

Dugotrajna svojstva niskougličnog betona s dodatkom pepela drvene biomase

Marija Mendeš¹, Nina Štirmer²

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, marija.mendes@grad.unizg.hr

²Sveučilišta u Zagrebu Građevinski fakultet, nina.stirmer@grad.unizg.hr

Sažetak

Smanjenje emisija CO₂ u građevinskom sektoru zahtijeva razvoj niskougličnih betona i veću primjenu sekundarnih sirovina. Rad istražuje dugotrajno ponašanje betona s dodatkom pepela drvene biomase (PDB), nusproizvoda energetske postrojenja na biomasu. Poseban naglasak stavljen je na mehanička svojstva, trajnost i okolišne učinke. Preliminarni rezultati ukazuju na potencijal primjene PDB-a u cementnim kompozitima te potrebu daljnjeg sustavnog istraživanja dugotrajnih svojstava i njihova utjecaja na projektiranje armiranobetonskih konstrukcija.

Ključne riječi: pepeo drvene biomase, niskouglični beton, trajnost, kružno gospodarstvo, dugotrajna svojstva

Long-term properties of low-carbon concrete with wood biomass ash addition

Abstract

Reducing CO₂ emissions in the construction sector requires the development of low-carbon concretes and increased use of secondary raw materials. This paper examines the long-term behaviour of concrete containing wood biomass ash (WBA), a by-product of biomass energy plants. Particular emphasis is given to mechanical properties, durability, and environmental impacts. Preliminary results indicate the potential for using WBA in cement composites and highlight the need for further systematic research on long-term properties and their influence on the design of reinforced concrete structures.

Key words: wood biomass ash, low-carbon concrete, durability, circular economy, long-term properties

1 Uvod

Građevinski sektor značajno utječe na okoliš, pri čemu proizvodnja cementa predstavlja jedan od najvećih izvora emisija ugljikova dioksida (CO_2) u industriji. Procjenjuje se da proizvodnja cementa doprinosi približno 7 – 8 % globalnih emisija CO_2 , uglavnom zbog visoke energetske potrošnje i procesa kalcinacije vapnenca tijekom proizvodnje klinkera [1]. To čini dekarbonizaciju cementne industrije jednim od najizazovnijih pothvata u industrijskoj tranziciji prema održivosti [2].

U tom kontekstu intenzivno se razvijaju koncepti niskougljičnih betona, koji uključuju smanjenje udjela klinkera u cementu, primjenu alternativnih veziva te uvođenje sekundarnih materijala u betonske mješavine [3]. Jedan od takvih materijala je pepeo drvene biomase (PDB) – nusproizvod nastao izgaranjem drvene biomase u energetske postrojenjima. S obzirom na rastuću uporabu biomase kao obnovljivog izvora energije, količine proizvedenog PDB-a kontinuirano rastu, postavljajući pitanje njegove ekološki održive uporabe [4]. Primjena PDB-a u cementnim kompozitima može istovremeno doprinijeti smanjenju količine otpada od termičke obrade biomase i smanjenju potrošnje primarnih sirovina u proizvodnji betona, što je u skladu s načelima kružne ekonomije i održivog razvoja [5].

Dosadašnja istraživanja pokazuju da se PDB može upotrebljavati kao mineralni dodatak ili djelomična zamjena cementa i agregata u betonu, s potencijalnim pozitivnim učincima na mehanička svojstva i trajnost pri umjerenim razinama zamjene [4]. Međutim, zbog velike varijabilnosti kemijskog sastava i fizikalnih svojstava PDBa, njegova primjena u betonu još nije potpuno istražena niti normirana [3, 6]. Nadalje, postoji ograničen broj podataka o dugotrajnom ponašanju takvih kompozita, što predstavlja barijeru za njihovu primjenu u konstrukcijskim elementima [4, 7].

