

Primljen / Received: 16.12.2024.

Ispravljen / Corrected: 8.8.2025.

Prihvaćen / Accepted: 26.1.2026.

Dostupno online / Available online: 10.3.2026.

Utjecaj sastava na mehanička i elastična svojstva geopolimernog betona očvrslulog pri temperaturi okoliša uz primjenu pucolanskih i cementnih materijala

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Anand Rejilin Dorairaj**, dipl.ing.građ.
Tehnički i tehnološki fakultet Mar Ephraem, Indija
Odjel za građevinarstvo
rej.anand@gmail.com
Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Bravin Ebanesh Vincent**, dipl.ing.građ.
Tehnički i tehnološki fakultet Mar Ephraem, Indija
Odjel za građevinarstvo
bravineban@gmail.com



Doc.dr.sc. **Jenishia Jeya Raj**, dipl.ing.građ.
Tehnički i tehnološki fakultet Mar Ephraem, Indija
Odjel za građevinarstvo
jenishia1996@gmail.com



Prof.dr.sc. **Kanthavelkumaran Natesan**, dipl.ing.stroj.
Tehnički fakultet Ponjesly, Nagercoil, Indija
Odjel za strojarstvo
kanthavelpriya@gmail.com

Prethodno priopćenje

Anand Rejilin Dorairaj, Bravin Ebanesh Vincent, Jenishia Jeya Raj, Kanthavelkumaran Natesan

Utjecaj sastava na mehanička i elastična svojstva geopolimernog betona očvrslulog pri temperaturi okoliša uz primjenu pucolanskih i cementnih materijala

Vezivna svojstva matrice uvelike određuje čvrstoću betona, zbog čega se cement tradicionalno koristi kao vezivni materijal. Međutim, zbog velikih troškova i nepovoljnog utjecaja proizvodnje cementa na okoliš, razmatraju se alternativni vezivni sustavi, među kojima geopolimerni beton (GPC) zauzima važno mjesto. U slučaju geopolimernog betona potreba za cementom kao vezivom potpuno se eliminira, a čvrstoća se razvija polimerizacijskom reakcijom između alkalnih aktivatora i materijala poput letećeg pepela i mljevene granulirane zgure visoke peći (GGBS). Ispitivanja tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem i modula elastičnosti provedena su nakon 7 i 28 dana. U usporedbi s konvencionalnim betonom, geopolimerni beton s potpunom (100 %) zamjenom letećeg pepela GGBS-om te s 40 % dodatka OPC-a pokazao je višu čvrstoću, bez potrebe za toplinskim njegovanjem. Dodatno povećanje čvrstoće ostvareno je u GPC-u na bazi GGBS-a uz dodatak OPC-a, pri čemu je znatno poboljšanje postignuto već pri udjelu od 12 %. Rezultati eksperimentalnog istraživanja upućuju na mogućnost znatnog smanjenja potrošnje cementa uz zadržavanje ili poboljšanje mehaničkih svojstava, čime se potvrđuje ekonomska i okolišna opravdanost primjene modificiranoga geopolimernog betona.

Ključne riječi:

alkalna otopina, njegovanje pri temperaturi okoliša, leteći pepeo, geopolimerni beton, granulirana zgura visoke peći (GGBS), obični portlandski cement (OPC)

Research Paper

Anand Rejilin Dorairaj, Bravin Ebanesh Vincent, Jenishia Jeya Raj, Kanthavelkumaran Natesan

Effect of synthesis parameters on the mechanical and elastic behaviour of ambient-cured geopolymer concrete modified with pozzolanic and cementitious materials

The adhesive nature of the binder determines the strength of concrete. Although cement is the most efficient binding material, it is not cost-effective or eco-friendly. Therefore, alternative building materials such as geopolymer concrete (GPC) deserve consideration. In the case of geopolymer concrete, the need for cement as a binding material is eliminated, and strength is achieved through the polymerisation reaction between alkali activators and fly ash/ground granulated blast furnace slag (GGBS). The adequate specimens were then tested at 7th day and 28th day to find their compressive strength, split tensile strength, and Young's modulus. Compared with cement concrete composites, GPC, in which fly ash is replaced with 100 % GGBS and 40 % OPC, showed superior strength without the need for curing at elevated temperatures. The strength was further improved by the addition of OPC to GGBS replaced GPC, and showed an ultimate increase in strength with OPC content as low as 12 %. The experimental investigation revealed a visible decrease in the cement requirement, establishing GPC to be economical and eco-friendly.

Key words:

alkaline solution, ambient curing, fly ash, geopolymer concrete, ground granulated blast furnace slag, ordinary portland cement

1. Uvod

Beton je, odmah nakon vode, najčešće korišten građevni materijal. Cement, kao vezivo agregata u betonu, skup je materijal čijom se proizvodnjom emitira približno jednaka količina ugljikova dioksida. Kako bi se smanjile emisije CO₂, potreban je alternativan, ekološki prihvatljiv beton [1]. Geopolimerni beton (eng. *geopolymer concrete* - GPC) ima potencijal postati idealna zamjena za konvencionalne betone. Korištenjem zaliha letećeg pepela i mljevene granulirane zgre visoke peći (eng. *ground granulated blast furnace slag* - GGBS) kao industrijskih nusproizvoda može se izbjeći upotreba cementa te dugoročno doprinijeti održivosti okoliša [2].

Postizanje visoke čvrstoće također je izazov kod GPC-a. Povećana molarnost i povišena temperatura rezultiraju betonom visoke čvrstoće, ali istodobno čine proizvodni proces složenijim i neekonomičnim. Reakcija polimerizacije u GPC-u započinje i održava se vanjskom primjenom topline. Zato je proizvodnja geopolimernih elemenata moguća u komorama s kontroliranim zagrijavanjem, dok je primjena *in situ* otežana ili neizvediva [3, 4].

