

Primljen / Received: 31.1.2019.

Ispravljen / Corrected: 9.5.2019.

Prihvaćen / Accepted: 24.5.2019.

Dostupno online / Available online: 10.6.2020.

Razvoj i optimalizacija temperature njegovanja energetski učinkovite geopolimerne opeke

Autori:



Rupali B. Kejkar, dipl.ing.građ.

Nacionalni institut za tehnologiju, Nagpur, Indija

Odjel za građevinarstvo

rupali.kejkar@gmail.com

Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Swapnil P. Wanjari**, dipl.ing.građ.

Nacionalni institut za tehnologiju, Nagpur, Indija

Odjel za građevinarstvo

swapnil_wanjari@yahoo.co.in

Prethodno priopćenje

Rupali B. Kejkar, Swapnil P. Wanjari

Razvoj i optimalizacija temperature njegovanja energetski učinkovite geopolimerne opeke

U radu prikazan je razvoj održive geopolimerne opeke primjenom maksimalno dopuštenog udjela letećeg pepela i manjom koncentracijom alkalne otopine bez cementa u mješavini, kako bi se u konačnici smanjio negativan utjecaj na okoliš i emisija stakleničkih plinova. Geopolimerne opeke razvijene su primjenom letećeg pepela klase F s korištenjem 2 do 4 M alkalne otopine. Opeka se suši tijekom jednog sata na temperaturi koja varira od 100 do 600 °C. Tlačna čvrstoća takve opeke iznosi 10,2 MPa, a postignuta je u 4 M alkalnoj otopini na temperaturi od 400 °C. Geopolimerna opeka ima kristalnu strukturu i sposobnost toplinske izolacije.

Ključne riječi:

geopolimerna opeka, leteći pepeo, alkalna otopina, temperatura sušenja, fizikalnomehanička svojstva

Research paper

Rupali B. Kejkar, Swapnil P. Wanjari

Development and optimisation of curing temperature of energy-efficient geopolymer bricks

Present study focuses on development of a sustainable geopolymer brick in which the use of fly ash is maximised and the concentration of an alkaline solution without cement is reduced, in order to reduce environmental burden and carbon emissions. The geopolymer bricks were developed using the Class F fly ash with 2 to 4 Molar alkaline solution. The bricks were cured for one hour at temperatures ranging from 100 to 600 °C. The compressive strength of such bricks amounts to 10.2 MPa and was achieved in the 4-Molar alkaline solution at the curing temperature of 400 °C. The geopolymer bricks exhibit crystalline structure and good thermal insulation properties.

Key words:

geopolymer brick, fly ash, alkaline solution, curing temperature, physicochemical properties

Vorherige Mitteilung

Rupali B. Kejkar, Swapnil P. Wanjari

Entwicklung und Optimierung der Pflegetemperatur energieeffizienter Geopolymerziegel

In der Abhandlung wird die Entwicklung nachhaltiger geopolymerer Ziegel durch Anwendung des maximal zulässigen Anteils an Flugasche und einer geringeren Konzentration an alkalischer Lösung ohne Zement in der Mischung vorgestellt, um letztendlich die negativen Auswirkungen auf die Umwelt und die Treibhausgasemissionen zu verringern. Geopolymere Ziegel wurden durch Anwendung von Flugasche der Klasse F mit Verwendung von 2 bis 4 M alkalischer Lösung entwickelt. Die Ziegel werden innerhalb einer Stunde bei einer Temperatur im Bereich von 100 bis 600 °C getrocknet. Die Druckfestigkeit solcher Ziegel beträgt 10,2 Mpa, und wird bei einer 4 M alkalischen Lösung bei einer Temperatur von 400 °C erreicht. Geopolymere Ziegel haben eine Kristallstruktur und die Fähigkeit zur Wärmedämmung.

Schlüsselwörter:

geopolymere Ziegel, Flugasche, alkalische Lösung, Trocknungstemperatur, physikalisch-mechanische Eigenschaften

1. Uvod

U razvijenim zemljama je proizvodnja novih održivih građevnih materijala prioritet u građevinskoj industriji. Maksimalno korištenje industrijskog otpada poput letećeg pepela nužno je kako bi se smanjio negativan utjecaj otpada na okoliš. Tijekom proizvodnje jedne tone portland cementa u okoliš se ispusti 0,95 tona CO₂, dok geopolimerni materijali generiraju manju emisiju CO₂, čak 40 do 80 posto, jer za njihovu proizvodnju ne koristi se kalcijev karbonat [1]. Geopolimerni materijal je anorganski materijal dobiven miješanjem alkalne otopine s materijalima obogaćenima aluminijskim silikatima, poput letećeg pepela. Proizvodi dobiveni procesom polimerizacijom imaju neke prednosti u pogledu veće čvrstoće, bolje toplinske izolacije, veće otpornosti na utjecaj kemijskih otapala i manje skupljanje u usporedbi s običnim betonom [2]. Tlačna čvrstoća mješavine geopolimera poboljšana je udjelom Na₂O prisutnog u alkalnoj otopini koji je potreban za vezanje silicijevog materijala prisutnog u letećem pepelu za postupak polimerizacije [3]. Trenutačno, mnogi proizvođači opeke proizvode različite vrste opeka koje se baziraju na primjeni cementa i pijeska korištenjem letećeg pepela, gline-nih opeka, betonskih opeka, autoklaviranih laganih opeka itd., a u proizvodnji se primjenjuje različite metode njegovanja poput njegovanja uzoraka na pari, njegovanja na temperaturi, njegovanja u autoklavu pod vodenom parom i tlakom. Međutim, komercijalna proizvodnja geopolimerne opeke nije pokrenuta zbog velike povišene koncentracije alkalne otopine, temperature njegovanja i samog trajanja njegovanja uzoraka. Jayasehar i suradnici [4] proizveli su opeke s granuliranom zgustom i 5 M i 12 M otopinom koje su njegovali na pari pri temperaturi od 60 °C tijekom 24 sata. Promatrane čvrstoće tih uzoraka iznosile su 16,11 MPa i 12 MPa. U svom ispitivanju Sivasakthi M. i suradnici [5] zaključili su da silikatna prašina može povećati mehaničku čvrstoću geopolimerne paste, morta i betona do 45 MPa, ako se uzorci suše dva sata na temperaturi od 800°C. Ibrahim i suradnici [6] su zaključili da koncentracija alkalnih akti-