2 Primjena pepela drvene biomase u betonu

PDB nastaje u različitim fazama procesa izgaranja i može se klasificirati kao leteći pepeo, pepeo s dna peći ili miješani pepeo [8]. Njegova kemijska i mineralna svojstva ovise o vrsti biomase, uvjetima izgaranja te načinu prikupljanja i skladištenja pepela [4]. U usporedbi s letećim pepelom iz termoelektrana na ugljen, PDB često pokazuje veću varijabilnost sastava, što može utjecati na njegova reaktivna i vezivna svojstva u cementnim sustavima [9].

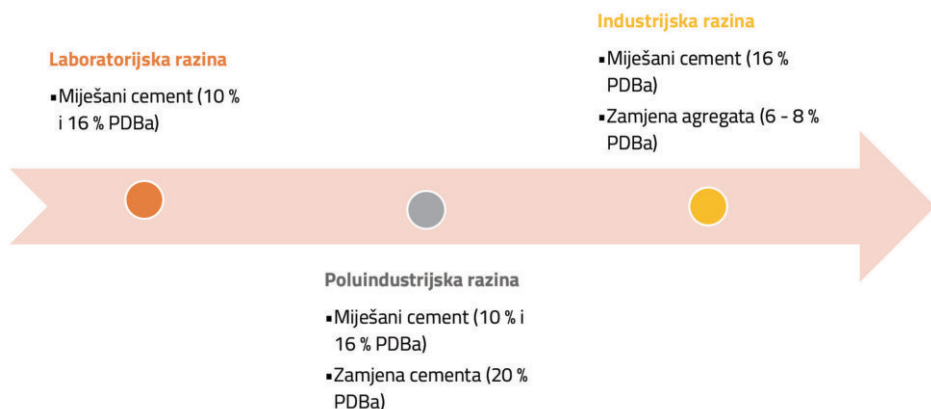
U literaturi se PDB najčešće istražuje kao djelomična zamjena cementa, agregata ili kao dodatak u mortovima i betonu [10, 11, 12]. Rezultati pokazuju da manji udjeli pepela biomase ($\approx 10 - 20 \%$) mogu imati ograničen ili čak pozitivan učinak na tlačnu čvrstoću betona, dok veći udjeli obično utječu na smanjenje mehaničkih svojstava [4]. Osim toga, PDB utječe i na svojstva svježeg betona, osobito na

konzistenciju, gdje je često potreban dodatak superplastifikatora kako bi se održala obradljivost i homogenost smjese [4].

Iako su brojna istraživanja usmjerena na tlačnu čvrstoću u ranim starostima, znatno je manje dostupnih podataka o dugotrajnom razvoju mehaničkih svojstava, deformacijama i trajnosti betona s dodatkom PDBa. Upravo su takvi podaci ključni za procjenu mogućnosti primjene ovih materijala u konstrukcijskim elementima i za razvoj budućih normi i smjernica [4, 7].

3 Preliminarna eksperimentalna istraživanja

U sklopu projekta AshCycle provedena su istraživanja na laboratorijskoj, poluindustrijskoj i industrijskoj razini (slika 1.) [13]. Ispitivanja su uključivala zamjenu dijela cementa PDB-om, primjenu miješanih cementa te djelomičnu zamjenu agregata u različitim betonskim sastavima. Cilj istraživanja bio je procijeniti učinak ovih materijala na mehanička svojstva, trajnost i primjenjivost u predgotovljenim i nosivim elementima.



Slika 1. Shematski prikaz istraživačkih aktivnosti prema razinama ispitivanja

3.1 Miješani cement

Laboratorijska istraživanja miješanih cementa s udjelom PDB-a od 10 % i 16 % pokazala su veću tlačnu čvrstoću nakon 28 dana u usporedbi s referentnim cementom, uz blago povećanje gustoće betona. Poluindustrijska i industrijska ispitivanja potvrdila su da odabrana mješavina s približno 16 % PDB-a predstavlja optimalan kompromis između mehaničkih svojstava i dostupnosti sekundarnog materijala, osiguravajući stabilna svojstva i tijekom industrijske proizvodnje.