Proces proizvodnje GPC-a zahtijeva posebnu pažnju pri rukovanju alkalnim otopinama te kontrolu temperature njegovanja. Kako bi se smanjila složenost i povećala čvrstoća, GPC se modificira dodatkom pucolanskih i cementnih materijala, čime se povećava čvrstoća i uklanja potreba za komorama za grijanje tijekom njegovanja [5, 6]. Reakcija polimerizacije događa se na približno 90 °C, pri čemu je visoka temperatura ključna za očvršćivanje GPC-a. Primjenjuju se različite kombinacije letećeg pepela, GGBS-a i običnog portlandskog cementa (OPC) kako bi se eliminirala potreba za njegovanjem pri povišenim temperaturama i povećala čvrstoća [7].

Cilj eksperimentalnog istraživanja bio je analizirati utjecaj GGBS-a i OPC-a na mehanička svojstva GPC-a na bazi letećeg pepela. Ovo istraživanje može dovesti do razvoja novoga hibridnog GPC-a sposobnog postići visoku čvrstoću pri temperaturi okoliša, čime bi se omogućila primjena *in situ*.

Pojam "geopolimer" uveo je Davidovits 1978. Dvije osnovne komponente geopolimera jesu alkalne otopine (NaOH i Na₂SiO₃) i kalcinirani izvorni materijali (leteći pepeo, GGBS, pepeo rižine ljuske itd.) na bazi aluminosilikata, bogati aluminijem i silicijem [8, 9]. Za razliku od OPC-a, koji tijekom procesa hidratacije postiže čvrstoću stvaranjem kalcij-silikat-hidrata (CSH), geopolimeri postižu čvrstoću aktivacijom minerala bogatih silicijem i aluminijem s alkalnim otopinama pri povišenim temperaturama, pri čemu nastaju trodimenzionalne polimerne lančane i prstenaste strukture sastavljene od Si-O-Al-O veza [10, 11]. Reakcije polimerizacije događaju se kombinacijom otapanja, orijentacije i polikondenzacije te su egzotermne [12, 13].

Maseni omjer alkalnog aktivatora i izvornog materijala obično se kreće od 0,25 do 0,30 [14]. Dodatak cementa, zajedno s GGBS-om u različitim udjelima pri temperaturi okoliša, dovoljan

je za iniciranje i održavanje reakcije polimerizacije, čime se uklanja potreba za njegovanjem pri povišenim temperaturama. Zbog svoje alkalne prirode, geopolimeri pokazuju otpornost na djelovanje kiselina. Nadalje, udio paste u GPC-u veći je u usporedbi s kompozitima konvencionalnog betona, čime se smanjuje kemijski napad uslijed prodiranja tekućina [15]. U ovome istraživanju ispitani su različiti odgovori GPC-a pri miješanju s OPC-om i GGBS-om u različitim omjerima.

2. Eksperimentalna metodologija

Cilj ovoga eksperimentalnog istraživanja jest ispitati utjecaj različitih sastava na mehaničku čvrstoću i elastična svojstva geopolimernog betona (GPC) njegovanog pri temperaturi okoliša uz primjenu pucolanskih i cementnih materijala.

Posebno su analizirani učinci zamjene letećeg pepela GGBS-om i OPC-om te zamjene GGBS-a OPC-om na krutost i mehanička svojstva GPC-a. Identificiranjem optimalnih kombinacija veziva i postotaka zamjene nastojalo se poboljšati mehaničko ponašanje uz zadržavanje njegovanja pri temperaturi okoliša. Radi uklanjanja potrebe za njegovanjem pri povišenim temperaturama i povećanja čvrstoće GPC-a provedena su prethodna ispitivanja s različitim omjerima materijala. Na temelju pregleda literature i preliminarnih istraživanja određeni su udjeli zamjene GGBS-a, OPC-a i letećeg pepela.

2.1. Projektiranje sastava mješavine

Prema Hardjitu i Ranganu [16], za razliku od konvencionalnih kompozita cementnog betona, geopolimerni beton jest inovativni građevni materijal za koji još uvijek ne postoji standardizirani postupak projektiranja sastava mješavine.

Za GPC primijenjena je metoda probnog sastava mješavine, kako je to prikazano u tablici 1. GPC proizveden probnom mješavinom zahtijevao je njegovanje pri povišenoj temperaturi. Kako bi se taj problem prevladao, GGBS i OPC korišteni su kao zamjena za leteći pepeo radi postizanja očvršćivanja pri temperaturi okoliša i veće čvrstoće.

Jedinična masa GPC-a iznosi 2400 kg/m³. Ukupni udio agregata (eng. *Combined Aggregate* - CA), koji obuhvaća krupnu i sitnu frakciju, određen je kao 75 % ukupne mase betona, što odgovara masi agregata od 1800 kg/m³. Od toga krupni agregat čini 65 %, odnosno 1170 kg/m³, dok preostalih 35 % otpada na sitni agregat, što iznosi 630 kg/m³. Ti omjeri korišteni su pri formuliranju probne mješavine radi postizanja optimalne ravnoteže između gustoće, obradivosti i mehaničkih svojstava. Omjer natrijeva silikata i natrijeva hidroksida iznosio je 2,5, dok je omjer tekućine i letećeg pepela iznosio 0,5 [17]. Proces otapanja NaOH u vodi oslobađa toplinu koja dodatno potiče reakciju polimerizacije. Kako bi se oslobođena toplina iskoristila, vrijeme nakon otapanja skraćeno je s 24 sata na šest sati, jer se količina oslobođene topline smanjuje produljenjem vremena otapanja [18].

Tablica 1. Sastav mješavine geopolimernog betona

Probna mješavina	ID	Udio komponenti [kg/m ³]					
		Ukupni agregat	Krupni agregat	Sitni agregat / pijesak	Leteći pepeo	NaOH	Na ₂ SiO ₃
T1	P0	1800	1170	630	400	57,15	142,85
T2	P4	1800	1170	630	384	57,15	142,85
T3	P8	1800	1170	630	368	57,15	142,85
T4	P12	1800	1170	630	352	57,15	142,85
T5	P16	1800	1170	630	336	57,15	142,85
T6	P20	1800	1170	630	320	57,15	142,85
T7	P40	1800	1170	630	240	57,15	142,85
T8	P60	1800	1170	630	160	57,15	142,85
T9	P80	1800	1170	630	80	57,15	142,85
T10	P100	1800	1170	630	0	57,15	142,85

2.2. Izrada ispitnih uzoraka

Kao što je to prikazano na slici 1., prethodno izvagane komponente geopolimernog betona, odnosno letećeg pepela te sitnog i krupnog agregata, najprije su miješane u suhome stanju, a zatim su, prema omjerima u probnome sastavu mješavine, dodane alkalne otopine. Na svježoj mješavini ispitana je

obradivost, pri čemu je za svaku mješavinu određena vrijednost slijeganja (*slump*).

