraka morta s aerogelom njegovanih u vodi, vlaženjem i sušenjem te magnezijevim sulfatom.

Prema rezultatima ispitivanja poroznosti uzoraka njegovanih u vodi, najveća ukupna vrijednost poroznosti (15,29 %) za tu skupinu zabilježena je kod uzorka A2 pri sadržaju aerogela od 0,3 % i pri najnižoj tlačnoj čvrstoći (37,4 MPa). Tlačne čvrstoće uzoraka A1 (56,5 MPa), A4 (54,9 MPa) i A5 (57,0 MPa), koje se zapravo vrlo malo razlikuju, odgovaraju vrijednostima ukupne poroznosti od 14,77 %, 14,46 % i 13,07 %, odnosno vrijednostima u rasponu od 13 % do 14 %. Najmanje vrijednosti medijana promjera pora dobivene su za uzorke A1 (6,6 MPa) i A5 (7,1 MPa), kod kojih su zabilježene najniže savojne čvrstoće u skupini njegovanoj vodom.

U skupini uzoraka njegovanoj postupkom vlaženja i sušenja zabilježene su tlačne čvrstoće u rasponu od 59,4 MPa do 60,8 MPa pri sadržaju aerogela od 0,1 % do 0,7 %, dok su vrijednosti

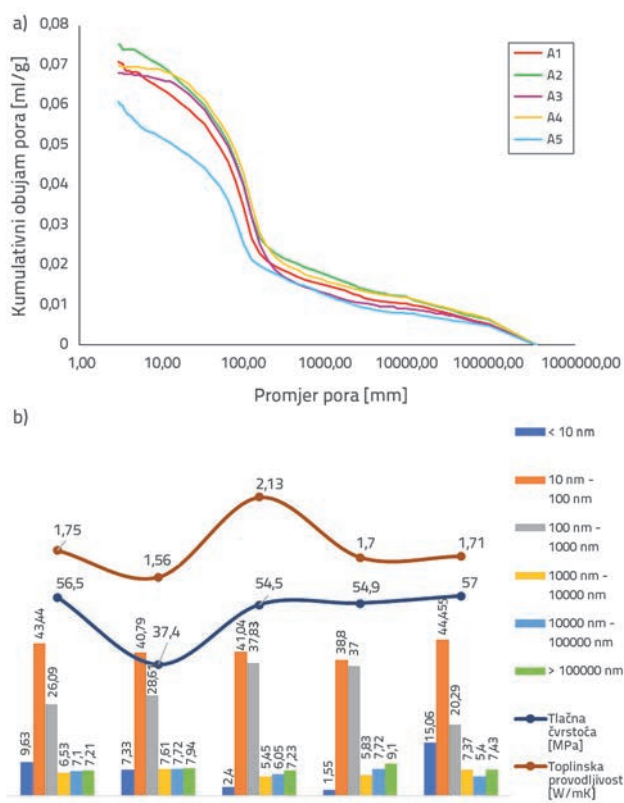
Tablica 5. Rezultati ispitivanja metodom MIP za mortove s aerogelom

Br. smjese	Skupina njegovana u vodi		Skupina njegovana vlaženjem i sušenjem		Skupina njegovana magnezijevim sulfatom	
	Ukupna poroznost [%]	Medijan promjera pora [nm]	Ukupna poroznost [%]	Medijan promjera pora [nm]	Ukupna poroznost [%]	Medijan promjera pora [nm]
A1	14,77	93,4	13,64	117	2,63	163,8
A2	15,29	103,4	14,96	117,4	2,68	173,3
A3	2,4	113,7	14,46	109,6	14,49	168,2
A4	14,46	121,4	12,17	47,2	2,2	156,3
A5	13,07	79,9	14,15	109,2	13,58	164

poroznosti varirale od 12,17 % do 14,96 %. Najniža tlačna čvrstoća u toj skupini iznosila je 36,3 MPa pri najvišem udjelu aerogela (A5).

Uočen je porast tlačne čvrstoće uzoraka njegovanih magnezijevim sulfatom istodobno s porastom udjela aerogela pod utjecajem medijana promjera pora. Promjena tlačne čvrstoće varira od 42,3 MPa do 44,3 MPa, pa maksimalna vrijednost varijacije iznosi 2,75 %, što ovisi o ograničenoj promjeni srednje vrijednosti promjera i obujma pora koja varira u rasponu od 156,3 nm do 173,3 nm.

Na slikama 4.a i 4.b prikazani su kumulativna raspodjela obujma pora odnosno veličine pora te odnos između sadržaja pora, toplinske provodljivosti i tlačne čvrstoće uzoraka njegovanih u vodi.