Industrijska primjena uključivala je proizvodnju predgotovljenih opločnika (slika 2.) i klupa (slika 3.) gdje je miješani cement sa 16 % PDB-a zadovoljavao kriterije

mehaničkih svojstava i trajnosti, uključujući otpornost na smrzavanje, minimalno upijanje vode i veliku otpornost na prodiranje vode.



Slika 2. Predgotovljeni opločnici (osnovni sloj – beton s miješanim cementom sa 16 % PDB-a)



Slika 3. Predgotovljena betonska klupa proizvedena s miješanim cementom sa 16 % PDB-a

3.2 Zamjena cementa

Poluindustrijska ispitivanja u kojima je 20 % portlandskog cementa zamijenjeno s PDB-om pokazala su značajan utjecaj na svojstva svježeg betona, dok su mehanička svojstva očvrslulog betona bila zadovoljavajuća i usporediva s referentnom mješavinom. Ispitivanja trajnosti pokazala su zadovoljavajuće rezultate za primjenu u predgotovljenim nekonstrukcijskim elementima, s povoljnim svojstvima upijanja vode i otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje.

3.3 Zamjena agregata

U okviru istraživanja, PDB je korišten kao djelomična zamjena prirodnog pijeska i agregata u mješavinama za lijevane ploče i lijevani beton (slika 4. i slika 5.). Primjena ovih nusproizvoda omogućuje smanjenje ovisnosti o prirodnim resursima i doprinosi kružnoj ekonomiji.

Ispitivanja su pokazala da udio pepela od 6 - 8 % u odnosu na referentnu mješavinu može značajno utjecati na svojstva betona. Optimalna izvedba postignuta je pri manjim udjelima pepela. Također je potvrđeno da su svojstva mješavina vrlo osjetljiva na promjenu sastava mješavine i uporabu dodataka, te da udio PDB-a sam po sebi nije pouzdan parametar za procjenu izvedbe.



Slika 4. Betonske žardinjere sa 6 % PDB-a zamjene agregata (dio „mini” pilot-projekta u Osnovnoj školi Mušaluk)



Slika 5. Betonska klupa sa 6 % PDB-a zamjene agregata (pilot-projekt u Klinča Selima)

4 Rasprava

Preliminarni rezultati ukazuju na potencijal primjene PDB-a u proizvodnji nisko-ugljičnih betona. Međutim, dostupni podaci uglavnom se odnose na kratkoročna svojstva materijala, dok su dugotrajni procesi poput razvoja skupljanja, promjena modula elastičnosti ili utjecaja okolišnih uvjeta nedovoljno istraženi.

S obzirom na veliku varijabilnost sastava PDB-a, očekuje se da će vrsta pepela, udio zamjene i uvjeti njege imati značajan utjecaj na razvoj mikrostrukture i dugotrajna svojstva betona. Stoga je potrebno provesti sustavna dugotrajna ispitivanja koja će omogućiti bolje razumijevanje odnosa između sastava materijala, mikrostrukture i mehaničkih svojstava.

Rezultati ovakvih istraživanja mogli bi pružiti znanstvenu osnovu za širu primjenu PDB-a u betonu te pridonijeti razvoju budućih smjernica i norma za upotrebu takvih betona u konstrukcijskim elementima.

5 Zaključak

Rezultati dosadašnjih istraživanja ukazuju na potencijal primjene PDB-a kao sekundarnog materijala u cementnim kompozitima te na mogućnost razvoja niskougljičnih betona s prihvatljivim mehaničkim svojstvima. Preliminarna eksperimentalna ispitivanja pokazuju da odgovarajući udjeli PDB-a mogu osigurati zadovoljavajuće performanse betona, uz određene promjene u svojstvima svježeg i očvrsnulog stanja. Međutim, dostupni podaci o dugotrajnom ponašanju takvih kompozita i dalje su ograničeni, osobito u pogledu deformacijskih svojstava i trajnosti u različitim uvjetima okoliša.