Za ispitivanje tlačne čvrstoće izrađene su kocke dimenzija 150 × 150 × 150 mm, a za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem valjci promjera 150 mm i visine 300 mm, korištenjem kalupa od lijevanog željeza i čelika. Radi postizanja očvršćivanja GPC-a pri sobnim uvjetima, udio GGBS-a u mješavini povećavan je

zamjenom dijela letećeg pepela. Kocke su ostavljene u kalupima 24 sata, nakon čega su izvađene i njegovane pri temperaturi okoliša, što podrazumijeva temperaturu okoliša od 27 °C do 35 °C i relativnu vlažnost zraka od 70 % do 80 %. Uzorci su ispitivani nakon 7 i 28 dana kako bi se odredio optimalan postotak zamjene za postizanje maksimalne čvrstoće. Radi daljnjeg poboljšanja parametara čvrstoće OPC je dodavan kao zamjena za GGBS, a optimalan udio za postizanje najveće čvrstoće određen je na temelju rezultata ispitivanja nakon 7 i 28 dana [19].

3. Korišteni materijali

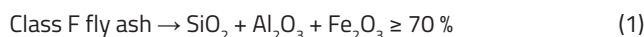
Fizikalna i kemijska svojstva sastavnih materijala korištenih u ovome istraživanju prikazana su u tablicama od 2. do 6. Navedene vrijednosti preuzete su iz ovjerenih tehničkih listova proizvođača i verificirane standardnim laboratorijskim postupcima, čime je osigurana usklađenost s važećim specifikacijama prije primjene u projektiranju mješavine.



Slika 1. Postupak izrade i njegovanja geopolimernog betona: a) vaganje sastojaka; b) miješanje i izrada uzoraka za ispitivanja (kocki i valjaka); c) njegovanje uzoraka

3.1. Leteći pepeo

Leteći pepeo korišten u ovome istraživanju nabavljen je iz termoelektrane u Tuticorinu, u Indiji. Dostupni pepeo klasificiran je kao leteći pepeo razreda F, koji ima visok udio aluminijeva oksida (Al_2O_3) i silicijeva dioksida (SiO_2). Leteći pepeo nema izražena vezivna svojstva, ali sadržava komponente pogodne za primjenu u geopolimernome betonu (GPC) [20]. Pucolanska svojstva letećeg pepela s udjelom CaO manjim od 10 % i udjelom ugljika manjim od 5 % smatraju se povoljnima. Fizikalna svojstva letećeg pepela prikazana su u tablici 2.



Tablica 2. Fizikalna svojstva letećeg pepela

R. br.	Svojstva materijala	Vrijednosti
1.	Specifična težina	2,34
2.	Specifična površina	300 – 500 m ² /kg
3.	Veličina čestica	1 μm – 150 μm
4.	Nasipna gustoća	540 – 860 kg/m ³
5.	Modul finoće	2,73

3.2. Granulirana zgura visoke peći (GGBS)

Granulirana zgura visoke peći (GGBS) industrijski je nusproizvod procesa taljenja željezne rudače pri proizvodnji željeza i čelika. Zgura visoke peći sastoji se pretežno od kalcijevih silikata i aluminosilikata koji nastaju u rastaljenom stanju. Temperatura rastaljene zgure kreće se između 1300 °C i 1600 °C, nakon čega se materijal naglo hladi postupkom vodenog hlađenja kako bi se spriječila kristalizacija. Sirova granulirana zgura visoke peći ima staklastu granularnu strukturu te se suši i melje u fini prah čije su veličine čestica manje od 45 μm. Kada se dodaje cementu u propisanim količinama, GGBS omogućuje proizvodnju betona visoke čvrstoće uz poboljšanu obradivost, smanjenu propusnost i povećanu otpornost na kemijske utjecaje [21]. Kemijski sastav te fizikalna svojstva granulirane zgure visoke peći prikazan je u tablicama 3 i 4.

Tablica 3. Kemijski sastav GGBS-a

R. br.	Kemijska komponenta	Maseni udio
1.	Kalcijev oksid (CaO)	45,45 %
2.	Silicijev dioksid (SiO_2)	29,96 %
3.	Aluminijev trioksid (Al_2O_3)	12,25 %
4.	Sumporov trioksid (SO_3)	3,62 %

Tablica 4. Fizikalna svojstva GGBS-a

R. br.	Svojstva materijala	Vrijednosti
1.	Specifična gustoća	2,90
2.	Modul finoće	3,75
3.	Nasipna gustoća	1200 kg/m ³

3.3. Obični portlandski cement (OPC)

Cement, kao vezivni materijal agregata u betonu, fini je prah dobiven kalcinacijom vapnenca i gline pri visokim temperaturama. Tijekom hidratacije dolazi do formiranja C-S-H gela (kalcij-silikat hidrata), koji pokazuje iznimna vezivna svojstva i pridonosi čvrstoći betona. U tablici 5. prikazani su glavni oksidi u OPC-u, dok su u tablici 6. navedena osnovna fizikalna svojstva. U ovome istraživanju korišten je obični portlandski cement (OPC) razreda 43, u skladu s normom IS 650:1966, koja propisuje minimalnu tlačnu čvrstoću od 43 MPa nakon 28 dana njegovanja.

