

Primljen / Received: 2.6.2018.

Ispravljen / Corrected: 10.12.2019.

Prihvaćen / Accepted: 15.7.2020.

Dostupno online / Available online: 10.4.2021.

Geopolimerno vezivo za propusni beton

Autori:

Doc.dr.sc. **Elango Krishnan Soundararajan**, dipl.ing.građ.

KPR Institut za inženjerstvo i tehnologiju, Indija

Odjel za građevinarstvo

kselango04@gmail.com

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Revathi Vaiyapuri**, dipl.ing.građ.

K.S.R Tehnički fakultet, Indija

Odjel za građevinarstvo

revthiru2002@yahoo.com

Prethodno priopćenje

Elango Krishnan Soundararajan, Revathi Vaiyapuri

Geopolimerno vezivo za propusni beton

Nogostup od propusnog betona (PC) ekskluzivna je i efikasna mjera za rješavanje ekoloških problema i pridonosi održivosti. Omogućava kišnici da se procijedi u tlo smanjujući time mogućnost razlijevanja i pomažući u dopunjavanju razina podzemnih voda. Koristi se za izgradnju pločnika, parkirališnih površina kao i za ostale mnoge primjene. Prilikom provedbe istraživanja variralo se s veličinom zrna krupnog agregata u geopolimernom vezivu kako bi se procijenila svojstva propusnog betona. Utvrđeno je da geopolimerno vezivo za propusni beton s letećim pepelom zadovoljava zahtjeve postavljene pravilnicima i može se koristiti za izgradnju održivih pločnika.

Ključne riječi:

propusni beton, makrostruktura, kohezija, geopolimer, vezivo, leteći pepeo

Research Paper

Elango Krishnan Soundararajan, Revathi Vaiyapuri

Geopolymer binder for pervious concrete

Construction of pervious concrete (PC) pavements is an exclusive and efficient measure for solving environmental problems while also contributing to sustainability. Pervious concrete enables rainwater to percolate into soil thus reducing the storm water runoff and assisting in ground water recharge. It is used for the construction of pedestrian pathways, parking lots, and in various other applications. During the research, the content of coarse aggregate grains in geopolymer binder was varied in order to investigate pervious concrete properties. It was established that pervious concrete with geopolymer binder containing fly ash meets requirements set in regulations, and that it can be used for sustainable pavement construction.

Key words:

pervious concrete, macrostructure, cohesion, geopolymer, binder, fly ash

Vorherige Mitteilung

Elango Krishnan Soundararajan, Revathi Vaiyapuri

Geopolymeres Bindemittel für den durchlässigen Beton

Ein Fußweg aus dem durchlässigen Beton (PC) ist eine exklusive und effiziente Maßnahme für die ökologischen Probleme, und sie trägt der Nachhaltigkeit bei. Diese Maßnahme ermöglicht, dass das Regenwasser in den Boden fließt, womit die Möglichkeit der Zerfließung/Vergießung gemindert wird. Der durchlässige Beton ist auch bei der Ergänzung von Ebenen der Grundwasser behilflich. Dieser Beton wird auch für den Bau von Fußwegen, von den Parkplatzflächen, sowie für viele andere Bauten angewendet. Bei der Durchführung von Forschungen gab es Variationen mit der Korngröße des groben Aggregats im geopolymeren Bindemittel, damit die Eigenschaften des durchlässigen Betons eingeschätzt werden können. Es wurde festgestellt, dass das geopolymeres Bindemittel für den durchlässigen Beton mit der fliegenden Asche die Anforderungen erfüllt, welche mit den Dienstvorschriften festgelegt wurden, und dieses Mittel kann für den Bau von nachhaltigen Fußwegen genutzt werden.

Schlüsselwörter:

der durchlässige Beton, Makrostruktur, Kohäsion (Bindigkeit), Geopolymer, Bindemittel, fliegende Asche

1. Uvod

Razvoj infrastrukture u gradovima doveo je do toga da su pločnici izgrađeni od nepropusnog betona koji ne dopušta propuštanje vode. Stoga postoji potreba za propusnim pločnicima. Propusni beton pločnika je najbolji odabir za propusne pločnike koji omogućuju prodiranje vode i nadopunu podzemnih voda. Sastav propusnog betona je većinom cement, krupni agregat i voda s malo ili potpuno bez sitnog agregata. Koristi se za izgradnju parkirališta, pločnika, ploče bazena, manje prometnice itd. [1-3]. Općenito, veličina pora propusnog betona varira od 2 mm do 8 mm u promjeru s rasponom udjela šupljina između 15 % i 35 % te s tlačnom čvrstoćom u rasponu između 2,8 MPa i 28 MPa [4]. Beton je najčešći materijal za izgradnju na svijetu, a obični portland cement (OPC) njegov je glavni sastojak. Beton je na drugom mjestu odmah iza vode što se tiče globalne uporabe. Kad postoji potreba za betonom, očito je da postoji i potreba za portland cementom. S druge strane, proizvodnja portland cementa rezultira velikom emisijom CO₂ plinova u atmosferu što postaje velik problem s obzirom na klimatske promjene zbog globalnog zatopljenja [5]. Prema statistici, 7 % težine ukupnog ispuštenog ugljičnog dioksida je uzrokovano industrijskom proizvodnjom cementa. Stoga, propisna reciklaža i ponovna uporaba prerađenog otpada/otpadnih materijala pomaže u zaštiti okoliša. Provedena su mnoga ispitivanja kako bi se suočili s tim problemima razvijajući alternativne materijale za zamjenu portland cementa koristeći nekoliko otpada/otpadni materijal kao što su leteći pepeo, mijevene granulirane troske visoke peći, silicijska prašina, pepeo rižinih ljuskica itd. [6].

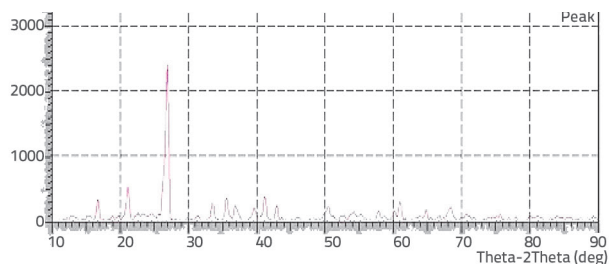
Joseph Davidovits je 1978. pokušao stvoriti geopolimerno vezivo miješajući anorganske polimerne materijale (alkalne otopine) s drugim izvornim materijalima. Alkalne otopine mogu biti bazirane na natriju ili kaliju. Geopolimerna tehnologija je jedna od novih tehnologija kojom se pokušava smanjiti uporaba portland cementa u betonu te smanjuje ekološki otisak [7]. Provedeno je nekoliko ispitivanja varirajući omjere alkalne tekućine/krutine (L/S) i koncentracije natrijevog hidroksida (NaOH) nazvane molarost (M). Pomoću tih ispitivanja prikazan je utjecaj čvrstoće, propusnosti te utjecaj koncentracije NaOH u betonu. Osim toga, proučavan je omjer ukupnih šupljina, koeficijent propusnosti vode te tlačne čvrstoće propusnog geopolimernog betona uz uporabu recikliranog agregata. Nadalje, utvrđeno je da se mješavina propusnog betona može proizvesti s prihvatljivom propusnošću i čvrstoćom kombinirajući lateks i pijesak [8-14]. Brojna su ispitivanja također provedena uporabom geopolimera s različitim izvornim materijalima koji su bogati silicijskim dioksidom i aluminijem u armiranom betonu, no samo su ograničena ispitivanja provedena uporabom geopolimera s letećim pepelom u primjeni propusnog betona.

