

GEPOLIMERI – DOBIJANJE, KARAKTERISTIKE I PRIMJENA

GEPOLYMERS – OBTAINING, CHARACTERISTICS AND APPLICATION

**Nadira Bušatlić, vanredni profesor, Ilhan Bušatlić, redovni profesor, Adnan
Mujkanović, redovni profesor, Marina Jovanović, redovni profesor**
Fakultet inženjerstva i prirodnih nauka, Univerzitet u Zenici
Travnička cesta 1, Zenica

Amel Zahirović, viši istraživač saradnik
Institut „Kemal Kapetanović“, Univerzitet u Zenici
Travnička cesta 7, Zenica

REZIME

Vezivna sredstva su, danas, ključni materijali u građevinarstvu i građevinskoj industriji, a industrija portland cementa predstavlja industrijsku granu bez koje se ne može zamisliti razvoj ljudske civilizacije. Cement je jedan od najpopularnijih i široko primjenjivih građevinskih materijala.

U toku proizvodnje cementa, pečenje krečnjaka uzrokuje emisiju ugljen dioksida u atmosferu, što iznosi 5 % od ukupne emisije CO₂. Postoje dva izvora emisije ugljen dioksida uslijed proizvodnje cementa: sagorijevanje fosilnih goriva za pokretanje rotacione peći je najveći izvor, a drugi je hemijski proces pečenja krečnjaka. Prilikom proizvodnje 1 tone cementa, u atmosferu se emituje približno 1 tona CO₂. Ako uzmemo da je svjetska proizvodnja cementa oko 4,18 milijardi tona, onda se vidi da se prilikom proizvodnje cementa u atmosferu ispusti ista količina CO₂. Koncept “zelenog cementa” razvijen je kao zamjena za trenutne metode proizvodnje cementa. Zeleni cement koristi manje prirodnih sirovina, energije i vode i pojavljuje se kao zamjena za portland cement. Pod zelenim cementom se podrazumijeva cement koji se proizvodi uz što manju potrošnju prirodnih sirovina i fosilnih goriva, a uz maksimalno korištenje tehnogenih otpadnih materijala kao sirovine za proizvodnju cementa i alternativnih goriva umjesto fosilnih goriva. Kontinuirano se vrše istraživanja za razvoj inovativnih metoda proizvodnje zelenog cementa u cilju smanjenja, i čak eliminisanja, emisije gasova koji pospješuju efekat staklene bašte i drugih toksičnih zagađujućih materija. U svakom slučaju, kako iz ekoloških tako i iz ekonomskih razloga, treba pribjegavati što je moguće većoj upotrebi ovih otpadnih materijala što za direktnu posljedicu ima manju eksploataciju prirodnih sirovina.

U ovom radu je dat pregled načina dobijanja, vrste, hemijskog mehanizma vezivanja i kvaliteta zelenog cementa, tzv. geopolimera. Primjena i razvoj geopolimera kao alternative klasičnim cementima sve je izglednija zbog niza problema vezanih za cementnu industriju. Osnovni problem je ekološkog karaktera zbog emisije CO₂, o kojoj je već naprijed rečeno. Nadalje, za proizvodnju cementa odnosno, sintezu klinker minerala (tzv. cementnog klinkera) koja se odvija pri temperaturi od oko 1450 °C, potrebna je velika količina energije, dok sinteza geopolimera „štedi energiju“ budući da se koriste otpadni materijali i prirodne sirovine koje ne zahtijevaju termičku obradu, a sam proces geopolimerizacije se odvija od 60 do 90 °C.

Ključne riječi: geopolimeri, zeleni cement, emisija CO₂, zaštita životne sredine

SUMMARY

Today, binders are key materials in the construction and building industry, and the Portland cement industry is an industry without which the development of human civilization cannot be imagined. Cement is one of the most popular and widely used construction materials.

During the production of cement, the burning of limestone causes the emission of carbon dioxide into the atmosphere, which amounts to 5% of the total CO₂ emissions. There are two sources of carbon dioxide emissions from cement production: the combustion of fossil fuels to power the rotary kiln is the largest source, and the other is the chemical process of burning limestone. When producing 1 ton of cement, approximately 1 ton of CO₂ is emitted into the atmosphere. If we assume that the world production of cement is about 4.18 billion tons, then it can be seen that the same amount of CO₂ is released into the atmosphere during the production of cement. The concept of "green cement" was developed as an alternative to current cement production methods. Green cement uses less natural raw materials, energy and water and appears as a replacement for Portland cement. Green cement refers to cement that is produced with the lowest possible consumption of natural raw materials and fossil fuels, and with the maximum use of technogenic waste materials as raw materials for cement production and alternative fuels instead of fossil fuels. Research is continuously being conducted to develop innovative methods for the production of green cement in order to reduce, and even eliminate, emissions of gases that enhance the greenhouse effect and other toxic pollutants. In any case, for both environmental and economic reasons, the use of these waste materials should be as large as possible, which directly results in less exploitation of natural raw materials.

