

Primljen / Received: 22.1.2022.
Ispravljen / Corrected: 3.8.2022.
Prihvaćen / Accepted: 14.8.2022.
Dostupno online / Available online: 10.9.2023.

Procjena trajnosti geopolimernog betona s različitim molaritetima NaOH njegovan na temperaturi okoline

Autori:



Doc.dr.sc. **Sasi Rekha M.**, dipl.ing.građ.
Državni fakultet za inženjerstvo, Tirunelveli,
Indija
Odjel za građevinarstvo
msasirekha.gce@gmail.com
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Sumathy S. R.**, dipl.ing.građ.
Alagappa Chettiar Državni fakultet za
inženjerstvo i tehnologiju, Karaikudi, Indija
Odjel za građevinarstvo
sr.sumathy5@gmail.com

Izvorni znanstveni rad

Sasi Rekha M., Sumathy S. R.

Procjena trajnosti geopolimernog betona s različitim molaritetima NaOH njegovan na temperaturi okoline

Geopolimerni beton inovativna je varijacija konvencionalnog građevnog materijala koja smanjuje utjecaj proizvodnje običnog portlandskog cementa (OPC) na okoliš, a istovremeno poboljšava učinkovitu primjenu industrijskih nusproizvoda. Promjenom molariteta natrijevog hidroksida na 4M, 6M, 8M, 10M i 12M, za ovo je istraživanje pripremljeno pet kombinacija geopolimernog betona. Nakon 28 dana njegovanja na sobnoj temperaturi, procijenjena su svojstva čvrstoće, tj. tlačna čvrstoća (DT i NDT), vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje. Potom su ispitana i svojstva trajnosti kao što su početno upijanje vode, upijanje vode do zasićenja, sorptivnost, prosječna efektivna poroznost, otpornost na habanje i otpornost na kemijsko djelovanje. Rezultati istraživanja geopolimernog betona uspoređeni su s rezultatima istraživanja betona OPC razreda M35. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja pokazali su da, s iznimkom GPC-4M, ostale geopolimerne mješavine betona zadovoljavaju zahtjeve ciljane čvrstoće betona razreda M35. Rezultati istraživanja otkrili su da su se GPC-8M betonski uzorci pokazali kao najbolji u smislu svojstva čvrstoće i trajnosti. Stoga se umjesto OPC betona preporučuje raširenija uporaba geopolimernog betona, koji se priprema s letećim pepelom i mljevenom granuliranom zgrom iz visokih peći te njeguje na temperaturi okoline.

Ključne riječi:

geopolimerni beton, alkalna otopina, njegovanje na temperaturi okoline, razorno ispitivanje (DT), nerazorno ispitivanje (NDT), trajnost

Original research paper

Sasi Rekha M, Sumathy S. R.

Durability study on ambient cured geopolymer concrete made with various molarities of NaOH

Geopolymer concrete is an innovative variation of the conventional construction material that reduces the environmental impact of producing Ordinary Portland Cement (OPC) while simultaneously improving the efficient use of industrial by-products. By altering the molarities of sodium hydroxide to 4M, 6M, 8M, 10M, and 12M, five combinations of geopolymer concrete were prepared for this study. After 28 days of curing at room temperature, the strength properties, viz., the compressive strength (DT and NDT), the splitting tensile strength, and the flexural strength were evaluated. Additionally, the durability properties such as the initial water absorption, saturated water absorption, sorptivity, average effective porosity, abrasion resistance, and chemical attack resistance were studied as well. All the findings of the geopolymer concrete were compared to those of the M35 grade OPC concrete. The experimental test results showed that, with the exception of GPC-4M, the other Geopolymer concrete mixtures met the target strength requirements of the M35 grade concrete. The findings revealed that the GPC-8M concrete specimens performed the best in terms of strength and durability. Consequently, widespread use of geopolymer concrete, which is prepared with fly ash (FA) and ground granulated blast-furnace slag and cured in ambient air, is recommended instead of OPC concrete.

Key words:

geopolymer concrete, alkaline solution, ambient curing, destructive test (DT), non-destructive test (NDT), durability

1. Uvod

Razvoj održivih građevnih materijala ne samo da je stekao popularnost, već je postao i nužan u dvadeset prvom stoljeću. Primarni razlog je cement, koji se najčešće primjenjuje kao vezivo u građevnoj industriji, a emitira 0,6 do 0,8 kg za svaki kilogram proizvedenog cementa i čini približno 5 do 7 % ukupne emisije CO₂ u svijetu [1, 2]. Kako bi se suprotstavio ovim problemima, francuski znanstvenik Davidovits je 1978. godine stvorio jedinstveno vezivo nazvano "geopolimer" u kojem se materijali bogati silicijevim dioksidom i glicinom aktiviraju korištenjem alkalnih otopina na bazi natrija ili kalija. Prema istraživanju, korištenje geopolimernog betona u građevnoj industriji ima potencijal eliminirati gotovo 80 % emisija ugljika [3]. Razvoj novih građevnih materijala zahtijeva temeljito razumijevanje standarda čvrstoće i trajnosti jer na slom može utjecati primjena teških opterećenja kao i degradacija strukturnih komponenti kao što je armaturni čelik. Dok je trajnost ključni parametar u korisnom roku upotrebe betonskih konstrukcija, propusnost je primarni faktor koji je ključan za određivanje trajnosti. Propusnost nije uvjetovana samo poroznošću, već ovisi i o veličini i volumenu pora, njihovoj povezanosti i strukturi [4]. Prema tome, u ovom su istraživanju ispitivane karakteristike trajnosti, kao što su početno upijanje vode i upijanje vode do zasićenja, prosječna vrijednost efektivne poroznosti, sorptivnost, varijacije gustoće, otpornost na habanje i otpornost na djelovanje kiseline i sulfata, za geopolimerne betone tretirane alkalnim otopinama s različitim molaritetima. Ispitni uzorci njegovani su na sobnoj temperaturi, a rezultati su uspoređeni s rezultatima običnog portlandskog cementnog (engl. *ordinary Portland cement* - OPC) betona. Tijekom razdoblja izlaganja od 120 dana, degradacija betona uzrokovana sumpornom kiselinom i natrijevim sulfatom, praćena je pomoću mjerenja gubitaka mase i ispitivanja tlačne čvrstoće. Razlog za odabir sumporne kiseline u odnosu na druge kiseline je taj što su betonske konstrukcije tijekom uporabe često izložene djelovanju sumporne kiseline u raznim primjenama kao što su rudarstvo, kanalizacija i prehrambena industrija [5]. U istraživanju koje procjenjuje dugotrajna svojstva geopolimera na bazi letećeg pepela, Wallah i Rangan pokazali su da geopolimerni kompoziti imaju izvrsna svojstva trajnosti [6]. Brojni su istraživači ispitivali na koji način kiseline i sulfati utječu na geopolimerni beton te su otkrili da je vrlo otporan u agresivnom okruženju [7, 8]. Međutim, uočeno je da kada je izložen sumpornoj kiselini u koncentraciji od 5 %, geopolimerni beton pripremljen s mljevenom granuliranom zgurom iz visokih peći (engl. *ground granulated blast-furnace slag* - GGBS) kao jedinim vezivom proizvodi gips kao proizvod reakcije, koji sadrži unutarnje šupljine i podvrgnut je mnogo većem gubitku mase nego u slučaju geopolimernog betona na bazi letećeg pepela (engl. *fly ash* - FA) [9]. Wong [10] navodi da je stupanj djelovanja kiseline na vezivanje kalcijevog silikata i kalcijevog aluminata u OPC betonu veći od stupnja djelovanja do kojeg dolazi do uništenja veza je aluminosilikata geopolimernom betonu. Istraživanje je potvrdilo da geopolimerni beton pokazuje veću tlačnu čvrstoću pri idealnoj povišenoj temperaturi, nisku do