Glavni je cilj ovog istraživačkog rada ispitati svojstva propusnog betona koji ima geopolimerno vezivo s letećim pepelom (GP), proučavanjem fizikalnih, mehaničkih i drugih relevantnih svojstava s različitim veličinama zrna krupnog agregata.

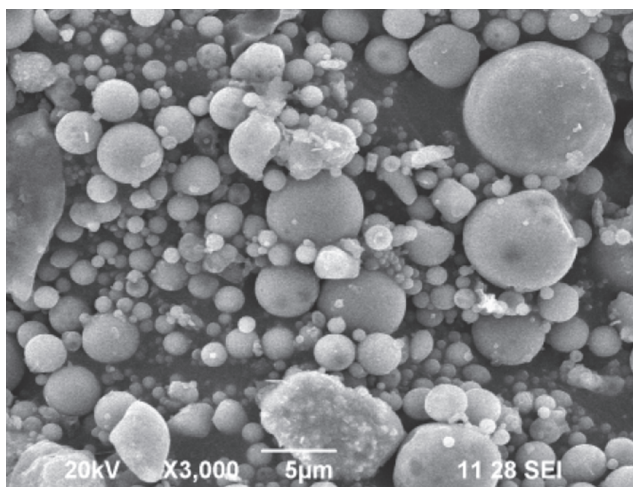
2. Eksperimentalno istraživanje

2.1. Materijali

U prikazanom istraživanju, koristio se obični portlandski cement (OPC) čvrstoće 53 MPa u skladu s normom IS 12269-2013. Leteći pepeo kategorije 'F' prema normi IS 3812-2003 dobiven je iz Mettur termalne elektrane iz Mettura u Indiji. Gustoća letećeg pepela iznosila je 2,30 g/cm³. Spektar rendgenske difrakcije (XRD) pokazuje da leteći pepeo ima iznimno visok raspršeni vrh na otprilike 20 do 30° (2θ max), kako je i prikazano na slici 1. Uočava se prisutnost kristaliziranih faza zbog kvarca, kalcita, glinenca i silikatnog minerala u matrici aluminijevog silikatnog stakla. Nadalje, dobivena SEM slika letećeg pepela prikazana je na slici 2. na kojoj se vidi da su čestice gotovo posve sferičnog oblika. SEM i XRD analize provedene su na Sveučilištu u Karunji, Coimbatore. Alkalna otopina, natrijev hidroksid (NH) u obliku pahuljica i otopina natrijevog silikata (Na₂SiO₃) u tekućem obliku dobivena je iz Coimbatore u Indiji. Krupni agregat (drobljeni plavi metalni granit) veličine 6,3 mm, 8 mm, 10 mm i 12,5 mm dobiven je iz lokalne tvrtke za isporuku materijala.



Slika 1. Rendgenski difraktogram letećeg pepela

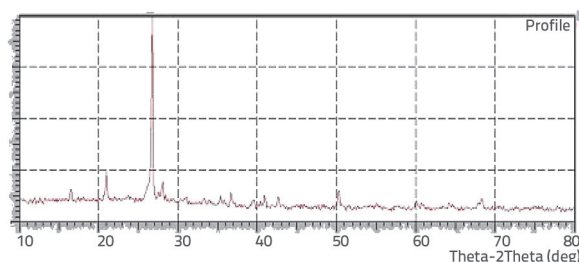


Slika 2. SEM slika letećeg pepela

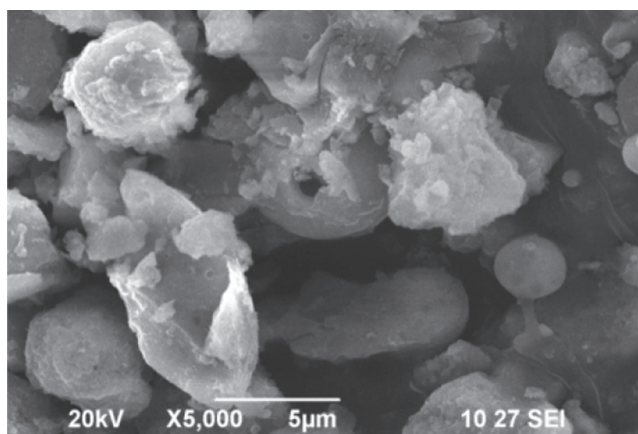
2.2. Geopolimerno vezivo s letećim pepelom

Geopolimerno vezivo s letećim pepelom pripravljeno je odabirom Na₂SiO₃/NaOH s omjerom jednakim 2 te omjerom tekućine i čvrstih sastojaka 0,4. Molarost NaOH odabrana je

kao 8. Nakon pripreme veziva, ono je ugrađeno u kvadratne kalupe veličine 70,6 mm x 70,6 mm x 70,6 mm. Uzorci su raskalupljeni nakon 24 sata i njegovani 28 dana kako bi se postigla odgovarajuća čvrstoća. Nadalje, XRD i SEM analize provedene su na uzorcima na Karunya sveučilištu, Coimbatore, kako bi se ispitalo ponašanje pri polimerizaciji, a rezultati su prikazani na slikama 3. i 4. XRD uzorak GP mješavine ima iznimno raspršeni vrh na otprilike 20° do 30° (2θ max). Prisutnost kristalizirane faze u letećem pepelu kao silikatnog minerala, kvarca, magnetita i tektonsko silikatnog minerala, proučavani su XRD analizom i zbog aktivacijskog procesa alkalne otopine, dogodio se mali pomak izbočenja na difraktorskom grafu (16° do 22° i 25° do 30°) što znači formaciju aluminijevih silikatnih minerala koji potiču reakciju geopolimerizacije [17, 18]. SEM analizom uočene su guste supstancije slične gelu, a također su na površini geopolimera uočeni mali aluminijevi silikatni kristali i prisutnost N-A-S-H gela. Sferični oblik supstancije na SEM slici označava prisutnost neaktivnih čestica letećeg pepela u geopolimernoj mješavini.



