

Primljen / Received: 17.2.2021.

Ispravljen / Corrected: 25.7.2021.

Prihvaćen / Accepted: 11.8.2021.

Dostupno online / Available online: 10.11.2021.

Utjecaj smola na mehanička svojstva polimernog betona

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Ferit Cakir**, dipl.ing.građ.

Tehničko sveučilište Gebze, Kocaeli, Turska

Tehnički fakultet

Odjel za građevinarstvo

cakirf@gtu.edu.tr

Autor za korespondenciju



Armin Karimi, dipl.ing.stroj.

Mert Casting Inc., Istanbul, Turska

armin@mertdokum.com.trMr.sc. **Arif Ulu**, dipl.ing.stroj.

Sveučilište Istanbul Aydin, Istanbul, Turska

Tehnički fakultet

Odjel za strojarstvo

arifulu@aydin.edu.tr

Mustafa Gundogdu, dipl.ing.metal.

Mert Casting Inc., Istanbul, Turska

mustafa@mertdokum.com.tr

Prethodno priopćenje

Ferit Cakir, Armin Karimi, Arif Ulu, Mustafa Gundogdu

Utjecaj smola na mehanička svojstva polimernog betona

Industrija cementa je danas odgovorna za najveće razine emisije ugljičnog dioksida (CO₂) i potrošnje energije u građevinskoj industriji. Stoga je u današnje vrijeme primjena održivih vezivnih materijala kao zamjene za cement postalo pitanje od globalnog značenja. Iz prethodnih se radova vidi da su polimeri pouzdana i održiva alternativa cementu u graditeljstvu, a dugoročno gledano, polimerni betoni (PC) smatraju se najprikladnijom zamjenom tradicionalnih betona s cementom. U ovom se radu kao glavni cilj postavlja istraživanje utjecaja smola, koje se koriste kao vezivne komponente u polimernom betonu, na mehanička svojstva polimernih betona. U tom se smislu u radu analizira deset ortoftalnih nezasićenih poliesterskih smola (OUPR) koje se često koriste u građevinarstvu, te se provode ispitivanja svježeg i očvrstnalog betona u obliku ploča koje sadrže navedene smole. Nakon analize, svakom se tipu smole dodjeljuje indeks učinkovitosti. Eksperimentalni rezultati pokazuju da vrsta smole bitno utječe na mehanička svojstva polimernog betona.

Ključne riječi:

polimerni materijali, polimerni beton, smola, ortoftalna nezasićena poliesterska smola, fizikalna svojstva, mehanička svojstva

Research Paper

Ferit Cakir, Armin Karimi, Arif Ulu, Mustafa Gundogdu

Effects of resins on mechanical performance of polymer concrete

Cement manufacturing is currently responsible for one of the highest levels of carbon dioxide (CO₂) emissions and energy consumption in construction industry. Thus, the use of sustainable binder materials instead of cement has become a worldwide issue. Previous studies have shown that polymers are a reliable and sustainable alternative to cement in construction, while polymer concretes (PCs) are seen as the biggest alternative to conventional cement concretes in the long term. In this study, the main objective is to investigate the effects of resins, which are used as binder components in polymer concrete, on the mechanical properties of the PCs. To achieve this, ten different orthophthalic unsaturated polyester resins (OUPR) that are commonly used in construction industry are considered, and fresh concrete tests and hardened concrete tests are performed on deck plates prepared with these resins. Based on the analysis results, each resin is given a performance index. The experimental results indicate that the type of resin has a significant impact on mechanical properties of polymer concrete.

Key words:

polymer materials, polymer concrete, resin, orthophthalic unsaturated polyester resin, physical properties, mechanical properties

1. Uvod

Globalno gledano, građevinska industrija je danas jedan od vodećih korisnika energije i generatora stakleničkih plinova. Prema Globalnom izvješću o stanju u građevinarstvu, 38 % globalnih industrijskih emisija ugljičnog dioksida (CO_2) proizlazi iz industrije građevinarstva [1]. Značajan dio emisija koje potječu iz industrije građevinarstva odnosi se na proizvodnju cementa i čelika [2]. Tijekom proizvodnje cementa, generira se otprilike 8 % ukupnih svjetskih emisija CO_2 . Kako bi se smanjile emisije ugljičnog dioksida (CO_2), posljednjih se godina u proizvodnji betona uvode različiti alternativni vezivni materijali kao zamjena za cement. Ovdje treba napomenuti da se polimeri već pet desetljeća koriste kao vezivo u proizvodnji betona umjesto cementa. Američki institut za beton (ACI) još od 1971. godine uvelike potiče primjenu polimera u betonu putem povjerenstva 548 [4]. ACI navodi da postoje tri vrste polimernih betona: polimerni beton s portland cementom (eng. *Polymer Portland Cement Concrete* - PPCC) (koji je također poznat pod nazivom polimerno poboljšan beton (eng. *Polymer Modified Concrete* - PMC), polimerom impregnirani beton (eng. *Polymer Impregnated Concrete* - PIC) i polimerni beton (eng. *Polymer Concrete* - PC) [4]. Kako polimerni beton uopće ne sadrži cement, očito je da se tu radi o najzanimljivijem betonu s polimerom koji je danas zastupljen u građevinarstvu. Kao sastavni dijelovi održivog betona, polimeri su postali značajan proizvod modernog doba i uvelike se koriste u građevinskoj industriji [5, 6].

Prema podacima iz literature, istraživači najveće zanimanje pokazuju za polimerni beton i za mogućnosti njegove primjene u građevinarstvu. Primjerice, Gagandeep [7] stavlja težište na karakteristike čvrstoće polimernog betona s epoksidnom smolom. U toj se studiji ispituju mehanička svojstva polimernog betona s 3 % i 5 % smole i uspoređuje s polimernim betonom koji sadrži 0,5 % i 1 % staklenih vlakana. Dobiveni rezultati pokazuju da porast udjela smole s 3 % na 5 % dovodi do poboljšanja obradivosti, a također i do poboljšanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje. Osim toga, dodavanjem staklenih vlakana polimernom betonu raste i njegova tlačna čvrstoća. Kiruthika i dr. [5] istražuju polimerni beton s poliesterom te različite aspekte primjene tog materijala u održivom građenju. Navedeni autori prikazuju metodu izrade polimernog betona s izoftalnom smolom te navode da polimerni beton traje više od dvadeset godina upravo zbog njegove izrazite trajnosti, pa tako troškovi održavanja postaju niži od istih troškova betona na bazi cementa. U drugoj studiji koju su izradili Seco i dr. [8] naglasak je na trajnosti polimernog betona baziranog na metalurškom otpadnom materijalu te na mogućnostima korištenja tog otpada u proizvodnji i izgradnji građevina. U toj se studiji potvrđuje mogućnost primjene tog recikliranog materijala u proizvodnji trajnih i održivih polimernih betona. Prema istoj studiji prolaz električnog naboja se smanjuje, a otpornost betona na prodor iona klorida se povećava kada se betonu doda 1 do 2 % polimera. Shen i dr. [9] analiziraju skupljanje lakog polimernog betona koji sadrži prah od otpadnih guma i keramzit. Ustanovljeno je da se kompoziti polimernog betona u kojima se kao agregat