Tablica 5. Osnovne komponente OPC-a

Kemijski sastojci	Postotak mase
Kalcijev oksid (CaO)	61 – 67
Silicijev dioksid (SiO_2)	18 – 24
Aluminijev oksid (Al_2O_3)	3 – 7
Sumporov trioksid (SO_3)	2,3 – 3,7
Željezov oksid (Fe_2O_3)	0,5 – 5,5
Magnezijev oksid (MgO)	0,5 – 3
Alkalije	0,5 – 1

Tablica 6. Fizikalna svojstva OPC-a

R. br.	Svojstva materijala	Vrijednosti
1.	Tlačna čvrstoća (nakon 28 dana u N/mm ²)	57
2.	Specifična težina	3,14
3.	Standardna konzistencija [%]	32
4.	Početno vrijeme stvrdnjavanja [min]	28
5.	Vrijeme konačnog stvrdnjavanja [min]	219

3.4. Alkalna otopina

Alkalna otopina pripremljena je miješanjem natrijeva silikata i natrijeva hidroksida u omjeru 2,5, uz dodavanje vode. Ta otopina ključna je komponenta GPC-a jer u kombinaciji s letećim pepelom djeluje kao vezivo agregata [22].

Tablica 7. Fizikalna svojstva sitnog i krupnog agregata

Sitni agregat		Krupni agregat	
Svojstva materijala	Vrijednost	Svojstva materijala	Vrijednost
Modul finoće	2,73	Modul finoće	6,45
Veličina čestica	od 425 μ do 2 mm	Veličina čestica	od 4,75 mm do 20 mm
Specifična težina	2,67	Specifična težina	2,62
Gustoća u rasutom stanju	1668 kg/m ³	Gustoća u rasutom stanju	1765 kg/m ³
		Oblik	kocka

Peleti natrijeva hidroksida (NaOH) proizvode se elektrolizom otopine natrijeva klorida. NaOH, odnosno kaustična soda, izrazito je alkalna tvar s pH-vrijednošću između 12 i 14. Molekulska masa NaOH iznosi 40 g/mol, a gustoća 2,13 g/cm³. U ovome istraživanju korišteni su peleti NaOH čistoće 99 %, koji su otopljeni u destiliranoj vodi kako bi se izbjegao utjecaj prisutnih nečistoća i minerala iz vode za miješanje. Molarna koncentracija (molaritet) ima znatnu ulogu u razvoju čvrstoće GPC-a. Definira se kao koncentracija tvari otopljene u jediničnome volumenu otopine. Za pripremu 10 M otopine NaOH, uz molekulu masu od 40 g/mol, potrebno je otopiti 400 g NaOH (10 × 40 g) u litri vode.

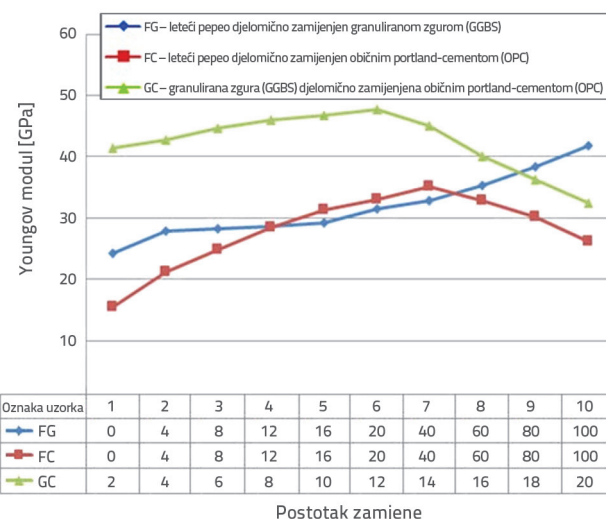
Otopina natrijeva silikata u obliku tekućine ili gela proizvodi se taljenjem i fuzijom pijeska (SiO₂) s natrijevim karbonatom pri temperaturi od 1100 do 1200 °C. Poznata je i pod nazivom "vodeno staklo" te se sastoji od vode (55,52 %), SiO₂ (29,75 %) i Na₂O (14,73 %). Specifična gustoća natrijeva silikata iznosi 1,39, a pH-vrijednost kreće se između 11 i 12. U ovome istraživanju primijenjena je koncentracija NaOH od 12 M, dok je pH-vrijednost otopine silikata održavana ispod 10,7 kako bi se osigurala učinkovita reakcija polimerizacije. Reakcije između NaOH, Na₂SiO₃ i vode oslobađaju znatnu količinu topline, čime se povećava brzina polimerizacije.

3.5. Agregat

Agregat, koji čini najveći volumni udio u betonu, analiziran je postupkom prosijavanja (granulometrijska analiza), na temelju čega su određeni odgovarajući maseni udjeli sitnog i krupnog agregata. Kao sitni agregat korišten je pijesak s niskim udjelom gline (manje od 4 %), u zasićenome površinski suhom stanju. U tablici 7. prikazana su fizikalna svojstva sitnog i krupnog agregata korištenih u eksperimentalnome istraživanju.

4. Rezultati i rasprava

Eksperimentalno istraživanje provedeno je radi potvrđivanja mogućnosti postizanja visoke čvrstoće GPC-a modificiranog GGBS-om i OPC-om pri temperaturi okoliša. Laboratorijska ispitivanja obuhvaćaju određivanje slijeganja (*slump*), tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem i modula elastičnosti, a rezultati su prikazani kao srednje vrijednosti ispitane na trima uzorcima za svaku mješavinu.



Slika 2. Promjena vrijednosti slijeganja za različite mješavine geopolimernog betona

4.1. Obradivost

Obradivost ima ključnu ulogu u razvoju čvrstoće betona jer sposobnost miješanja, ugradnje i zbijanja svježeg betona temelj je za postizanje učinkovite veze između agregata i guste strukture. U skladu s normom IS 1199, za sve mješavine određena je vrijednost slijeganja radi procjene obradivosti u trenutku ugradnje. Amorfna se struktura uslijed polimerizacije formira brže od procesa hidratacije cementa. Obradivost svih mješavina bila je zadovoljavajuća, pri čemu je dodatak GGBS-a i OPC-a postupno smanjivao obradivost.