Slika 3. Rendgenski difraktogram GP veziva s letećim pepelom



Slika 4. SEM slika GP veziva s letećim pepelom

Tablica 2. Sastojci mješavina za različite mješavine GP

ID mješavine	Leteći pepeo [kg/m ³]	Krupni agregat [kg/m ³]	Alkalna otopina [kg/m ³]		L/S omjer
			NaOH	Na ₂ SiO ₃	
GP _{6,3}	475	1570	63,3	126,6	0,4
GP ₈	454	1500	60,5	121,0	
GP ₁₀	421	1390	56,1	112,2	
GP _{12,5}	412	1360	54,9	109,8	

2.3. Proporcije mješavine

Omjer težine agregata i čvrstih sastojaka (A / S) bio je 3,3 s konstantnim omjerom tekućih sastojaka (Na₂SiO₃/NaOH) koji je iznosio 2 te omjerom tekućih i krutih sastojaka (L/S) od 0,4. Molarnost NaOH odabrana je kao 8. Iznimno se pazilo prilikom pripreme alkalne otopine. Koristeći običan portland cement (OPC) kao vezivo u konvencionalnoj referentnoj mješavini, dobivena je proporcionalna mješavina, što je prikazano u tablici 1. Proporcionalna mješavina dobivena je za geopolimerno vezivo s letećim pepelom (GP), što je prikazano u tablici 2. Mješavina ID 'OPC' i 'GP' predstavlja mješavinu betona s običnim portland cementom i geopolimernim vezivom za propusni beton s letećim pepelom a sufiks označava veličinu zrna agregata korištenog u mješavini.

Tablica 1. Sastojci mješavina za različite mješavine OPC

ID mješavine	OPC [kg/m ³]	Krupni agregat [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	v/v omjer
OPC _{6,3}	475	1570	166,2	0,35
OPC ₈	475	1500	158,9	
OPC ₁₀	421	1390	147,3	
OPC _{12,5}	412	1360	144,2	

3. Provedba ispitivanja

Ispitana su svojstva poput tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem, čvrstoće na savijanje, propusnosti, poroznosti, otpornosti na habanje te otpornosti na kemikalije za OPC i GP veziva za propusni beton.

3.1. Mehanička svojstva

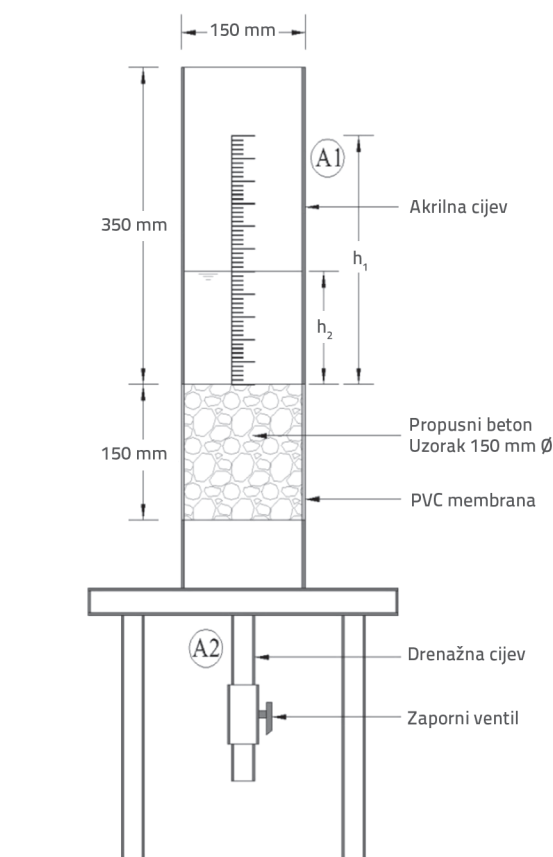
Tlačna čvrstoća uzoraka određena je prema smjernicama navedenim u normi IS 516-1959. Ukupno 72 kvadratna uzorka (100 mm x 100 mm x 100 mm) bila su pripremljena za sve mješavine s različitim vezivima za ispitivanje tlačne čvrstoće. U slučaju ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem, upotrebljavana su 72 cilindrična uzorka, veličine 150 mm u promjeru i 300 mm visine, i ispitivanje je provedeno prema IS 5816 - 1999. Ukupno 72 uzorka u obliku prizme veličine 100 mm x 100 mm x 500 mm služila su za ispitivanje čvrstoće na savijanje, a postupak

je proveden prema normi IS 516-1959. Nakon 24 sata uzorci 'GP' mješavina su raskalupljeni i njegovani na temperaturi okoline kako bi se dostigla zadovoljavajuća čvrstoća. Uzorci OPC mješavina propusnog betona njegovani su u vodi. U prosjeku na 3 uzorka je provedeno ispitivanje mehaničkih svojstava tijekom 7, 28 i 56 dana za svaku mješavinu.

3.2. Fizikalna svojstva

3.2.1. Ispitivanje propusnosti

Ispitivanje propusnosti provedeno je u starosti od 28 dana uređajem za ispitivanje propusnosti prema smjernicama u ASTM C1701/M. Uređaj je izrađen u laboratoriju za beton K.S.R Tehničkog fakulteta, Tiruchengode, Tamil Nadu, a shematski prikaz postupka ispitivanja predočen je na slici 5.



Slika 5. Postupci provjere ispitivanja propusnosti

Ukupno 24 cilindrična uzorka izrađena su veličine 150 mm u promjeru i 150 mm visine te su postavljeni između PVC cijevi i akrilne cijevi. Bočni dio cilindričnog uzorka se čvrsto pokriva PVC membranama kako bi se zaustavio vodoravan tok vode. Ventil za odvod je pričvršćen na dnu PVC cijevi. Voda je slobodno tekla kroz cilindrični uzorak održavajući ventil za odvod otvorenim, tako da se zatvarač za zrak s uzorka može ukloniti. Akrilna cijev se puni do početne razine zatvaranjem odvodnog ventila.

Nakon otvaranja ventila, vrijeme potrebno (t) za protok vode od početne razine do ukupne završne razine (h_1 do h_2) mjereno je koristeći skalu za mjerenje pričvršćenu na akrilnu cijev. Primjenom Darcyjevog zakona, koeficijent propuštanja (k) je izračunan izrazom (1).

$$k = \frac{A_1}{A_2 t} \log \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad (1)$$

gdje su A_1 i A_2 poprečni presjek uzorka i odvodne cijevi.

3.2.2. Ispitivanje poroznosti

Pripremljena su ukupno 24 kvadratna uzorka veličine 70,6 mm x 70,6 mm x 70,6 mm kako bi se utvrdio postotak poroznosti različitih mješavina za propusni beton. Ovo ispitivanje je provedeno kako su naveli autori Lian i Zhuge [22]. Postotak poroznosti u uzorku betona bio je utvrđen izrazom (2)

$$\text{Poroznost [\%]} = \frac{V_T - V_C}{V_T} \quad (2)$$

gdje je ukupan volumen uzorka u [mm^3], $V_T - V_C$ je volumen praznih šupljina u [mm^3].