vatora pospješuje svojstva geopolimernih betonskih mješavina, a dobivena tlačna čvrstoća uzorka, koji su njegovani 24 sata na temperaturi od 70 °C u 12 M alkalnoj otopini, iznosila je 20,3 MPa. Okoye i suradnici [7] njegovali su uzorke s dodatkom silikatne prašine u 14 M NaOH otopini na temperaturi od 100 °C, a dobivena tlačna čvrstoća iznosila je 58 MPa. Silva i suradnici [8] su ispitivali CEB opeku koja sadrži 10 % letećeg pepela, 90 % zemlje i otopine geopolimera njegovane na temperaturi od 20 °C. Sukmak i suradnici [9] proizveli su geopolimernu opeku korištenjem letećeg pepela i gline u omjeru 0,3 i 10 M alkalnoj otopini, a uzorke su njegovali na temperaturi od 65 °C tijekom 48 sati. Tlačna čvrstoća se povećavala s temperaturom njegovanja do određene granice, iznad koje je došlo do stvaranja mikropukotina na uzorcima. Iz pregleda literature može se zaključiti da su mnogi autori radili s većim koncentracijama alkalnih otopina (od 5 do 14 M), višom temperaturom (do 800 °C) i duljim vremenom njegovanja uzoraka, primjerice između 24 i 72 sata.

Cilj ovog istraživanja je proizvodnja opeke s minimalnom povišenom koncentracijom alkalne otopine i maksimalnim udjelom letećeg pepela. Istraživanje procjenjuje utjecaj temperature na kojoj se njeguju uzorci geopolimerne opeke, s 80-postotnim udjelom letećeg pepela, 10-postotnim udjelom silikatne prašine i 10-postotnim udjelom gline bez udjela cementa i sitnog agregata. Tijekom ispitivanja određen je utjecaj alkalnih otopina i uvjeta njegovanja uzoraka na mehanička svojstva geopolimerne opeke. Uzorci su njegovani na temperaturama koje su varirale od 100 do 600 °C, a vrijeme njegovanja uzoraka trajalo je jedan sat. Stoga se ovo istraživanje fokusira na proizvodnju energetski učinkovite i ekonomične opeke kako bi se smanjio negativni utjecaj na okoliš.

2. Materijali i proizvodni proces

2.1. Materijali

U ovom su istraživanju geopolimerne opeke pripremljene s dodatkom letećeg pepela klase F, gline, silikatne prašine i alkalne

Tablica 1. Kemijska i fizikalna svojstva letećeg pepela, silikatne prašine i gline

Fizikalna svojstva	Leteći pepeo	Silikatna prašina	Glina
Finoća mliva [m ² /kg]	329	19500	416
Postojanost volumena	0,08		0,095
Specifična težina	2,23	2,15	2,66
Kemijska svojstva	Leteći pepeo	Silikatna prašina	Glina
Silicijev oksid (SiO ₂) u mas. [%]	52,32	95,12	59,2
Željezni oksid i aluminijski oksid u mas. [%]	32,29	0,73	21,1
Kalcijev oksid (CaO) u mas. [%]	5,83	0,24	4,37
Sulfati (SO ₃) u mas. [%]	0,15	0,13	0,3
Magnezijev oksid (MgO) u mas. [%]	1,57	0,53	0,83
(Na ₂ O + K ₂ O) u mas. [%]	0,04	0,41	0,89
Gubitak žarenjem u mas. [%]	4,48	1,9	8,4

otopine (natrijev silikat i natrijev hidroksid). Fizikalna i kemijska svojstva korištenog materijala analizirana su prema indijskoj normi [10]. Leteći pepeo dobiven je od Nacionalne korporacije za toplinsku energiju (NTPC Sipat) u Sipatu, u Indiji.

Fizikalna i kemijska svojstva letećeg pepela, silikatne prašine i gline prikazana su u tablici 1. Svojstva natrijevog hidroksida i natrijevog silikata dana su u tablicama 2 i 3. Alkalna otopina pripravljena je mješanjem NaOH i Na_2SiO_3 u omjeru 1:1,5. Omjer je preuzet iz prijašnjih znanstvenih radova Sukmaka i suradnika [9] te Unnatija i suradnika [11]. Povišena koncentracija otopine određena je koncentracijom NaOH u litri vode.

Tablica 2. Svojstva natrijevog hidroksida

Svojstvo	NaOH
Specifična težina	2,18
Čistoća [%]	96,1

Tablica 3. Svojstva natrijevog silikata

Svojstvo	Na_2SiO_3
Na_2O	13,53
SiO_2	35,24
Voda	44,76
$\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$	2,60
Specifična težina	1,68

3. Proizvodnja geopolimerne opeke

3.1. Postupak proizvodnje geopolimerne opeke

Leteći pepeo i glina sušeni su tijekom 24 sata na temperaturi od 100 °C kako bi se uklonila vlaga iz tih materijala. Pripremljene su alkalne otopine različitih koncentracija. Prije izrade mješavina, prethodno je zagrijana alkalna otopina na temperaturi od 60 do 70 °C kako bi se ubrzala geopolimerizacija.