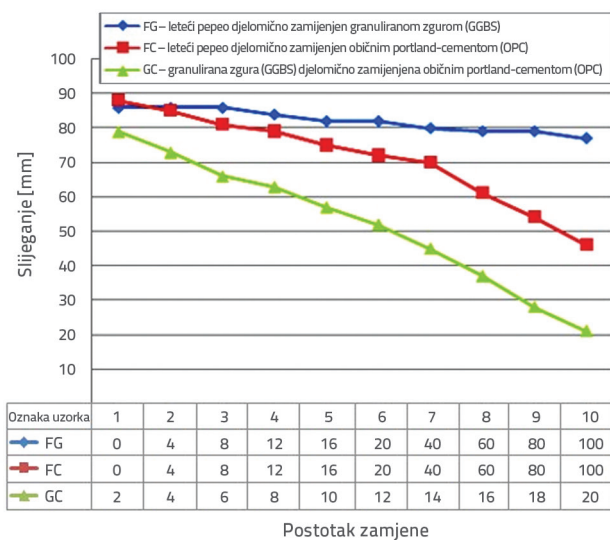
4.2. Modul elastičnosti

Elastična svojstva betona, kao krhkog materijala, potrebno je ispitati radi procjene njegova ponašanja pod opterećenjem. Modul elastičnosti ovisi o čvrstoći agregata i cementne matrice. Kao što je to prikazano na slici 3., preša je centralno postavljena na uzorak valjka betona, a tlačno opterećenje postupno je povećavano do loma. Vrijednosti opterećenja i deformacije zabilježene su i analizirane radi određivanja modula elastičnosti u skladu s normom IS 516.



Slika 3. Postav ispitivanja za određivanje Youngova modula

Varijacije modula elastičnosti kod modificiranog GPC-a s različitim zamjenama veziva pokazale su izražene trendove. Kod djelomične zamjene letećeg pepela GGBS-om zabilježeno je postupno povećanje modula elastičnosti s 24,20 GPa pri 0 % zamjene (FG1) na 41,78 GPa pri 100 % zamjene (FG10). U drugoj seriji pokusa, u kojoj je leteći pepeo zamijenjen OPC-om (serija FC), najveća vrijednost modula od 35,10 GPa postignuta je pri zamjeni od 40 % (FC7). Međutim, daljnje povećanje udjela OPC-a dovelo je do smanjenja modula elastičnosti. Slično, kod djelomične zamjene GGBS-a OPC-om (serija GC) najveća vrijednost modula elastičnosti od 47,80 GPa postignuta je pri 12 % zamjene (GC6). Nakon tog udjela zabilježeno je smanjenje modula, vjerojatno zbog smanjene obradivosti i otežanog zbijanja. Te promjene prikazane su na slici 4.



Slika 4. Promjena Youngova modula geopolimernog betona za različite mješavine

4.3. Tlačna i vlačna čvrstoća

Visoka tlačna čvrstoća odražava učinkovitost betonske mješavine i osnovno je svojstvo betona. Izravno pokazuje kvalitetu postupaka tijekom ugradnje, uključujući precizno doziranje, učinkovito miješanje, zbijanje, ugradnju i njegovanje, a neizravno upućuje na kvalitetu veziva i ostalih komponenti. Vlačna čvrstoća cijepanjem dobiva na važnosti jer beton ima visoku otpornost na tlačna naprezanja, ali znatno manju

otpornost na ona vlačna. Uzimanje tog ograničenja u obzir osigurava pouzdanost ukupnog ponašanja betona. Osim toga vlačna čvrstoća cijepanjem daje posredan uvid u posmičnu otpornost betona.

Uzorci su ispitani u skladu s normama IS 516 i IS 5816, pri čemu je primijenjeno postupno rastuće opterećenje do loma, uz korištenje tlačne preše kapaciteta 2000 kN. Uzorci kocke korišteni su za određivanje tlačne čvrstoće, a valjka za određivanje vlačne čvrstoće cijepanjem. Postavke ispitivanja prikazane su na slici 5.

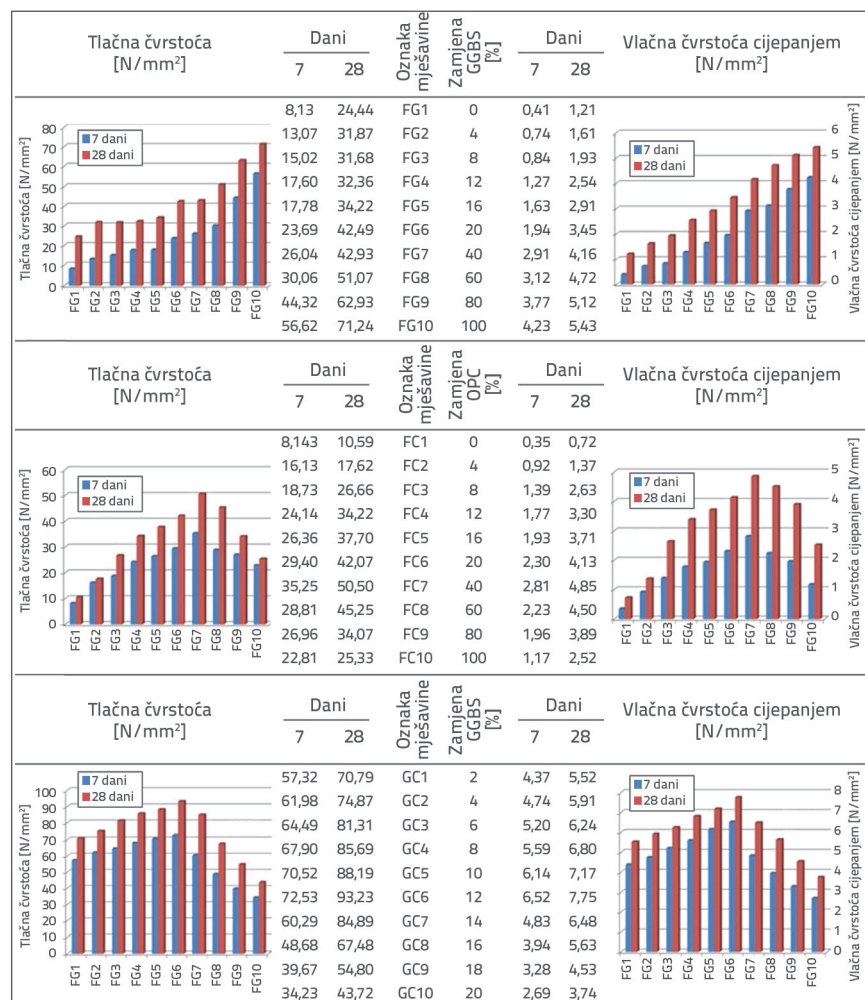


Slika 5. Postav ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće cijepanjem

Geopolimerni beton na bazi letećeg pepela poslužio je kao referentna mješavina, pri čemu je leteći pepeo zamijenjen različitim udjelima GGBS-a. Kombinacija letećeg pepela i GGBS-a povećala je udio paste u mješavini te osigurala izvrsnu obradivost.