koristi keramzit manje skupljanju od kompozita u kojima se koristi drobljeni kamen. Jafari i dr. [10] izvještavaju kako se, bez obzira na činjenicu da se čvrstoća polimernog betona smanjuje s povećanjem temperature, čvrstoća tog betona može u tim okolnostima pospješiti povećanjem udjela epoksidne smole te korištenjem krupnijeg agregata. Mohamed i dr. [11] analiziraju u svojoj studiji tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje polimernog betona. U toj se studiji spomenuta tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje polimernog betona određuju onda ako se dodaju četiri različite količine smole. Rezultati pokazuju da se dodavanjem epoksidne smole od 20 % i 25 % na masu postižu najbolja mehanička svojstva za sve veličine čestica, te da polimerni beton koji sadrži 20 % smole ima veću čvrstoću od istog betona s 25 % smole. Lokuge i Aravinthan [12] istražuju utjecaj letećeg pepela na mehanička svojstva polimernog betona. U zaključku se navodi da se količina smole smanjuje kada se u mješavinu doda leteći pepeo kao punilo. Osim toga, u studiji se naglašava da s porastom udjela letećeg pepela raste tlačna čvrstoća i modul elastičnosti, ali također i vlažna čvrstoća pri cijepanju te čvrstoća na savijanje. Kumar i dr. [13] istražuju mehanička svojstva polimernih beton koji sadrže različite količine letećeg pepela (8, 12 %), crvenog mulja (12, 25 %) i smole (30, 35 %). Prema toj studiji, najveća čvrstoća na savijanje zabilježena je kod uzorka polimernog betona s 35 % smole, 25 % letećeg pepela te 15 % silicijske prašine. Nadalje se navodi da polimerni beton sa sitnozrnatim punilom može dosegnuti izrazito povoljna mehanička svojstva čvrstoće zbog jake zbijenosti molekula.

Prema izvješćima iz ranijih studija, može se zaključiti da betoni na bazi polimera predstavljaju značajan doprinos građevinskoj industriji. Iako se u literaturi razmatraju različite vrste betona na bazi polimera i brojne mogućnosti njihove primjene, te iako se općenito smatra da bi se betoni na bazi polimera mogli uvrstiti među najznačajnije građevne materijale, ipak do sada još nije detaljno istražen utjecaj pojedinačnih komponenata na mehanička i fizikalna svojstva polimernih betona. Stoga se u ovom radu težište stavlja na smole koje su itekako značajna komponenta betona na bazi polimera. Na osnovi dobivenih rezultata ispitivanjem svježeg i očvrsnulog polimernog betona, u ovom se radu istražuju utjecaji smola na mehanička svojstva polimernih betona. Odabrano je deset tržišno dostupnih vrsta smola, te je za svježi beton ispitano vrijeme vezivanja, najveća temperatura, vrijeme pri kojem se dostiže najveća temperatura te rasprostiranje, dok je za očvrsnuli beton ispitana gustoća, tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje. Pritom su korišteni betonski uzorci pripremljeni posebno za svaku smolu. Generirana je učinkovitost svakog pojedinog polimernog betona, a rezultati analize ocijenjeni su na bazi tako određene učinkovitosti. Posebnost ovog rada sastoji se u provedbi ispitivanja kako na svježem tako i na očvrnulom betonu. Također je važno napomenuti da su odabrane najčešće korištene smole. Osim toga, indeks učinkovitosti koji se primjenjuje u ovom radu omogućio je pravilnu uporabu brojnih i različitovrskih podataka dobivenih tijekom ispitivanja, te odabir najprikladnije smole.

2. Materijali i metode

Ovo je istraživanje provedeno na Tehničkom sveučilištu Gebze (GTU) u suradnji s Istanbulskim sveučilištem Aydin (IAU) te s tvrtkom Mert Casting Inc. Uzorke korištene u ispitivanjima ustupila je tvrtka Mert Casting Inc., a sama eksperimentalna ispitivanja provedena su u laboratoriju za mehanička ispitivanja tvrtke Mert Casting Inc. Polimerni betoni izrađeni su na temelju recepture dobivene od tvrtke Mert Casting Inc. u vrijeme provođenja ovih istraživanja. Tu je recepturu tvrtka Mert Casting Inc. i prije koristila u izvođenju polimernih melioracijskih kanala. U ovom se radu ne prikazuje spomenuta receptura jer je riječ o poslovnoj tajni. Tijekom cjelokupnog ispitivanja korišten je materijal iz istog kontingenta kako bi se osigurala međusobna kompatibilnost uzoraka te izbjegle eksperimentalne pogreške. U ovom dijelu rada daju se podaci o materijalima koji su korišteni u polimernim betonima te se ukratko prikazuje postupak miješanja betona.

2.1. Materijali

2.1.1. Prirodni agregat

U ovom je ispitivanju kao agregat korišten kvarcni pijesak različitih granulacija: 0,3 – 1 mm, 1 – 2 mm, 2 – 3 mm te 3 – 5 mm. Riječni agregat za potrebe ispitivanja ustupile su tvrtke Yelten Mining i Kumsan Dokum iz Kirklarelija i Istanbula, a specifična težina agregata iznosila je otprilike 2,65 g/cm³. Sav agregat je očišćen pranjem u čistoj vodi te je prije upotrebe prikladno osušen. Kemijski sastav agregata prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav agregata

Kemijski spojevi	Agregat		
	0,3-1 mm	1-3 mm	3-5 mm
MgO	0,10	0,06	0,06
Al ₂ O ₃	0,245	1,80	1,86
SiO ₂	98,86	94,20	94,15
CaO	0,01	0,45	0,39
Fe ₂ O ₃	0,148	0,46	0,46
SO ₃	-	0,10	0,10
K ₂ O	0,03	1,52	1,56
Na ₂ O	0,02	1,16	1,12
Gubitak žarenjem	0,24	0,25	0,30

2.1.2 Smole

Poliesterske se smole mogu svrstati u četiri osnovna tipa. Kako bi se mogli razlikovati, ta četiri tipa svrstana su kako slijedi: vinilester, aloud, zasićeni poliester i nezasićeni poliester. Osnovne karakteristike nezasićene poliesterske smole (eng. *unsaturated polyester resin* - UPR) jesu otpornost na toplinu, malo skupljanje, dobra mehanička čvrstoća i hladno križno povezivanje. Stiren je monomer koji se najčešće upotrebljava u proizvodnji nezasićenih poliester. "Izoftalne" i "ortoftalne" smole su dvije vrste nezasićene poliesterske smole. Danas se na tržištu uglavnom nalaze ortoftalne UPR smole zbog prosječnih specifikacija, cijena i učinkovitosti ortoftalnih UPR smola (njihova kratica je: OUPR). Općenito uzevši, one se mogu koristiti za brojne namjene. Zato

Tablica 2. Tehnička svojstva smola

Smole	Kiselost [mg KOH/g]	Udio krutih tvari [%]	Viskoznost [cps]	Specifična težina [g/cm ³]	Vrijeme vezivanja [min]	Vrijeme kada se dostiže najveća temperatura [min]	Najveća egzotermna temperatura [°C]
Smola-1	10-25	65-70	500-700	1,10-1,20	10-20	15-30	130-180
Smola-2	30-35	40-45	450-550	1,11-1,23	7-9	14-20	145-165
Smola-3	25-35	60-62	300-400	1,12-1,20	5-7	10-12	175-195
Smola-4	20-30	65-67	400-800	1,13-1,15	7-10	15-25	145-160
Smola-5	15-35	59-62	300-400	1,10-1,20	5-7	12-14	175-195
Smola-6	25-30	34-36	250-450	1,10-1,12	10-15	20-24	150-180
Smola-7	25-27	65-67	70-90	1,20-1,25	14-16	26-30	150-165
Smola-8	25-30	65-70	500-600	1,10-1,12	10-12	20-25	155-185
Smola-9	20-24	62-66	280-320	1,10-1,12	5-6	12-15	150-170
Smola-10	14-20	41-43	250-300	1,12-1,15	5-7	14-18	155-170

Tablica 3. Tehnička svojstva ubrzivača

Svojstva	Vrijednosti
Gustoća	0,92 g/cm ³ (20 °C)
Viskoznost	300 mPa.s (20 °C)
Temperatura samoubrzavajućeg razlaganja (SADT)	≥ 150 °C
Talište	62 °C
Udio kobalta	1,5 %

je u ovom ispitivanju jedan od zadataka odrediti koje ortoftalne nezasićene poliesterske smole (OUPR smole) imaju najbolja mehanička svojstva. Za potrebe takvog ispitivanja, odabrano je deset različitih OUPR smola koje se često koriste u praksi. Kako su smole tržišno dostupni proizvodi, u ovom se ispitivanju ne daju njihovi nazivi već su smole označene brojevima. Tehnička svojstva spola korištenih u ovom radu prikazana su u tablici 2.