srednju propusnost kloridnih iona i bolju otpornost na habanje. Valencia-Saavedra i sur. [11] ispitivali su i procijenili trajnost FA/GGBS i FA/OPC betona na djelovanje octene i sumporne kiseline. Alkalijski aktivirani beton pokazuje smanjenje mase i tlačne čvrstoće nakon godinu dana, a OPC pokazuje značajnu degradaciju tijekom izloženosti djelovanja kiseline. Štoviše, dodavanje malog volumena vlakana u mješavinu geopolimernog betona poboljšalo je karakteristike mikrostrukture spajanjem mikropukotina prisutnih u betonskoj matrici [12], a dodavanje nanosilike u geopolimerni beton stvorilo je gustu strukturu koja je ograničila trajnost, poroznost i sorptivnost [13]. Kumar i sur. [14] proizveli su trokomponentnu mješavinu geopolimernog betona (engl. *Ternary Blend Geopolymer Concrete* - TGPC), izdržljiv i ekološki prihvatljiv beton napravljen od veziva izrađenog od tri različita izvorna materijala. Temeljna prednost TGPC-a je to što ima gusto zbijene čestice različitih veličina i oblika što dovodi do poboljšanih karakteristika. Učinkovitost TGPC-a s 1 % čeličnih vlakana i 0,15 % polipropilenskih vlakana bolja je od drugih kombinacija TGPC-a i konvencionalnog OPC betona. Aygörmöz i sur. [15] ocijenili su trajnost geopolimernih kompozita 365 dana nakon ugradnje. Mješavina je sadržavala poliamidna i poliolefinska vlakna s metakaolinom, kolemanitom, zgurom, pijeskom i alkalnim aktivatorom. Prema rezultatima ispitivanja, na uzorke geopolimera slabije su utjecali ciklusi smrzavanja i odmrzavanja, te je otpornost na utjecaje temperaturnih promjena poboljšana i znatno je manji utjecaj djelovanja HCl otopine u odnosu na OPC uzorke nakon 365 dana izlaganja. To je rezultat procesa geopolimerizacije tijekom mokro-suhog postupka njegovanja, kojim se razvila gusta mikrostruktura. Paudel i sur. [16] ispitivali su utjecaj pH porne otopine u alkalijski aktiviranom geopolimernom betonu (engl. *Geopolymer Concrete* - GPC) na bazi letećeg pepela s različitim koncentracijama silicijevog dioksida na alkalno-silikatnu reakciju (ASR). U usporedbi s OPC-om, rezultati su pokazali da je GPC otporniji na ASR reakciju te da se u geopolimeru stvara manje ASR gela.

Nadalje, ispitivana su mehanička svojstva geopolimernog betona s promijenjenim molaritetima, tj. tlačna čvrstoća (razorno i nerazorno ispitivanje), vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje nakon završetka procesa njegovanja od 28 dana. Zasad se vrlo malo zna o trajnosti geopolimernog betona pripremljenog s različitim molaritetima NaOH. Rezultati pet mješavina geopolimernog betona, označenih kao 4M, 6M, 8M, 10M i 12M, te njihove funkcionalne karakteristike u usporedbi s karakteristikama OPC betona prikazani su u ovom istraživačkom radu čime se dao doprinos postojećoj literaturi.

2. Eksperimentalni program

2.1. Materijali

Leteći pepeo i geopolimerni beton na bazi GGBS-a pripremljeni su primjenom sirovina bogatih silicijevim i aluminijevim oksidom, tj. letećeg pepela i GGBS-a, u kombinaciji s alkalnom otopinom na bazi natrija, koja je mješavina natrijevog silikata i otopine natrijevog hidroksida. Leteći pepeo s niskim udjelom

Tablica 1. Kemijska analiza letećeg pepela i GGBS-a

Komponenta	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	SO ₃
Leteći pepeo [%]	55,41	29,69	8,48	2,02	1,39	1,01	0,7	0,45	0,32
GGBS [%]	31,75	16,91	0,61	1,11	39,79	0,47	-	6,23	1,62

Tablica 2. Pojediniosti o identifikaciji mješavine

Br.	Identifikacija mješavine	Specifikacije
1	GPC – 4M	Geopolimerni beton od 4 molarnih koncentracija natrijevog hidroksida
2	GPC – 6M	Geopolimerni beton od 6 molarnih koncentracija natrijevog hidroksida
3	GPC – 8M	Geopolimerni beton od 8 molarnih koncentracija natrijevog hidroksida
4	GPC – 10M	Geopolimerni beton od 10 molarnih koncentracija natrijevog hidroksida
5	GPC – 12M	Geopolimerni beton od 12 molarnih koncentracija natrijevog hidroksida
6	CC – M35	Beton od običnog portlandskog cementa razreda M35

kalcija specifične težine 2,2 (tamnosiva boja) dobiven je iz termoelektre Tuticorin u Indiji. U procesu proizvodnje betona upotrijebljen je i GGBS specifične težine 2,8 koji ima prljavu bijelu nijansu. Kemijski sastav sirovina, tj. letećeg pepela i GGBS-a, određen je XRF analizom, a rezultati su prikazani u tablici 1. Viskozna tekućina natrijevog silikata, poznata i kao vodeno staklo, održava SiO₂/Na₂O omjer od 3,1 i sadrži maseni udio od 26,5 i 8 % topljivog silikata (SiO₂) i natrijev oksid (Na₂O), dok je otopina natrijevog hidroksida pripravljena korištenjem granula natrijevog hidroksida čistoće 97 %. Omjer otopine natrijevog silikata i otopine natrijevog hidroksida održavan je na 2,5 za pripremu različitih koncentracija alkalne otopine. Tekući natrijev silikat i otopina natrijevog hidroksida nabavljeni su od lokalnih dobavljača. Bolja zbijenost može se postići optimalnom raspodjelom veličine zrna agregata. Stoga su kao krupni agregati korišteni lokalno dostupni plavi granitni metali veličine 20 i 12,5 mm sa specifičnom težinom 2,8 odnosno 2,96 i modulima finoće 7,37 odnosno 6,97. Zbog nedostatka prirodnog riječnog pijeska, kao sitni agregat korišten je M-pijesak zone II u skladu s normom IS 383(1970):2002 [17] specifične težine 2,72 i modula finoće 2,5. Kao aditiv za poboljšanje karakteristika svježeg betona korišten je superplastifikator na bazi polikarboksilnog etera s pH 7 i specifičnom težinom od 1,08. Tablica 2. prikazuje identifikaciju mješavine geopolimernog betona i konvencionalnog betona.

2.2. Projektiranje sastava mješavina

Budući da ne postoji norma pri projektiranju sastava mješavina geopolimernog betona, samo se nekoliko istraživača usredotočilo na proces projektiranja sastava mješavina za različite razrede geopolimernog betona i geopolimernog betona na bazi letećeg pepela [18, 19]. Uz pretpostavku da beton ima gustoću od 2400 kg/m³, sastojci mješavine razvijeni su u ovom istraživanju metodom pokušaja i pogreške. Udio potrebnog veziva izračunan je kao 500 kg za proizvodnju 1 m³ betona (pretpostavljena je gustoća letećeg pepela i GGBS-a od 250 kg/m³) održavanjem omjera alkalne otopine i veziva na 0,35, dok je potreba za materijalima agregata (koji čine 70 % težine betona) određena na 1680 kg za proizvodnju 1 m³ betona. Održavanjem omjera sitnog i krupnog agregata na 0,35 [20], procijenjena je potrebna količina sitnog i krupnog agregata od ukupno 436 kg/m³, odnosno 1244 kg/m³. U skladu sa smjernicama norme IS10262:2009 [21], sastavljen je kontrolni beton razreda M35 s OPC udjelom i omjerom vode i cementa od 371 kg/m³ odnosno 0,45 kg/m³. Količina potrebnog superplastifikatora iznosi tri posto udjela veziva iz svake mješavine. Podaci o udjelima za sirovine potrebne za proizvodnju 1 m³ geopolimernog betona prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Udjeli mješavine za 1 m³ geopolimernog betona

Identifikacija mješavine*	Izvorni materijali [kg]		Sitni agregati [kg]	Krupni agregati [kg]		Alkalna otopina	
	Leteći pepeo	GGBS		12,5 [mm]	20 [mm]	Otopina NaOH [kg]	Otopina Na ₂ SiO ₃ [kg]
GPC-4M	250	250	436	498	746	50	125
GPC-6M	250	250	436	498	746	50	125
GPC-8M	250	250	436	498	746	50	125
GPC-10M	250	250	436	498	746	50	125
GPC-12M	250	250	436	498	746	50	125

*GPC - geopolimerni beton; M - molaritet natrijevog hidroksida

Udio sitnog i krupnog agregata procijenjen je postavljanjem omjera sitnog i krupnog agregata i volumena agregata na 0,35 i 70 % ukupnog volumena u pretpostavljenoj gustoći betona. Za određivanje udjela veziva i alkalne otopine, omjer alkalne otopine i veziva postavljen je na 0,35 po težini. Prilikom određivanja udjela za 1 m³ geopolimernog betona, procijenjena potreba za alkalnom otopinom određena je kao 175 kg po kubičnom metru betona koji je podijeljen na 125 odnosno 50 kg otopina natrijevog silikata i NaOH, na temelju Na₂SiO₃/NaOH omjera od 2,5 [22]. Nadalje, za pripremu otopine natrijevog hidroksida s molaritetom 4, 160 g granula natrijevog hidroksida (4 × 40) otopljeno je u jednoj litri vode, pri čemu je molekularna težina natrijevog hidroksida 40, a koncentracija NaOH je 4.