3.3. Svojstva trajnosti

3.3.1. Ispitivanje otpornosti na habanje

Pripremljena su ukupno 24 kvadratna uzorka veličine 70,6 mm x 70,6 mm x 40 mm pripremljeni su kako bi se utvrdila otpornost na habanje propusnog betona. Ispitivanje je provedeno prema proceduri navedenoj u IS 1237- 2012. Prosječni gubitak debljine istrošenog materijala uzorka dobiven je korištenjem izrazom (3):

$$t = \frac{(w_1 - w_2)V_1}{w_1 A} \quad (3)$$

gdje je:

- t - prosječan gubitak debljine istrošenog materijala, [mm]
- w_1 - početna težina uzorka, [g]
- w_2 - konačna težina uzorka nakon ispitivanja, [g]
- V_1 - početni volumen uzorka, [mm^3],
- A - površina uzorka, [mm^2].

Također, postotak habanja može se utvrditi primjenom izraza (4).

$$\text{postotak habanja [\%]} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \quad (4)$$

3.3.2. Kemijska otpornost

Kvadratni uzorci propusnog betona veličine 100 mm x 100 mm x 100 mm pripremljeni su kako bi se utvrdila otpornost mješavina OPC i GP propusnog betona na kemijske supstance, kao što su sol, sulfati i kiseline. Pripremljeni uzorci su uronjeni

u 3,5-postotnom NaCl otopinu za utjecaj soli, 5-postotnom otopinu $MgSO_4$ za utjecaj sulfata te 2-postotnom otopinu HCl za utjecaj kiselina i to zasebno u spremnicima. Nakon 180 dana izlaganja kemikalijama, promatrani su parametri kao što su promjena u težini, promjena u vrijednosti tlačne čvrstoće te vizualni pregled uzoraka.

4. Rezultati i rasprava

Premda su ispitivanja svojstava kao što su tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem, čvrstoća na savijanje, suha gustoća, propusnost, otpornost na habanje i kemijska otpornost OPC i GP veziva za propusni betona s različitim veličinama zrna agregata, a rezultati su detaljno analizirani.

4.1. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće OPC i GP veziva za propusni betona prikazani su u tablici 3. Rezultati ispitivanja pokazuju da je tlačna čvrstoća $GP_{6,3}$ mješavine veća za 8,6 % u usporedbi s referentnom mješavinom $OPC_{6,3}$. Tlačna čvrstoća mješavine GP_8 veća je za 8,9 % u odnosu na konvencionalnu referentnu mješavinu OPC_8 . Mješavina GP_{10} ima 9,7 % veću tlačnu čvrstoću od mješavine OPC_{10} . Nadalje, 19,2 % veća tlačna čvrstoća je zabilježena u mješavini $GP_{12,5}$ u odnosu na mješavinu $OPC_{12,5}$. Rezultati ispitivanja pokazuju da je da mješavine s GP vezivom imaju veću tlačnu čvrstoću od konvencionalne referentne mješavine betona. To se može pripisati činjenici da je prisutnost bogatog udjela silikata i aluminija u letećem pepelu dovela do formacije gela aluminijeva silikata za vrijeme postupka polimerizacije koji poboljšava tlačnu čvrstoću [24, 25]. Promatrajući veličinu zrna agregata, primjena agregata veličine 6,3 mm pokazuje veću tlačnu čvrstoću i za mješavinu GP kao i za konvencionalnu referentnu mješavinu betona. Kako se veličina zrna agregata povećava, uočava se postupno smanjenje tlačne čvrstoće u betonu. Razlog tome je što beton pripremljen s agregatom manjeg zrna ima manje praznog prostora u pakiranju i time postaje gušći, a to rezultira maksimalnom tlačnom čvrstoćom. Nadalje je uočeno da agregati s manjim zrnima imaju veću specifičnu površinu koja omogućuje odgovarajuću prionjivost između faza agregata [26].

Izraz vezan za tlačnu čvrstoću i veličinu zrna agregata u OPC i GP vezivima za propusni beton osmišljen je i prikazuje se izrazima (5) i (6)

OPC vezivo

$$f_{ck}(28) = -1,94 \cdot 10^{-2} ca^3 + 0,56 ca^2 - 6,53 ca + 45,76; \quad (5)$$

$$R^2 = 0,998$$

GP vezivo s letećim pepelom

$$f_{ck}(28) = -6,49 \cdot 10^{-3} ca^3 + 2,66 \cdot 10^{-1} ca^2 - 4,38 ca + 42,62; \quad (6)$$

$$R^2 = 0,999$$

gdje je:

f_{ck} - tlačna čvrstoća [MPa]

ca - veličina zrna agregata [mm].

4.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Rezultati vlačne čvrstoće cijepanjem propusnog betona s vezivom GP s letećim pepelom prikazani su u tablici 3. Slično tlačnoj čvrstoći, mješavine s geopolimernim vezivom s letećim pepelom imaju veću vlačnu čvrstoću od konvencionalne referentne mješavine. Rezultati pokazuju da mješavina $GP_{6,3}$ ima 7,0 % veću vlačnu čvrstoću cijepanjem od konvencionalne referentne mješavine $OPC_{6,3}$. Nadalje, 7,5 % veća vlačna čvrstoća cijepanjem uočena je kod mješavine GP_8 u usporedbi s mješavinom OPC_8 . Mješavina GP_{10} ima 10,1 % veću vlačnu čvrstoću cijepanjem od konvencionalne referentne mješavine OPC_{10} . Nadalje, 20,1 % veća vlačna čvrstoća cijepanjem uočena je kod mješavine $GP_{12,5}$ od konvencionalne referentne mješavine $OPC_{12,5}$. Razlog tome može biti kohezija i krutost geopolimera koji poboljšavaju vlačnu čvrstoću cijepanjem propusnog betona i, kako je već razmotreno prije, polimerizacijski proces i veći omjer koncentrata natrijevog silikata (Na_2SiO_3) i natrijevog hidroksida (NaOH) povećavaju vlačnu čvrstoću cijepanjem [27]. S obzirom na veličinu zrna agregata, dobiveni rezultati slijede sličan trend kao i kod ispitivanja ponašanja tlačne čvrstoće. Razvijeni su izrazi vezani za vlačnu čvrstoću cijepanjem i veličinu zrna agregata za mješavine GP propusnog betona s OPC i GP vezivom te su prikazani u jednadžbama (7) i (8).