Buduća istraživanja trebala bi biti usmjerena na sustavno ispitivanje dugotrajnih mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti betona s dodatkom PDB-a te na analizu utjecaja sastava pepela, udjela zamjene i uvjeta njege na razvoj mikrostrukture i performansi materijala. Dobiveni rezultati trebali bi doprinijeti boljem razumijevanju ponašanja ovih materijala te predstavljati znanstvenu osnovu za njihovu širu primjenu u građevinskoj praksi i buduću razvoj normativnih smjernica.

Zahvala

Ispitivanja predstavljena u ovom radu provedena su u okviru znanstvenog projekta *AshCycle – Integration of Underutilized Ashes into Material Cycles by Industry-Urban Symbiosis*, 101058162, HORIZON-CL4-2021-TWIN-TRANSITION-01. Rad doktorandice podržan je kroz „Program razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti (NPOO-DOK-2023-10)”, koji financira Hrvatska zaklada za znanost (HRZZ).

Literatura

- [1] Ige, O. E., Kabeya, M.: Decarbonizing the Cement Industry: Technological, Economic, and Policy Barriers to CO₂ Mitigation Adoption, *Clean Technologies*, 7, 2025.
- [2] Martínez-García, R., et al.: The Present State of the Use of Waste Wood Ash as an Eco-Efficient Construction Material: A Review, *Materials*, 15, 2022.
- [3] Marandi, N., Shirzad, S.: Sustainable cement and concrete technologies: a review of materials and processes for carbon reduction, *Discover Civil Engineering*, 2025.
- [4] Teker Ercan, E. E., Andreas, L., Cwirzen, A., Habermehl-Cwirzen, K.: Wood Ash as Sustainable Alternative Raw Material for the Production of Concrete - A Review, *Materials*, 16, 2023.
- [5] Bragança, L., Cvetkovska, M., Askar, R., Ungureanu, V.: Creating a Roadmap Towards Circularity in the Built Environment, *Springer Tracts in Civil Engineering*, 2023.
- [6] Liang, X., Li, Z., Dong, H., Ye, G.: A review on the characteristics of wood biomass fly ash and their influences on the valorization in cementitious materials, *Journal of Building Engineering*, 2024.
- [7] Olatoyan, O. J., Kareem, M. A., Adebajo, A. U., Olawale, S. O. A., Alao, K. T.: Potential use of biomass ash as a sustainable alternative for fly ash in concrete production: A review, *Hybrid Advances*, 2023.
- [8] Štirmer, N., Carević, I.: Utilization of Wood Biomass Ash in Concrete Industry, *IntechOpen*, 2022.
- [9] Al-Kharabsheh, B. N., Arbili, M. M., Majdi, A., Ahmad, J., Deifalla, A. F., Hakamy, A.: A Review on Strength and Durability Properties of Wooden Ash Based Concrete, *Materials*, 15, 2022.
- [10] Pandolfi Balbi, E., et al.: Wood biomass ash, municipal solid waste ash, and recycled concrete from construction demolition waste as supplementary cementitious materials in fine graded granular mixtures, *Construction and Building Materials*, 498, 2025.
- [11] Carević, I., Bajto, J. Š., Grubor, M., Štirmer, N.: Wood biomass ash as a clinker substitute in advancing next-generation blended cement: Croatian case study, *Scientific Reports*, 2026.
- [12] Jensen, A. H., Ottosen, L. M., Edvardsen, C.: Wood bottom ash as sand replacement in concrete: Mechanical properties and prediction of durability, *Construction and Building Materials*, 512, 2026.
- [13] AshCycle - Integration of Underutilized Ashes into Material Cycles, www.ashcycle.eu/en