Slika 4. a) Raspodjela veličine pora za sve uzorke njegovane u vodi prema podacima dobivenima ispitivanjem metodom MIP; b) Odnos između sadržaja pora, toplinske provodljivosti i tlačne čvrstoće za skupinu njegovanu u vodi

Što se tiče uzoraka njegovanih u vodi, kod uzoraka A2 (1,56 W/mK) i A4 (1,70 W/mK), koji imaju najniži koeficijent toplinske provodljivosti, zabilježen je najviši kumulativni obujam pora u usporedbi s ostalim uzorcima u rasponu promjera od 3 nm do 340.000 nm na čitavom grafikonu. Kumulativni obujam pora uzorka A1 (1,75 W/mK) viši je od vrijednosti zabilježene na uzorku A4, ali samo u rasponu promjera od 3 nm do 3,50 nm. Takav trend prestaje oko vrijednosti 3,50 nm. Uzevši u obzir taj trenutak vidljiv kroz cijeli grafikon, može se uočiti to da uzorci

A2 i A4 imaju najniže koeficijente toplinske provodljivosti. U rasponu promjera kapilara od 225 nm do 9000 nm kumulativni obujam pora veći je kod uzorka A2 nego kod uzorka A4, ali kod većih promjera uzorak A4 ima veći kumulativni obujam pora nego uzorak A2. Dakle, ukupna vrijednost poroznosti uzorka A2 viša je (15,29 %) od odgovarajuće vrijednosti za uzorak A4 i za druge uzorke u toj skupini njege u rasponu promjera kapilara od 225 nm do 9000 nm. Vrijednost obujma pora, uzevši u obzir medijan promjera pora (121,4 nm), zabilježena na uzorku A4 viša je od odgovarajuće vrijednosti za uzorak A2 i za ostale uzorke u istoj skupini zbog ponašanja u rasponu od 9000 nm do 340.000 nm. Kada se analizira raspored promjera pri 10.000 nm i iznad te vrijednosti, može se utvrditi to da je formiranje makropora s najvišim udjelom (15,6 % i 16,8 %) u skupini uzoraka njegovanoj u vodi zabilježeno na uzorcima A2 i A4 zbog kumulativnog obujma pora u gornjoj zoni grafikona. Formiranje makropora na višim razinama uvelike utječe na koeficijent toplinske provodljivosti.

U skupini njegovanoj vodom najveći koeficijent toplinske provodljivosti (2,13 W/mK) zabilježen je na uzorku A3. Zato se isti uzorak odlikuje i najnižom vrijednošću ukupne poroznosti (2,4 %) u toj skupini. S obzirom na najviši koeficijent toplinske provodljivosti te najnižu vrijednost ukupne poroznosti, može se zaključiti to da su postignuti rezultati konzistentni.

Iako se ukupna vrijednost poroznosti uzorka A3 bitno razlikuje od poroznosti ostalih uzoraka, njegova tlačna čvrstoća (54,5 MPa) slična je tlačnim čvrstoćama uzoraka A1, A4 i A5 (54,9 MPa – 57 MPa) jer je raspodjela promjera pora slična raspodjeli zabilježenoj kod drugih uzoraka u toj skupini.

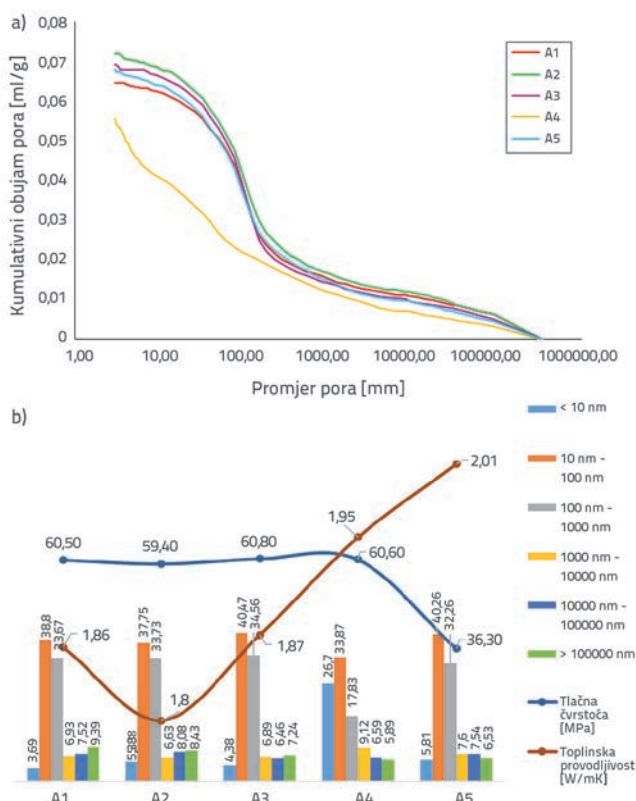
Najmanje vrijednosti ukupnoga koeficijenta toplinske provodljivosti (1,56 W/mK) i tlačne čvrstoće (37,4 MPa) u skupini, zabilježene na uzorku A2 koji ima najvišu vrijednost ukupne poroznosti u skupini, potpuno su logične i konzistentne. S obzirom na to da je ukupna vrijednost poroznosti uzorka A1 (14,77 %) manja od odgovarajuće vrijednosti uzorka A2, sasvim je logično to da su vrijednosti tlačne čvrstoće (56,5 MPa) i koeficijenta toplinske provodljivosti (1,75 W/mK) uzorka A1 više od odgovarajućih vrijednosti za uzorak A2. Međutim, analizom sastava uzoraka A1 i A2 utvrđeno je to da je jedina razlika u količini aerogela koja raste od 0,1 % do 0,3 % težine cementa. Zato se može ustvrditi to da udio aerogela od 0,1 % do 0,3 % bitno utječe na tlačnu čvrstoću i koeficijent toplinske provodljivosti morta.

