

Inovativni građevni proizvodi s pepelom drvne biomase

Nina Štirmer, Ivana Carević, Sonja Cerković, Martina Grubor i Dubravka Bjegović¹

¹ članica emerita HATZ-a u Odjelu građevinarstva i geodezije

Sažetak: *Republika Hrvatska obvezala se kao članica Europske unije (EU) na ispunjenje zahtjeva da udio potrošnje energije iz obnovljivih izvora iznosi najmanje 32 % do 2030. godine. Drvna biomasa predstavlja važnu ulogu u ostvarenju toga cilja. No, tijekom izgaranja drvne biomase dolazi do nastanka pepela drvne biomase (PDB) koji se zasada pretežito odlaže što je najmanje poželjna opcija prema hijerarhiji gospodarenja otpadom. Procjenjuje se da u energanama na drvenu biomasu u Hrvatskoj godišnje nastane približno 25.000 t PDB-a. Prema dosadašnjim istraživanjima, PDB pokazuje veliki potencijal primjene u industriji betona. Za potrebe istraživanja, prikupljene su različite vrste PDB-a iz energana na drvenu biomasu na području RH te su izrađene betonske mješavine sa zamjenom dijela sitnog agregata PDB-om. U radu su prikazane vrste i porijeklo prikupljenih PDB-ova, trenutno upravljanje njime te razvoj inovativnih građevnih proizvoda s PDB-om.*

Gljučne riječi: *pepeo drvne biomase, građevinska industrija, inovativni građevni proizvodi, beton.*

1. Uvod

Beton predstavlja dominantan materijal kada se radi o izgradnji infrastrukture, budući da ima neograničene mogućnosti inovativnih dizajnerskih rješenja i tehnologije građenja te je drugi najčešće korišten materijal nakon vode [1]. Primarni materijali koji se koriste u njegovoj proizvodnji su cement, agregat i voda [2]. Cement se smatra najviše upotrebljavanom materijalom na svijetu, a njegova godišnja svjetska potrošnja iznosi između 500 i 2000 kg po stanovniku. Proizvodnja cementa podrazumijeva intenzivnu upotrebu sirovina i energije, a istodobno u atmosferu ispušta velike količine ugljičnog dioksida (CO₂) [3]. Sada je već dobro poznato da doprinos industrije cementa iznosi 7 % globalne emisije stakleničkih plinova [4]-[6], s tim da je to treća energetska najintenzivnija industrija na svijetu [7]. Dodatnu opasnost predstavlja

iscrpljivanje ogromnih količina prirodnih sirovina za proizvodnju agregata za beton, što loše utječe na okoliš te istovremeno ugrožava sposobnost budućih generacija da osiguraju same sebe. Stoga, postaje sve jasnije da uvođenje održivog razvoja i metodologija u građevinski sektor predstavlja jedno od najboljih rješenja za opstanak čovječanstva. Građevinska industrija trebala bi reciklirati građevni otpad i voditi brigu o trajnosti građevina i o uporabi ekološki prihvatljivih sirovina i sekundarnih materijala [8]. Osim toga, institucije Europske unije su Direktivom 2018/2001 postavile novi obvezujući cilj da do 2030. udio energije iz obnovljivih izvora (OIE) u ukupnoj bruto potrošnji mora iznositi najmanje 32 % [9], a slijedi i mogućnost klimatske neutralnosti do 2050. pri čemu će OIE morati opskrbljivati većinu potrošnje energije. Da bi ispunila sve zahtjeve koji su pred nju postavljeni, EU planira do 2030. zatvoriti sve elektrane na ugljen te zamijeniti njihov rad s novim energanama na krutu i plinovitu biomasu. Biomasa je daleko najvažniji OIE u EU i ključan je čimbenik u ostvarivanju klimatskih ciljeva, istodobno doprinoseći gospodarskom rastu i zapošljavanju, osobito u ruralnim područjima [10]. U ukupnoj potrošnji obnovljive energije, biomasa čini oko 60 % [11], te se smatra neutralnim gorivom [12], [13]. Nakon potpunog izgaranja drvene biomase u energanama na biomasu, u tvornicama papira i drugim postrojenjima, nastaju značajne količine otpadnog pepela drvene biomase (PDB), koji se uglavnom odlaže ili se koristi kao gnojivo, najčešće bez ikakvog oblika kontrole [14], [15]. PDB se sastoji od vrlo sitnih čestica koje se mogu lako prenijeti kroz zrak, što znači da to može uzrokovati zdravstvene probleme vezano uz dišni sustav stanovništva koje živi u blizini odlagališta PDB-a [16]. Osim toga, u slučaju neadekvatnog privremenog odlaganja PDB-a, može doći do onečišćenja podzemnih voda [17]. S druge strane, istraživanja su pokazala da se PDB zbog svojih karakteristika i kemijskog sastava može ponovno upotrijebiti betonskoj industriji kao zamjena dijela cementa ili agregata [14], [16], [17].