Potom se suhi materijal pomiješao s unaprijed pripremljenom alkalnom otopinom kako bi se postigla bolja homogenost mješavine. Materijali koji su potrebni za proizvodnju jednog kubičnog metra geopolimerne opeke prikazani su u tablici 4. Omjer alkalne otopine i suhog materijala (L/M) te povišena koncentracija značajni su parametri za povećanje čvrstoće.

Omjer NaOH i Na_2SiO_3 iznosi 1:1,5, a odabran je na temelju prethodnog istraživanja, dok je omjer alkalne otopine i suhog materijala iznosio 1 : 4, [6]. Geopolimerne opeke ispitane su uz pomoć hidraulične preše. Uzorci su imali dimenzije 200 mm × 100 mm × 75 mm, a njegovani su tijekom 24 sata, nakon čega je uklonjen kalup u kojem su pripremljeni. Uzorci su sušeni sat vremena u električnoj pećnici na temperaturama od 100 do 600 °C. Dijagram toka procesa izrade geopolimerne opeke prikazan je na slici 1., a uzorci su prikazani na slici 2.



Slika 2. Proizvodnja geopolimerne opeke



Slika 1. Proces izrade geopolimerne opeke

Tablica 4. Količina mješavine za 1 m³ geopolimerne opeke

Sastav	Leteći pepeo [kg]	Silikatna prašina [kg]	Glina [kg]	Otopina [kg]	Temperatura [°C]
FB1	900	90	20	2 M	100
FB2	900	90	20	2 M	200
FB3	900	90	20	2 M	400
FB4	900	90	20	2 M	600
FB5	900	90	20	3 M	100
FB6	900	90	20	3 M	200
FB7	900	90	20	3 M	400
FB8	900	90	20	3 M	600
FB9	900	90	20	4 M	100
FB10	900	90	20	4 M	200
FB11	900	90	20	4 M	400
FB12 FB12	900	90	20	4 M	600

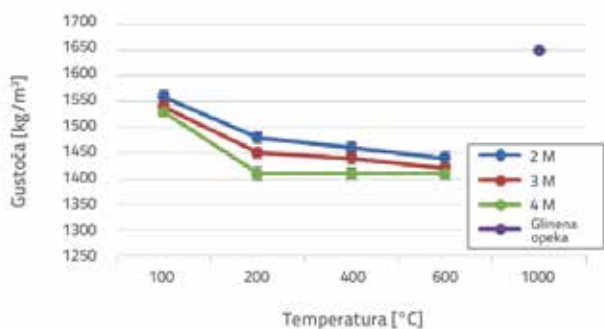
L/M = 0,25 (L - alkalna otopina, M - suhi materijal); Na₂SiO₃/NaOH = 1,5

4. Rezultati i rasprava

Ukupno su pripravljena 64 uzorka dimenzija 200 x 100 x 75 mm, kojima su potom ispitivana sljedeća svojstva: tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, posmična čvrstoća, apsorpcija vode i efluorescencija. Ukupno je testirano devet uzoraka po promatranom svojstvu. Za ispitivanje toplinske provodljivosti ispitano je devet uzoraka promjera 100 mm i debljine 10 mm. Za potrebe SEM i XRD analize pripremljen je jedan uzorak. Svi uzorci sušeni su sat vremena na temperaturi od 100 do 600 °C, te njegovani na sobnoj temperaturi idućih 28 dana, nakon čega je provedeno ispitivanje fizikalno-mehaničkih svojstava uzoraka, koja su predstavljena u idućim dijelovima ovog rada.

4.1. Gustoća geopolimerne opeke

Tijekom ispitivanja određena je gustoća geopolimerne opeke koja je njegovana na različitim temperaturama i u različitim koncentracijama alkalnih otopina. Što je viša povišena koncentracija i što je viša temperatura geopolimerizacije, to je geopolimerna opeka laganija.



Slika 3. Gustoća geopolimerne opeke

Na slici 3. može se vidjeti kako se s povećanjem povišene koncentracije i temperature njegovanja smanjuje gustoća uzorka. Gustoća klasične opeke iznosi 1650 kg/m³. Gustoća geopolimerne opeke manja je u odnosu na konvencionalne opeke

4.2. Tlačna čvrstoća geopolimerne opeke

Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka provedeno je prema indijskoj normi BIS 3495: 1992 dio 1 [12]. Tlačna čvrstoća geopolimerne opeke poboljšava se s procesom geopolimerizacije [13] i određuje čvrstoću i kvalitetu građevnog materijala [14]. Moguće je značajno smanjenje trajanja njegovanja uzoraka povećanjem temperature sušenja uzoraka na 400 °C [4, 8]. Iz različitih ispitivanja može se zaključiti da primjena visoke koncentracije alkalne otopine pridonosi traženom parametru čvrstoće. Nisu provedena istraživanja s nižim vrijednostima koncentracije. Primjerice 1–4 M. Jeyasehar i suradnici [4] su postigli tlačne čvrstoće od 16,11 MPa za uzorke s 12 M alkalne otopine i njegovane 24 sata na temperaturi od 60 °C. Sivasakthi i suradnici [5] postigli su tlačnu čvrstoću od 28 MPa za uzorke koncentracije 12,5 M alkalne otopine te sušene dva sata na temperaturi od 800 °C. Oba ispitivanja imaju gotovo iste koncentracije alkalnih otopina, ali je veća temperatura njegovanja uzoraka (od 60 do 800 °C) i skraćeno je vrijeme njegovanja (s 24 na 2 sata), a tlačna je čvrstoća povećana za 73 posto.

U ovom radu istraživanje je usredotočeno na razvoj geopolimernih opeka s minimalnom koncentracijom alkalne otopine, minimalnim vremenom njegovanja i sušenja uzoraka, uzimajući u obzir kriterije za tlačnu čvrstoću prema indijskim normama (*Indian Standard Code*). Sastav uzorka FB11 postigao je tlačnu čvrstoću od 10,2 MPa, za 4 M alkalnu otopinu, a sušen je jedan sat na temperaturi od 400 °C.