2.3. Priprema mješavina

Zasićeni površinski suho kondicionirani agregati najprije su pomiješani s letećim pepelom i GGBS-om, što se još naziva i suho miješanje. Nakon toga, alkalna otopina i superplastifikator postupno su dodavani u suhu smjesu uz dodatno miješanje 4 do 5 minuta dok nije nastala homogena smjesa. Proces proizvodnje geopolimernog betona prikazan je na slici 1. Alkalna otopina je mješavina otopina natrijevog hidroksida i natrijevog silikata. Da bi se napravila otopina natrijevog hidroksida, u vodi je otopljena potrebna količina granula natrijevog hidroksida čistoće od 97 %. Priprema alkalne otopine prema opisanom postupku dovršena je dan prije miješanja betona jer je ova reakcija egzotermna; prethodna priprema omogućuje potpuno otapanje granula natrijevog hidroksida i dovoljno vremena za oslobađanje topline i za hlađenje. Kao što je prethodno navedeno, tijekom miješanja betona otopina natrijevog silikata kombinirana je s otopinom natrijevog hidroksida.



Slika 1. Proizvodnja geopolimernog betona

2.4. Ugradnja i njegovanje

Po završetku pravilnog ručnog miješanja, geopolimerni i konvencionalni betoni ugrađeni su u odgovarajuće kalupe i vibrirani dvije do tri minute. Uzorci geopolimernog i OPC betona njegovani su u vodenoj kupelji do raskalupljivanja, a zatim su ostavljeni da se stvrdnjavaju na sobnoj temperaturi 28 dana. Nekoliko uzoraka različitih oblika i veličina, kao što će biti opisano, ugrađeno je za različita ispitivanja. Za ispitivanje tlačne, vlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje, ugrađeni su uzorci oblika kocke veličine 150 x 150 x 150 mm, cilindra promjera 150 mm × 300 mm visine i prizmi širine 100 mm × 100 mm dubine × 500 mm duljine. Ugrađeno je i stotinu uzoraka kocki kako bi se procijenilo upijanje vode, sorptivnost, varijacija gustoće i otpornost na djelovanje kiseline i sulfata. Nadalje, uzorci u obliku prizmica sa stranicama veličine 70,7 x 70,7 mm i debljine 25 mm upotrijebljeni su za ispitivanje otpornosti na habanje. Ispitana su tri identična uzorka svake vrste kako bi se odredila prosječna vrijednost svakog ispitnog parametra.

3. Rezultati ispitivanja

3.1. Ispitivanje svojstava čvrstoće

Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje svih kombinacija geopolimernog i konvencionalnog betona određena je prema normi IS 516 (1959):2004 [23]. Ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem provedena su prema postupcima navedenim u normi IS 5816 (1999):2004 [24]. U tablici 4. prikazani su rezultati ispitivanja navedenih mehaničkih parametara. Može se primijetiti da se tlačna čvrstoća geopolimernog betona povećava nakon 28 dana njegovanja na sobnoj temperaturi u skladu s molaritetom natrijevog hidroksida. Međutim, u slučaju uzoraka u kojima je molaritet natrijevog hidroksida veći od 8 M, čvrstoća se neznatno smanjila. Ispiranje povećanog udjela silicijevog dioksida pri višim koncentracijama natrijevog hidroksida, što može dovesti do usporavanja reakcije polimerizacije, uzrokovalo je uočeno smanjenje čvrstoće iznad 8 M [25]. Mješavina GPC-8M imala je graničnu čvrstoću od 57,53, što je 23,72 % više od granične čvrstoće konvencionalnog betona. Dodavanje kalcija betonu koji je prisutan u GGBS-u pridonijelo je povećanju čvrstoće tijekom njegovanja na temperaturi okoline [26]. Osim C-A-S-H i N-A-S-H gelova, proizvedene su i C-S-H faze kao u slučaju OPC betona. Osim toga, komponenta kalcija u GGBS-u omogućuje rani razvoj čvrstoće, a to povećanje čvrstoće neovisno je o razdoblju njegovanja ili vrsti agregata [27]. Druga istraživanja također su potvrdila i dala vjerodostojnost ovoj hipotezi [22, 28]. Osim GPC-4M,

Tablica 4. Mehanička svojstva geopolimernog i konvencionalnog betona

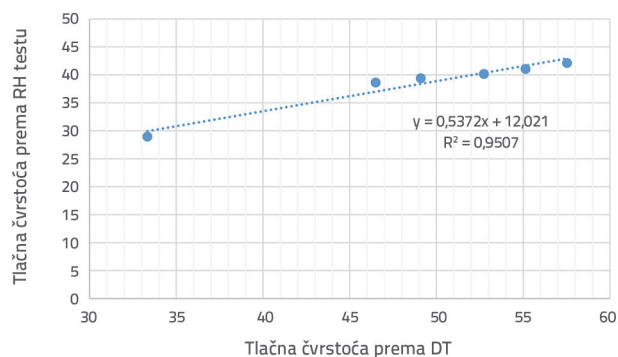
Identifikacija mješavine	Tlačna čvrstoća nakon 28 dana [MPa]	Tlačna čvrstoća prema ispitivanju sklerometrom [MPa]	Vlačna čvrstoća cijepanjem nakon 28 dana [MPa]	Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana [MPa]
GPC-4M	33,34	28,95	2,78	3,45
GPC-6M	49,1	39,38	3,18	4,21
GPC-8M	57,53	42,11	3,84	4,55
GPC-10M	55,14	41,04	3,51	4,43
GPC-12M	52,74	40,15	3,4	4,35
CC-M35	46,5	38,62	2,98	4,1

svi ostali geopolimerni betoni postigli su željenu čvrstoću konvencionalnog betona M35. U usporedbi s geopolimernim betonima većeg molariteta, GPC-4M uzorci nisu pridonijeli većem razvoju čvrstoće; mogli su zadovoljiti samo zahtjeve za čvrstoću razreda M25. Kao što je prikazano u tablici 4., rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje održavaju trend prikazan u podacima o tlačnoj čvrstoći. Osim GPC-4M, ostale mješavine geopolimernog betona pokazale su veću vlačnu čvrstoću cijepanjem od OPC betona. Kao što pokazuju rezultati ispitivanja, vlačnom čvrstoćom cijepanjem postignuto je samo 6-8 % tlačne otpornosti, što je usporedivo s konvencionalnim betonom [29]. Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana za betone GPC-6M, GPC-8M, GPC-10M i GPC-12M bila je veća za 3, 11, 8 odnosno 6 % u odnosu na konvencionalni beton. Međutim, čvrstoća na savijanje betona GPC-4M bila je 16 % niža nego kod konvencionalnog betona, što se može pripisati nižoj koncentraciji alkalne otopine. Na razvoj čvrstoće na savijanje i vlačne čvrstoće cijepanjem geopolimernog betona značajno je utjecalo taloženje aluminijevog silikatnog gela i otapanje lužina na površini agregata [30]. Zbog jače veze agregata i veziva u geopolimernim betonima, ostvarena je veća čvrstoća na savijanje od tradicionalnog OPC betona kada su njegovani na sobnoj i povišenoj temperaturi [31]. U ovom je istraživanju čvrstoća na savijanje bila približno 8 do 10 % odgovarajuće 28-dnevne tlačne čvrstoće geopolimernog betona. Zannerni i sur. [32] navode da su karakteristike čvrstoće geopolimernog betona na bazi letećeg pepela često nepovoljnije od karakteristika geopolimernog betona na bazi GGBS-a. Razlog tome je što čestice letećeg pepela imaju glatku površinu i sferičnog su oblika, a GGBS čestice imaju hrapavu površinu koja stvara jaku vezu s agregatima. Stoga su svojstva čvrstoće geopolimernog betona proizvedenog u kombinaciji s letećim pepelom i GGBS-om bolja od betona samo s letećim pepelom.