Republika Hrvatska (RH) raspolaže velikim potencijalom drvene biomase budući da je oko 37 % (2.485.611 milijuna ha) ukupne kopnene površine pokriveno šumama [18] te je došlo do otvaranja velikog broja energana na biomasu u sklopu ispunjavanja ciljeva koje je postavila EU. Potrebno je naglasiti da postoje i druga postrojenja, poput tvornica za proizvodnju papira, tvornica namještaja, rasadnika i dr. koji također primjenjuju tehnologiju izgaranja drvene biomase i imaju PDB kao otpadni materijal. S obzirom na otvaranje sve većeg broja energana na biomasu te potencijal drvene biomase kojom RH raspolaže, može se očekivati proizvodnja od približno 25.000 tona PDB-a godišnje [19]. Procjenjuje se da će u EU primjena energije iz energana na drvenu biomasu u budućnosti utjecati na proizvodnju od približno 600.000 tona PDB-a [20]. Iz svega navedenog može se zaključiti da važni izazovi za održivu uporabu biomase uključuju i održivo upravljanje proizvedenim PDB-om.

Transformacija građevinske industrije u nisko-ekološku, klimatski neutralnu, resursno učinkovitu i kružnu industriju podrazumijeva veću kružnost različitih vrsta

tokova otpada koji se još uvijek odlažu. Promicanjem uporabe odnosno pretvaranja otpada jedne industrije u sirovinu druge industrije dolazi do nove industrijske simbioze, a samim time i do uspostavljanja okvira za širu uporabu na tržištu. Trenutno u RH ne postoji sustavna uporaba PDB-a. U okviru projekta „Razvoj inovativnih građevnih kompozita primjenom biopepela“ uspostavljena je industrijska simbioza između građevinskog sektora (proizvodnog pogona Beton Lučko RBG d.o.o.) kao korisnika nove potencijalne sirovine PDB-a u betonskoj industriji te energetskog sektora koji proizvodi navedenu sirovinu. Ovim projektom želi se doprinijeti jačanju gospodarstva primjenom istraživanja i inovacija u građevnoj industriji kroz razvoj inovativnih ekoloških proizvoda, tehnologija i poslovnih procesa.

U radu je prikazano trenutačno gospodarenje PDB-om u EU i RH, dosadašnja iskustva primjene PDB-a u betonskoj industriji te preliminarna istraživanja s ciljem utvrđivanja kako dodatak PDB-a kao djelomična zamjena sitnom agregatu utječe na relevantna svojstva betona u svježem i očvrslom stanju. Cilj je pronaći mogućnosti primjene PDB-a u proizvodnji betonske galanterije. Za potrebe ovog istraživanja prikupljeni su i korišteni PDB-ovi iz 4 energane na području RH te su izrađene različite betonske mješavine.

2. Gospodarenje pepelom drvne biomase (PDB-om)

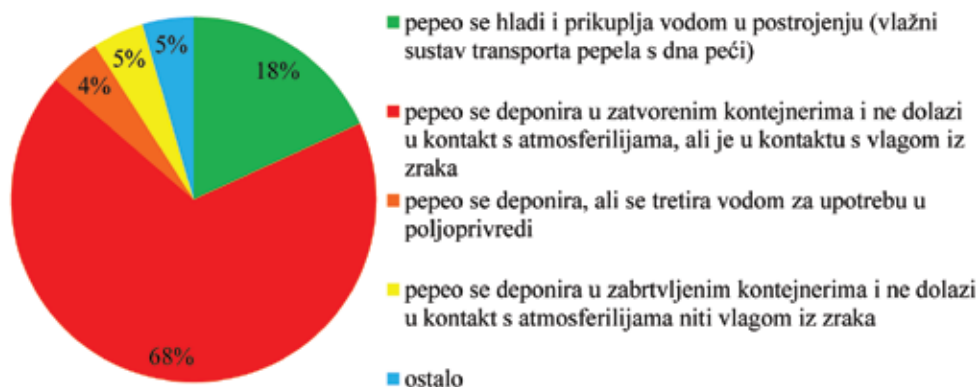
Kao što je navedeno u uvodu, procjenjuje se da će u EU primjena energije iz energana na drvenu biomasu u budućnosti utjecati na proizvodnju od približno 600.000 tona PDB-a [19]. Međutim, novi cilj od 32 % do 2030. godine dovest će do značajnog povećanja količine PDB-a. Trenutna praksa pokazuje da se oko 70 % PDB – a odlaže na odlagališta, 20 % se nastoji primijeniti kao dodatak u tlu u poljoprivredi, a 10 % se koristi za ostale namjene [19], [21], [22], [23]. PDB je u RH trenutno klasificiran kao „Otpad iz termičkih procesa“ pod ključnim brojem 10 u Pravilniku o katalogu otpada (NN 90/15), odnosno 10 01 otpad iz termoelektrana i ostalih postrojenja u kojima se odvija sagorijevanje (osim 19) [24].