2.1.3. Ubrzivač

Osnovna namjena ubrzivača je da ubrza reakciju njege između smole i učvršćivača. Ubrzivači obično ubrzavaju epoksidne reakcije povećavanjem temperature u sustavu. U ovom se radu kao ubrzivač za aktiviranje sredstva za njegu koristi kobaltov naftenat (0,3 % smole). U kobaltovom naftenatu, koji se često koristi za OUPR smole, aftenske kiseline (NA) se pretvaraju u kobalt. Tehnička svojstva ubrzivača prikazana su u tablici 3.

2.1.4. Učvršćivač

U ovom se ispitivanju za njegu epoksidne smole kao komponenta za učvršćivanje upotrebljava acetil acetone peroksid (AAP), a radi se o jednom od najčešće korištenih učvršćivača za polimerne betone. S kobaltnim ubrzivačem, AAP može njegovati OUPR smole na sobnoj temperaturi, a kada se koriste zajedno, AAP i kobalt omogućuju najbržu njegu pri najvećim temperaturama. Tehnički detalji o ovom učvršćivaču prikazani su u tablici 4.

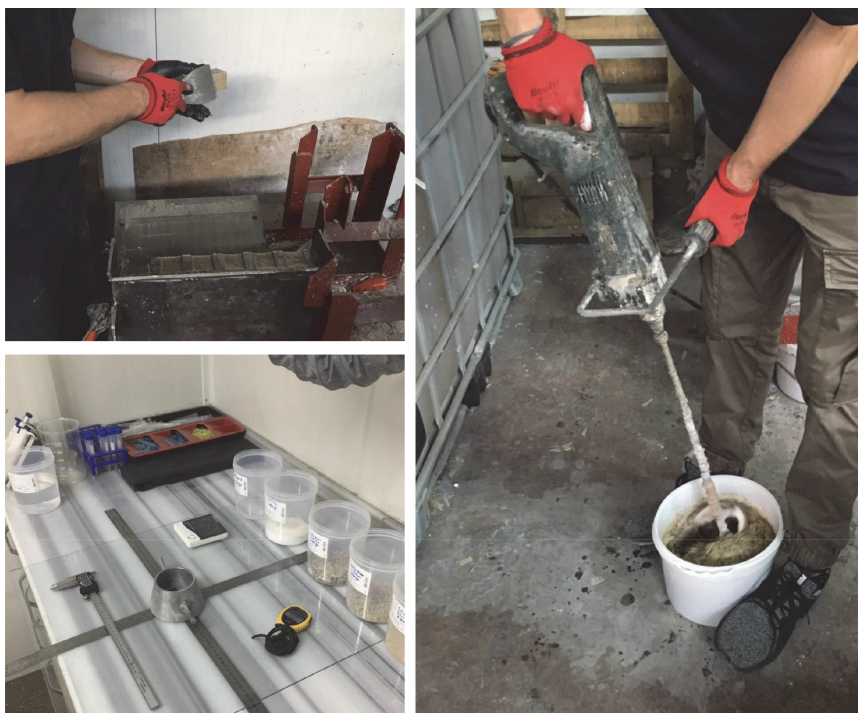
2.2. Izrada polimernog betona

Izrada polimernog betona počinje miješanjem agregata različitih frakcija u zadanim postocima prema odgovarajućoj granulometriji. Kako bi se izbjeglo oštećenje agregata te omogućilo njihovo prikladno miješanje u

Tablica 4. Tehnička svojstva učvršćivača

Svojstva	Vrijednost
Talište	> 60 °C
Gustoća, 20 °C	1055 kg/m ³
Viskoznost, 20 °C	21 mPa.s
Temperatura samoubrzavajućeg razlaganja (SADT)	60 °C
Ukupan udio aktivnog kisika	4,0 - 4,2 %
Udio peroksida	33 %
Dietilenglikol + voda + diacetonski alkohol	67 %

ovoj prvoj fazi miješanja, sam postupak se provodio vrlo polako i pravilno. Nakon dobivanja mješavine agregata odgovarajuće granulometrije, u mješavinu je dodana smola i ubrzivač te je mješavina zatim dobro izmiješana mehaničkim mikserom. U ovoj fazi treba paziti da miješanje bude djelotvorno, tj. da smola i ubrzivač ravnomjerno prekriju sva zrna agregata, ali i da pritom ne dolazi do oštećenja samog agregata. U posljednjoj je fazi dodan stabilizator i opet je proveden odgovarajući postupak miješanja kako bi se prikladno izmiješali svi spomenuti sastojci. Kako do očvršćivanja polimernog betona dolazi vrlo brzo, ispitivanja na svježem betonu trebala su se obaviti prije očvršćivanja betona, a uzorci za ispitivanje očvršćenog betona ugrađeni su u prikladne kalupe. Da bi se izbjegli bilo kakvi problemi u ovoj fazi te osiguralo učinkovito provođenje postupaka, formirane su dvije radne skupine. U okviru prve skupine, provedena su ispitivanja svježeg betona koristeći pripremljenu mješavinu betona, dok su se u okviru druge skupine provodila ispitivanja na uzorcima koji



Slika 1. Izrada polimernih betona i oprema za provođenje ispitivanja

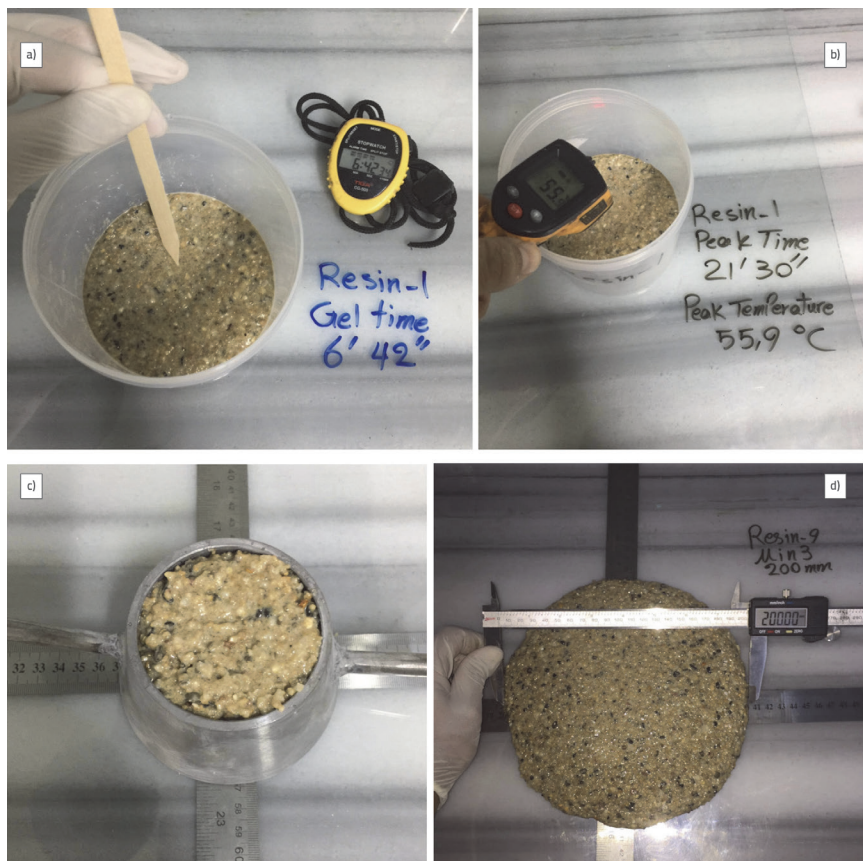
su ugrađeni u kalupe. Kako bi se provela ispitivanja u očvrslom stanju, svježe mješavine polimernog betona ugrađene su u kalupe u obliku prizme i kocke radi ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje. Svaki kalup je zatim vibriran na vibracijskom stolu kako bi se dobili zbijeni uzorci. Za ispitivanja čvrstoće na savijanje upotrijebljeni su uzorci dimenzija 40 mm x 40 mm x 200 mm, a za ispitivanja tlačne čvrstoće uzorci dimenzija 50 mm x 50 mm x 50 mm (slika 1.). Za potrebe ispitivanja, pet je uzoraka pripremljeno za svaku skupinu polimernog betona. Nakon deset minuta njegovanja, uzorci su ugrađeni u kalupe. Nakon vađenja uzoraka iz kalupa svi su se uzorci čuvali u komori za njegu kako bi se osigurali ujednačeni uvjeti. U okviru ovog ispitivanja izrađeno je ukupno 50 uzoraka oblika kocke te 50 uzoraka prizme.