OPC vezivo

$$f_{ct}(28) = -2,26 \cdot 10^{-3} ca^3 + 6,58 \cdot 10^{-2} ca^2 - 7,56 \cdot 10^{-1} ca + 5,14; \quad (7)$$

$$R^2 = 0,998$$

GP vezivo s letećim pepelom

$$f_{ct}(28) = -1,99 \cdot 10^{-3} ca^3 + 6,48 \cdot 10^{-2} ca^2 - 7,90 \cdot 10^{-1} ca + 5,49; \quad (8)$$

$$R^2 = 0,998$$

gdje je:

f_{ct} - vlačna čvrstoća cijepanjem [MPa]

ca - veličina zrna agregata [mm].

4.3. Ispitivanje čvrstoće na savijanje

Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje za propusni beton za GP vezivo s letećim pepelom prikazani su u tablici 3. Rezultati GP veziva s letećim pepelom uspoređeni su s konvencionalnim referentnim mješavinama propusnog betona u starosti 28 dana. Uočeno je da mješavina $GP_{6,3}$ ima 2,1 % veću čvrstoću na savijanje od konvencionalne referentne mješavine $OPC_{6,3}$. Čvrstoća na savijanje mješavine GP_8 je bila 4,2 % veća od mješavine OPC_8 . Nadalje, 3,4 % veća čvrstoća na savijanje je uočena kod mješavine GP_{10} u usporedbi s mješavinom OPC_{10} . Mješavina $GP_{12,5}$ ima 8,7

Tablica 3. Svojstva čvrstoće betona s OPC i GP s letećim pepelom

Veličina zrna agregata [mm]	Starost [dani]	Tlačna čvrstoća [MPa]		Vlačna čvrstoća cijepanjem [MPa]		Čvrstoća na savijanje [MPa]		Suha gustoća [kg/m ³] nakon 28 dana	
		OPC	GP	OPC	GP	OPC	GP	OPC	GP
6,3	7	17,04	20,75	1,87	2,06	2,91	3,04	2060	2066
	28	22,05	23,95	2,42	2,59	3,33	3,40		
	56	23,52	25,12	2,58	2,78	3,55	3,61		
8	7	14,25	18,39	1,52	1,69	2,65	2,76	2038	2045
	28	19,53	21,27	2,14	2,30	3,12	3,25		
	56	21,23	22,78	2,28	2,52	3,23	3,34		
10	7	11,55	16,19	1,25	1,43	2,44	2,55	2030	2037
	28	17,24	18,92	1,89	2,08	2,95	3,05		
	56	18,62	20,25	2,02	2,23	3,02	3,14		
12,5	7	9,52	14,65	1,05	1,28	2,23	2,37	2015	2028
	28	14,05	16,75	1,54	1,85	2,63	2,86		
	56	15,83	17,83	1,75	1,95	2,85	2,96		

% veću čvrstoću na savijanje od mješavine OPC_{12,5}. Omjer alkalne otopine prema letećem pepelu, koji iznosi 0.4, pridonosi znatnom poboljšanju čvrstoće na savijanje [28]. Očito, korištenje agregata manjeg zrna postiže veću čvrstoću na savijanje u usporedbi s korištenim većim zrnim agregata zbog gušćeg pakiranja i bolje prionjivosti. Poveznice između čvrstoće na savijanje i veličine zrna agregata za propusni betona s vezivom OPC i GP s letećim pepelom navedene su u izrazima (9) i (10).

OPC vezivo

$$f_{cr}(28) = -3,22 \cdot 10^{-3} ca^3 + 8,86 \cdot 10^{-2} ca^2 - 8,95 \cdot 10^{-1} ca + 6,25; \quad (9)$$

$$R^2 = 0,995$$

GP vezivo s letećim pepelom

$$f_{cr}(28) = 1,37 \cdot 10^{-3} ca^3 - 3,65 \cdot 10^{-2} ca^2 + 2,22 \cdot 10^{-1} ca + 3,10; \quad (10)$$

$$R^2 = 0,998$$

gdje je:

f_{cr} - čvrstoća na savijanje [MPa]

ca - veličina zrna agregata [mm].

4.4. Suha gustoća

Vrijednosti suhe gustoće za veziva OPC i GP s letećim pepelom prikazane su u tablici 3. Rezultati ispitivanja vode do zaključka da s povećanjem veličine zrna agregata dolazi do povećanja šupljina koje se ne mogu potpuno ispuniti agregatom i vezivom.

4.5. Svojstva propusnosti

Propusnost i poroznost za propusni beton s vezivima OPC i GP prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Svojstva propusnosti za propusni beton s OPC i GP s letećim pepelom

Veličina zrna agregata [mm]	Propusnost, k [cm/s] nakon 28 dana		Poroznost [%] nakon 28 dana	
	OPC	GP	OPC	GP
6,3	0,98	0,87	14,85	12,25
8	1,26	1,15	15,62	13,52
10	1,55	1,43	17,84	15,84
12,5	1,95	1,65	19,53	16,52

Koeficijent propusnosti propusnog betona s OPC i GP vezivom je rangiran od 0,98 cm/s do 1,95 cm/s te 0,87 cm/s do 1,65 cm/s. Utvrđeno je da mješavina GP_{6,3} pokazuje 11,2 % manji koeficijent propusnosti u usporedbi s konvencionalnom referentnom mješavinom OPC_{6,3}. Mješavina GP₈ ima 8,7 % manji koeficijent propusnosti od konvencionalne referentne mješavine OPC₈. Nadalje, 7,7 % manji koeficijent propusnosti utvrđen je za mješavinu GP₁₀ u usporedbi s konvencionalnom referentnom mješavinom običnog OPC₁₀. Mješavina GP_{12,5} ima 15,4 % manji koeficijent propusnosti nego mješavina OPC_{12,5}. Očito je da mješavine propusnog betona s GP vezivom s letećim pepelom pokazuju manji koeficijent propusnosti od konvencionalnih referentnih mješavina betona. To se može pripisati činjenici da se dodavanjem alkalne tekućine u mješavine s geopolimernim vezivom povećava sadržaj paste te smanjuje udio pora u betonu što čini propusni beton relativno gustim u usporedbi s konvencionalnim referentnim mješavinama betona [29]. Ta pojava smanjuje koeficijent propusnosti u mješavinama GP s letećim pepelom u usporedbi s konvencionalnim referentnim mješavinom betona. S obzirom na veličinu zrna agregata, manji raspon propusnosti uočen je korištenjem agregata s manjim zrnim

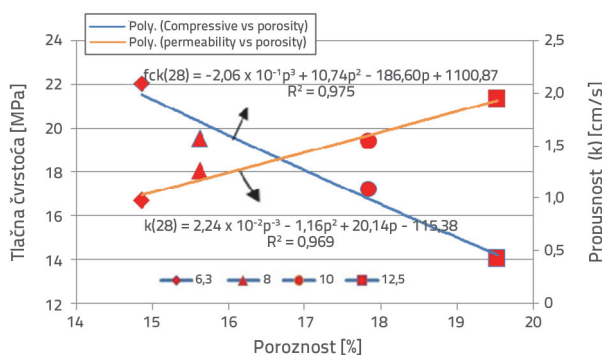
zbog manje količine pora. Kako se veličina zrna agregata povećava, postupno se povećava svojstvo propusnosti zbog većeg udjela pora [30, 31].