3.2. Rezultati nerazornog ispitivanja

Nerazorne metode ispitivanja najučinkovitije su tehnike za procjenu stanja postojećih konstrukcija kako bi se odredila njihova čvrstoća i trajnost [33]. Da bi se potvrdila tlačna čvrstoća pomoću nerazornog ispitivanja, provedeno je ispitivanje sklerometrom (engl. *Rebound Hammer* - RH) na identičnim uzorcima nakon 28 dana njegovanja na temperaturi

okoline u skladu s normom IS 13311 (2. dio):1992 [34]. Prema statistici, vrijednosti predviđanja tlačne otpornosti ispitivanjem sklerometrom bile su niže od rezultata razornog ispitivanja. To može biti uzrokovano nizom čimbenika, odnosno vrstom agregata, stanjem površine, udjelom vlage i karbonizacijom betona [35]. Rezultati nerazornog ispitivanja prikazani su u tablici 4. Maksimalna tlačna čvrstoća betonske mješavine GPC-8M utvrđena je ispitivanjem sklerometrom na 42,11 MPa, a u razornom ispitivanju postigla je tek neznatno bolje rezultate. Društvo Concrete Society je 2000. [36] kategoriziralo sve mješavine geopolimernog betona uključujući obični beton kao dobre kvalitete (30-40 MPa) ili izvrsne kvalitete (> 40 MPa), s izuzetkom GPC-4M koji je kategoriziran kao zadovoljavajuće kvalitete (20-30 MPa). Utvrđena je povezanost između vrijednosti tlačne čvrstoće utvrđenih razornim i nerazornim ispitivanjima. Regresijska jednadžba i povezani koeficijent prikazani su na slici 2. Vidljivo je da su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće izravnim tlačnim ispitivanjem (DT) i ispitivanjem sklerometrom (RH) dobro prilagođeni linijom linearne regresije, a R^2 vrijednost je utvrđena na 0,9507.

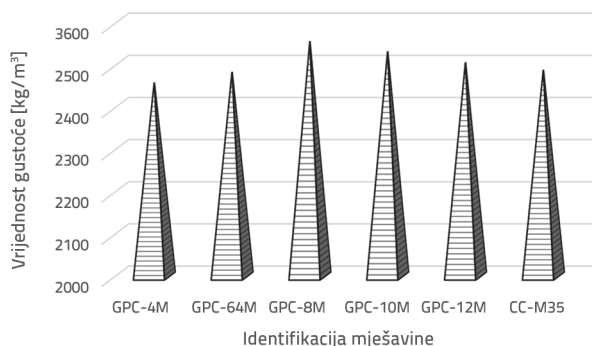


Slika 2. Korelacija tlačne čvrstoće prema DT i NDT (RH)

3.3. Varijacija gustoće

Gustoća betona u različitim uvjetima može se izračunati na osnovi omjera težine betonskog uzorka u tom uvjetu i volumena betonskog uzorka. Slika 3. prikazuje vrijednosti gustoće geopolimernog i kontrolnog betona, a može se uočiti da je fluktuirala u rasponu od 2460 do 2558 kg/m³. Štoviše, rezultati

pokazuju da geopolimerni beton s koncentracijama natrijevog hidroksida od 6M, 8M, 10M i 12M ima veće vrijednosti gustoće od uobičajenog OPC betona, a mješavina GPC-4M ima najnižu gustoću od 2460 kg/m^3 . Gustoća betona prije svega se očituje u jediničnoj težini agregata koji se koriste za njegovu izradu; međutim, stvaranje geopolimernog gela i njegova veza s agregatom također doprinose gustoći betona. Raspon gustoće geopolimernog betona sličan je rasponu običnog portlandskog cementnog betona, kao što navodi Rangan [37].



Slika 3. Varijacije gustoće geopolimernih betonskih mješavina

3.4. Ispitivanje upijanja vode i efektivne poroznosti

Ispitivanja početnog upijanja vode i upijanja do zasićenosti provedena su u skladu s normama ASTM C 642-82 [38]. Počevši od uzoraka kocki od 100 mm osušenih u pećnici na $105 \text{ }^\circ\text{C}$ do indikacije konstantne težine (W_1), određeno je upijanje vode i prosječna efektivna poroznost. Zatim je izmjereno početno upijanje vode i upijanje do zasićenosti uzoraka koji su bili uronjeni u vodu 30 minuta, odnosno 120 sati. Zasićene težine W_2 (30 min) i W_3 (120 h) izmjerene su nakon uranjanja. Postotak upijanja vode izračunan je dijeljenjem razlike između zasićene težine i težine nakon sušenja u pećnici s težinom nakon sušenja u pećnici. Prema smjernicama Europskog društva za beton (engl. *European Committee for Concrete - CEB*) [39], kvaliteta betona klasificira se kao dobra, prosječna ili loša ovisno o postotku početnog upijanja vode nakon 30 minuta, koji bi trebao biti manji od 3 %, između 3 % i

5 %, odnosno veći od 5 %. Tablica 5. prikazuje vrijednosti početnog upijanja vode i upijanja vode do zasićenosti te prosječnu efektivnu poroznost. Volumen šupljina izračunan je dijeljenjem volumena šupljina s ukupnim volumenom uzorka. Nalazi ispitivanja su pokazali da su, osim mješavine GPC-4M, stope početnog upijanja vode i upijanja do zasićenja geopolimernog betona bile manje od stopa kontrolnog betona. Prema Ganesanu i sur. [12], stopa upijanja geopolimernog betona na bazi letećeg pepela niža je od stope upijanja OPC betona. Ovi rezultati su u snažnoj korelaciji s onima koje su objavili Sathia i sur. [13]. Prema Al-Otaibu [40], geopolimerni beton na bazi zgre pokazao je veće vrijednosti poroznosti od običnog OPC betona, koji ima raspon poroznosti od 8 do 10,4 % za isto razdoblje njegovanja, a geopolimerni beton na bazi zgre ima poroznost u rasponu od 10 do 13 %. Vrijednosti upijanja geopolimernog betona kombiniranog s letećim pepelom i GGBS-om u ovoj analizi iznose od 7,98 do 12,96 % za različite molaritete. Najveća i najmanja postignuta poroznost geopolimernog betona s GPC-4M je 12,96 %, a s GPC-8M je 7,98 %. Osim za uzorke betona GPC-4M, betoni s ostalim molaritetima udjel su u kategoriji dobre kvalitete, kao što je prikazano u tablici 5. Volumen propusnih šupljina u alkalijski aktiviranom betonu veći je nego u konvencionalnom betonu pri udjelu zgre većem ili jednakom 50 % [41]. Međutim, primjena letećeg pepela u kombinaciji s GGBS-om u pripremi geopolimernog betona rezultirala je sintezom N-A-S-H i C-A-S-H što je dovelo do gušće mikrostrukture geopolimernog betona. Otkrivena je jaka povezanost između volumena propusnih šupljina i brzine upijanja vode. Stopa upijanja se povećavala s povećanjem broja šupljina i obrnuto.

3.5. Ispitivanje sorptivnosti

Sorptivnost se definira kao brzina kojom voda prodire u pore zahvaljujući kapilarnom djelovanju. Ispitivanje je provedeno prema opisu autora Ganesana i sur. [12] Prvi krug sušenja uključivao je sušenje kocki veličine 100 mm u pećnici na $105 \text{ }^\circ\text{C}$ tijekom 24 sata, nakon čega je uslijedilo hlađenje, također u trajanju od 24 sata. Stranice uzoraka oblijepljene su izolacijskom trakom kako bi se spriječilo prodiranje vode sa stranica kocki.