3. Eksperimentalna analiza

U ovom dijelu rada opisuje se eksperimentalna analiza. Ona je podijeljena u dvije kategorije: svojstva svježeg betona i svojstva očvrslulog betona. Kako za ispitivanje čvrstoće polimernog betona nema međunarodnih normi, eksperimentalna analiza provedena je u skladu s međunarodnim propisima za betone i mortove s cementom.

3.1. Svojstva svježeg polimernog betona

Polimerni beton treba biti homogen, nesegregiran, jednostavan za miješanje, transport i zbijanje, a završna površina treba biti lako obradiva. Osim toga, mješavina takvog betona treba imati takve karakteristike da se lako može ugraditi u kalupe, bez šupljina i bez gubitka homogenosti. Stoga se može reći da dobra svojstva svježeg betona u velikoj mjeri upućuju na kvalitetu tog betona, što je razlog zašto se u prvom dijelu ovog rada analiziraju svojstva svježeg polimernog betona. U radu se razmatraju četiri ključna svojstva svježeg betona koja bitno utječu na njegovu obradivost i čvrstoću: vrijeme vezivanja, vrijeme kad se ostvaruje najveća temperatura, najveća temperatura i rasprostiranje (slika 2.). U analizi svježeg betona korištena je norma ASTM D 2471-99 [14] za određivanje vremena vezivanja, vrijeme u kojem se ostvaruje najveća temperatura, najveća temperatura. Primjenom te norme moguće je točno odrediti koliko je vremena proteklo od dodavanja reaktanata do početka očvršćivanja u uvjetima koji su bliski uvjetima stvarne primjene. Osim toga, ova metoda omogućava mjerenje najvećih egzotermnih temperatura,



Slika 2. Ispitivanja svježeg betona: a) vrijeme vezivanja; b) najveća temperatura; c) i d) ispitivanje rasprostiranja

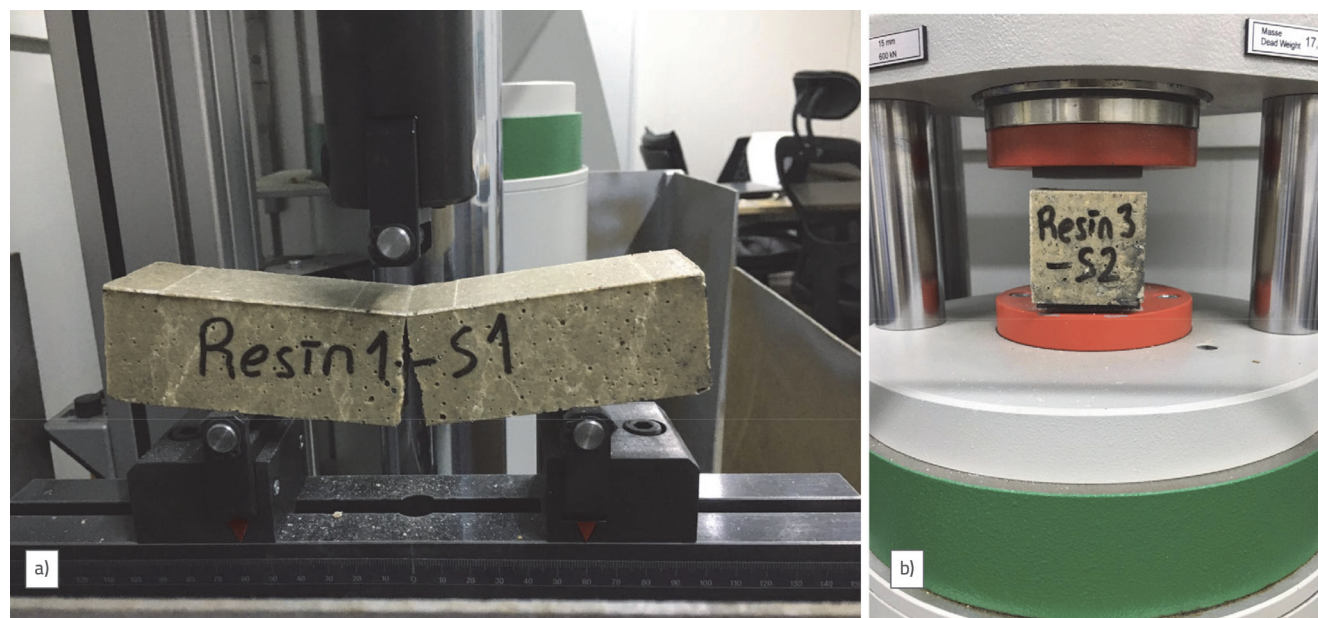
isto kao i mjerenje intervala između miješanja i postizanja tih temperatura. Za određivanje obradivosti betona primijenjena je norma ASTM C143/C143M-20 [15]. Još nema propisa o načinu ispitivanja obradivosti polimernog betona, pa se stoga koriste ispitivanja koja se odnose na betone s cementom. Prvobitno je razvijena metoda ispitivanja za određivanje konzistencije svježeg betona, a može se primijeniti na beton s česticama agregata manjima od 37,5 mm. Ta je norma ovdje i primijenjena jer je maksimalna veličina agregata u ovom ispitivanju manja od 37,5 mm. Podaci dobiveni tijekom ispitivanja svježeg betona prikazani su u tablici 5.

3.2. Svojstva očvrslulog polimernog betona

U drugom dijelu ovog rada provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje i gustoće kako bi se ocijenila svojstva očvrslulog betona. Očvrsluli betoni ispitani su prema normi ASTM C109/C109M [16] radi određivanja tlačne čvrstoće, te prema normi ASTM C78/C78M za čvrstoću na savijanje, dok je norma ASTM C642 [18] korištena za ispitivanje gustoće. Sokoowska [19] u svom radu navodi da polimerni beton postiže više od 80 % od svoje mehaničke čvrstoće u roku od tri dana, te da nema većih promjena čvrstoće unutar sedam dana starosti. Zbog toga se ovdje za ispitivanje očvrslulih betonskih uzoraka korišteni uzorci starosti 7 dana [19].