4.2.1. Varijacije u vrijednostima tlačne čvrstoće zbog promjene temperature

Koncentracija alkalne otopine ima značajnu ulogu za postizanje tražene tlačne čvrstoće uzorka. Tijekom ispitivanja promatrana je kombinacija utjecaja koncentracija otopine i temperature sušenja na ubrzanje procesa geopolimerizacije. Na slici 4. vidi se kako povećanje koncentracije utječe na povećanje tlačne čvrstoće. Postotak povećanja čvrstoće je niži što je manja vrijednost koncentracije, a čvrstoća je veća kada je veća koncentracija otopine. Postotak povećanja tlačne čvrstoće s obzirom na temperaturu predočen je izrazima (1) i (2), a odnose se na 4 M i 3 M alkalnu otopinu.

$$CS_3 = 0,77 \cdot T + 1,77 \quad (1)$$

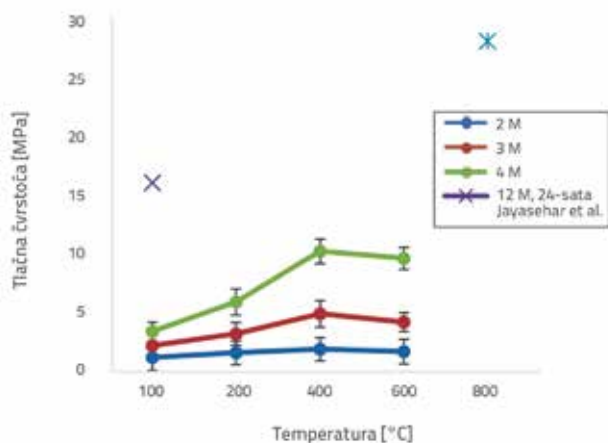
$$CS_4 = 2,29 \cdot T + 1,55 \quad (2)$$

gdje je:

CS - tlačna čvrstoća

T - temperatura.

Na slici 4. može se vidjeti kako se tlačna čvrstoća povećava s povećanjem temperature sušenja uzorka od 100 na 400 °C tijekom jednog sata uz koncentraciju alkalne otopine od 2 do 4 M. Daljnjim povećanjem temperature iznad 400 °C došlo je do pojave mikropukotina na površinskim slojevima opeka. Na temperaturi od 600°C došlo je do smanjenja tlačne čvrstoće zbog razvoja mikropukotina, što je prikazano na slici 5. Oštećena opeka ne smije se primjenjivati za zidanje konstrukcija u skladu s normom IS1077:1992 [14].



Slika 4. Tlačna čvrstoća geopolimerne opeke

U ovom istraživanju, uzorak FB7 pripremljen u 3 M alkalnoj otopini i sušen sat vremena na temperaturi od 400 °C, postigao je čvrstoću od 4,9 MPa. Uzorak FB7 zadovoljio je kriterije minimalne čvrstoće, prema normi IS 1077: 1992 (tj. 3,5 MPa) [15], s nižom koncentracijom alkalne otopine i nižom temperaturom njegovanja među svim ispitanim geo-

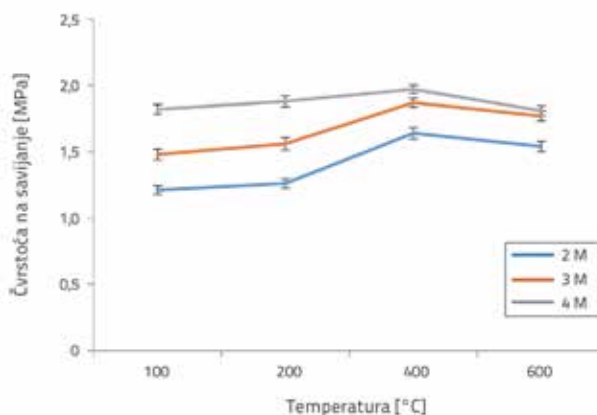
polimernim opekama. Međutim, uzorak FB11, pripremljen u 4 M otopini te njegovan sat vremena na temperaturi od 400 °C, postigao je maksimalnu tlačnu čvrstoću od 10,2 MPa, a uzorak FB7 s minimalnom koncentracijom alkalne otopine zadovoljio je minimalni kriterij čvrstoće prema indijskoj normi.



Slika 5. Pukotine na uzorku koji je sušen sat vremena na temperaturi od 600 °C

4.3. Čvrstoća na savijanje geopolimerne opeke

Čvrstoća na savijanje geopolimerne opeke dobivena je ispitivanjem na jednoosno opterećenje, kao što je prikazano na slici 7. Na slici 6. može se vidjeti da su uzorci s većom koncentracijom otopine, sušeni na temperaturi od 400 °C postigli veće vrijednosti čvrstoće na savijanje.



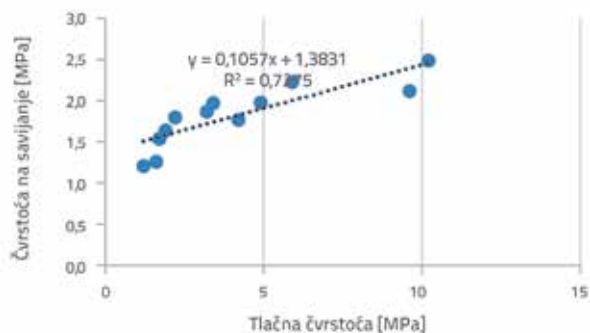
Slika 6. Čvrstoća na savijanje geopolimerne opeke