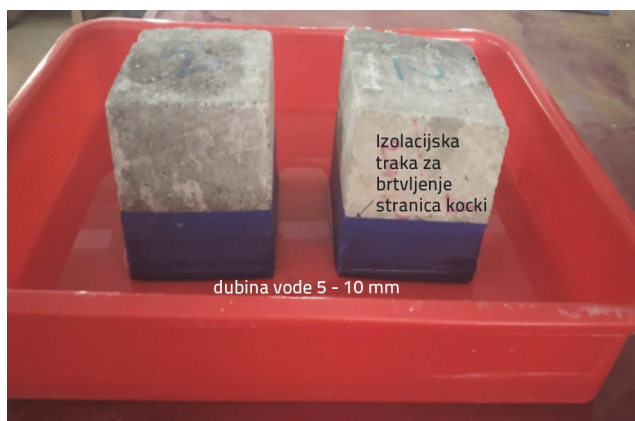
Tablica 5. Rezultati ispitivanja upijanja vode uranjanjem i efektivne poroznosti

Identifikacija mješavine	Početna težina W_1 [kg]	Konačna težina nakon 30 min W_2 [kg]	Konačna težina nakon 120 sati W_3 [kg]	Početno upijanje vode $(W_2 - W_1)/W_1$ [%]	Upijanje vode do zasićenosti $(W_3 - W_1)/W_1$ [%]	Prosječna efektivna poroznost [%]	Kvaliteta betona prema [39] (CEB 1989)
GPC-4M	2,45	2,532	2,58	3,33	5,29	12,96	Prosječna
GPC-6M	2,485	2,559	2,58	2,96	3,84	9,54	Dobra
GPC-8M	2,59	2,621	2,67	1,19	3,08	7,98	Dobra
GPC-10M	2,551	2,612	2,633	2,38	3,21	8,19	Dobra
GPC-12M	2,508	2,574	2,599	2,63	3,63	9,1	Dobra
CC-M35	2,468	2,542	2,567	2,98	4	9,87	Dobra

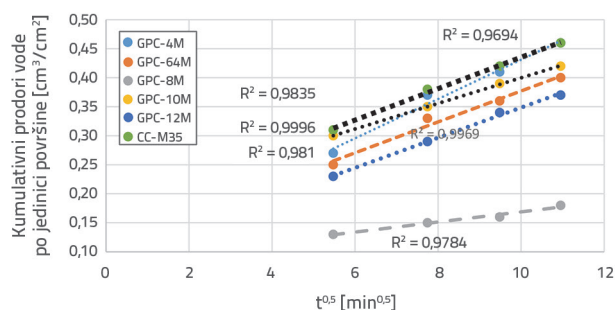
Tablica 6. Rezultati ispitivanja sorptivnosti

Identifikacija mješavine	Kumulativna težina prodrle vode nakon uranjanja vodu [g]				Kumulativni volumen prodrle vode po izloženoj površini u vodi [cm ³ /cm ²]				Sorptivnost [cm/min ^{0,5}]
	30 [min]	60 [min]	90 [min]	120 [min]	30 [min]	60 [min]	90 [min]	120 [min]	
GPC-4M	27	37	41	46	0,27	0,37	0,41	0,46	3.39 x 10 ⁻²
GPC-6M	25	33	36	40	0,25	0,33	0,36	0,4	2.67 x 10 ⁻²
GPC-8M	23	25	29	31	0,23	0,25	0,29	0,31	1.52 x 10 ⁻²
GPC-10M	30	35	39	42	0,3	0,35	0,39	0,42	2.2 x 10 ⁻²
GPC-12M	23	29	34	37	0,23	0,29	0,34	0,37	2.6 x 10 ⁻²
CC-M35	31	38	42	46	0,31	0,38	0,42	0,46	2.71 x 10 ⁻²

Nakon što je izmjerena početna težina uzorka, on je stavljen u vodu na dubinu od 5-10 mm. Potpora izrađena od filtrirajućeg materijala od staklenih vlakana umetnuta je na dno svakog uzorka kocke kako bi se omogućio prodor vode i kroz donju površinu kocke, kao što je prikazano na slici 4. Povećanje težine mjereno je u intervalima od 30 minuta tijekom vremena od 2 sata. Na temelju ovih nalaza, kumulativni volumen vode koja prodire kroz uzorak po jedinici kontaktne površine uzorka ucrtan je u odnosu na kvadratni korijen vremena izlaganja. Ovaj dijagram je lineariziran kako bi se dobio nagib linije koja pokazuje vrijednost sorptivnosti. U tablici 6. prikazane su vrijednosti sorptivnosti različitih geopolimernih betona i kontrolnog OPC betona. Osim za GPC-4M, sorptivnost ostalih mješavina geopolimernog betona bila je niža od sorptivnosti konvencionalnog betona. To se može pripisati uspostavljanju jake veze između agregata i geopolimernog gela, dok u slučaju mješavine GPC-4M zbog niže koncentracije alkalne otopine nije formiran spomenuti geopolimerni gel. GPC-8M je imao najnižu vrijednost sorptivnosti od $1,52 \times 10^{-2} \text{ cm/min}^{0,5}$, a kontrolni beton imao je vrijednost od $2,71 \times 10^{-2} \text{ cm/min}^{0,5}$. Niža vrijednost sorptivnosti je poželjna jer upućuje na slabiji prodor vode [42]. Kumulativno prodiranje vode po jedinici površine na kvadratni korijen vremena prikazano je na slici 5. za svaku od šest vrsta betona. Utvrđeno je da je koeficijent korelacije u rasponu od 0,9784 do 0,9996, a linearne jednadžbe su dobro prilagođene.



Slika 4. Ispitivanje sorptivnosti



Slika 5. Kumulativno prodiranje vode u odnosu na kvadratni korijen vremena izlaganja

3.6. Ispitivanje otpornosti na habanje

Sposobnost materijala da se odupre habanju ili trošenju naziva se otpornost betona na habanje. Općenito je jači beton otporniji na habanje od slabog betona. Uzorci u obliku kvadratne pločice pripremljeni za ovo ispitivanje bili su debljine 25 mm sa stranicama dimenzija 70,7 mm x 70,7 mm (5000 mm²) u skladu s normom IS 1237:2012 [43]. Ovaj sustav za ispitivanje habanja sastojao se od vodoravno postavljene glatke brusne ploče promjera 750 mm koja se okreće brzinom od 30 okretaja u minuti. Uzorci su najprije sušeni u pećnici na $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ tijekom 24 sata, a nakon toga je početna težina (W_1) uzoraka izmjerena nakon hlađenja na temperaturi okoline. Uzorak je zatim postavljen na uređaj za ispitivanje te je primijenjeno opterećenje od 300 N na središte uzorka, kao što je prikazano na slici 6. Kao abrazivno sredstvo upotrijebljen je svježi prah korunda specifične težine 3,9 i udjela aluminijevog oksida od najmanje 95 %. Rotacija ploče je zaustavljena nakon svaka 22 okretaja kako bi se uzorak zarotirao za 90° u smjeru kazaljke na satu prije nastavka ispitivanja. Svaki je uzorak ispitan tijekom deset ciklusa na prije opisani način (svaki ciklus uključivao je 22 okretaja praćena rotacijom od 90°) uz dodatak nove doze od 20 g abrazivnog sredstva za svaki ciklus. Nakon ukupno 220 okretaja na svakom uzorku, izračunana je njegova konačna težina (W_2) kako bi se izračunao postotak gubitka težine. Prosječni gubitak debljine može se dobiti pomoću izraza (1):

Tablica 7. Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje

Identifikacija mješavine	Početna masa [kg]	Konačna masa [kg]	Gubitak mase [%]	Prosječno trošenje [mm]
GPC-4M	0,37	0,358	3,24	0,811
GPC-6M	0,377	0,371	1,51	0,398
GPC-8M	0,398	0,395	0,75	0,188
GPC-10M	0,396	0,392	1,01	0,253
GPC-12M	0,39	0,385	1,28	0,321
CC-M35	0,385	0,378	1,82	0,455

$$t = \frac{(W_1 - W_2)V}{W_1 \cdot A}$$

Pri čemu je:

- t - prosječni gubitak debljine
- W_1 - početna masa uzorka
- W_2 - konačna masa uzorka
- V - početni volumen uzorka
- A - površina uzorka.