Poroznost mješavina propusnog betona s OPC i GP vezivom bila je u rasponu od 14,85 % do 19,53 % i 12,25 % do 16,52 %. Rezultati su pokazali da mješavina GP_{6,3} ima 17,5 % manju poroznost od OPC_{6,3}, a mješavina GP₈ pokazuje 13,4 % manju poroznost u usporedbi s konvencionalnom referentnom mješavinom OPC₈. Utvrđeno je da je poroznost mješavine GP₁₀ bila 11,2 % manja od OPC₁₀. Nadalje, 15,4 % manja pozornost je utvrđena u mješavini GP_{12,5} u usporedbi s konvencionalnom referentnom mješavinom OPC_{12,5}. Sličan trend je uočen za dobivene rezultate ispitivanja propusnosti. Kao što je već spomenuto, stvaranje geopolimernog veziva s visokim svojstvom prijanjanja zbog postotka alkalne otopine smanjuje stvaranje šupljina te smanjuje količinu pora u strukturi betona. Što se tiče veličine zrna agregata, korištenjem manjeg zrna ostvaruje se i manja poroznost. Nadalje, uočeno je da se s povećavanjem veličine zrna agregata povećava i poroznost, a to se događa zbog manjeg učinka pakiranja između matrice agregata [32].

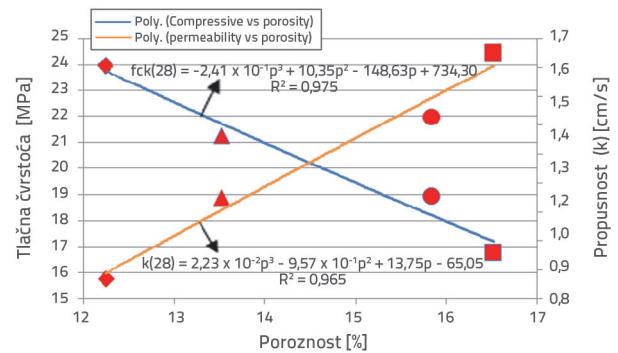
4.6. Odnos između različitih svojstava

Ovdje se opširnije objašnjavaju odnosi između različitih svojstava poput tlačne čvrstoće, propusnosti i poroznosti, jer su ta svojstva usko povezana.

Ovo okvirno istraživanje pomaže u pronalasku optimalne veličine zrna agregata za svaku mješavinu s odgovarajućim vrijednostima tlačne čvrstoće, poroznosti i propusnosti. Prema slici 6., utvrđeno je da je optimalna veličina zrna agregata između 8 mm i 10 mm pa tako veličina zrna agregata od 9,5 mm može biti poželjna za mješavine OPC. S obzirom na veličinu zrna agregata od 9,5 mm, tlačna čvrstoća iznosila je 18,6 MPa s poroznošću od 16,5 % i propusnošću od 1,4 cm/s. Nadalje prema slici 7., optimalno maksimalno zrno agregata za mješavinu GP također iznosi 8 mm i 10 mm kao i za mješavinu OPC, stoga poželjna veličina zrna agregata je 9,5 mm. Za poželjnu veličinu zrna agregata, mješavina GP ima tlačnu čvrstoću od 20,1 MPa s poroznošću od 14,6 % te propusnosti od 1,29 cm/s.



Slika 6. Odnos između "f_{ck}", "p" i "k" - OPC



Slika 7. Odnos između "f_{ck}", "p" i "k" - GP s letećim pepelom

4.7. Otpornost na habanje

Otpornost na habanje vodoravnih površina propusnog betona utvrđena je metodom okretanja diska, pri čemu je uzorak izložen silama trenja trljanjem te brušenjem. Ispitivanje je provedeno na uzorcima propusnom betonu (PC) dimenzija 70,6 mm x 70,6 mm x 40 mm. Otpornost na habanje za mješavine OPC i GP propusnog betona utvrđena je uzorcima starosti 28 dana, a rezultati su prikazani u tablici 5.

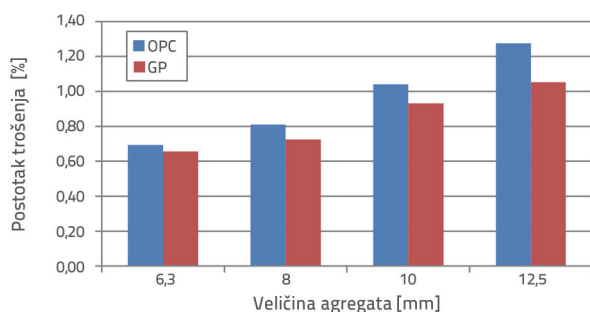
Tablica 5. Otpornost na habanje za mješavine propusnog betona s OPC i GP s letećim pepelom

Veličina zrna agregata [mm]	Otpornost na habanje [%]		Debljina istrošenog materijala [mm]	
	OPC	GP	OPC	GP
6,3	0,694	0,656	0,375	0,318
8	0,810	0,725	0,382	0,350
10	1,040	0,932	0,395	0,372
12,5	1,276	1,052	0,411	0,402

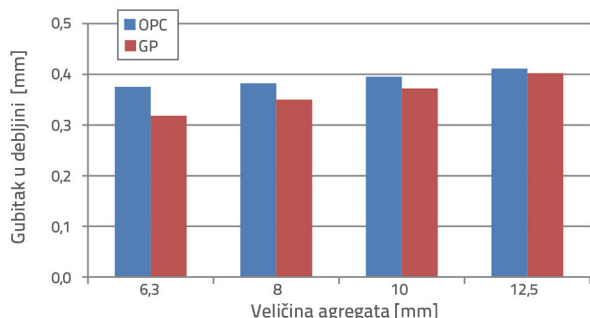
Rezultati ispitivanja pokazuju da uzorci mješavina GP imaju maksimalnu otpornost na habanje u odnosu na konvencionalne referentne mješavine OPC. Otpornost na habanje za mješavine GP_{6,3}, GP₈, GP₁₀ i GP_{12,5} je manja za 5,5 %, 10,5 %, 10,4 % i 17,6 % od konvencionalne referentne mješavine s odgovarajućom veličinom zrna agregata, što je prikazano na slici 10. To se može pripisati činjenici da veći udio letećeg pepela s većim udjelom alkalnih aktivatora u mješavini GP poboljšava otpornost betona na habanje. Također se može zaključiti da je otpornost na habanje svih mješavina veća zbog većih tlačnih čvrstoća. Mnogi znanstvenici su se složili da otpornost na habanje ima izravnu vezu s tlačnom čvrstoćom. Utvrđeno je da povećanje tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem i vlačne čvrstoće na savijanje smanjuju učinak abrazije [33].