Prethodne eksperimentalne studije pokazuju da se dodavanjem aerogela može poboljšati termoizolacijsko svojstvo bez znatnoga gubitka tlačne čvrstoće. I u ovoj je studiji utvrđeno to da se u uzorcima A3 i A4 koeficijent toplinske provodljivosti smanjuje s 2,13 W/mK na 1,7 W/mK istodobno s povećanjem udjela aerogela s 0,5 % na 0,7 %. To smanjenje toplinske provodljivosti nije dovelo do gubitka čvrstoće te je zato, u skladu s očekivanjima, zabilježen porast čvrstoće nakon dodavanja aerogela.

Utvrđeno je i to da se slično djelovanje ne može ostvariti s omjerima za A1 i A2. U tome prijelaznom omjeru toplinska izolacija koja se dobiva dodavanjem aerogela te gubitak tlačne

čvrstoće povezuju se s većim postotkom formiranja makropora (15,6 %) u strukturi pora pri udjelu aerogela od 0,3 posto, a u odnosu na druge uzorke. Iako je poznato to da su čestice aerogela stabilne tijekom hidratacije te da zadržavaju svoja povoljna mehanička svojstva u strukturi s visokom poroznošću, odnosno s visokim sadržajem makropora pri niskome udjelu aerogela, to ipak ne može doprinijeti tlačnoj čvrstoći morta, i to zbog slabe prionjivosti.

Na slikama 5.a i 5.b prikazani su raspodjela kumulativnoga obujma pora u odnosu na veličinu pora te odnos između sadržaja pora, toplinske provodljivosti i tlačne čvrstoće uzoraka njegovanih postupkom vlaženja i sušenja.



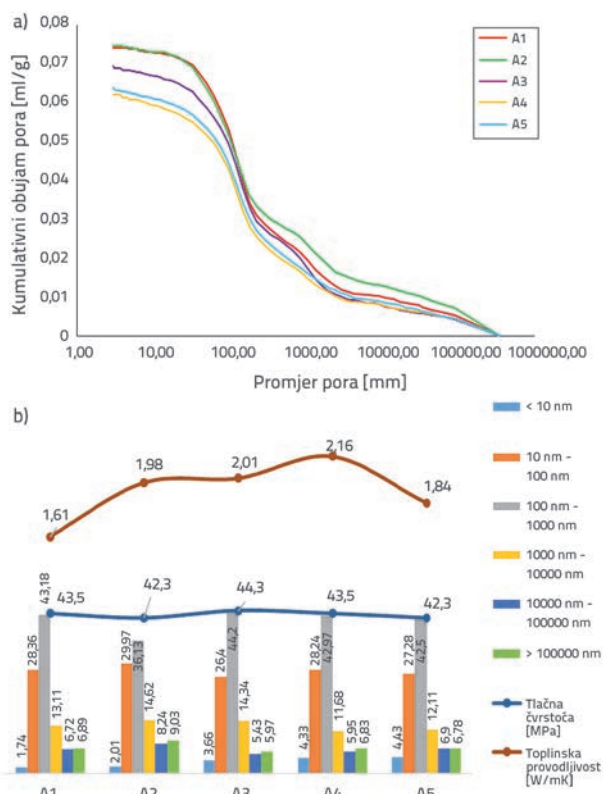
Slika 5. a) Raspodjela veličina pora za sve uzorke njegovane vlaženjem i sušenjem prema rezultatima ispitivanja metodom MIP; b) Korelacija sadržaja pora, toplinske provodljivosti i tlačne čvrstoće za skupinu njegovanu postupkom vlaženja i sušenja

U skupini uzoraka njegovanih postupkom vlaženja i sušenja uzorak A2 s najmanjim koeficijentom toplinske provodljivosti (1,80 W/mK) ima, u odnosu na ostale uzorke, najviši kumulativni obujam pora u rasponu od 3 nm do 340.000 nm. Također, kod uzorka A2 nisu uočena odstupanja u bilo kojemu području unutar grafikona, pa taj uzorak ima najveću ukupnu poroznost (14,96 %) i najveći medijan promjera pora (117,4 nm) u toj skupini. U skladu s tim porozimetrijskim nalazima uzorak A2 ima najmanji koeficijent toplinske provodljivosti.