Povećanje temperature sušenja uzorka iznad 400 °C rezultiralo je stvaranjem pukotina geopolimernih opeka zbog pregrijavanja. Čvrstoća na savijanje uzorka FB7 iznosila je 1,87 MPa, a za uzorak FB11 bila je 1,97 MPa. Zadovoljen je kriterij minimalne dopuštene čvrstoće na savijanje (70 kg/cm²) (kriterij za drugu klasu opeka prema indijskoj normi IS 4860:1996 [16]. Odnos tlačne

čvrstoće i čvrstoće na savijanje prikazan je na slici 8. Tlačna čvrstoća je prikazana na osi X, a čvrstoća na savijanje na osi Y. Presijecanje je bilo u točki 1,3831, a nagib pravca je iznosio 0,1057. Čvrstoća na savijanje geopolimernih opeka povećavala se s povećanjem tlačne čvrstoće. Čvrstoća na savijanje konvencionalne opeke iznosila je 0,86 MPa, a geopolimerna opeka imala je veću čvrstoću na savijanje.



Slika 7. Ispitivanje čvrstoće na savijanje uzorka



Slika 8. Odnos između tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje

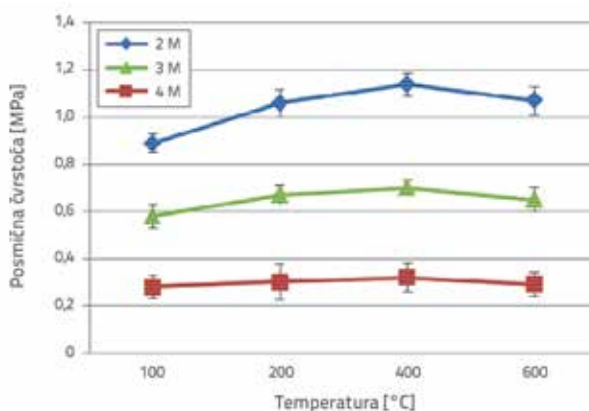
4.4. Posmična čvrstoća

Zidane konstrukcije često se ispituju na različita opterećenja kao što je opterećenje vjetrom i seizmičko djelovanje, pod različitim kutovima, a to može uzrokovati smicanje zidova. Na posmičnu čvrstoću zida utječu svojstva opeke i morta, površinska tekstura opeke, poroznost i sl. [17]. Ispitivanje posmične čvrstoće geopolimerne opeke provedeno je prema normi [18]. Slika 9. prikazuje otkazivanje uzorka od geopolimernih opeka tijekom ispitivanja nastalo na sučelju opeke i morta. Na slici 10. može se vidjeti kako je posmična čvrstoća uzoraka geopolimerne opeke iznosila 0,44 MPa i 0,38 MPa za FB11 (4 M, 400°C) te FB7 (3 M, 400°C). Iz prethodnog ispitivanja, koje je proveo C. Christy sa suradnicima, posmična čvrstoća za opeke s letećim pepelom iz ugljena iznosila je 0,3 MPa, [19], a za opeke s glinom i 5 % cementom

iznosila 0,12 MPa [17]. Zapaženo je da geopolimerne opeke imaju veću posmičnu čvrstoću od konvencionalnih opeka s letećim pepelom i glinenih opeka.



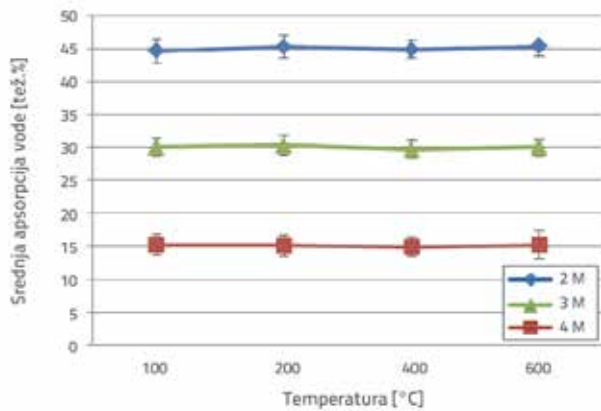
Slika 9. Ispitivanje posmične čvrstoće uzorka



Slika 10. Posmična čvrstoća uzoraka geopolimerne opeke

4.5. Kapilarna apsorpcija

Ispitivanje geopolimerne opeke na apsorpciju vode provedeno je prema normi IS 3495:1992 [20]. Na slici 11. može se vidjeti kako apsorpcija vode uzoraka geopolimerne opeke iznosi između 14 i 16 posto po masi te zadovoljava kriterij koji je zadan u Indijskoj normi 1077:1992 (prema tom kriteriju, apsorpcija vode mora biti manja od 20 %) [14]. Zaključeno je da je apsorpcija konstantna, bez obzira na promjenu temperature. S druge strane, apsorpcija je povećana u uzorcima s povišenom koncentracijom, zbog formiranja amorfne NaSH matrice.



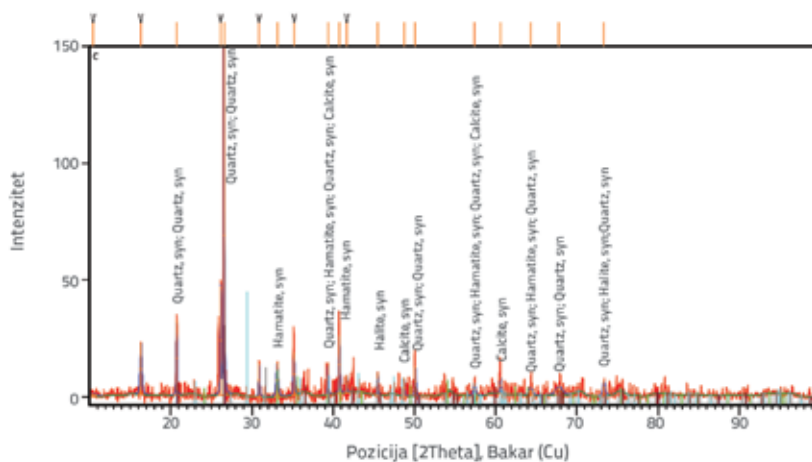
Slika 11. Apsorpcija vode geopolimerne opeke