Tablica 5. Rezultati dobiveni ispitivanjem svježeg betona

Polimerni beton	Vrijeme vezivanja [s]	Najveća temperatura [°C] (sobna temperatura od: 25 °C)	Vrijeme dostizanja najveće temperature [s]	Ispitivanje rasprostiranja [mm] (smjer X / Y)
PC-1	380	53,9	1290	S1: 152/160 S2: 165/175 S3: 180/190 S4: 187/197 S5: 177/180
PC-2	560	53,3	1500	S1: 160/160 S2: 175/170 S3: 185/185 S4: 195/190 S5: 178/176
PC-3	180	52,8	690	S1: 140/150 S2: 160/165 S3: 175/180 S4: 185/185 S5: 168/172
PC-4	375	45,4	1110	S1: 140/140 S2: 155/155 S3: 165/165 S4: 170/170 S5: 158/160
PC-5	195	53,3	660	S1: 160/165 S2: 170/175 S3: 180/185 S4: 190/190 S5: 175/178
PC-6	570	48	1500	S1: 145/145 S2: 155/155 S3: 165/170 S4: 170/175 S5: 159/160
PC-7	360	40,1	1650	S1: 155/155 S2: 170/170 S3: 185/185 S4: 195/195 S5: 176/175
PC-8	390	45,8	1290	S1: 160/160 S2: 170/170 S3: 180/180 S4: 190/190 S5: 170/170
PC-9	210	57,5	780	S1: 170/180 S2: 195/200 S3: 200/205 S4: 200/210 S5: 180/178
PC-10	230	58,2	1170	S1: 195/195 S2: 205/205 S3: 214/214 S4: 215/215 S5: 198/201



Slika 3. a) Ispitivanje čvrstoće na savijanje; b) Ispitivanje tlačne čvrstoće

Kako bi se odredila tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje uzoraka, oni su ispitani do sloma pomoću uređaja Form-Test kapaciteta 600 kN (slika 3.). Prilikom određivanja tlačne čvrstoće uzoraka, korištene

su kocke, a ne valjci jer je maksimalni promjer agregata korištenog u ovom ispitivanju iznosio 5 mm. Rezultati ispitivanja očvrsnulog betona sažeto su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati dobiveni ispitivanjem očvrsnulog betona

Polimerni beton	Tlačna čvrstoća [MPa]	Čvrstoća na savijanje [MPa]	Gustoća [kg/m ³]
PC-1	S1: 69,11 S2: 73,85 S3: 68,93 S4: 68,30 S5: 74,31	S1: 19,71 S2: 19,62 S3: 16,48 S4: 18,63 S5: 17,06	S1: 2106,80 S2: 2043,63 S3: 2057,58 S4: 2079,84 S5: 2092,30
	Prosjek: 70,90	Prosjek: 18,3	Prosjek: 2076,03
PC-2	S1: 90,71 S2: 114,48 S3: 109,93 S4: 103,83 S5: 100,81	S1: 27,92 S2: 27,06 S3: 26,76 S4: 27,89 S5: 27,11	S1: 2242,30 S2: 2232,66 S3: 2234,77 S4: 2236,09 S5: 2246,09
	Prosjek: 103,95	Prosjek: 27,35	Prosjek: 2238,38
PC-3	S1: 99,73 S2: 101,26 S3: 99,56 S4: 102,81 S5: 99,98	S1: 28,95 S2: 24,02 S3: 26,56 S4: 26,83 S5: 25,34	S1: 2300,51 S2: 2328,01 S3: 2351,41 S4: 2332,37 S5: 2323,97
	Prosjek: 100,67	Prosjek: 26,34	Prosjek: 2327,25
PC-4	S1: 91,48 S2: 88,34 S3: 89,87 S4: 90,87 S5: 88,22	S1: 24,21 S2: 23,23 S3: 25,79 S4: 24,39 S5: 25,02	S1: 2227,34 S2: 2205,94 S3: 2190,86 S4: 2190,31 S5: 2205,45
	Prosjek: 89,76	Prosjek: 24,53	Prosjek: 2203,98

Tablica 6. Rezultati dobiveni ispitivanjem očvrslulog betona - nastavak

Polimerni beton	Tlačna čvrstoća [MPa]	Čvrstoća na savijanje [MPa]	Gustoća [kg/m ³]
PC-5	S1: 82,93 S2: 85,07 S3: 82,96 S4: 83,32 S5: 84,43	S1: 21,52 S2: 20,65 S3: 19,83 S4: 19,98 S5: 20,02	S1: 2252,93 S2: 2302,46 S3: 2263,38 S4: 2283,40 S5: 2287,21
	Prosjek: 83,74	Prosjek: 20,40	Prosjek: 2277,88
PC-6	S1: 77,85 S2: 99,29 S3: 99,42 S4: 97,14 S5: 80,61	S1: 24,73 S2: 31,32 S3: 23,03 S4: 25,91 S5: 28,19	S1: 2270,16 S2: 2247,66 S3: 2256,52 S4: 2220,31 S5: 2183,55
	Prosjek: 90,86	Prosjek: 26,64	Prosjek: 2235,64
PC-7	S1: 69,62 S2: 67,82 S3: 67,61 S4: 68,78 S5: 69,71	S1: 19,59 S2: 20,13 S3: 19,13 S4: 19,36 S5: 19,26	S1: 2327,66 S2: 2324,14 S3: 2260,82 S4: 2243,59 S5: 2319,36
	Prosjek: 68,71	Prosjek: 19,49	Prosjek: 2295,11
PC-8	S1: 78,23 S2: 79,91 S3: 79,92 S4: 78,34 S5: 79,14	S1: 17,84 S2: 21,19 S3: 20,67 S4: 20,46 S5: 19,70	S1: 2186,05 S2: 2182,85 S3: 2173,24 S4: 2219,84 S5: 2184,73
	Prosjek: 79,11	Prosjek: 19,97	Prosjek: 2189,34
PC-9	S1: 98,00 S2: 93,56 S3: 83,11 S4: 94,03 S5: 92,98	S1: 24,14 S2: 26,95 S3: 24,80 S4: 27,35 S5: 23,65	S1: 2263,98 S2: 2199,06 S3: 2221,45 S4: 2195,78 S5: 2273,95
	Prosjek: 92,34	Prosjek: 25,38	Prosjek: 2230,84
PC-10	S1: 82,34 S2: 82,32 S3: 84,18 S4: 83,29 S5: 86,24	S1: 20,88 S2: 21,05 S3: 30,23 S4: 29,53 S5: 23,18	S1: 2129,84 S2: 2171,84 S3: 2172,11 S4: 2140,31 S5: 2134,73
	Prosjek: 83,67	Prosjek: 24,97	Prosjek: 2149,77

4. Analiza rezultata

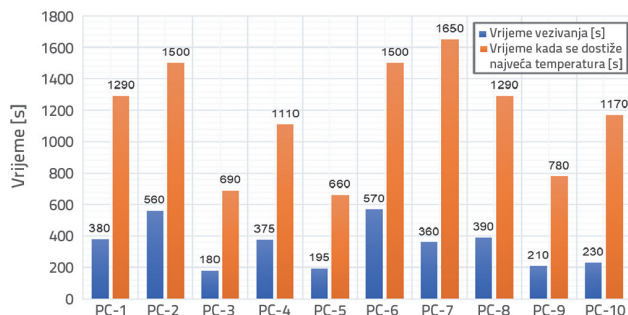
U ovom poglavlju studije provodi se analiza i usporedba rezultata dobivenih tijekom ispitivanja svježeg i očvrslulog betona. U prvom dijelu analiziraju se podaci dobiveni tijekom ispitivanja svježeg betona, što uključuje određivanje vremena vezivanja, najveće temperature, vrijeme kada se doseže najveća temperatura i promjera rasprostiranja, te analizu prosječnih

vrijednosti tih rezultata. Što se tiče vremena vezivanja, najkraće vrijeme vezivanja od 180 sekundi zabilježeno je kod smole 3, a kod smole 6 zabilježeno je najduže vrijeme tj. 570 sekundi (slika 4.). Prema tablici 2. koja sadrži tehničke informacije o smolama, vrijeme vezivanja polimernih betona izravno je povezano s vremenom vezivanja smola. Uočeno je da u slučajevima kada do vezivanja smole dolazi relativno brzo, tada isto tako relativno brzo dolazi i do vezivanja polimernog betona. Isto tako, ako je