Analizom ponašanja uzoraka u rasponu promjera od 10.000 nm do 340.000 nm lako se može uočiti to da uzorci A4 i A5 imaju

najmanji kumulativni obujam pora u svim slučajevima. U skladu s time najniže porozimetrijske vrijednosti u skupini dobivene su za medijan promjera pora (47,2 nm) te ukupnu vrijednost poroznosti (12,17 %) na uzorku A4, koji ima najmanji kumulativni obujam pora na svim promjerima na grafikonu. Na temelju takvih nalaza dobivenih porozimetrijskom analizom može se zaključiti to da oba uzorka imaju najveće vrijednosti toplinske provodljivosti u svojim skupinama njege (1,95 W/mK i 2,01 W/mK).

Na slikama 6.a i 6.b prikazani su kumulativna raspodjela obujma pora te odnos između sadržaja pora, toplinske provodljivosti i tlačne čvrstoće za uzorke njegovane magnezijevim sulfatom.

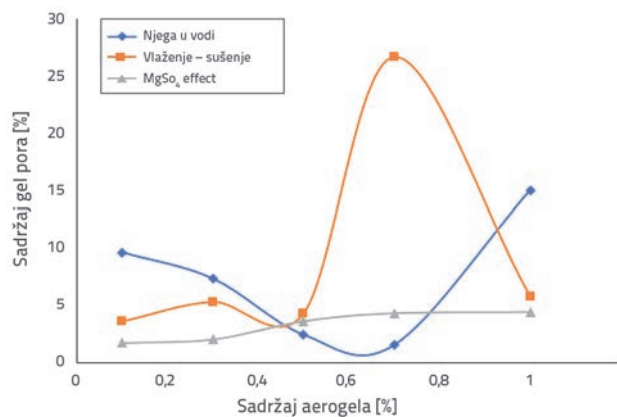


Slika 6. a) Raspodjela veličine pora za sve uzorke njegovane magnezijevim sulfatom prema podacima dobivenima tijekom ispitivanja metodom MIP; b) Korelacija sadržaja pora, toplinske provodljivosti i tlačne čvrstoće za skupinu njegovanu magnezijevim sulfatom

U usporedbi s ostalim uzorcima, uzorak A1 (1,61 W/mK), koji se odlikuje najnižim koeficijentom toplinske provodljivosti u skupini uzoraka njegovanih uz pomoć magnezijeva sulfata, ima najviši kumulativni obujam pora u rasponu promjera od 3 nm do 120 nm. Osim toga, uzorak A1 drugi je po kumulativnome obujmu pora u rasponu od 120 nm do 340.000 nm, odnosno nalazi se odmah iza uzorka A2, na kojemu je zabilježena najveća vrijednost. U usporedbi s uzorkom A2, uzorak A1 ima višu stopu raspodjele kapilarnih pora (84,6 %) te manji sadržaj pora gela (1,74 %) u strukturi pora morta.

Zabilježene su velike razlike između vrijednosti ukupne poroznosti uzoraka njegovanih magnezijevim sulfatom (2,63 %, 2,68 %, 14,49 %, 2,2 %, 13,58 %), no te se razlike ne reflektiraju na odgovarajuće rezultate tlačne čvrstoće (43,5 MPa, 42,3 MPa, 44,3 MPa, 43,5 MPa i 42,3 MPa). Vrlo ravnomjerna raspodjela rezultata tlačne čvrstoće povezuje se s relativno bliskim vrijednostima srednjega promjera i obujma pora uzoraka morta (163,8 nm, 173,3 nm, 168,2 nm, 156,3 nm, 164 nm). Porast u formiranju strukture pora u gelu, što je u bliskoj vezi s povećanjem udjela aerogela u skupini njegovanoj magnezijevim sulfatom, pokazuje to da bi se struktura pora mogla točnije iskazati uz pomoć srednjega promjera i obujma pora nego primjenom ukupne poroznosti.