This paper provides an overview of the method of production, type, chemical bonding mechanism and quality of green cement, so-called geopolymers. The application and development of geopolymers as an alternative to classic cements is increasingly likely due to a number of problems related to the cement industry. The main problem is of an environmental nature due to CO₂ emissions, which has already been mentioned above. Furthermore, the production of cement, or rather the synthesis of clinker minerals (so-called cement clinker), which takes place at a temperature of around 1450 °C, requires a large amount of energy, while the synthesis of geopolymers "saves energy" since waste materials and natural raw materials that do not require thermal treatment are used, and the geopolymerization process itself takes place from 60 to 90 °C.

Keywords: geopolymers, green cement, CO₂ emissions, environmental protection

1. UVOD

Vezivna sredstva su, danas, ključni materijali u građevinarstvu i građevinskoj industriji, a industrija portland cementa predstavlja industrijsku granu bez koje se ne može zamisliti razvoj ljudske civilizacije.

Savremeno građevinarstvo u velikoj mjeri zavisi od upotrebe cementa kao osnovnog vezivnog materijala. Međutim, proizvodnja portland cementa je energetske intenzivan proces, pri kojem se oslobađaju velike količine ugljen-dioksida (CO₂), što direktno doprinosi globalnom zagrijavanju [8]. Tokom proizvodnje jedne tone cementa u atmosferu se emituje gotovo jednaka količina CO₂, što se, s obzirom na godišnju svjetsku proizvodnju od više milijardi tona, pretvara u ogroman ekološki problem [2]. Ako uzmemo da je svjetska proizvodnja cementa oko 4,18 milijardi tona, onda se vidi da se prilikom proizvodnje cementa u atmosferu ispusti ista količina CO₂ [5].

Razvoj ekološki prihvatljivih materijala, poznatih kao „zeleni cementi“, predstavlja jedno od ključnih rješenja za smanjenje zagađenja. U tom kontekstu, **geopolimeri** su se pokazali kao

izuzetno obećavajuća alternativa portland cementu, jer se proizvode pri nižim temperaturama i koriste otpadne materijale kao sirovine (Zhang et al., 2022).

2. EKOLOŠKI IZAZOVI CEMENTNE INDUSTRIJE

Industrija cementa godišnje proizvede oko 4 milijarde tona cementa, uz prosječnu emisiju od oko 5 % ukupnih globalnih emisija CO₂ [4,5]. Najveći dio emisija potiče iz dva izvora:

1. **hemijska dekarbonizacija krečnjaka** ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), i
2. **sagorijevanje fosilnih goriva** za postizanje temperatura od oko 1450 °C u rotacionim pećima.

Osim emisije CO₂, proizvodnja cementa zahtijeva velike količine energije, vode i prirodnih sirovina, što dodatno opterećuje životnu sredinu. Zbog toga je intenzivno istraživanje održivih alternativa, poput geopolimera, postalo prioritet u građevinskoj industriji [3,5].

3. POJAM I ISTORIJAT GEOPOLIMERA

Termin **geopolimer** uveo je francuski naučnik Joseph Davidovits 1978. godine, opisujući materijale koji nastaju **alkalnom aktivacijom aluminijum-silikatnih komponenti** [2]. Za razliku od cementa, koji nastaje hidratacijom klinkera, geopolimeri se formiraju procesom polikondenzacije u alkalnoj sredini, obično na temperaturama od 60–90 °C.

Sirovine za sintezu geopolimera su prirodni i otpadni materijali bogati silicijem (Si) i aluminijem (Al), kao što su **leteći pepeo, visokopećna troska, metakaolin i vulkanski pepeo** [10]. Njihova upotreba omogućava smanjenje količine otpada i očuvanje prirodnih resursa.

4. MEHANIZAM GEOPOLIMERIZACIJE

Proces formiranja geopolimera obuhvata tri glavna koraka:

1. **Rastvaranje** aluminijum-silikatnih struktura u alkalnom rastvoru (NaOH, KOH),
2. **Polikondenzaciju** nastalih monomera u trodimenzionalnu mrežu (Si–O–Al–O–Si),
3. **Očvršćavanje** pri umjerenim temperaturama (60–90 °C) [9].

Odnos između NaOH i natrijum-silikata (Na₂SiO₃) te molarni omjer Si/Al presudno utiču na krajnja svojstva materijala. Optimalni omjer Si/Al između 1,5 i 2,0 daje najveću mehaničku čvrstoću [1].

Jedan od modela geopolimerizacije, kojeg su predložili Duxson i saradnici, prikazan je na slici 1.