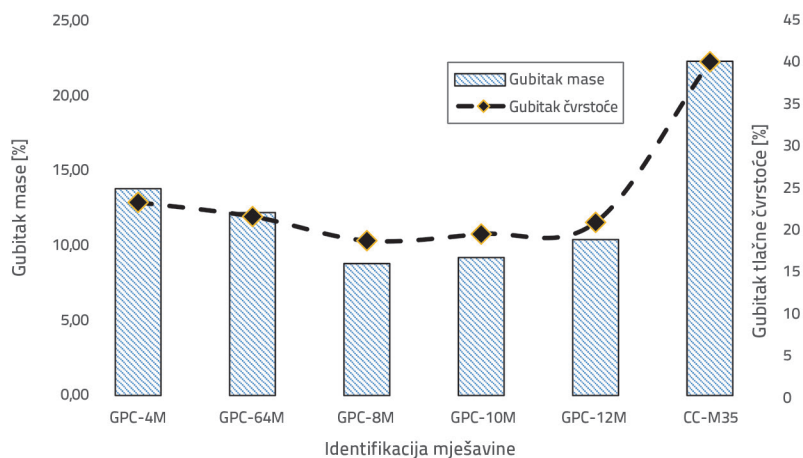
Slika 6. Uređaj za ispitivanje otpornosti na habanje

Procijenjene početne i konačne mase, prosječni gubitak debljine i postotak gubitka mase zbog habanja navedeni su u tablici 7. Za podne ploče opće namjene i podne ploče za teške radne uvjete, prosječno habanje ne smije biti veće od 3,5 odnosno 2 mm. Ispitni podaci otkrili su da je prosječna stopa habanja za sve kombinacije betona niža od zahtjeva propisanih indijskim normama. Minimalni postotak gubitka mase i smanjenje debljine uzorka nakon ispitivanja otpornosti na habanje dobiven je za mješavinu GPC-8M, a stvarne vrijednosti iznose 0,75 % odnosno 0,188

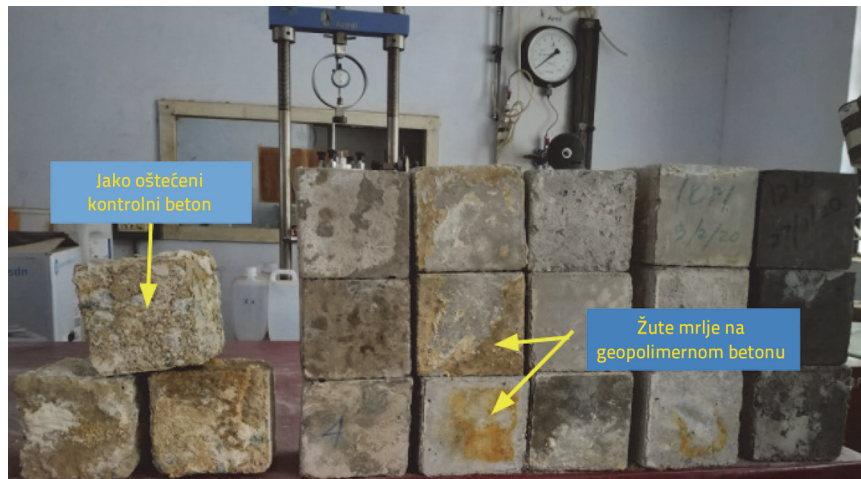
mm, što je manje od odgovarajućih vrijednosti za OPC beton. Geopolimerni beton s koncentracijama natrijevog hidroksida od 6, 8, 10 i 12 pokazao je manje habanje od konvencionalnog betona; dok je u slučaju mješavine nižeg molariteta, tj. 4M, došlo do većeg habanja tijekom ispitivanja otpornosti na habanje. To pokazuje da postoji jaka povezanost između geopolimernog gela proizvedenog s višim molaritetima NaOH i matrice agregata [31]. Za razliku od ostalih mješavina geopolimera, mješavina s nižim udjelom natrijevog hidroksida (GPC-4M) nije stvorila jake veze u međufaznoj prijelaznoj zoni.

3.7. Otpornost na djelovanje kiseline

U prošlosti je nekoliko istraživača proučavalo sposobnost geopolimernog betona da izdrži djelovanje kiselina [44-47]. Koncentracija kiselice otopine i razdoblje uranjanja utječu na masu i čvrstoću geopolimernog betona. U ovom je istraživanju ispitana sposobnost geopolimernog betona s letećim pepelom i GGBS-om da izdrži djelovanje sumporne kiseline. Ispitivanje se provodilo potapanjem kockastih uzoraka od 100 mm, koji su osušeni u pećnici, tijekom 120 dana u 3-postotnu H_2SO_4 otopinu s pH-vrijednošću od 0,1 nakon bilježenja njihovih početnih težina. Otopina je ostavljena na nesmetanom mjestu i povremeno temeljito promiješana kako bi se održala njezina homogenost. Osim toga, kiselica otopina je promijenjena svakih 30 dana. Po završetku razdoblja potapanja od 120 dana, uzorci



Slika 7. Gubitak mase i čvrstoće geopolimernog betona nakon djelovanja kiseline



Slika 8. Uzorci nakon potapanja u sumpornu kiselinu

su osušeni i zabilježene su njihove konačne težine. Promjene u izgledu, masi i tlačnoj čvrstoći ispitane su kod svih uzoraka geopolimernog betona kao i kod kontrolnih uzoraka betona. Slika 7. prikazuje postotak smanjenja mase i tlačnu čvrstoću. Vizualni pregled OPC i geopolimernog betona prikazan je na slici 8.

Izgled uzoraka geopolimernog betona nije se značajno promijenio nakon izlaganja otopini sumporne kiseline. Međutim, došlo je do slabije degradacije i neki dijelovi uzoraka bili su obojeni žuto što se može pripisati stvaranju sumpornog dioksida (SO_2) [47]. Za razliku od geopolimernog betona, kiselina je na uzorke konvencionalnog OPC betona imala ozbiljan utjecaj i njihovo stanje je značajno degradirano, vjerojatno zbog prisutnosti visokih razina kalcijevih oksida, koji su potaknuli reakciju s otopinom sumporne kiseline što je dovelo do stvaranja kalcijevog sulfata [47, 48]. U prethodnom je istraživanju zaključeno da je djelovanje kiseline na geopolimerni beton površinski fenomen [49], jer degradacija počinje na površini i napreduje prema unutrašnjosti betonske površine. Postotak gubitka mase za geopolimerni beton s različitim rasponima molariteta NaOH bio je u rasponu od 8,8 do 13,8 %, a kontrolni beton imao je gubitak mase od 22,3 %. Međutim, kada se uroni u 5-postotnu H_2SO_4 otopinu na 180 dana, geopolimerni beton na bazi letećeg pepela pokazao je samo 2,2 % smanjenja mase i 20 % smanjenja čvrstoće [12]. Mješavina GPC-8M imala je najmanji gubitak tlačne čvrstoće od 18,6 %, a OPC beton pokazao je najveće smanjenje čvrstoće od 40,1 %. To značajno smanjenje čvrstoće OPC betona moglo bi se pripisati stvaranju ekspanzivna gipsa i etringita koji dovodi do nastanka pukotina i eksplozivnog odlamanja [44]. Mallikarjuna i sur. [9] navode da geopolimerni beton na bazi zgure ima veći udio kalcija nego geopolimerni beton na bazi letećeg pepela. Kao posljedica toga, stvaranje kalcijevog sulfata tijekom izlaganja sumpornoj kiselini uzrokuje unutarnje šupljine, koje mogu prouzročiti smanjenje mase i čvrstoće geopolimernog betona na bazi zgure.

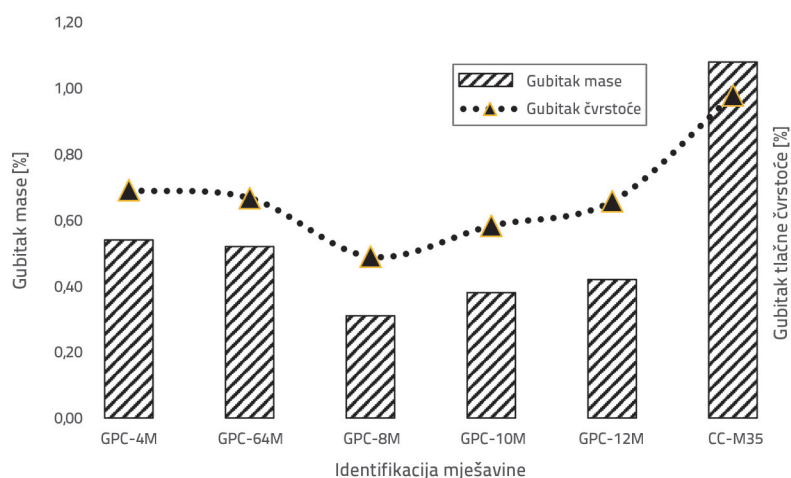
3.8. Otpornost na djelovanje sulfata

Otpornost geopolimernog betona na djelovanje sulfata procijenjena je s 3-postotnom otopinom natrijevog sulfata pri pH 7. Zabilježene su početne težine uzoraka geopolimera osušenih u pećnici i uzoraka konvencionalnog betona, a potom su uronjeni u 3-postotnu otopinu Na_2SO_4 . Tijekom razdoblja ispitivanja otopina je svakodnevno miješana, a mijenjana je na kraju svakog mjeseca. Po završetku razdoblja ispitivanja u trajanju od 120 dana, uzorci su izvađeni i osušeni kako bi se izračunala promjena težine. Proučen je