Bitno različite vrijednosti ukupne poroznosti unatoč ujednačenim vrijednostima medijana promjera pora i obujma pora te tlačne čvrstoće, i to pod utjecajem magnezijeva sulfata, pokazuju to da utjecaj magnezijeva sulfata na strukturu pora u mortu uključuje formiranje geometrije pora i mogućnosti povezivanja koje se ne mogu objasniti samo promjerom pora. Ipak, kada se radi o skupini uzoraka njegovanih magnezijevim sulfatom, vrlo povezani i kontrolirani utjecaj silicijskoga aerogela koji se primjenjuje u eksperimentalnim studijama u rasponu promjera od 8 nm do 10 nm, a za promjer od najviše 10 nm u formiranju gela, mogao bi omogućiti ravnomjernu raspodjelu tlačnih čvrstoća, i to bez obzira na variranje ukupne poroznosti. Obujam pora u strukturi pora mortova s dodatkom aerogela prikazan je na slici 7. za različite uvjete njege.



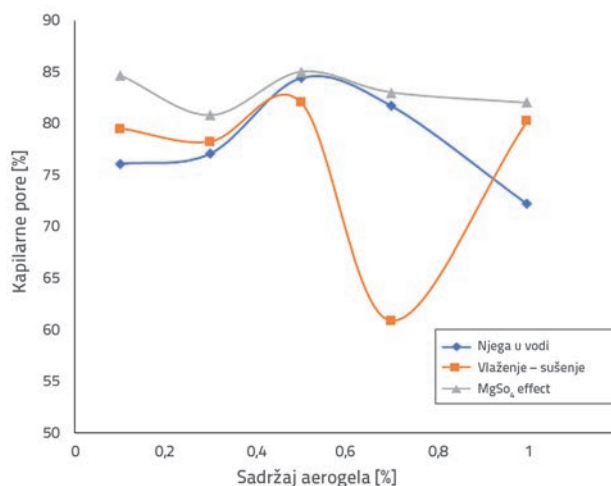
Slika 7. Korelacija sadržaja aerogela i raspodjele pora gela u mortovima s dodatkom aerogela

Pri niskome sadržaju aditiva (0,1 % i 0,3 %) u uzorcima njegovanima u vodi sadržaj pora gela iznosi 9,6 % i 7,3 %. Sadržaj pora gela smanjuje se na minimalne vrijednosti od 2,4 % i 1,5 % s povećanjem sadržaja aerogela do srednjih vrijednosti od 0,5 % i 0,7 %. Sadržaj pora gela doseže maksimalnu vrijednost od 15 % pri visokome sadržaju aerogela od 1,0 %. Pri umjerenome sadržaju aerogela od 0,5 % i 0,7 % (uzorci A3 i A4) sadržaj pora gela smanjuje se na minimum, a istodobno dolazi do stabiliziranja tlačnih čvrstoća na vrijednosti od 54,5 MPa i 54,9 MPa, dok savojne čvrstoće iznose 8,1 MPa i 7,8 MPa. Uzorak A5 u kojemu

sadržaj pora gela doseže maksimalnu razinu (15 %) ima najveću tlačnu čvrstoću (57,0 MPa) pri navedenome postupku njege.

Sadržaj pora gela varira od 3,6 % do 5,8 % kod ostalih udjela aerogela, osim kod udjela od 0,7 % kod uzoraka njegovanih postupkom vlaženja i sušenja. Sadržaj pora gela pri udjelu aerogela od 0,7 % doseže vrijednost od 26,7 %, maksimalnu vrijednost za taj postupak njege. Zbog visokoga sadržaja pora gela pri tome udjelu aerogela, pri udjelu aerogela od 0,7 % medijan promjera pora u uzorku A4 smanjuje se na 47,2 nm, što je minimalna vrijednost za taj postupak njege. Dakle, tijekom toga postupka njege na uzorku A4 mogu se postići najmanja ukupna vrijednost poroznosti (12,17 %) i visoka tlačna čvrstoća (60,6 MPa).

Sadržaj pora gela raste ravnomjerno i konačno istodobno s porastom udjela aerogela u skupini njegovanoj magnezijevim sulfatom. Sadržaj pora gela ravnomjerno raste od 1,7 % do 4,4 % pri porastu udjela aerogela od 0,1 % do 1,0 %. Kapilarna poroznost strukture mortova s dodatkom aerogela prikazana je na slici 8 za različite uvjete njege.



Slika 8. Korelacija udjela aerogela i raspodjele kapilarnih pora u mortovima s dodatkom aerogela

U uzorcima njegovanima vodom sadržaj kapilarnih pora raste od 72,2 % do 85,0 % istodobno s porastom udjela aerogela. Najveći sadržaj kapilarnih pora zabilježen je na uzorku A3 pri udjelu aerogela od 0,5 %.