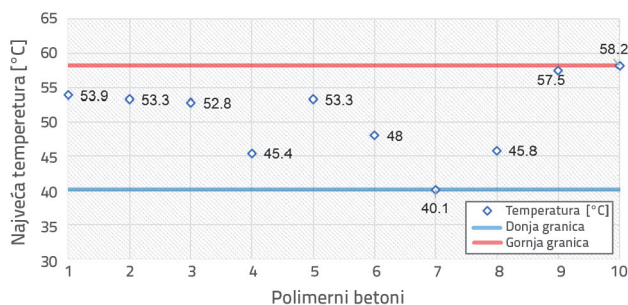
kod smole zabilježeno dugo vrijeme vezivanja, tada i polimerni beton karakterizira dugo vrijeme vezivanja. Rezultati dobiveni u ovom istraživanju odgovaraju rezultatima istraživanja koje su proveli Haddad i Sbarski 2017. godine [20]. Naime, Haddad i Sbarski [20] ustanovili su da je vrijeme vezivanja kratko kod polimernih betona koji sadrže smolu s kratkim vremenom vezivanja, dok je dugo vrijeme vezivanja utvrđeno kod polimernih betona proizvedenih sa smolom s dugim vremenom vezivanja. Isti se trend uočava i kod vrijednosti najveće temperature i vremena kada se ona dostiže. Tijekom analize prosječnih najvećih vrijednosti temperature, uočeno je da najniža temperatura iznosi 40,1 °C u smoli 7, najviša temperatura od 58,2 °C zabilježena je u smoli 10. Također je utvrđeno da najveće vrijednosti temperature uglavnom variraju u rasponu od 55 °C do 60 °C (slika 4.).

Rezultati znatno variraju kada se vremena pri kojoj se ostvaruje najveća temperatura uspoređuju jedna s drugima. Drugim riječima, može se uočiti da smola 5 ima najkraće prosječno vrijeme kada se postiže najveća temperatura, a smola 7 ima najveće (slika 5.). Ako se uspoređuju vremena kada se postiže najveća temperatura tih dviju smola, može se uočiti da smola 7 ima vrijeme koje je gotovo dva puta veće u odnosu na smolu 5. Tako visoko vrijeme kada se postiže najveća temperatura zabilježeno kod smole 7 može se objasniti niskom najvećom temperaturom te smole. Na temelju tih rezultata može se zaključiti da su svojstva svježeg polimernog betona izravno ovisna o svojstvima smole. Ispitivanje rasprostiranja pokazuje da smola 10 ima najvišu vrijednost rasprostiranja od otprilike 205 mm, dok je kod smole 4 zabilježeno najmanje rasprostiranje otprilike od 158 mm (slika 6.). U ovom slučaju, za takvo je stanje izravno odgovorna viskoznost smole. Što se tiče promjera

rasprostiranja, mali promjer zabilježen je kod polimernih betona proizvedenih sa smolom visoke viskoznosti, dok je promjer rasprostiranja velik kod polimernih betona proizvedenih sa smolom niske viskoznosti.

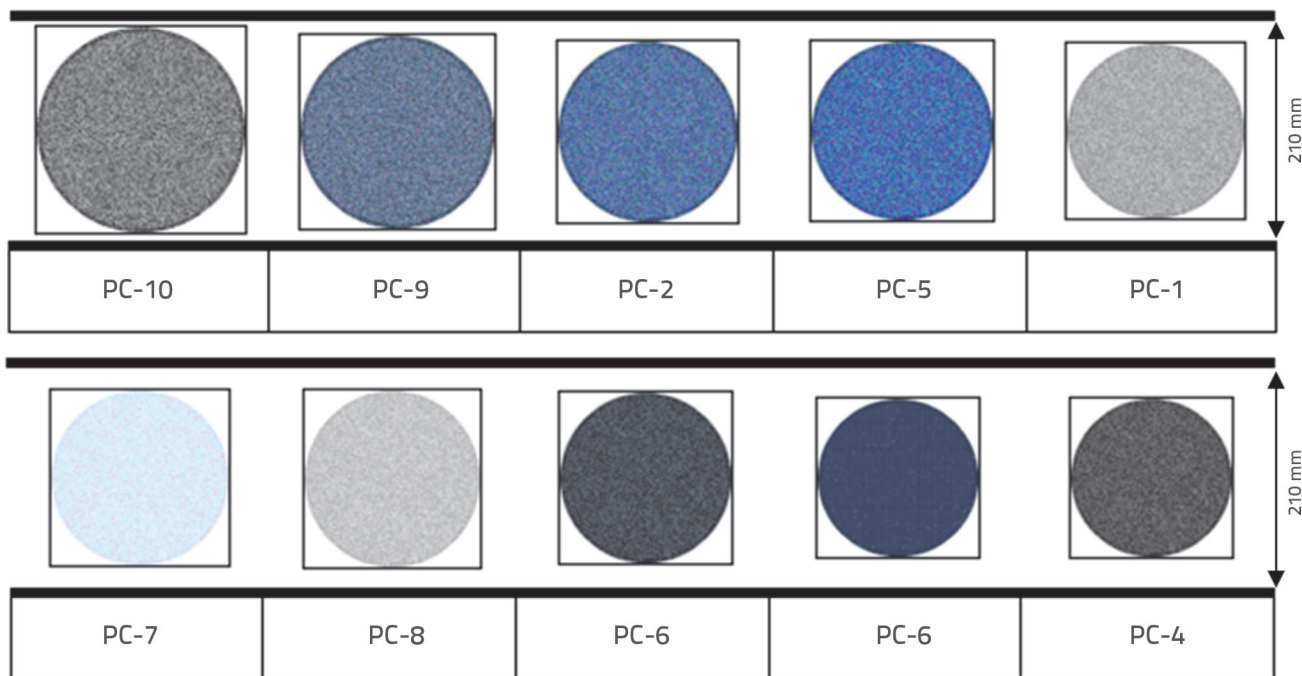


Slika 4. Prosječno vrijeme vezivanja i vrijeme kada se dostiže najveća temperatura [s]

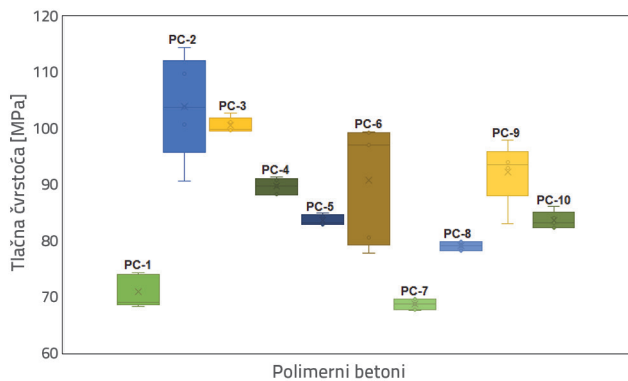


Slika 5. Prosječna najveća temperatura [°C]

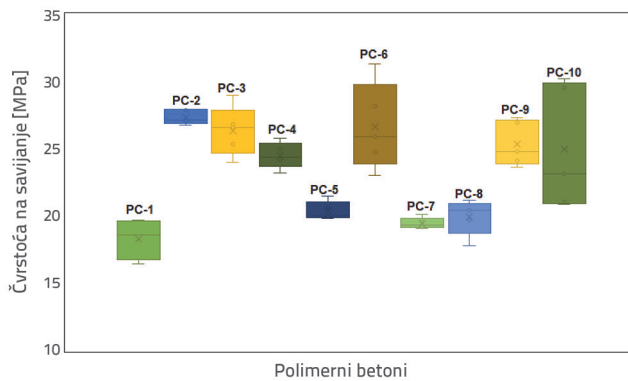
Što se tiče mehaničkih ispitivanja provedenih na očvrslim uzorcima betona, tlačna čvrstoća može biti od 68 MPa do 104