Kao što je to prikazano na prvome dijelu slike 6., zamjena letećeg pepela GGBS-om rezultirala je postupnim porastom tlačne i vlačne čvrstoće tijekom vremena. Vezivna svojstva GGBS-a, visok udio aluminija i silicija te finoća čestica imali su ključnu ulogu u razvoju čvrstoće, dok je porast vlačne čvrstoće posljedica povećane obradivosti, što je rezultiralo gušćom i kompaktnijom strukturom.

Na drugome dijelu slike 6. prikazano je mehaničko ponašanje GPC-a na bazi letećeg pepela s dodatkom OPC-a, koje pokazuje sličnosti s ponašanjem običnoga cementnog betona. Čvrstoća i obradivost rasle su do 40 % zamjene, dok je iznad te vrijednosti



Slika 6. Tlačna i vlačna čvrstoća cijepanjem geopolimernog betona

došlo do smanjenja obradivosti i čvrstoće. Razlog za to je rano formiranje amorfnih aluminosilikatnih produkata uslijed istodobne hidratacije OPC-a i egzotermne reakcije NaOH s

dodatkom OPC-a postupno je rasla, dosežući optimalne vrijednosti pri 40 % odnosno 100 % zamjene. Za razliku od GPC-a na bazi GGBS-a i GPC-a na bazi letećeg pepela s

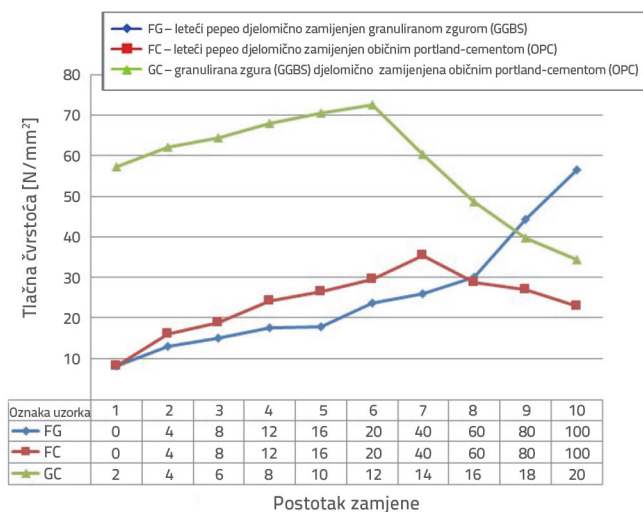
vodom, što skraćuje vrijeme vezivanja i dovodi do bržeg ukrućivanja smjese.

Na trećem dijelu slike 6. prikazano je povećanje čvrstoće GGBS-baziranog GPC-a dodatkom OPC-a. Budući da su i GGBS i OPC kvalitetna veziva, postignute su čvrstoće veće od onih kod konvencionalnog betona. Iznad 12 % zamjene GGBS-a OPC-om došlo je do naglog pada čvrstoće i obradivosti zbog ubrzanog razvoja čvrstoće uslijed istodobne hidratacije i polimerizacije, što je otežalo zbijanje.

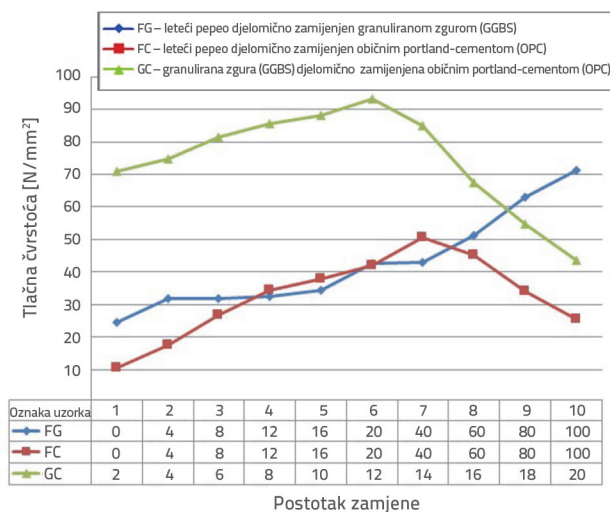
Kako bi se povećala čvrstoća GPC-a u uvjetima okolnog sušenja, OPC je dodan GPC-u na bazi GGBS-a, kao što je to prikazano na trećem dijelu slike 6. Budući da su GGBS i OPC izvršna veziva za agregate, postignuta čvrstoća bila je veća u odnosu na čvrstoću normalnog betona. Pri zamjeni više od 12 % GGBS-a OPC-om, čvrstoća i obradivost znatno su se smanjile zbog ubrzanog razvoja čvrstoće uslijed hidratacije i reakcije polimerizacije GGBS-a i OPC-a, čime mješavina postaje kruta, a ugradnja otežana.