Prerada otpada u sekundarne sirovine može ispunjavati definiciju recikliranja ako se uporaba materijala zasniva na odgovarajućoj kontroli kvalitete te zadovoljava sve relevantne norme, specifikacije i zahtjeve u pogledu zaštite okoliša i zdravlja za posebnu uporabu te se na takav način može doprinijeti smanjenju ovisnosti EU o uvozu sirovina i olakšati prijelaz na održivije gospodarenje materijalima i model kružnog gospodarstva [25]. Zbog toga je nužno provesti detaljne analize i istraživanja PDB-a, kako bi se mogli uspostaviti zakonski okviri za njegovu upotrebu u građevinskoj industriji.

2.1. Gospodarenje PDB-om u Republici Hrvatskoj (RH)

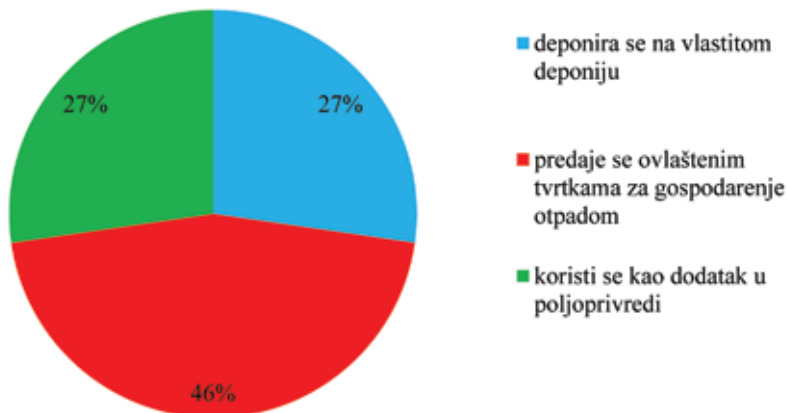
U sklopu projekta TAREC² [19], napravljena je procjena sadašnje i buduće godišnje proizvodnje PDB-a u RH na osnovi podataka dobivenih provođenjem anketa u 13 postrojenja na drvenu biomasu te uzimajući u obzir instaliranu snagu 29 aktivnih energana na biomasu 2018. godine. Zaključeno je da tijekom izgaranja 1 tona drvene biomase nastane 3,1 % PDB-a, a s obzirom je ukupna potrošnja biomase iznosila 819.820 tona godišnje, odnosno 54 % tadašnjeg potencijala tržišta drvene biomase u RH, procjenjuje se da ukupna količina PDB-a u postojećim energanama na biomasu u Hrvatskoj iznosi 25.414 tona godišnje. Osim toga, napravljena je procjena PDB-a za slučaj kada bi se iskoristio sav potencijal drvene biomase kojom raspolaže RH te bi u tom slučaju količina PDB-a iznosila 47.430 tona godišnje [26], [27].

U ovom radu prikazana je analiza upravljanja PDB-om koja obuhvaća 20 postrojenja na drvenu biomasu u RH (Slike 1 i 2). Iz rezultata dobivenih anketiranjem navedenih postrojenja može se zaključiti slijedeće: u većini slučajeva PDB se skladišti u zatvorenim kontejnerima (68 %) i nije u dodiru s oborinama, ali je u kontaktu s vlagom iz zraka; 18 % PDB – a hladi se i prikuplja vodom u sustavima za mokro otpeljivanje; 5 % PDB-a deponira se u zabrtvljenim kontejnerima i nije u kontaktu s oborinama i vlagom iz zraka; dok se samo 4 % deponira, ali tretira vodom za upotrebu u poljoprivredi (Slika 1).