njihov vanjski izgled, smanjenje mase i gubitak čvrstoće. Izgled uzoraka geopolimera i konvencionalnog betona prikazani su na slici 9. Vizualni pregled otkrio je da su uzorci geopolimernog betona razvili bijeli sloj na površini nakon sušenja; međutim, OPC beton uronjen u otopinu natrijevog sulfata nije pokazao znakove značajne degradacije, ali su kutovi donekle oštećeni. Ovi rezultati podudaraju se s drugim istraživanjima [5, 47]. Izluženi natrijev hidroksid reagira s atmosferskim ugljikovim dioksidom i proizvodi bijeli sloj natrijevog karbonata, što uzrokuje pojavu bijelih mrlja na površinama uzoraka geopolimernog betona [50]. Primijećeni gubitak težine i gubitak čvrstoće nakon uranjanja u otopinu natrijevog sulfata prikazani su na slici 10. Prema rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, uzorci geopolimernog betona pokazali su zanemarive gubitke mase u rasponu od 0,31 do 0,54 %, dok je gubitak mase konvencionalnog betona iznosio približno 1,08 %. Hardjito i sur. [51] otkrili su da kada je uronjen u 5-postotnu otopinu natrijevog sulfata, geopolimerni beton na bazi letećeg pepela nije pokazao nikakvo značajno smanjenje ni tlačne čvrstoće ni težine. Manja degradacija OPC betona može se pripisati stvaranju gipsa koji uzrokuje ekspanziju i eksplozivno odlamanje betona [52]. Međutim, u usporedbi s konvencionalnim betonom, geopolimerni beton ne sadrži istu količinu kalcijevog hidroksida u betonskom sustavu da bi potaknuo ekspanziju [44]. To je uzrok smanjenja tlačne čvrstoće OPC betona od 20 %. Smanjenje čvrstoće geopolimernih betonskih mješavina, s druge strane, iznosi od 10 % do 14 %. Bakharev i sur. [53] procijenili su otpornost geopolimernog betona na bazi zgure na sulfata nakon 12 mjeseci izlaganja 5-postotnoj otopini natrijevog sulfata. Navodi da je čvrstoća OPC betona smanjena za 25 %, a čvrstoća geopolimernog betona na bazi zgure za 17 %. Kemijska otpornost na otopinu natrijevog sulfata bila je veća u alkalijski aktiviranim mortovima od zgure, mortovima od letećeg pepela/zgure i betonu aktiviranom zgurou [54, 55]. Geopolimerni beton ima najbolju otpornost na sulfata zahvaljujući neutraliziranim poprečnim vezama strukture aluminijevog silikatnog polimera u usporedbi s hidratacijskom strukturom konvencionalnog OPC betona.



Slika 9. Uzorak nakon uranjanja u natrijev sulfat



Slika 10. Gubitak mase i čvrstoće geopolimernog betona nakon djelovanja sulfata

4. Zaključak

Procijenjena je čvrstoća i trajnost geopolimernog betona molariteta 4M, 6M, 8M, 10M i 12M te konvencionalnog betona. Iz rezultata eksperimentalnih ispitivanja izvedeni su sljedeći zaključci.

- Na temelju rezultata tlačne čvrstoće, beton GPC-8M postigao je optimalnu čvrstoću od 57,53 MPa, što je za 23,72 % više od kontrolnog betona razreda M35.
- Povećanje molariteta natrijevog hidroksida do 8M povećalo je vlačnu čvrstoću cijepanjem geopolimernog betona, a sličan je trend uočen i kod čvrstoće na savijanje.
- Rezultati razornih ispitivanja uspoređeni su s rezultatima nerazornih ispitivanja (sklerometar). Rezultati nerazornog ispitivanja za geopolimerni i za konvencionalni beton bili su lošiji od rezultata razornog ispitivanja.
- Mješavine geopolimernog betona GPC-6M, GPC-8M, GPC-10M i GPC-12M imaju niže vrijednosti početnog upijanja vode i upijanja do zasićenja od kontrolnog OPC betona.

- Prema CEB 1989, sve mješavine geopolimernog betona, osim GPC-4M, ocijenjene su kao dobre kvalitete jer je postotak početnog upijanja vode nakon 30 minuta manji od 3 %.
- Osim mješavine GPC-4M, ostale mješavine geopolimernog betona imale su nižu prosječnu efektivnu poroznost od OPC betona što se može pripisati razlikama u mikrostrukturi.
- Konvencionalni OPC beton imao je sorptivnost od $2,71 \times 10^{-2} \text{ cm/min}^{0,5}$. Nasuprot tome, najniža vrijednost od $1,52 \times 10^{-2} \text{ cm/min}^{0,5}$ primijećena je za mješavinu geopolimernog betona GPC-8M.
- Uzorak GPC-8M pokazao je izvrsnu otpornost na habanje. To je dovelo do prosječnog gubitka debljine od 0,188 mm, što je 58,68 % manje od kontrolnog OPC betona. Stoga se ova mješavina preporučuje za proizvodnju betonske podne ploče prema normi IS 1237:2012.
- Geopolimerni beton na bazi letećeg pepela i GGBS-a ima izvrsnu otpornost na djelovanje kiselina i sulfata.
- Kada su uronjeni u 3-postotnu otopinu sumporne kiseline tijekom 120 dana, uzorci geopolimera izgubili su 8 do 14 % svoje mase i 18 do 23 % svoje čvrstoće, a konvencionalni OPC beton izgubio je 22 % odnosno 40 % svoje mase i čvrstoće.

- Kada su bili izloženi 3-postotnoj otopini natrijevog sulfata tijekom 120 dana, i geopolimerni i OPC beton izgubili su manje od 2 % gubitka mase. Međutim, smanjenje čvrstoće iznosio je 10 do 14 % za mješavine geopolimernog betona te 20 % za konvencionalni OPC beton.
- Istraživanje je otkrilo da geopolimerni beton od letećeg pepela i GGBS-a s koncentracijama natrijevog hidroksida od 6, 8, 10 i 12 ima izvanredne mehaničke kvalitete i kvalitete trajnosti. Nadalje, upotrebom industrijskih nusproizvoda, geopolimerni beton može se koristiti kao zamjena OPC betona u svrhu smanjenja CO₂ emisija.

Zahvale

Autori zahvaljuju Državnom fakultetu inženjerstva, Tirunelveli, T.N. u Indiji na pružanju potrebne eksperimentalne potpore za ovo istraživanje.