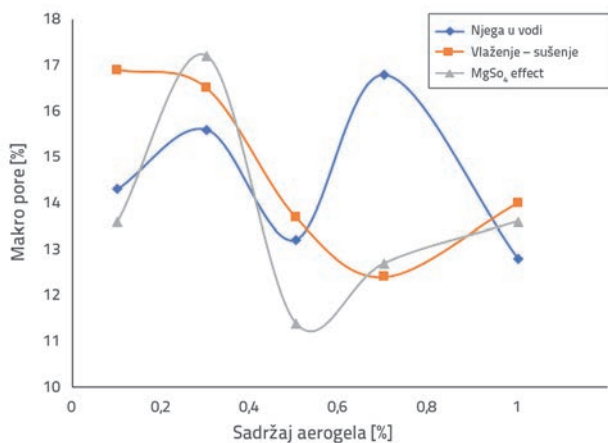
Najmanja ukupna vrijednost poroznosti (2,4 %) i najveći koeficijent toplinske provodljivosti (2,13 W/mK) u postupku njege vodom zabilježen je na uzorku A3, na kojemu je registriran najveći sadržaj kapilarnih pora (85 %) u odnosu na ukupnu poroznost i koeficijent toplinske provodljivosti. Također, iako su vrijednosti tlačne čvrstoće (54,5 MPa i 54,9 MPa) kod uzoraka A3 i A4 vrlo slične, njihovi koeficijenti toplinske provodljivosti (2,13 W/mK i 1,7 W/mK) bitno se razlikuju zbog različite raspodjele kapilarnih pora (85 % i 81,7 %). Na rezultate provodljivosti utječu razlika u sadržaju kapilarnih pora i ukupna poroznost.

U uzorcima njegovanima vlaženjem i sušenjem sadržaj kapilarnih pora raste od 60,9 % do 82,0 % istodobno s porastom

udjela aerogela. Najmanji sadržaj kapilarnih pora zabilježen je na uzorku A4 pri udjelu aerogela od 0,7 %. Najmanje vrijednosti ukupne poroznosti (12,17 %) i medijana promjera pora (47,2 nm) u tome postupku njege dobivene su na uzorku A4, gdje je zabilježen i najniži sadržaj kapilarnih pora (60,9 %) prilikom ocjenjivanja ukupne poroznosti i koeficijenta toplinske provodljivosti. Zbog toga su na uzorku A4 registrirane visoke vrijednosti tlačne čvrstoće (60,6 MPa) i savojne čvrstoće (8,6 MPa). Koeficijent toplinske provodljivosti uzorka A4 prilično je visok (1,95 W/mK) ako ga se uspoređi s ostalim uzorcima njegovanima tim postupkom.

U uzorcima njegovanima magnezijevim sulfatom sadržaj kapilarnih pora raste od 80,8 % do 85 % istodobno s porastom udjela aerogela. Promjena sadržaja kapilarnih pora ovisno o sadržaju aerogela manja je ako se uspoređi s drugim metodama njege. Kao što je već spomenuto, s obzirom na to da u uzorcima njegovanima magnezijevim sulfatom medijan promjera pora malo varira (od 156,3 nm do 173,3 nm), i promjena tlačne čvrstoće također varira u rasponu od 42,3 MPa do 44,3 MPa, odnosno za najviše 2,75 %.

Obujam makropora u pornoj strukturi mortova s dodatkom aerogela prikazan je na slici 9. za razne uvjete njege.



Slika 9. Korelacija sadržaja aerogela i raspodjele makropora u mortovima s dodatkom aerogela

U uzorcima njegovanima vodom sadržaj makropora raste od 12,8 % do 16,8 % istodobno s porastom udjela aerogela. U tome postupku njege najmanji koeficijenti toplinske provodljivosti od 1,56 W/mK i 1,70 W/mK zabilježeni su na uzorku A2 (15,6 %) pri udjelu aerogela od 0,3 % te na uzorku A4 (16,8 %) pri udjelu aerogela od 0,7 %, a u njima je zabilježen i najveći sadržaj makropora. Najveća ukupna poroznost (15,29 %) i najniža tlačna čvrstoća (37,4 MPa) zabilježena je na uzorku A2 zbog visokog udjela makropora (čak veći od 15 %). Medijan promjera pora kod uzorka A4 iznosi 121,4 nm, što je najveća vrijednost pri tome postupku njege, a uzrokovana je maksimalnim sadržajem pora od 16,8 %.