Slika 1: Načini prikupljanja PDB-a u 20 postrojenja na drvenu biomasu u RH

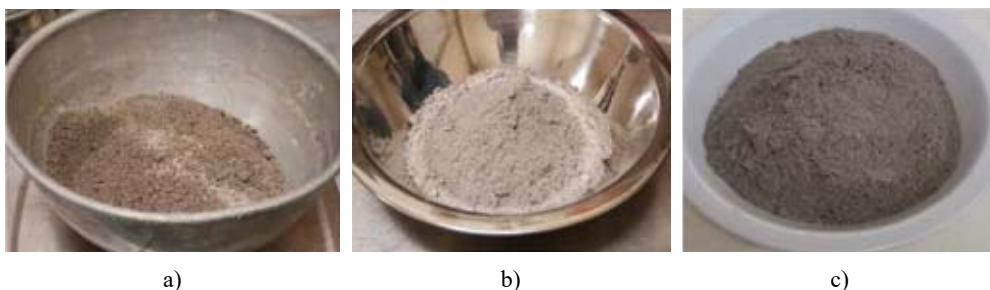
Po pitanju gospodarenja PDB – om, 46 % energana predaje ga ovlaštenim tvrtkama za gospodarenje otpadom, 27 % predaje ga tvrtkama za upotrebu u poljoprivredi, a čak 27 % privremeno odlaže na vlastitom deponiju (Slika 2) predstavljajući ekološko opterećenje za lokalnu zajednicu.



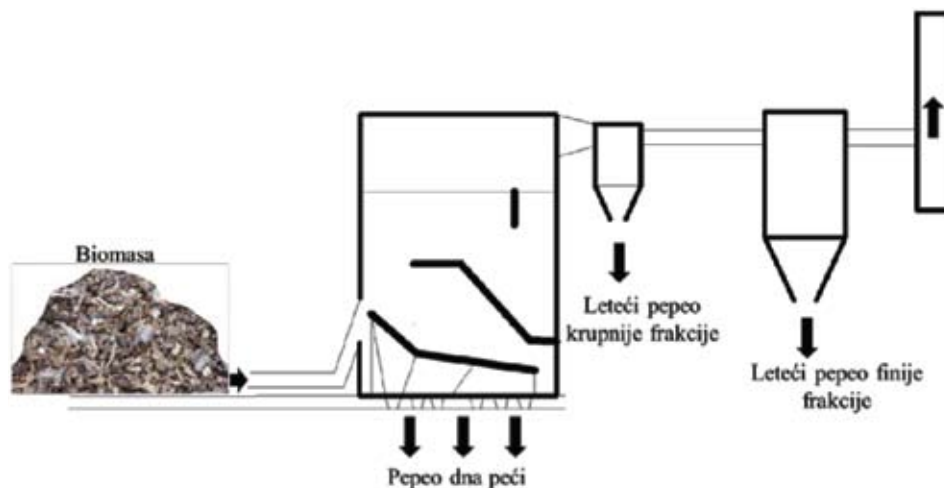
Slika 2: Načini gospodarenja PDB-om u 20 postrojenja na drvnu biomasu u RH

3. Dosadašnja iskustva primjene PDB-a u betonskoj industriji

Tradicionalno se PDB može koristiti u poljoprivredi i šumarstvu kao gnojivo i poboljšivač tla [28], ali je potrebno voditi računa o opasnim elementima u tragovima i pH vrijednosti koji mogu dovesti do ekoloških problema [29]. Primjena PDB-a u poljoprivredi ne može se smatrati niti dugoročnim rješenjem: primjerice dansko zakonodavstvo dopušta korištenje maksimalno 3 mg/ha PDB-a na šumskom tlu, koji bi se reciklirao tijekom 10-godišnjeg razdoblja. Međutim, korištenje PDB-a ograničeno je na tri puta u roku od 75 godina [30]. Prema [31], PDB je kompleksna mješavina anorganskog i organskog sastava koji može znatno varirati. S obzirom na različite tehnologije izgaranja u energanama na drvnu biomasu, PDB se može podijeliti na pepeo s dna peći i leteći pepeo – finije i krupnije frakcije (Slika 3). Sastav i količine PDB – a ovise o vrsti biomase, tehnologiji izgaranja postrojenja i temperaturi toplinske obrade, lokaciji prikupljanja pepela (Slika 4) te načinu njegova skladištenja [32], [33], [34].