U slučaju smanjenja debljine istrošenog materijala, uzorak mješavine GP je pokazao smanjenu debljinu istrošenog materijala spram konvencionalne referentne mješavine betona. Slika 11. grafički prikazuje rezultate smanjenja debljine istrošenog materijala za uzorke mješavina OPC i GP propusnog

betona. Ako se koristi agregat različite veličine zrna, tada će agregat većih dimenzija zrna dovesti do mnogo manjeg habanja i trošenja materijala kako je i grafički prikazano.



Slika 10. Otpornost na habanje za mješavine OPC i GP



Slika 11. Debljina istrošenog materijala za mješavine OPC i GP

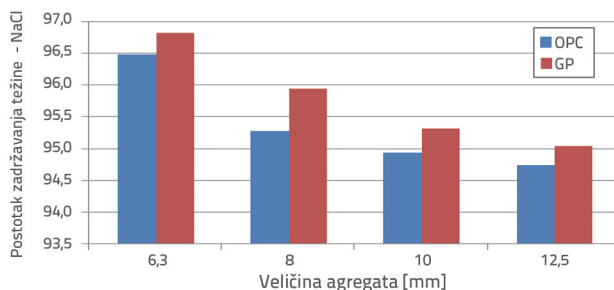
4.8. Otpornost na kemijske supstancije

Parametri kao što su vizualna provjera, postotak gubitka težine i preostale tlačne čvrstoće promatrani su za uzorke koji su uronjeni u NaCl, MgSO₄ i HCl otopine tijekom 180 dana. Rezultat postotka zadržavanja težine naspram agresivnih otopina u vodi, grafički su prikazani na slikama 12. do 14. Tijekom vizualnog promatranja uzoraka uronjenih u NaCl, zamijećena je pojava manjeg iscjetavanja na oštrim rubovima uzoraka GP mješavine i OPC mješavine. To se događa jer izlučivanje kompozita kalcija iz cementa i letećeg pepela reagira s ionima klorida što dovodi do iscjetavanja. Što se tiče promjene boje, nije bilo promjena u boji uzoraka GP mješavina i uzoraka OPC mješavina u usporedbi sa stanjem prije nego što su bili uronjeni u otopinu NaCl.

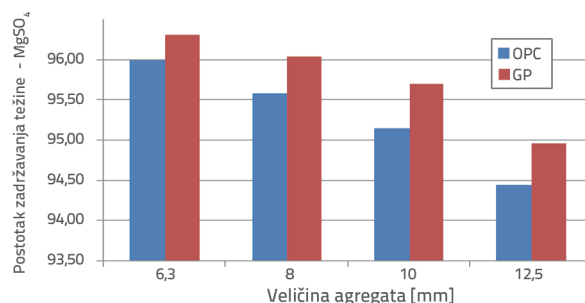
Kada su uzorci uronjeni u MgSO₄ otopinu, uočeno je taloženje bijele soli u OPC mješavini zbog zamjene kalcija magnezija u oblik brucita (magnezijev hidroksid) i magnezijevog hidroksida silikata. Slično tome, u GP mješavini uočava se stvaranje bjelkastog sloja zbog reakcije na taloženje natrijevog hidroksida s ugljičnim dioksidom iz atmosfere koji kasnije stvara bijeli sloj Na₂CO₃.

Uranjanjem uzoraka u kiselinu HCl, uočeno je stvaranje blijedo crvenkastog sloja na površini uzoraka mješavina GP i OPC. To se može pripisati prisutnosti željeza (Fe₂O₃) u letećem pepelu i hidratnoj cementnoj matrici [34, 35].

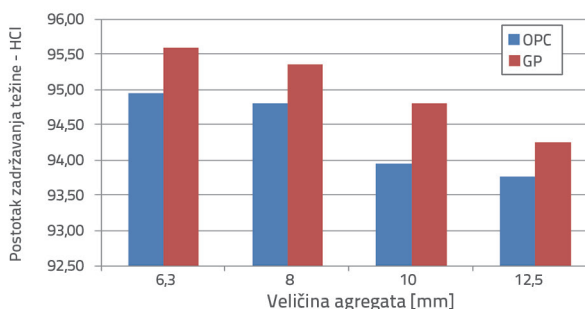
Nakon izlaganja uzorka otopinama NaCl, MgSO₄ i HCl, uzorci GP mješavina su imali relativno manji gubitak težine u usporedbi s konvencionalnim referentnim mješavinama betona u starosti od 180 dana. To se može pripisati činjenici da gusta mikrostruktura GP mješavine ograničava prodiranje klorida, sulfata i kiselina, odnosno prodiranje njihovih iona u beton, što dovodi do boljšeg ponašanja mješavina tijekom prodiranja vode u agresivnom okolišu [36-38].



Slika 12. Postotak zadržavanja vode u odnosu na NaCl



Slika 13. Postotak zadržavanja vode u usporedbi s MgSO₄



Slika 14. Postotak zadržavanja vode u odnosu na HCl

5. Zaključak

Mehanička svojstva kao što su tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje, fizikalna svojstva poput propusnosti, poroznosti i suhe gustoće te svojstva trajnosti kao što su otpornost na habanje i kemijska otpornost utvrđenasiu te se mogu izvesti sljedeći zaključci:

- Utvrđeno je da propusni beton izrađen od GP veziva s letećim pepelom ima veću čvrstoću. To se može pripisati činjenici da prisutnost silicija i aluminija u letećem pepelu ima

- dominantnu ulogu u procesu polimerizacije, što dovodi do formiranja aluminijeva silikatnog gela koji je najodgovorniji za poboljšavanje mehaničkih svojstava.
- Nadalje, među svim veličinama zrna agregata, mješavina pripremljena s agregatom manje veličine zrna pokazala je bolja mehanička svojstva od mješavina s agregatom veće veličine zrna. To se može pripisati činjenici da mješavine s agregatom manjeg zrna pokazuju učinak gušćeg pakiranja od mješavina s agregatima većeg zrna. Štoviše, korištenje agregata manje veličine zrna povećava specifičnu površinu i time povećava površinu za vezivanje radi boljih čvrstoća.
 - Istraživanje odnosa između različitih fizikalnih svojstava potvrdila je da se agregatom veličine zrna 9,5 mm postižu optimalne mješavine GP za propusni betona s letećim pepelom kao i za konvencionalne referentne mješavine OPC za propusni beton.
 - Mješavine OPC i GP propusnog betona pokazale su bolje zadržavanje težine kada su izložene kemijskim otopinama. Stoga, propusni beton spravljen od mješavina OPC i GP s letećim pepelom može se koristiti za poboljšanje kemijske otpornosti u okolišu soli, sulfata i kiselina.
 - Općenito, prema rezultatima ispitivanja, za propusni beton spravljen od mješavina OPC i GP s letećim pepelom preporučuje se uporaba na pločnicima, pješačkim stazama, parkiralištima i prostorima sa srednje gustim prometom.
 - Zaključno, propusni beton spravljen od mješavina GP s letećim pepelom preporučuje se za zeleni projekt jer upotreba industrijskog otpada poput letećeg pepela pomaže u smanjivanju otpadnih materijala i kontroli odlaganja te očuvanju okoliša.