4.6. Rendgenska analiza uzoraka geopolimerne opeke

XRD analiza provedena je na uzorcima geopolimerne opeke koji su sušeni na temperaturi od 400 °C. Rezultati uzoraka sa 3 M alkalnom otopinom (primjerice FB7) su prikazani na slici 12. Maksimalno za 2θ područje je na 26,45, a visina je 55,60 za stopostotni relativni intenzitet. Kristalnost uzorka određena je XRD analizom, a temelji se na pretpostavci da široki kut dolazi zbog amorfne faze, a oštri kut zbog kristalne faze [21, 22]. Rendgenska analiza uzoraka pokazuje prisutnost kvarca, hematita, kalcita i različitih minerala gline. Oštri kut u XRD difraktogramu pokazao je da je geopolimerna opeka kristalne strukture.

4.7. Analiza geopolimerne opeke skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM)

Slika 13. prikazuje SEM i EDS (energetska disperzivna rendgenska spektroskopija) analizu uzoraka geopolimerne opeke. SEM slike prikazuju karakterističnu morfologiju [5]. SEM slike ne pokazuju pukotine na uzorcima koji su sušeni na temperaturi od 400 °C, što je vjerojatno zbog popunjavanja strukture letećim

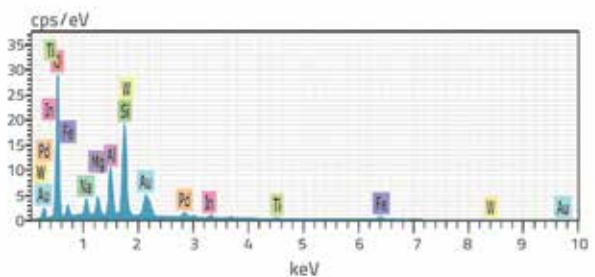


Slika 12. XRD analiza uzoraka geopolimerne opeke

pepelom i silikatnom prašinom. Silikatna prašina ima glavnu ulogu u stvaranju aluminijsva silikatnog gela koji se stvara povećanjem omjera Si/Al.



Slika 13. Mikroskopska snimka geopolimerne opeke



Slika 14. Energetsko-disperzijska rendgenska spektroskopija geopolimerne opeke

Ne preporučuje se njegovati uzorke na temperaturama većim od 400 °C, te zbog toga SEM i EDS analize nisu provedene na uzorcima koji su sušeni na većim temperaturama. Nakon 28 dana njegovanja uzorka, može se primijetiti formiranje NaSH

matrice, formacija gustog aluminijsva silikatnog gela i nereaktivne čestica letećeg pepela. Geopolimerna matrica formirana je reakcijom silicija i aluminijsva prisutnih u letećem pepelu i silikatnoj prašini. Leteći pepeo koji nije reagirao može s vremenom poboljšati tlačnu čvrstoću i djelovati kao punilo smanjujući poroznost. Na slici 14. prikazana je energetsko-disperzijska rendgenska spektroskopija geopolimerne opeke. Geopolimerni materijal sadrži najviše elemenata silicija, aluminijsva, natrijsva i kisika, te kalcija u tragovima. Omjer silicija i aluminijsva bio je 3,1, a izračunan je primjenom podataka EDS analize.

4.8. Eflorescencija geopolimerne opeke

Ispitivanje eflorescencija geopolimerne opeke provedeno je prema normi IS 3495: 1992 (treći dio) [23]. Tijekom ispitivanja na površini uzoraka opeke pojavio se vrlo tanak sloj soli, koji je zauzeo manje od 10 posto ukupne vanjske površine uzorka. Tijekom provedenog istraživanja, zaključeno je da je eflorescencija geopolimerne opeke umjerena, prema normi 1077: 1992 [15].

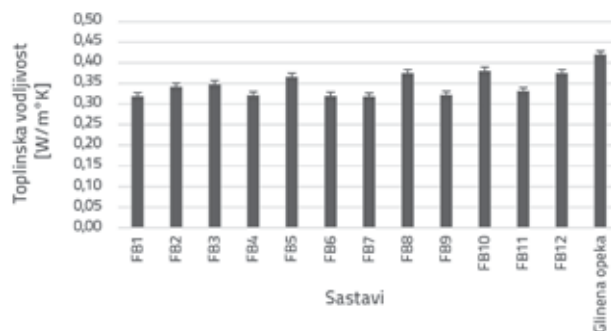
4.9. Analiza toplinske provodljivosti geopolimerne opeke

Ispitivanje toplinske vodljivosti provedeno je na geopolimernom materijalu metodom dviju vrućih ploča prema normi IS 3346: 1980 [24]. Analiziran je tok topline koji prolazi kroz dvije referentne metalne ploče između kojih se nalazi uzorak opeke debljine 10 mm i promjera 100 mm, kao što je prikazano na slici 15.



Slika 15. Toplinska provodljivost geopolimerne opeke

Na slici 16. može se vidjeti kako toplinska provodljivost uzoraka geopolimerne opeke varira između 0,42 i 0,46 W/mK. Toplinska provodljivost geopolimernog betona od letećeg pepela iz prethodnih istraživanja iznosila je 0,43–0,45 W/mK [25] za betonski blok 1–1,7 W/mK [26] i za konvencionalne opeke od gline 0,4–0,5 W/mK [27]. Može se zaključiti da geopolimerna opeka ima bolja toplinska svojstva od konvencionalne opeke.