Slika 3: Podjela PDB-a s obzirom na tehnologiju izgaranja u energanama na biomasu: a) pepeo s dna peći; b) leteći pepeo finije frakcije; c) leteći pepeo krupnije frakcije



Slika 4: Podjela PDB-a prema lokaciji skupljanja u postrojenju [35], [36]

Ispitivanja [37] su pokazala da se upotrebom PDB-a kao zamjene dijela cementa u cementnim kompozitima može očekivati povećana potreba za vodom, odgođeno vrijeme vezivanja, sporiji prirast tlačne čvrstoće, smanjene vrijednosti difuzije klorida te minimalni porast kapilarnog upijanja. Osim navedenog, provedena su ispitivanja ekološkog utjecaja PDB-a pri primjeni u cementnim kompozitima, a sve u skladu s temeljnim zahtjevom za građevinu koji uključuje „higijenu, zdravlje i okoliš“ prema Uredbi o utvrđivanju usklađenih uvjeta za stavljanje na tržište građevnih proizvoda [38]. Rezultati ukazuju na ekološku prihvatljivost PDB-a kao nove sirovine u proizvodnji cementnih kompozita koja je povezana sa sposobnošću cementne matrice da fizički i kemijski veže kontaminirane elemente (u ovom slučaju teške metale) unutar hidratne strukture [39]. No postojeći propisi i norme trenutno ne obuhvaćaju uporabu PDB-a u industriji betona, čime je otežana njegova primjena u praksi.

4. Istraživanje utjecaja zamjene sitnog agregata s PDB-om u betonskim mješavinama

U okviru projekta „Razvoj inovativnih građevnih kompozita primjenom biopepela“ provedeno je preliminarno istraživanje utjecaja zamjene sitnog agregata PDB-om na relevantna svojstva betonskih mješavina u svježem i očvrnulom stanju prema normama prikazanim u tablici 1. Izrađeno je 5 betonskih mješavina: referentna mješavina bez udjela PDB – a (oznake M0) te 4 mješavine s PDB iz različitih energana na području RH (oznake M1, M2, M3 i M4) u postrojenju Beton Lučko RBG d.o.o. (Slika

5 a, b, c). Simulacije sastava s PDB-om izrađene su u skladu s originalnim sastavom za lijevani beton proizvođača. Približno 15 % mase sitnog agregata frakcije 0 – 4 mm (pijeska) zamijenjeno je PDB-om. U provedenom preliminarnom istraživanju korišteni s PDB-ovi krupnije frakcije (pepeo s dna peći) te nisu prethodno tretirani.

Tablica 1: Plan ispitivanja svojstava betonskih mješavina s PDB-om

Svojstva	Norma
Konzistencija slijeganjem	HRN EN 12350 - 2:2019 [40]
Udio pora	HRN EN 12350 - 7:2019 [41]
Tlačna čvrstoća	HRN EN 12390-3:2019 [42]
Upijanje vode	HRN EN 1340:2004 [43]
Vodonepropusnost	HRN EN 12390-8:2019 [44]



a)



b)

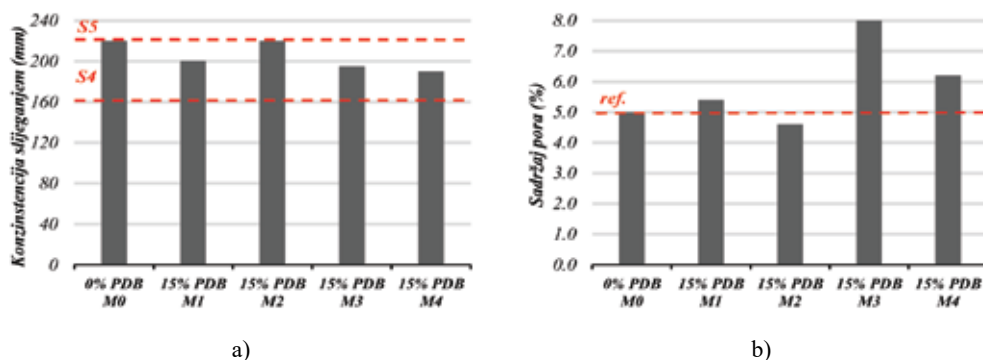


c)

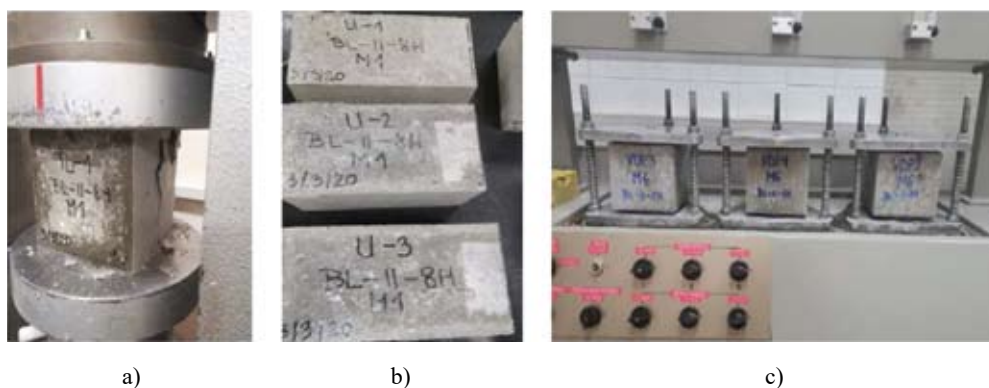
Slika 5: Izrada betonskih mješavina u postrojenju Beton Lučko RBG d.o.o.: a) ručno dodavanje PDB-a u miješalicu; b) svježi beton; c) ispitivanje obradljivosti betona metodom slijeganja