Slika 6. Prosječni promjer rasprostiranja dobiven tijekom ispitivanja rasprostiranja (prikazano od najviših do najnižih vrijednosti)



Slika 7. Prosječne tlačne čvrstoće [MPa]



Slika 8. Prosječne čvrstoće na savijanje [MPa]

Tablica 7. Najgori i najbolji scenarij svakog parametra

Parametri Rezultat	Vrijeme vezivanja	Najveća temperatura	Vrijeme pri kojoj se dostiže najveća temperatura	Ispitivanje rasprostiranja	Tlačna čvrstoća	Vlačna čvrstoća	Gustoća
Najgori rezultat	MIN	MAX	MIN	MIN	MIN	MIN	MAX
Najbolji rezultat	MAX	MIN	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN

MPa (slika 7.). Kod smole 7 zabilježena je najniža tlačna čvrstoća, dok je kod smole 2 najviša. Što se tiče čvrstoće na savijanje, najniža vrijednost je 18,30 MPa, a najviša zabilježena kod smole 1, iznosi 27,35 MPa (slika 8.). Prema standardnoj devijaciji pet uzoraka, utvrđeno je da su rezultati eksperimentalnih istraživanja kompatibilni. U odnosu na beton s cementom, polimerni beton ima višu tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje. Na osnovi spomenutih rezultata može se uočiti da vrsta epoksidnih smola također utječe na mehanička svojstva polimernog betona. Rezultati zabilježeni u ovom radu slični su rezultatima o kojima izvještavaju Vipulanandan i Paul [21]. Izravan utjecaj smola na tlačnu i vlačnu čvrstoću polimernih betona u ovom je radu utvrđen na bazi eksperimentalnih ispitivanja i konstitutivnog modeliranja. Muthukumar i Raju [22] također izvješćuju da mehanička svojstva polimernog betona ovise o vrsti polimernog veziva, vrsti agregata te o granulometriji. Kako su vrste agregata i granulometrija u ovom ispitivanju bile konstantne veličine, može se zaključiti da mehanička svojstva polimernih betona izravno ovise o vrsti smole.

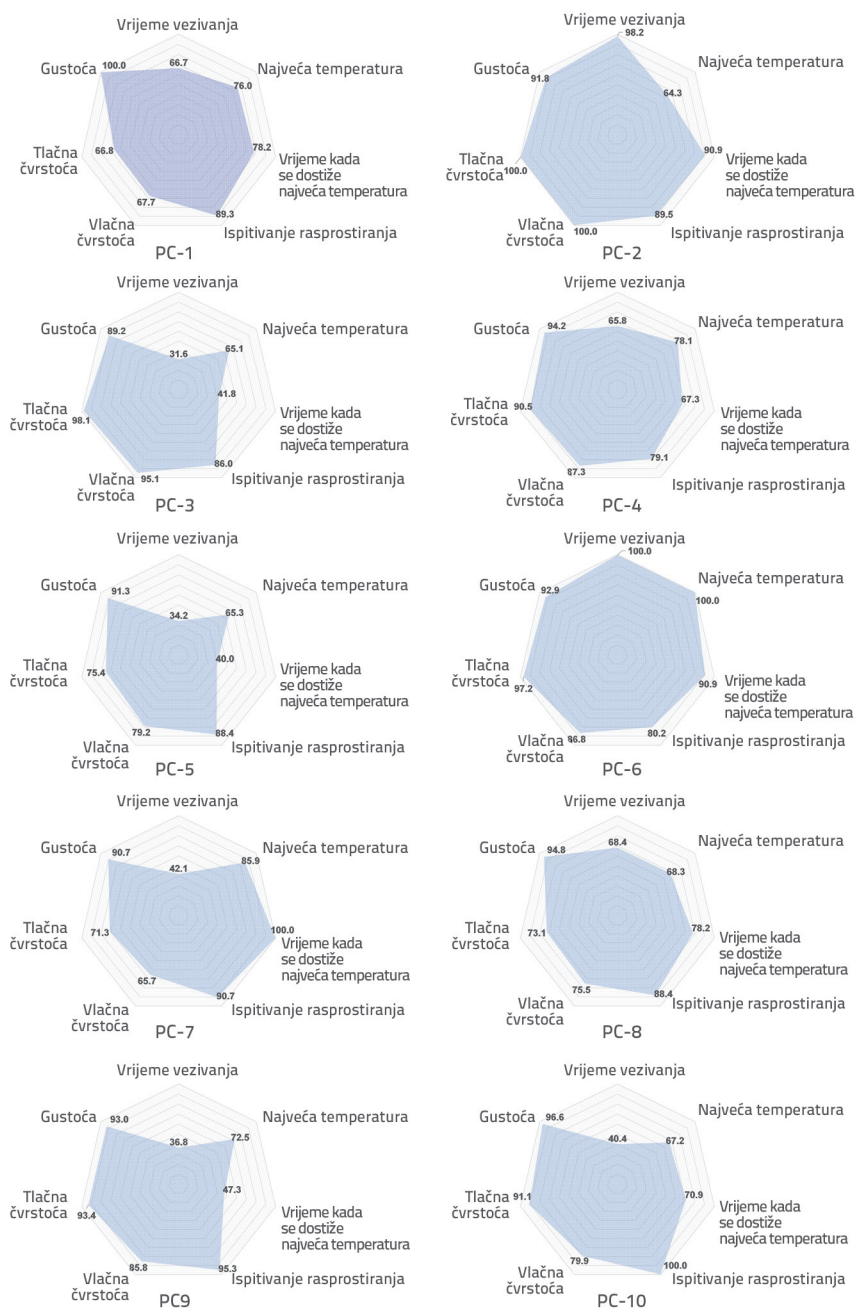
5. Indeks učinkovitosti

U kontekstu ovog rada, učinkovitost smole mjerena je na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem svježeg i očvrsnulog betona. Međutim, teško je na osnovi eksperimentalnih podataka odrediti koji beton ima najbolja svojstva. Zbog toga su za uzorke korišteni indeksi učinkovitosti kako bi se omogućila što kvalitetnija interpretacija eksperimentalnih rezultata te usporedba pojedinačnih polimernih betona. U ovom je ispitivanju za svojstva svježeg i očvrsnulog betona korišteno sedam različitih parametara. Svaki od tih parametara može

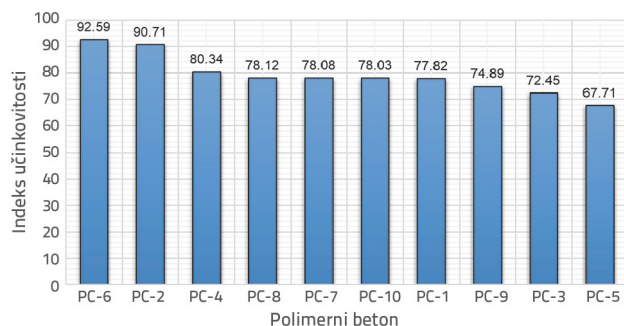
bilo pozitivno ili negativno utjecati na učinkovitost polimernog betona. Stoga je na početku postupka utvrđen utjecaj tih sedam parametara na polimerni beton (tablica 7.). Kao što se vidi u toj tablici, više vrijednosti mogu vrlo negativno utjecati na polimerni beton, a niske vrijednosti mogu s druge strane izuzetno pozitivno utjecati na taj beton. Kako bi se riješila ova poteškoća, spomenuti su parametri rangirani od 0 do 100, pri čemu 0 predstavlja najgori, a 100 najbolji rezultat. Nakon toga su određeni indeksi učinkovitosti pomoću formule prikazane u jednadžbi (1). Na osnovi indekasa učinkovitosti izrađeni su radarski grafikoni u ovisnosti o konačnoj fazi ocjenjivanja, te je učinkovitost svake smole ocijenjena na temelju tih grafikona (slika 9.). Nakon izrade radarskih grafikona određen je indeks učinkovitosti za svaki beton, koristeći pritom odgovarajuća područja prikazana na radarskom grafikonu. Indeksi učinkovitosti prikazani su, od najviše do najniže vrijednosti, na slici 10. Prema tako dobivenim indeksima učinkovitosti, smola 6 ima najbolji indeks učinkovitosti tj. 92,59 od 100, a smola 5 ima najgori indeks učinkovitosti: 67,71 od 100.