Slika 16. Analiza toplinske provodljivosti geopolimerne opeke

4.10. Ugrađena energija

Kako bi se smanjio negativan utjecaj na okoliš, analizirana je ugrađena energija tijekom proizvodnje geopolimerne opeke na uzorku FB7, kao što je prikazano u tablici 5. Prethodna ispitivanja pokazala su da je ugrađena energija letećeg pepela smanjena za 50 posto u odnosu na konvencionalni beton [28]. Ugrađena energija za materijal iznosi 6,56 MJ/kg za NaOH otopinu, odnosno 5,37 MJ/kg za Na₂SiO₃ otopinu [29]. Za jednu opeku korišteno je 0,06 kg NaOH i 0,09 kg Na₂SiO₃. Uzorci su sušeni sat vremena u električnoj pećnici. Ugrađena energija električne pećnice iznosi 3,6 MJ/MWh [30]. Ugrađena energija u jednom uzorku opeke (uzorak FB7) iznosila je 3,89 MJ/opeki, što je manja vrijednost od ugrađene energije u konvencionalnoj glinenoj opeki (6,25 MJ/opeki). Ugrađena energija u konvencionalnoj

Tablica 5. Ugrađena energija geopolimerne opeke i konvencionalne glinene opeke

Materijal	Jedinica	Potrebni materijal		Ugrađena energija (MJ/opeka)	
		Geopolimerna opeka	Glinena opeka	Geopolimerna opeka	Glinena opeka
Leteći pepeo	0 [MJ/kg]	1,6	0	0	0
Glina	0,1 [MJ/kg]	0	2,5	0	0,25
Silikatna prašina	0,1 [MJ/kg]	0,2	0	0,02	0
NaOH	6,56 [MJ/kg] [29]	0,06	0	0,39	0
Na ₂ SiO ₃	5,37 [MJ/kg] [29]	0,09	0	0,48	0
Zagrijavanje	3,6 MJ/MW-h	Sušenje sat vremena na 400 °C	Sušenje pet sati na 1100 °C	3	6
Ukupna ugrađena energija (MJ/opeka)				3,89	6,25

Tablica 6. Analiza troškova geopolimerne opeke od geopolimera i glinene opeke

Materijal	Jedinična cijena materijala/kg [EUR]	Materijal za 1 m ³ opeke [kg]		Trošak za 1 m ³ opeke [EUR]	
		Geopolimerna opeka	Glinena opeka	Geopolimerna opeka	Glinena opeka
Leteći pepeo	0,0012	9,6	0	0,96	0
Glina	0,0024	1,2	16,5	0,24	3,3
Silikatna prašina	0,0036	1,2	0	3,6	0
NaOH	0,0336	0,0024	0	6,72	0
Na ₂ SiO ₃	0,0264	0,0036	0	7,92	0
Zagrijavanje	3,5 MJ/MW h	Sušenje jedan sat na 400 °C	Sušenje pet sati na 1100 °C	5,04	25,2
Ukupni trošak za 1 m³ opeke				24,48	28,5

opeki iz prethodnog istraživanja bila je 7,02 MJ/opeki [30]. Na temelju tih podataka može se zaključiti da je geopolimerna opeka energetski učinkovitija od konvencionalne glinene opeke.

4.11. Ekonomska analiza geopolimerne opeke

Jednostavna ekonomska analiza za geopolimernu opeku dokazala je da je trošak izrade jednog kubnog metra takve vrste opeke približno 16,4 % manji u usporedbi s konvencionalnom opekrom. Trošak izrade optimiziranog sastava geopolimerne opeke izračunan je na način prikazan u tablici 6., uključujući i troškove prijevoza. Trošak izrade kubnog metra geopolimerne opeke iznosio je 24,48 EUR, a za konvencionalnu opeku trošak je bio 28,5 EUR.

5. Zaključak

Tijekom ovog istraživanja zaključeno je da se na uzorcima koji se suše sat vremena na temperaturama većim od 400 °C stvaraju mikropukotine na površinskom sloju, pa se takve opeke ne smiju upotrebljavati za gradnju prema normi IS1077:1993. Ispitivanje je pokazalo da je optimalna temperatura sušenja uzoraka 400 °C, tijekom jednog sata.

Tlačna čvrstoća geopolimerne opeke proporcionalna je povišenoj koncentraciji alkalne otopine, primjerice s

povećanjem koncentracije, povećava se i čvrstoća. Uzorak FB7 postigao je čvrstoću od 4,9 MPa, a najmanja je dopuštena čvrstoća 3,5 MPa prema normi IS 1077:1992, za uzroke s 3 M alkalnom otopinom sušene sat vremena na temperaturi od 400 °C, a ta se mješavina pokazala najpovoljnijom, od svih ispitanih.

Uzorak FB7 ima povećanu čvrstoću na savijanje u odnosu na ostale ispitane mješavine, a XRD analiza pokazala je da geopolimerna opeka ima kristalnu strukturu. Ispitivanje je pokazalo da takve vrste opeke imaju vrlo dobra toplinska svojstva u odnosu na konvencionalne opeke, pa se mogu koristiti i kao toplinski izolator.

Geopolimerne opeke pripremljene su sa smanjenom visokom koncentracijom alkalne otopine, primjenom letećeg pepela (80 posto), bez primjene cementa i agregata kako bi se smanjio negativan utjecaj na okoliš. Vrijeme sušenja opeke smanjeno je na jedan sat kako bi se ubrzao proces proizvodnja u građevinskoj industriji.

Proizvodnja geopolimerne opeke zahtijeva manju ugrađenu energiju nego proizvodnja konvencionalne opeke. Ekonomska analiza pokazala je da je proizvodnja geopolimerne opeke 16,42 posto jeftinija od proizvodnje konvencionalne opeke. Geopolimerne opeke kao građevni materijal predstavljaju održivo, energetski učinkovito i ekonomično rješenje.