Promjena svojstava betona s dodatkom PDB-a u svježem stanju ovisi o vrsti korištenog PDB-a iz pojedinih energana na području RH, odnosno o morfologiji samih čestica, udjelu alkalija i gubitku žarenjem. Prema [40], obradljivost mješavine M2 ostala je nepromijenjena u odnosu na referentnu mješavinu M0 te se mješavine M0 i M2 mogu svrstati u razred konzistencije slijeganjem S5 (Slika 6a). Obradljivost mješavina M1, M3 i M4 smanjena je u odnosu na referentnu mješavinu (bez dodatka

PDB-a) te se navedene mješavine mogu svrstati u razred konzistencije slijeganjem S4 (Slika 6a). Smanjenje obradljivosti mješavina s pojedinim vrstama PDB-a ne predstavlja ograničenje za njihovu primjenu tijekom proizvodnje betonske galanterije. Rezultati ispitivanja sadržaja zraka svih ispitnih mješavina bile su u rasponu od 4,6 % do 8,2 % (Slika 5b). Dobiveni rezultati upućuju na to da mješavina M3 ima značajno povećan sadržaj pora u odnosu na referentnu mješavinu, M0.



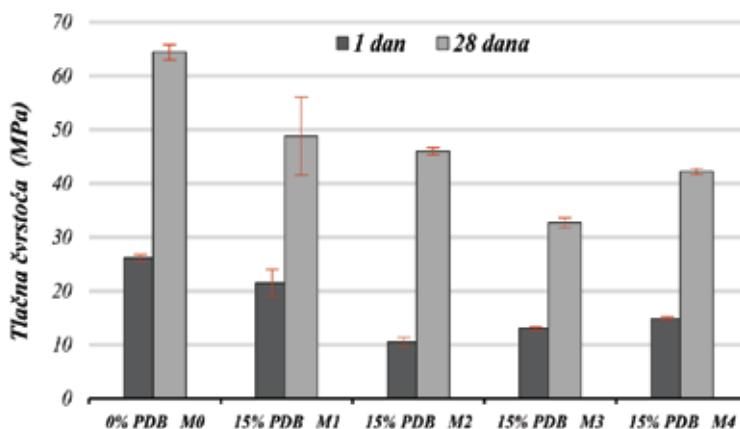
Slika 6: Grafički prikaz rezultata ispitivanja u svježem stanju:
a) konzistencija slijeganjem; b) sadržaj pora



Slika 7: Ispitivanje svojstava lijevanog betona u očvrslulom stanju:
a) tlačna čvrstoća; b) upijanje vode; c) vodonepropusnost

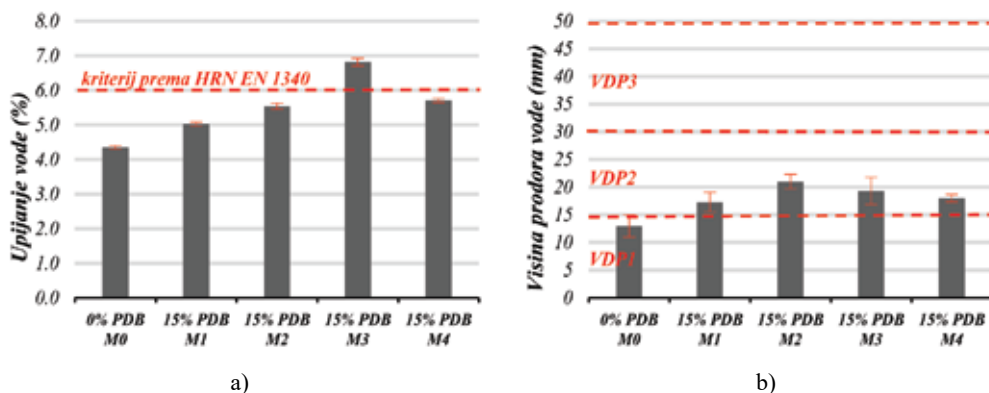
U okviru preliminarnog istraživanja utjecaja zamjene sitnog agregata s različitim vrstama PDB-a, provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti betona (Slika 7). Iz rezultata dobivenih ispitivanjem tlačne čvrstoće uzoraka u starosti od 1 i 28 dana (Slika 8) vidljivo je smanjenje tlačne čvrstoće dodavanjem PDB-a u odnosu na referentnu mješavinu – M0 te se može zaključiti da vrijednost tlačne čvrstoće bitno ovisi o vrsti pepela kojom je zamijenjena frakcija sitnog agregata. Tlačna