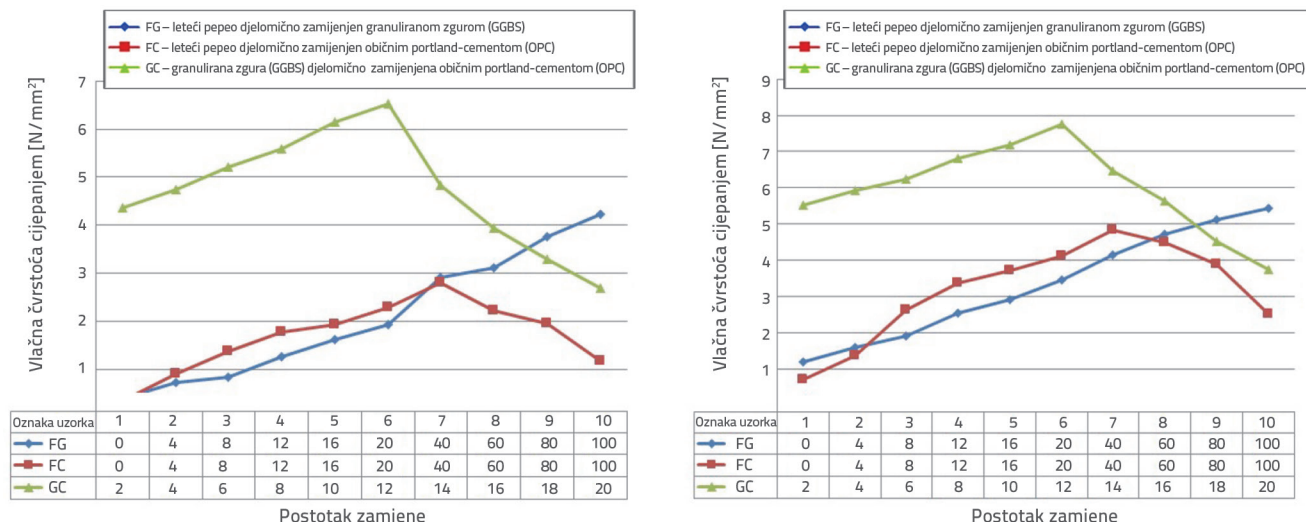
Kao što je to navedeno u prethodnim eksperimentima, uočeno je da pri većim udjelima zamjene GGBS-a OPC-om svježja mješavina brzo gubi obradivost i postaje previše kruta. Kako bi se očuvala obradivost i smanjila krutost svježije smjese, udio OPC-a ograničen je na 20 %.

Tlačna čvrstoća GPC-a na bazi GGBS-a te GPC-a na bazi letećeg pepela s



Slika 7. Tlačne čvrstoće mješavina FG, FC i GC nakon 7 i 28 dana





Slika 8. Vlačne čvrstoće cijepanjem mješavina FG, FC i GC nakon 7 i 28 dana

s OPC-om, vezna svojstva GGBS-a u kombinaciji s OPC-om rezultirala su visokom tlačnom čvrstoćom na samome početku.

Utjecaj OPC-a vidljiv je kroz sličan oblik krivulja tlačne i vlačne čvrstoće. Vrijednost vlačne čvrstoće cijepanjem bila je usporedivo veća u odnosu na konvencionalni beton i GPC na bazi letećeg pepela, slike 7 i 8.

5. Zaključak

Zamjena klasičnih cementnih kompozita GPC-om donosi višestruke prednosti, uključujući iskorištavanje industrijskih nusproizvoda poput letećeg pepela i GGBS-a. Primjenom GPC-a smanjuje se potrošnja cementa, emisija CO₂, potrošnja energije i iskorištavanje prirodnih sirovina potrebnih za proizvodnju cementa. Empirijski određeni omjeri letećeg pepela, GGBS-a i OPC-a omogućili su razvoj GPC-a koji se može njegovati u sobnim uvjetima bez primjene topline ili komora za njegovanje, što je jedno od ključnih postignuća ovog istraživanja. Takav GPC prikladan je za betoniranje *in situ* i može se primjenjivati u standardnim građevinskim postupcima, slično konvencionalnome betonu uz postizanje visoke čvrstoće. Sve ispitane kombinacije veziva pokazale su vrlo dobru početnu obradivost, koja je bila zadovoljavajuća pri optimalnim čvrstoćama, dok se daljnjim povećanjem udjela zamjene obradivost smanjivala paralelno sa smanjenjem čvrstoće.

Tlačna čvrstoća znatno se povećala dodatkom OPC-a tijekom očvršćivanja pri temperaturi okoliša. Tlačne čvrstoće za različite kombinacije pokazuju da je GPC na bazi GGBS-a priklasniji za očvršćivanje pri sobnim uvjetima, dok je 40 % OPC-a optimalna količina za GPC na bazi letećeg pepela pri takvome očvršćivanju. Kombinacije su dodatno varirane, a rezultati su pokazali da je dodatak male količine OPC-a GPC-u na bazi GGBS-a povećao čvrstoću na 93 MPa, što je

bolje od osnovnih svojstava GPC-a na bazi letećeg pepela. Vlačna čvrstoća cijepanjem od 7,75 MPa postignuta je kada je OPC dodan GPC-u na bazi GGBS-a. Zadovoljavajuće vlačne čvrstoće cijepanjem od 4 MPa i 5,5 MPa zabilježene su za ostale kombinacije letećeg pepela i GGBS-a.

Modul elastičnosti GPC-a s različitim kombinacijama pokazao je stalan porast, dosegnuvši 41,785 GPa pri 100-postotnoj zamjeni letećeg pepela GGBS-om. Povećanje elastičnih svojstava pripisuje se prisutnosti GGBS-a u matrici, što je povećalo otpornost na deformacije. Elastična svojstva dodatno su poboljšana dodatkom OPC-a. Kada je leteći pepeo zamijenjen s 40 % OPC-a, Youngov modul iznosio je 35,178 GPa, dok je OPC kao primjesa u GPC-u na bazi GGBS-a pri udjelu od 12 % rezultirao vrijednošću od 47,81 GPa.

Voda oslobođena tijekom reakcije polimerizacije iskorištena je u cementnoj pasti pri procesu hidratacije, čime je uklonjena potreba za dodatnom vodom za očvršćivanje i povećana čvrstoća. Pukotine uslijed skupljanja znatno su smanjene zahvaljujući dostupnosti vode oslobođene tijekom polimerizacije, koja je spriječila nastanak pukotina koje bi se inače formirale tijekom procesa očvršćivanja pri ambijentalnim uvjetima.