LITERATURA

- [1] Davidovits, J.: Geopolymer cement, *Geopolymer Sciences and Cement*, Technical Paper 21, (2013), pp. 1 -11.
- [2] Hamdi, N., Messaoud, I.B., Srasra, E.: Production of geopolymer binders using clay minerals and industrial wastes, *Comptes Rendus Chimie*, (2018), <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.11.010>.
- [3] Tuyan, M., Andiç-Çakir, O., Ramyar, K.: Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer, *Compos. Part B*, 135 (2018), pp. 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.013>.
- [4] Jeyasehar, C.A., Saravanan, G., Ramakrishnan, A.K., Kandasamy, S., Strength and durability studies on fly ash based geopolymer bricks, *Asian Journal of Civil Engineering*, 14 (2013), pp. 797-808
- [5] Sivasakthi, M., Jeyalakshmi, R., Rajamane, N.P., Jose, R.: Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 499 (2018), pp. 117-130, <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.027>

- [6] Mohammed, B.S., Liew, M.S., Alaloul, W. S., Al-Fakih, A., Ibrahim, W., Adamu, M.: Development of rubberized geopolymer interlocking bricks, *Case Studies in Construction Materials*, 8 (2018), pp. 401-408, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.007>.
- [7] Okoye, F.N., Prakash, S., Singh, N.B.: Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume, *Journal of Cleaner Production*, 149 (2017), pp. 1062-1067, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.176>.
- [8] Silva, R.A., Soares, E., Oliveira, D. V., Miranda, T., Cristelo, N.M., Leitão, D.: Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation, *Construction Building Materials*, 75 (2015), pp. 349-358, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.038>.
- [9] Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, S.L.: Strength development in clay-fly ash geopolymer, *Construction Building Materials*, 40 (2013), pp. 566-574, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.015>.
- [10] Bureau of Indian Standard: Indian Standard 1727: 1967 Methods of Test for Pozzolanic Materials, 1967.
- [11] Agrawal, U.S., Wanjari, S.P., Naresh, D.N.: Characteristic study of geopolymer fly ash sand as a replacement to natural river sand, *Construction Building Materials*, 150 (2017), pp. 681-688, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.029>.
- [12] Bureau of Indian Standards: Indian Standard: IS 3495 Part-I: Methods of tests of burnt clay building bricks - determination of compressive strength, 1992.
- [13] Amin, S.K., El-Sherbiny, S.A., El-Magd, A.A.M.A., Belal, A., Abadir, M.F.: Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste, *Construction Building Materials*, 157 (2017), pp. 610-620, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.052>.
- [14] Bureau of Indian Standard: Common Burnt Clay Building Bricks, IS1077, 1992.
- [15] Bureau of Indian Standards (BIS), Indian Standard: 1077: 1992 Common Burnt Clay Building Bricks- Specification, 1997.
- [16] Bureau of India, Standards: Indian Standard 4860:1968 acid-resistant bricks, 1994.
- [17] Reddy, B.V., Vyas, C.V.U.: Influence of shear bond strength on compressive strength and stress-strain characteristics of masonry, *Materials and Structures*, 41 (2008), pp. 1697-1712, <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9358-x>.
- [18] ASTM: Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms, 1 (2012), pp. 1-10, <https://doi.org/10.1520/C1314-11A.2>.
- [19] Freeda, R.M.S., Christy, D.T.C.: Bond strength of brick masonry, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 3 (2012), pp. 369-372.
- [20] Bureau of Indian Standards: Indian Standard 3495: 1992 Part-II: Methods of tests of burnt clay building bricks - determination of water absorption, 1992.
- [21] Sedira, N., Castro-Gomes, J., Magrinho, M.: Red clay brick and tungsten mining waste-based alkali-activated binder: Microstructural and mechanical properties, *Construction Building Materials*, 190 (2018), pp. 1034-1048, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.153>.
- [22] Ahmad, S., Iqbal, Y., Ghani, F.: Phase and microstructure of brick clay soil and Fired Clay Bricks from some areas Peshawar Pakistan Phase and Microstructure of Brick Clay Soil and Fired Clay Bricks, *Journal of Pakistan Materials Society*, 2 (2008), pp. 33-39.
- [23] Bureau of Indian Standards: Indian Standard 3495: 1992 Part-III: Methods of tests of burnt clay building bricks - determination of efflorescence, 1992.
- [24] Bureau of Indian Standards: Indian Standard 3340 - Method for the Determination of Thermal Conductivity of Thermal Insulation Materials, 1980.
- [25] Ampol Wongsu, P.C., Zaetang, Y., Sata, V.: Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregate, *Construction Building Materials*, 111 (2016), pp. 637-643.
- [26] Hashemi, A., Cruickshank, H., Cheshmehzangi, A., Environmental Impacts and Embodied Energy of Construction Methods and Materials in Low-Income Tropical Housing, *Sustainability*, 7 (2015), pp. 7866-7883, <https://doi.org/10.3390/su7067866>.
- [27] Dondi, G., Mazzanti, M., Principi, F., Raimondo, P., Zanarini, M.: Thermal Conductivity of Clay Bricks, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16 (2004), pp. 287-287, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:3\(287\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(287)).
- [28] Yao, Y., Li, Y., Liu, X., Sun, H.: Performance and energy calculation on a green cementitious material composed of coal refuse, *Clean Technology Environment Policy*, 16 (2014), pp. 281-290, <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0620-8>.
- [29] Sandhya Anvekar, R.M.: An Economic and Embodied Energy Comparison of Geo-polymer, Blended Cement and Traditional Concretes, *Journal of Civil Engineering and Technology Research*, 1 (2014), pp. 33-40.
- [30] Debnath, A., Singh, S.V., Singh, Y.P.: Comparative assessment of energy requirements for different types of residential buildings in India, *Energy and Buildings*, 23 (1995), pp. 141-146, [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00939-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00939-6).