Slika 1. Duxsonov model geopolimerizacije [12]

Procesi koji su prikazani na slici, uglavnom se odvijaju istovremeno. Aluminatni i silikatni produkti nastaju otapanjem čvrstog alumosilikatnog materijala proces alkalne hidrolize uz dodatak vode. Nakon otapanja, dolazi do stvaranja alumosilikatnih produkata, te se formira smjesa silikata, aluminata i alumosilikata. Pri visokom pH odvija se brzo otapanje alumosilikata i pri tom se stvara prezasićena alumosilikatna otopina, što dovodi do stvaranja geopolimernog gela. Pri ovom procesu oslobađa se voda. Nakon procesa geliranja, sistem se dalje preuređuje i reorganizuje uz nastanak alumosilikatnih struktura karakterističnih za geopolimere [12].

5. SVOJSTVA GEOPOLIMERA

Geopolimeri pokazuju **visoku pritisnu i savojnu čvrstoću**, odličnu **otpornost na hemijsku koroziju, vatrootpornost i dugotrajnu stabilnost**. U poređenju sa portland cementom, imaju veću otpornost na kiseline i sulfatne rastvore.

Njihova mikrostruktura je gušća, što smanjuje propusnost vode i povećava otpornost na smrzavanje i odmrzavanje. Osim toga, geopolimeri pokazuju izuzetnu **otpornost na visoke temperature** do 1000 °C, što ih čini pogodnim za primjenu u ekstremnim uslovima.

6. PRIMJENA GEOPOLIMERA

Zahvaljujući povoljnim svojstvima, geopolimeri nalaze široku primjenu:

- **U građevinarstvu:** kao betoni, malteri, blokovi i prefabrikovani elementi;
- **U zaštiti okoliša:** za imobilizaciju teških metala i radioaktivnog otpada [7];
- **U visokotehnološkim oblastima:** kao vatrostalni materijali i kompoziti za avionsku i automobilske industrije [11].

Primjena geopolimera direktno doprinosi smanjenju količine industrijskog otpada i zagađenja zraka, što ih čini značajnim elementom cirkularne ekonomije.

7. EKOLOŠKI I EKONOMSKI ASPEKTI

Prednost geopolimera ogleda se u nižim emisijama CO₂, manjoj potrošnji energije i većem iskorištenju otpada. Prema studijama, **proizvodnja geopolimera može smanjiti emisiju CO₂ i do 80 %** u odnosu na portland cement [3].

Iako je njihova komercijalna primjena još uvijek ograničena zbog troškova alkalnih aktivatora i standardizacije procesa, predviđa se značajan rast tržišta u narednim godinama [4].

8. ZAKLJUČAK

Geopolimeri predstavljaju izuzetno perspektivne materijale koji mogu značajno doprinijeti održivom razvoju građevinske industrije. Njihova proizvodnja koristi otpadne sirovine, zahtijeva manje energije i rezultira materijalima visoke čvrstoće i otpornosti. Dalji razvoj tehnologije, optimizacija receptura i uspostavljanje standarda omogućit će širu primjenu geopolimera kao **zelenog cementa budućnosti**.

9. REFERENCE

- [1] Cheng, T., Zhang, H. & Wu, Z., *Effect of Si/Al ratio on mechanical properties of fly ash-based geopolymers*. Construction and Building Materials, 310, 125239, 2021.
- [2] Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Applications*. 6th ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2020.
- [3] Habert, G., Miller, S.A. & Antoni, M., *Cement and Concrete Research for Sustainable Construction*. Journal of Cleaner Production, 2020, 263, 121–134.
- [4] IEA, *Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [5] Bušatlić, I., Bušatlić, N., Merdić, N., Haračić, N., *Fundamentals of Chemistry and Technology of Portland Cement*, Štamparija Fojnica d.d., Fojnica, 2020.
- [6] Khater, H., *Fire and acid resistance of geopolymer materials*. Ceramics International, 2020, 46(6), 7385–7394.
- [7] Liew, Y.M., Heah, C.Y. & Kamarudin, H. *Immobilization of heavy metals in geopolymer matrices: A review*. Journal of Hazardous Materials, 2022, 427, 128074.
- [8] Provis, J.L., *Green concrete or geopolymer concrete?*. Cement and Concrete Research, 2018, 114, 40–48.

- [9]Provis, J.L. & Bernal, S.A., *Geopolymers and related alkali-activated materials*. Annual Review of Materials Research, 2019, 49, 305–329.
- [10]Xu, H. & Van Deventer, J.S.J., *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals*. International Journal of Mineral Processing, 2021, 203, 105–112.
- [11]Zhang, Y. & Chen, W., *Advances in the development and application of geopolymer composites*. Construction and Building Materials, 2023, 370, 130682.
- [12]Banožić I., (2016) Ravnoteža sorpcije bakrovih iona na geopolimeru, Diplomski rad, Kemijsko-tehnološki fakultet, Split

institute@unze.ba; alaudin.brkic@unze.ba; dervis.mujagic@unze.ba