U uzorcima njegovanima vlaženjem i sušenjem sadržaj makropora raste od 12,4 % do 16,9 % istodobno s porastom

udjela aerogela. Najmanje vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti u tim uzorcima iznose 1,86 W/mK i 1,80 W/mK, što ukazuje na najveći sadržaj makropora: uzorak A1 (16,9 %) pri udjelu aerogela od 0,1 % te uzorak A2 (16,5 %) pri udjelu aerogela od 0,3 %. Najveći medijan promjera pora u tome postupku njege iznosi 117 nm i 117,4 nm, a zabilježen je kod uzoraka A1 i A2 s visokim sadržajem makropora.

U uzorcima njegovanima magnezijevim sulfatom sadržaj makropora raste od 11,4 % do 17,2 % istodobno s porastom udjela aerogela. U tome postupku njege najveći medijan promjera pora (173,3 nm) zabilježen je na uzorku A2 (17,2 %), na kojemu je zabilježen i najveći sadržaj makropora od 0,3 %.

4. Zaključak

U ovom istraživanju analizirana su mehanička svojstva, koeficijenti toplinske provodljivosti te porozimetrijska svojstva cementnih mortova pri raznim uvjetima njege i uz dodatak aerogela u rasponu od 0,1 % do 1,0 %.

Skupina uzoraka njegovanih u vodi

- Rezultati tlačne čvrstoće niži su od rezultata dobivenih za uzorke njegovane vlaženjem i sušenjem, iako treba napomenuti to da su različite među rezultatima prilično male.
- Bez obzira na povećanje udjela aerogela, maksimalna promjena tlačne čvrstoće iznosi otprilike 3,5 %, ne uzevši u obzir udio aerogela od 0,3 %. Vrijednosti ukupne poroznosti utječu na promjenu tlačne čvrstoće.
- Maksimalna čvrstoća na savijanje postiže se pri sadržaju aerogela od 0,3 % i 0,5 %.
- Najmanja vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti iznosi 1,56 W/mK pri sadržaju aerogela od 0,3 %.
- Maksimalni sadržaj kapilarnih pora (85 %) zabilježen je pri udjelu aerogela od 0,5 %. Na tome su uzorku zabilježeni najmanja vrijednost ukupne poroznosti (2,4 %) te najveći koeficijent toplinske provodljivosti (2,13 W/mK).
- Uzorci s udjelom aerogela od 0,3 % i 0,7 %, a oni imaju najveći kumulativni obujam pora, odlikuju se najmanjim koeficijentom toplinske provodljivosti (1,56 W/mK i 1,70 W/mK) za promjere od 10.000 nm i više.

Skupina uzoraka njegovanih vlaženjem i sušenjem

- Uzorci njegovani postupkom vlaženja i sušenja obično su imali najveće vrijednosti tlačne čvrstoće.
- Bez obzira na povećanje sadržaja aerogela, maksimalna promjena tlačne čvrstoće iznosi 1,8 %, osim pri sadržaju aerogela od 1,0 %. Vrijednosti ukupne poroznosti utječu na promjenu tlačne čvrstoće.
- U usporedbi s ostalim skupinama uzoraka u skupini uzoraka njegovanih vlaženjem i sušenjem zabilježene su najveće vrijednosti čvrstoće na savijanje.
- Najmanji koeficijent toplinske provodljivosti iznosi 1,80 W/mK pri udjelu aerogela od 0,3 %.

- Minimalni sadržaj kapilarnih pora u strukturi pora morta dobiven je pri udjelu aerogela od 0,7 %. Na uzorku njegovanome vlaženjem i sušenjem zabilježena je najmanja vrijednost ukupne poroznosti i najmanja vrijednost medijana promjera pora (47,2 nm). Zabilježena je i visoka tlačna čvrstoća (60,6 MPa) na temelju prethodno spomenutih porozimetrijskih rezultata.

Skupina uzoraka njegovanih magnezijevim sulfatom

- Najmanje vrijednosti tlačne čvrstoće zabilježene su upravo na uzorcima njegovanima magnezijevim sulfatom. Vrijednosti medijana promjera pora utječu na promjenu tlačne čvrstoće.
- Bez obzira na povećanje sadržaja aerogela, maksimalna promjena tlačne čvrstoće iznosi 2,75 %. U ograničenome rasponu promjene tlačnih čvrstoća može se uočiti utjecaj medijana promjera pora u rasponu od 156,3 nm do 173,3 nm.
- Iako su vrijednosti čvrstoće na savijanje manje od onih zabilježenih u postupku njege vlaženjem i sušenjem, vrijednosti čvrstoće veće su od odgovarajućih vrijednosti dobivenih na uzorcima njegovanima vodom, osim kod sadržaja aerogela od 0,5 %.
- Sadržaj pora gela u pornoj strukturi morta raste istodobno s povećanjem udjela aerogela.
- Najmanja vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti u tome postupku njege iznosi 1,61 W/mK pri udjelu aerogela od 0,1 %. Po visini vrijednosti taj je koeficijent predzadnji, ako se uspoređi s koeficijentima toplinske provodljivosti za ostale uvjete njege.