LITERATURA

- [1] Assi, L.N., Deaver, E., El Batanouny, M.K., Ziehl, P.: Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 112 (2016), pp. 807–815, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.008
- [2] Gunasekara, C., Law, D.W., Setunge, S.: Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes, *Construction and Building Materials*, 124 (2016), pp. 352–362, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.121
- [3] Saravanan, S., Nagajothi, S., Elavenil S.: Investigation on Compressive Strength Development of Geopolymer Concrete using Manufacturing Sand, *Materials Today: Proceedings of International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Engineering*, 18 (2019), pp. 114–124. doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.284
- [4] Neville, A.M.: *Properties of Concrete*, Third Edition, Longman, England, 1981.
- [5] Mehta, A., Siddique, R.: Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 146 (2017), pp. 136–143, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.077
- [6] Rangan, B.V., Wallah, S.E.: Low calcium fly ash based Geopolymer concrete: Long term properties Research report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, 2005.
- [7] Bakharev, T.: Durability of geopolymeric materials in sodium and magnesium sulfate solutions, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 1233–1246, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.09.002
- [8] Olivia, M., Nora, H.R.: Strength and Water permeability of fly ash geopolymer concrete, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6 (2011) 7, pp. 70–78.
- [9] Mallikarjuna Rao, G., Kireety, C.H.: Durability Studies on Alkali Activated Fly Ash and GGBS-Based Geopolymer Mortars, *Sustainable Construction and Building Materials, Lecture Notes in Civil Engineering*, 25 (2019), doi: 10.1007/978-981-13-3317-0_8
- [10] Wong, L.S.: Durability Performance of Geopolymer Concrete: A Review, *POLYMERS*, 14 (2022) 868, doi: 10.3390/polym14050868
- [11] Valencia-Saavedra, W.G., De Gutiérrez, R.M., Puertas, F.: Performance of FA-based geopolymer concretes exposed to acetic and sulfuric acids, *Construction and Building Materials*, 10 (2020) 257, 119503, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119503
- [12] Ganesan, N., Abraham, R., Deepa Raj, S.: Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 93 (2015), pp. 471–476, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014
- [13] Sathia, R., Babu, G., Santhanam, M.: Durability study of low calcium fly ash geopolymer concrete, *The 3rd ACF international conference*, pp. 1153–1159, 2008.
- [14] Sathish Kumar, V., Ganesan, N., Indira, P.V.: Engineering Properties of Hybrid Fibre Reinforced Ternary Blend Geopolymer Concrete, *Journal of Composites Science*, 5 (2021) 203, doi: 10.3390/jcs5080203
- [15] Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M.M.: Assessment of geopolymer composites durability at one year age, *Journal of Building Engineering*, 15 (2020), 101453, doi: 10.1016/j.job.2020.101453
- [16] Paudel, S.R., Yang, M., Gao, Z.: pH level of pore solution in alkali-activated fly ash geopolymer concrete and its effect on ASR of aggregates with different silicate contents, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (2020) 9, 04020257.
- [17] IS 383: 1970, Indian Standard specification for Coarse and Fine aggregates from natural sources for concrete (Second revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [18] Pavithra, P., Srinivasula Reddy, M., Dinakar, P., Hanumantha Rao, B., Satpathy, B.K., Mohanty, A.N.: A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash, *Journal of Cleaner Production*, 133 (2016), pp. 117–125, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.041
- [19] Patankar, S.V., Ghugal, Y.M., Jamkar, S.S.: Mix Design of Fly Ash Based Geopolymer Concrete, *Advances in Structural Engineering*, (2015), doi: 10.1007/978-81-322-2187-6_123
- [20] Rekha, M.S., Sumathy, S.R.: A study on cement-free geopolymer concrete incorporated with industrial waste cured at open environment for different molarities of sodium hydroxide, *Global Nest Journal*, 23 (2021) 2, pp. 265–274, doi: 10.30955/gnj.003329
- [21] IS 10262: 2009: Concrete Mix Design – Guidelines (First revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [22] Nath, P., Sarker, P.K.: Effect of GGBS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition, *Construction and Building Materials*, 66 (2014), pp. 163–171, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080
- [23] IS 516: 2004: Indian Standard Methods of Tests for Strength of Concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [24] IS: 5816: 2004: Indian Standard Splitting Tensile Strength of Concrete – Method of Test, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [25] Samantasinghar, S., Singh, S.P.: Synthesis of fly ash-GGBS blended Geopolymer Composites, *Indian Geotechnical Conference, IIT Madras, Chennai, India, 2016.*
- [26] Singhal, P.D., Junaid, M.T, Jindal, B.B., Mehta, A.: Mechanical and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete incorporating alccofine at ambient curing, *Construction and Building Materials*, 180 (2016), pp. 298–307, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.286
- [27] Hu, Y., Tang, Z., Li, W., Li, Y., Tam, V.W.Y.: Physical-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composites with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 226 (2019), pp. 139–151, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.211
- [28] Lee, N.K., Lee, H K.: Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/ slag concrete manufactured at room temperature, *Construction and Building Materials*, 47 (2013), pp. 1201–1209, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107
- [29] Patankar, S.V., Ghugal, Y.M., Jamkar, S.S.: Mix design of fly ash based geopolymer concrete, *Advances in Structural Engineering*, (2015), pp.1619–1634, doi: 10.1007/978-81-322-2187-6_123
- [30] Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D.W., Setunge, S.: Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes, *Construction and Building Materials*, 143 (2017), pp. 272–279, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.153
- [31] Hardjito, D., Rangan, B.V.: Development and properties of Low Calcium Fly ash based Geopolymer concrete, *Research Report GC1 (2015)*, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth.
- [32] Zannerni, G.M., Al-Tamimi, K.K.: Ambient-cured geopolymer concrete with single alkali activator, *Sustainable Materials and Technologies*, 23 (2020), e00131, doi: 10.1016/j.susmat.2019.e00131

- [33] Verma, S.K., Bhadauria, S.S., Akhtar, S.: Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures, *Journal of Construction Engineering*, (2013), doi: 10.1155/2013/834572
- [34] IS 13311 (part 2):1992, Indian Standard Specification for Non-Destructive testing of concrete Methods-of Test - Part 2 Rebound Hammer, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [35] Raju, S., Dharmar, B.: Mechanical Properties of Concrete with Copper Slag and Fly Ash by DT and NDT, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60 (2016) 3, pp. 313–322, doi: 10.3311/PPci.7904
- [36] The Concrete Society, Diagnosis of deterioration in concrete structures, Technical Report No. 54, Berkshire, Crowthorne, 2000.
- [37] Rangan, B.V.: Geopolymer concrete for Environmental protection, *The Indian Concrete Journal*, 88 (2014) 4, pp. 41–48, 50–59, doi: 20.500.11937/29749
- [38] ASTM C642, Standard Test method for specific gravity, absorption and voids in hardened concrete. Annual book of ASTM standards, 4.02, 1994.
- [39] CEB (Comite Euro-International Du Beton) CEB, Diagnosis and Assessment of Concrete Structures – State of art report, CEB – Bulletin, 1989.
- [40] Al-Otaib, S.: Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 2059–2067, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.023
- [41] Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., Nicolas, S.R., Hamdan, S., Deventer, J.S.J.V.: Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash, *Cement and Concrete Composites*, 45 (2014), pp. 125–135, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006
- [42] Raju, S., Dharmar, B.: Durability characteristics of copper slag concrete with fly ash, *GRADEVINAR*, 69 (2017) 11, pp. 1031–1040, doi: 10.14256/JCE.1229.2015
- [43] IS 1237: 2012, Indian Standard Cement Concrete Flooring Tiles - Specification (Second revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [44] Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K.: Geopolymer concrete: A review of some recent developments, *Construction and Building Materials*, 85 (2015), pp. 78–90, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036
- [45] Gopalakrishnan, R., Chinnaraju, K.: Durability of ambient cured alumina silicate concrete based on slag/fly ash blends against sulfate environment, *Construction and Building Materials*, 204 (2019), pp. 70–83, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.153
- [46] Ariffin, M.A.M., Bhutta, M.A.R., Hussin, M.W., Tahir, M.M., Aziah, N.: Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 43 (2013), pp. 80–86, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.018
- [47] Albitar, M., Ali, M.S.M., Visintin, P., Drechsler, M.: Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes, *Construction and Building Materials*, 136 (2017), pp. 374–385, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056
- [48] Alzebaree, R., Cevik, A., Nematollahi, B., Sanjayan, J., Mohammedameen, A., Gulsan, M.E.: Mechanical properties and durability of unconfined and confined geopolymer concrete with fiber reinforced polymers exposed to sulfuric acid, *Construction and Building Materials*, 215 (2019), pp. 1015–1032, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.165
- [49] Attiogbe, E.K., Rizkalla, S.H.: Response of concrete to sulfuric acid attack, *ACI Materials Journal*, 85 (1988), pp. 481–488.
- [50] Bakharev, T.: Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 1233–1246, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.09.002
- [51] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., Rangan B.V.: On the development of fly-ash based geopolymer concrete, *ACI MATERIALS JOURNAL*, 101 (2004), pp. 467–472.
- [52] Rajamane, N.P., Natraja, M.C., Dattatreya, J.K., Lakshmanan, N., Sabitha, D.: Sulphate resistance and eco-friendliness of geopolymer concretes, *Indian Concrete Journal*, 86 (2012), pp. 13–21.
- [53] Bakharev, T., Sanjayana, J.G., Chengb, Y.B.: Sulfate attack on alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 32 (2002), pp. 211–216, d., Delvasto, S., Maldonado, J.: Alkaline cement mortars: Chemical resistance to sulfate and seawater attack, *Material Construction*, 52 (2002) 267, pp. 55–71, doi: 10.3989/mc.2002.v52.i267.326
- [54] Puertas, F., Gutierrez, R.D., Fernandez-jimenez, A., Delvasto, S., Maldonado, J.: Alkaline cement mortars: Chemical resistance to sulfate and seawater attack, *Material Construction*, 52 (2002) 267, pp. 55–71, <https://doi.org/10.3989/mc.2002.v52.i267.326>
- [55] Chi, M.: Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, 35 (2012) 10, pp. 240–245, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.005