LITERATURA

- [1] Elango, K.S., Revathi, V.: Infiltration and Clogging Characteristics of Pervious Concrete, *Asian Journal of Civil Engineering*, 20 (2019), pp. 1119-1127, <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42107-019-00170-w>.
- [2] Elango, K.S., Revathi, V.: Fal-G Binder Pervious Concrete, *Construction and Building Materials*, 140 (2017), pp. 91-99, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.086>.
- [3] Elango, K.S., Revathi, V.: Properties of PPC Binder Pervious Concrete, *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 7 (2016) 2, pp. 444-448.
- [4] Obla, K.H.: Pervious concrete - An overview, *The Indian Concrete Journal*, 84 (2010), pp. 9-18.
- [5] Vijayarangan, B.: Geopolymer concrete for environmental protection, *The Indian concrete journal*, 88 (2010) 4, pp. 41-59.
- [6] Sata, V., Wongsu, A., Chindaprasirt, P.: Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 42 (2013), pp. 33-39, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012>.
- [7] Kiran, T., Zai, S.A.K., Srikant Reddy, S.: Impact test on geopolymer concrete slabs, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4 (2015) 12, pp. 110-116.
- [8] Luhar, S., Khandelwal, U.: A study on water absorption and sorptivity of geopolymer concrete, *Internal Journal of Civil Engineering*, 2 (2015) 8, pp. 1-10.
- [9] Nyale, S.M., Omotola, O.B., Birch, G.D., Böke, N., Petrik, L.F.: Synthesis and characterization of coal fly ash-based foamed Geopolymer, *Procedia Environmental Sciences*, 18 (2013), pp. 722-730.
- [10] Shuaibu, R.A.: Compressive strength of low calcium fly ash geopolymer concrete - A Review, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4 (2014) 4, pp. 463-472.
- [11] Srinivas, T., Ramana Rao, N.V.: Studies on acid attack resistance of low calcium fly ash slag based geopolymer concrete, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5 (2016) 20, pp. 216-227.
- [12] Tho-in, T., Vanchai, S., Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C.: Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 30 (2012), pp. 366-371, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.028>.
- [13] Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S.: Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution, *Journal of Engineering Science and Technology*, 3 (2010) 1, pp. 36-40.
- [14] Sriravindrarah, R., Wang, N.D.H., Wen Ervin, L.J.: Mix design for pervious recycled aggregate concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6 (2012) 4, pp. 239-246, <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0024-x>
- [15] IS 12269-2013, 'Specification for Grade 53 ordinary portland cement', Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [16] IS 3812 Part 1-2003.: Specification for fly ash for use as pozzolana and admixture, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [17] Alehyen, S., El Achouri, M., Taibi, M.: Characterization, microstructure and properties of fly ash-based geopolymer, *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8 (2017) 5, pp. 1783-1796.
- [18] Nyale, S.M., Omotola, O.B., Birch, G.B., Böke, N., Petrik, L.F.: Synthesis and characterization of coal fly ash-based foamed Geopolymer, *Procedia Environmental Sciences*, 18 (2013), pp. 722-730.
- [19] IS 516-1959.: Methods for test for strength of concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [20] IS 5816-1999.: Splitting tensile strength of concrete method of test, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [21] ASTM C1701/C1701M-09.: Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- [22] Lian, C., Zhuge, Y.: Optimum mix design of enhanced permeable concrete- An Experimental Investigation, *Construction and Building Materials*, 24 (2016) 12, pp. 2664-2671, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>.
- [23] IS 1237-2012.: Cement concrete flooring tiles - Specification, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.

- [24] Shriram, M., Mithanthaya, I.R., Bhavani Shankar, R.: A review on strength and durability studies on geopolymer concrete, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5 (2016) 9, pp. 917-921.
- [25] Sharma, A., Juned, A.: Factors affecting compressive strength of geopolymer concrete - A Review, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4 (2017) 4, pp. 2026-2031.
- [26] Lian, C., Zhuge, Y.: Investigation of the effect of aggregate on the performance of permeable concrete, *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, pp. 505-510, 2010.
- [27] Shaikh, F.U.A.: Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5 (2016), pp. 277-287, <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.05.009>.
- [28] Muthadhi, A., Vanjinathan, V., Durai, D.: Experimental investigations on geo polymer concrete based on class C fly ash, *Indian Journal of Science and Technology*, 9 (2016) 5, pp. 1-5, <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i5/87270>.
- [29] Tho-in, T., Sata, V., Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C.: Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 30 (2012), pp. 366-371, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.028>.
- [30] Jain, A.K., Chouhan, J.S., Goliya, S.S.: Effect of shape and size of aggregate on permeability of pervious concrete, *Journal of Engineering Research and Studies*, 2 (2011) 4, pp. 48-51.
- [31] Mrakovcic, S., Ceh, N., Jugovac, V.: Effect of aggregate grading on pervious concrete properties, *Gradevinar*, 6 (2014) 2, pp. 107-113, <https://doi.org/10.14256/JCE.977.2013>.
- [32] Yang, J., Jiang, G.: Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 3, pp. 381-386.
- [33] Ghashghaei, H.T., Hassani, A.: Investigation the relationship between porosity and permeability coefficient for pervious concrete pavement by statistical modeling, *Material sciences and Applications*, 7 (2016), pp. 101-107, <https://doi.org/10.4236/msa.2016.72010>.
- [34] Tang, S.W., Yao, Y., Andrade, C., Li, Z.J.: Recent durability studies on concrete structure, *Cement and Concrete Research*, 78 (2015), pp. 143-154, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.021>.
- [35] Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visinth, P., Drechsler, M.: Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes, *Construction and Building Materials*, 136 (2017), pp. 374-385, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056>.
- [36] Kolli Venkata, M., Sri Kalyana Rama, J.: An experimental investigation on the behavior of portland cement concrete and geopolymer concrete in acidic environment, *International Journal of Civil Engineering*, 2 (2015) 5, pp. 64-68.
- [37] Vijaya Sekhar Reddy, M., Ramana Reddy, I.V., Madan Mohan Reddy, K., Ravi Kumar, C.M.: Durability aspects of standard concrete, *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 2 (2013) 1, pp. 40-46.
- [38] Srinivas, T., Ramana Rao, N.V.: Studies on acid attack resistance of low calcium fly ash slag based geopolymer concrete, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5 (2016) 20.