čvrstoća referentne mješavine iznosi 26,1 MPa nakon 1 dana, dok nakon 28 dana iznosi 64,4 MPa, dok su se tlačne čvrstoće mješavina s PDB-om kretale u rasponu od 10,5 do 21,5 MPa pri starosti od 1 dana te u rasponu od 32,7 do 48,8 MPa pri starosti od 28 dana. Mješavina M3 ima najmanju 28-dnevnu tlačnu čvrstoću što se osim s vrstom korištenog pepela može povezati i s najvećim sadržajem pora.



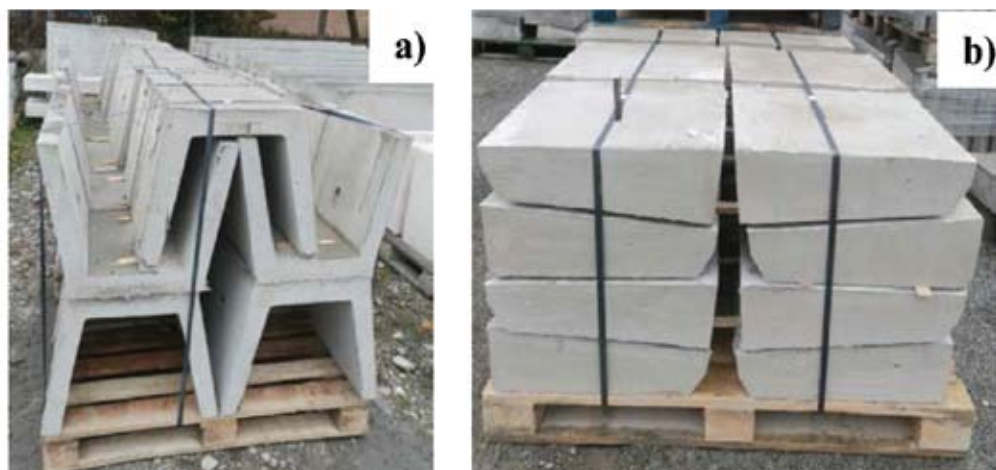
Slika 8: Grafički prikaz visina prodora vode u uzorcima lijevanog betona s PDB-om

Iz dobivenih rezultata ispitivanja upijanja vode, prikazanih na Slici 9a, vidljivo je da jedino uzorci mješavine M3 ne zadovoljavaju vrijednosti propisane normom (tablica 1), prema kojoj upijanje vode ne smije biti veće od 6 % [43]. Također, na osnovi dobivenih rezultata može se zapaziti da dodatak PDB-a u betonskim mješavinama povećava upijanje vode te da vrijednost upijanja vode bitno ovisi o vrsti pepela kojom je zamijenjena frakcija sitnog agregata.



Slika 9: Grafički prikaz rezultata ispitivanja svojstava trajnosti: a) upijanje vode; b) vodonepropusnost

Dodatak PDB-a u betonu utječe na povećanje visine prodora vode. Kao i kod ostalih ispitanih svojstava dobivene vrijednosti bitno ovise o vrsti pepela kojom je zamijenjena frakcija sitnog agregata (Slika 8b). Prema [44], sve mješavine s dodatkom PDB-a mogu se svrstati u razred vodonepropusnosti VDP2 (dubina prodora vode je ≤ 30 mm), dok se referentna mješavina bez dodatka PDB-a može svrstati u razred VDP1 (≤ 15 mm).



Slika 10: Gotovi proizvod s lijevanim betonom: a) kanalice; b) rubnjaci

Na osnovi provedenih preliminarnih istraživanja utjecaja zamjene sitnog agregata PDB-om u betonskim mješavinama za proizvodnju betonske galanterije, može se zaključiti da svojstva betona u svježem i očvrstulom stanju bitno ovise o samoj vrsti korištenog pepela. Dodatak PDB-a smanjuje obradljivost u svježem stanju te utječe na smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće kao i na povećanje upijanja vode i visine prodora vode. Unatoč tome, zamjena sitnog agregata s PDB-om od 15 % za sve ispitane mješavine, osim mješavine M3, ne predstavlja ograničenje za zadovoljavanje potrebnih svojstava za proizvodnju betonske galanterije i samim time PDB pokazuje veliki potencijal za upotrebu u njihovoj proizvodnji.