Može se uočiti to da se veće vrijednosti čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće dobivaju pri svim udjelima aerogela kada se umjesto postupka njege vodom primjenjuje postupak njege vlaženjem i sušenjem. Zbog toga se čini da bi u proizvodnji montažnih konstruktivnih elemenata velike mehaničke čvrstoće postupak njege vlaženjem i sušenjem mogao biti atraktivniji od tradicionalnoga postupka njege vodom. Porast tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje, koji se bilježi čak i pri sobnoj temperaturi, ukazuje na mogućnost bitnoga povećanja mehaničke čvrstoće montažnih konstruktivnih elemenata koji se proizvode pri visokim temperaturama njege.

Vrijedi spomenuti i to da su vrijednosti čvrstoće na savijanje prilikom primjene metode njege magnezijevim sulfatom uglavnom više od onih koje se postižu primjenom tradicionalne metode njege vodom. Treba napomenuti to da pri postupku njege magnezijevim sulfatom mehanička čvrstoća morta zadržava stabilnost, bez obzira na promjenu ukupne poroznosti uzoraka morta o rasponu od 2,2 % do 14,49 % zbog dodavanja aerogela.

Zato se može zaključiti to da dodavanje aerogela može biti atraktivna opcija u projektiranju konstruktivnih elemenata izloženih djelovanju magnezijeva sulfata, osobito u usporedbi s tradicionalnim aditivima koji se koriste za poboljšanje trajnosti elementa pod utjecajem sulfata, čija primjena dovodi do pada mehaničke čvrstoće.

LITERATURA

- [1] Jelle, B.P.: Traditional, State-of-the-Art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions-Properties, Energy and Buildings, 43 (2011) 10, pp. 2549-2563.
- [2] Fricke, J.: Aerogels - highly tenuous solids with fascinating properties, Journal of Non-Crystalline Solids, 100 (1988), pp. 169-173.
- [3] Dorcheh, A.S., Abbasi, M.H.: Silica aerogel; synthesis, properties and characterization, Journal of Materials Processing Technology, 199 (2008), pp. 10-26.
- [4] Gao, T., Jelle, B.P., Gustavsen, A., Jacobsen, S.: Aerogel-incorporated concrete: An experimental study, Construction and Building Materials, 52 (2014), pp. 130-136.
- [5] Narayanan, N., Ramamurthy, K.: Structure and properties of aerated concrete: a Review, Cem Concr. Compos., 22 (2000), pp. 321-329.
- [6] Fickler, S., Milow, B., Ratke, L., Schnellenbach-Held, M., Welsch, T.: Development of High Performance Aerogel Concrete, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, Energy Procedia, 78 (2015), pp. 406-411.
- [7] Ratke, L.: Herstellung und Eigenschaften eines neuen leichtbetons: Aerogelbeton, Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008) 4, pp. 236-243.
- [8] Hub, A., Zimmermann, G., Knippers, J.: Leichtbeton mit Aerogelen als Konstruktionswerkstoff, Beton und Stahlbetonbau, 9 (2013), pp. 654-661.
- [9] Ng, S., Jelle, B.P., Sandberg, L.I.C., Gao, T., Wallevik, O.H.: Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete, Construction and Building Materials, 77 (2015), pp. 307-316.
- [10] Julio, M.F., Soares, A., Ilharco, L.M., Flores-Colen, I., Brito, J.: Aerogel-based renders with lightweight aggregates: Correlation between molecular/pore structure and performance, Construction and Building Materials, 124 (2016), pp. 485-495.
- [11] Kim, S., Seo, J., Cha, J., Kim, S.: Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel, Construction and Building Materials, 40 (2013), pp. 501-505.
- [12] Strzałkowski, J., Garbalińska, H.: Thermal and strength properties of lightweight concretes with the addition of aerogel particles, Advances in Cement Research, 28 (2016), pp. 567-575.
- [13] Nosrati, R., Berardi, U.: Long-term performance of aerogel-enhanced materials, 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway, Energy Procedia, 132 (2017), pp. 303-308.
- [14] Ng, S., Jelle, B.P., Zhen, Y., Wallevik, O.H.: Effect of storage and curing conditions at elevated temperatures on aerogel-incorporated mortar samples based on UHPC recipe, Construction and Building Materials, 106 (2016), pp. 640-649.
- [15] Yildirim, K., Sumer, M.: Effects of sodium chloride and magnesium sulfate concentration on the durability of cement mortar with and without fly ash, Composites: Part B, 52 (2013), pp. 56-61.