$$PI_i = \left(\frac{PTime_i}{\max(GTime)} + \frac{\min(PTemp)}{PTemp_i} + \frac{PTime_i}{\max(PTime)} + \left(\frac{FTest_i}{\max(FTest)} + \frac{CSt_i}{\max(CSt)} + \frac{TSt_i}{\max(TSt)} + \frac{\min(Density)}{Density_i} \right) \right) \cdot 100 \tag{1}$$

gdje Gtime označava vrijeme vezivanja, PTemp najveću temperaturu, PTime vrijeme kada se postiže najveća temperatura, FTest ispitivanje čvrstoće na savijanje, CSt ispitivanje tlačne čvrstoće, a TSt je oznaka za gustoću.



Slika 9. Blizina učinkovitosti svakog uzorka polimernog betona



Slika 10. Indeks učinkovitosti uzoraka

6. Zaključak

Posljednjih se godina polimerni beton sve učestalije koristi u različitim područjima. S obzirom na visoku učinkovitost polimernih betona, oni se s pravom smatraju najdjelotvornijom zamjenom za cementne betone. U ovom se radu istražuje način na koji smole utječu na mehanička svojstva polimernog betona i u tom se smislu analiziraju eksperimentalni rezultati dobiveni tijekom ispitivanja svježeg i očvrsnulog polimernog betona. U istraživanju je odabrano deset tržišno dostupnih vrsta smola. Za svaku smolu pripremljeni su betonski uzorci na kojima je za svježi beton ispitano vrijeme vezivanja, najveća temperatura, vrijeme kada se dostiže najveća temperatura i rasprostiranje, a za očvrsnuli beton tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje i gustoća. U posljednjoj fazi, za svaki je polimerni beton generiran indeks učinkovitosti, a rezultati analize ocijenjeni su rangiranjem pojedinačnih učinkovitosti. Rezultati ispitivanja pokazuju da smole u vrlo velikoj mjeri utječu na učinkovitost polimernog betona. Na temelju indeksa učinkovitosti utvrđeno je da smola 6 ima najbolji indeks učinkovitosti koji iznosi 92,59, a smola 5 ima najgori indeks učinkovitosti tj. 67,71. Ispitivanje mehaničkih svojstava se provodi kako bi se odredio krti lom svih uzoraka. Ustanovljeno je da uzorci polimernog betona posjeduju slabu ili nikakvu otpornost na plastične deformacije. Dakle, sve uzorke karakterizira krti lom, te se može zaključiti da vrsta smole ne utječe na mehanizam sloma polimernog betona.

Vjeruje se da će se rezultati ovog rada koristiti u izradi brojnih analiza. Osim toga, ovaj rad može poslužiti i kao poticaj istraživačima u smislu istraživanja komponenata polimernog betona, te dodatnog ocjenjivanja tih komponenata.

Zahvale

Ovo istraživanja potpomogla je tvrtka Mert Casting Inc. u okviru projekta br. Ar-GeMO1. Autori ovim iskazuju zahvalnost tvrtki Mert Casting Inc. na kontinuiranoj podršci tijekom izrade ovog rada.

LITERATURA

- [1] GSR (2020): Global Status Report for Buildings and Construction, Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector, United Nations Environment Programme, 2020.
- [2] IEA (2020) Global energy review 2019: The latest trends in energy and emissions in 2019. April 2020, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>.
- [3] Proaño, L., Cobo, M., Sarmiento, A., Figueredo, M.: Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO₂ emissions capture in cement industry: A system dynamics approach, *Journal of Cleaner Production*, 263 (2019), pp. 121457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121457>
- [4] ACI 548.1R: Guide for the use of polymers in concrete", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2009.
- [5] Kiruthika, C., Prabha, S.L., Neelamegam, M.: Different aspects of polyester polymer concrete for sustainable construction, *Materials Today: Proceedings*, 43 (2021) 2, pp. 622-1625, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.766>
- [6] Fowler, D.W.: Are Polymer Concrete Materials and Products Really Sustainable?, *Advanced Materials Research*, 1129 (2015), pp. 3-9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1129.3>
- [7] Gagandeep, S.P.: Experimental study on strength characteristics of polymer concrete with epoxy resin, *Materials Today: Proceedings*, 37 (2021) 2, pp. 2886-2889. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.665>
- [8] Seco, A., Echeverría, A., Marcelino, S., García, B., Espuelas, S.: Durability of polyester polymer concretes based on metallurgical wastes for the manufacture of construction and building products, *Construction and Building Materials*, 240 (2020), pp. 117907. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117907>
- [9] Shen, Y., Huang, J., Ma, X., Hao, F., Lv, J.: Experimental study on the free shrinkage of lightweight polymer concrete incorporating waste rubber powder and ceramsite, *Composite Structures*, 242 (2020), pp. 112-152, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112152>
- [10] Jafari, K., Tabatabaeian, M., Joshaghani, A., Ozbakkaloglu, T.: Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation, *Construction and Building Materials*, 167 (2018), pp. 185-196, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.191>
- [11] Mohamed, M.R., ALdeen, S.N., Abdulrazzaq, R.I.: A study of compression strength and flexural strength for polymer concrete, *Iraqi Journal of Science*, 57 (2016) 4B, pp. 2677-2684.
- [12] Lokuge, W., Aravinthan, T., Sirimanna, C. S., Islam, M.: Influence of fly ash proportions on properties of polymer concrete with polyester resin, In *Proceedings of the 25th Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia (Concrete 2011)*, pp. 1-8, 2011.
- [13] Kumar, A., Singh, G., Bala, N.: Evaluation of flexural strength of epoxy polymer concrete with red mud and fly ash. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3 (2013) 5, pp. 1799-1803.
- [14] ASTM D2471: Standard Test Method for Gel Time and Peak Exothermic Temperature of Reacting Thermosetting Resins, West Conshohocken, PA. ASTM International, 1999.
- [15] ASTM C143/C143M: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, West Conshohocken, PA. ASTM International, 2020.
- [16] ASTM C109 / C109M: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), West Conshohocken, PA. ASTM International, 2002.
- [17] ASTM C78/C78M: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), West Conshohocken, PA. ASTM International, 2018.
- [18] ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, West Conshohocken, PA. ASTM International, 2013.
- [19] Sokołowska, J.J.: Long-Term Compressive Strength of Polymer Concrete-like Composites with Various Fillers", *Materials*, 13 (2020) 5, pp. 1207, <https://doi.org/10.3390/ma13051207>
- [20] Haddad, H., Sbarski, I.: Optimization of Moulding Technology of Polymer Concrete Used for Manufacture Precision Tool Machine Bases, *J Material Sci Eng*, 7 (2018) 427, pp. 2169-0022, <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000427>.
- [21] Vipulanandan, C., Paul, E.: Characterization of polyester polymer and polymer concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5 (1993) 1, pp. 62-82. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1993\)5:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:1(62)).
- [22] Muthukumar, M., Mohan, D.: Optimization of mechanical properties of polymer concrete and mix design recommendation based on design of experiments, *Journal of Applied Polymer Science*, 94 (2004) 3, pp. 1107-1116, <https://doi.org/10.1002/app.21008>