Zabilježeno je znatno smanjenje količine veziva s aspekta smanjene upotrebe OPC-a, bez narušavanja čvrstoće. Očvršćivanje u komori s kontroliranom temperaturom nije potrebno kao u slučajevima prefabriciranih elemenata, jer GPC može očvršćivati u sobnim uvjetima. Zato se postupak prefabrikacije u cijelosti eliminira, čime se smanjuju troškovi zagrijavanja, transporta i montaže.

Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na analizu mehaničkog ponašanja modificiranog GPC-a uz dodatak vlakana, s obzirom na mogućnost pojave toplinskih naprezanja i pukotina uslijed temperaturnih promjena, koje bi se mogle ublažiti uz prirast tlačne čvrstoće. Nadalje, potrebno je ispitati ponašanje GPC-a u različitim

okolišnim uvjetima kako bi se osigurala njegova trajnost i dugovječnost. Posebnu pozornost treba posvetiti otpornosti na toplinska naprezanja, djelovanje kiselina i propusnost, kako bi se potvrdila usporediva ili bolja svojstva u odnosu na konvencionalni beton. Konstrukcijske primjene modificiranog GPC-a treba analizirati i eksperimentalno potvrditi, s obzirom na očekivanu primjenu u monolitnim (*in situ*) konstrukcijskim elementima.

Zahvala

Autori zahvaljuju Odjelu za građevinarstvo Tehničkog i tehnološkog fakulteta Mar Ephraem u Tamil Naduu na pristupu laboratorijskoj opremi i eksperimentalnoj podršci koja je bila ključna za provedbu ovog istraživanja. Zahvaljuju i Odjelu za strojarstvo Tehničkog fakulteta Ponjesly u Tamil Naduu na pruženoj podršci koja je znatno doprinijela uspješnoj realizaciji istraživačkog rada.

LITERATURA

- [1] Miller, S.A., John, V.M., Pacca, S.A., Horvath, A.: Carbon dioxide reduction potential in the cement industry by 2050, *Cement Concr. Res.*, 114 (2018), pp. 115-123, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.015>.
- [2] BS 6699-1992: Specification for ground granulated blast furnace slag for use with Portland cement.
- [3] Sathvik, S., Shakor, P., Hasan, S., Awuzie, B.O., Singh, A.K., Rauniyar, A., Karakouzian, M.: Evaluating the potential of geopolymers concrete as a sustainable alternative for thin white-topping pavement, *Front. Mater.*, 10 (2023), Paper 1181474, <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1181474>.
- [4] Davidovits, J.: Chemistry of geopolymeric systems, terminology, *Proc. '99 Int. Conf. on Geopolymer, France (1999)*, pp. 9-40.
- [5] Davidovits, J.: Properties of geopolymer cements, in *Int. Conf. on Alkaline Cements and Concretes, SRIBM, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine (1994)*, pp. 131-149.
- [6] Xu, H., van Deventer, J.S.J.: The geopolymerisation of aluminosilicate minerals, *Int. J. Miner. Process.*, 59 (2000) 3, pp. 247-266, [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5).
- [7] Rejilin, D.R., Murugesan, R., Ebanesh, V.B.: Flexural performance of geopolymer concrete modified with pozzolanic minerals and secondary reinforcement, *J. Comput. Theor. Nanosci.*, 15 (2018) 2, pp. 459-469, <https://doi.org/10.1166/jctn.2018.7177>.
- [8] Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J., Lukey, G.C.: The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers, *Chem. Eng. J.*, 89 (2002) 1-3, pp. 63-73, [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6).
- [9] Xu, H., van Deventer, J.S.J.: Geopolymerisation of multiple minerals, *Minerals Eng.*, 15 (2002) 12, pp. 1131-1139, [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00213-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00213-9).
- [10] Swanepoel, J.C., Strydom, C.A.: Utilisation of fly ash in a geopolymeric material, *Appl. Geochem.*, 17 (2002) 8, pp. 1143-1148, [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00005-7).
- [11] Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D., Thaumaturgo, C.: Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers, *Int. J. Inorg. Mater.*, 2 (2000) 4, pp. 309-317, [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6).
- [12] Motorwala, A., et al.: Alkali activated fly ash-based geopolymer concrete, *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, 3 (2013) 1, pp. 1-6.
- [13] Panizza, M., Natali, M., Garbin, E., Tamburini, S.: Optimization and mechanical-physical characterization of geopolymers with construction and demolition waste aggregates, *Constr. Build. Mater.*, 264 (2023), pp. 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.120290>.
- [14] Tabassum, R.K., Khadwal, A.: Effect of sodium hydroxide concentration on various properties of geopolymer concrete, *Int. J. Eng. Technol. Res.*, 3 (2015) 10, pp. 123-128.
- [15] Leung, P.W.C., Wong, H.D.: Final report on durability and strength development of ground granulated blast furnace slag concrete, *Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of Hong Kong (2010)*.
- [16] Hardjito, D., Rangan, B.V.: Development and Properties of low-calcium flyash-based geopolymer concrete, *Research Report GC 1, Curtin University of Technology, (2005), Perth, Australia*.
- [17] Al Bakri, M.M., Mohammed, H., Kamarudin, H., Khairul Niza, I., Zarina, Y.: Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland cement, *J. Eng. Technol. Res.*, 3 (2011) 1, pp. 1-4.
- [18] Qureshi, M.N., Ghosh, S.: Effect of curing conditions on the compressive strength and microstructure of alkali-activated GGBS paste, *Int. J. Eng. Sci. Invention*, 2 (2013), pp. 24-31.
- [19] Nath, P., Sarker, P.K.: Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature, *Cement Concr. Compos.*, 55 (2015), pp. 205-214, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.008>.
- [20] Jaydeep, S., Chakravarthy, B.J.: Study on fly ash-based geopolymer concrete using admixtures, *Int. J. Eng. Trends Technol.*, 4 (2013) 10, pp. 2455-2460.
- [21] Deb, P.S., Nath, P., Sarker, P.K.: The effects of ground granulated blast furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature, *Mater. Des.*, 62 (2014), pp. 32-39, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.001>.
- [22] Ślosarczyk, A., et al.: Perspectives on alkali-activated materials and geopolymers for sustainable development, *J. Mater. Res. Technol.*, 25 (2023), pp. 5394-5425, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.001>.