5. Zaključak

Ovim istraživanjem pokazano je da PDB ima veliki potencijal primjene u betonskoj industriji te predstavlja vrijedni materijal čijom se upotrebom u građevnim proizvodima može značajno doprinijeti zaštiti okoliša, očuvanju prirodnih resursa te smanjenju emisije CO₂ uz smanjenje troškova proizvodnje. Republika Hrvatska raspolaže

velikom količinom drvene biomase, čije iskorištavanje predstavlja jednu od najvažnijih strategija u ostvarivanju postavljenih ciljeva do 2030. No, otvaranjem sve većeg broja energana na drvenu biomasu, posljedično se javlja problem odlaganja ogromnih količina PDB-a kojima je potrebno pronaći mogućnosti primjene. Pri tome, inovativni građevni proizvodi s PDB-om predstavljaju jedno od mogućih rješenja. Proizvodnjom betonske galanterije kao što su kanalice ili rubnjaci (Slika 10) omogućava se približavanje građevinske industrije kružnom modelu industrija. Sljedeći korak u istraživanju primjene PDB-a u inovativnim građevnim proizvodima uključuje optimizaciju sastava betonskih mješavina te sveobuhvatna ispitivanja mehaničkih svojstava i svojstva trajnosti betona.

Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u okviru projekta „Razvoj inovativnih građevnih proizvoda primjenom biopepela“ KK.01.2.1.01.0049 koji financira Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta temeljem „Ugovora o dodjeli bespovratnih sredstava za projekte koji se financiraju iz europskih strukturnih i investicijskih fondova u financijskom razdoblju 2014. – 2020.“

6. Literatura

- [1] World Business Council for Sustainable Development: Cement Industry Energy and CO₂ Performance- Getting the Numbers Right, Geneva, 2009.
- [2] Fapohunda, C., Akinbile, B. & Oyelade, A.: A review of the properties, structural characteristics and application potentials of concrete containing wood waste as partial replacement of one of its constituent material, *YBL Journal of Build Enviroment*, Vol. 6 (2018) Br. 1, str. 63-85, <https://doi.org/10.2478/jbe-2018-0005>
- [3] Bjegović, D. & Štirmer, N.: *Teorija i tehnologija betona*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ISBN 978-953-6272-77-8, Zagreb, (2015)
- [4] Mehta, P. K.: Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development, *Concrete International*, Vol. 24 (2002) Br. 7, str. 23 - 28.
- [5] Ochsendorf, J. A: Sustainable engineering: the future of structural design, *Structures 2005: Metropolis and Beyond*, ASCE, ISBN: 0784407533, New York, travanj 2005., ASCE, (2005)
- [6] Suhendro, B.: Toward green concrete for better sustainable environment, *Procedia Engineering*, Vol. 95 (2014), str. 305 - 320.
- [7] Shafiqh, P, Mahmud, H. B, Jumaat, M. Z & Zargar, M.: Agricultural wastes as Aggregate in concrete mixtures – a review, *Construction and Building Materials*, Vol. 53 (2014), str. 110 – 117, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.074>
- [8] European Parliament and of the Council: Regulation of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC, *Official Journal of the European Union*, Vol. 54 (2011), str. 43-88, ISSN 1725-2555

- [9] European Parliament and the Council: Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources, *Official Journal of the European Union*, Vol. 61 (2018), str. 82 – 210, ISSN 1977-0677
- [10] European Parliament and the Council: Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives., *Official Journal of the European Union*, Vol. 51 (2008), str. 3-30, ISSN 1725-2555
- [11] Bioenergy Europe: Report Bioenergy Landscape, *Statistical Report 2019*, Brussels, 2019.
- [12] The European Commission's Knowledge Center for Bioeconomy: Brief on biomass for energy in the European Union, *Dostupan na*: <http://dx.doi.org/10.2760/546943> *Pristupljeno*: 2021-01-15
- [13] Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K. & Vassileva, C.G.: An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel*, Vol. 89 (2010) Br. 5, str. 913–933., <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- [14] Agrela, F., Cabrera, M., Alshaer, M., Morales, M. M. & Zamorano, M.: Biomass fly ash and biomass bottom ash, U *New Trends Eco-Efficient Recycled Concrete.*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, ISBN: 978-0-08-102480-5, (2019), str. 23–58.
- [15] IEA Bioenergy: Options for increased use of ash from biomass combustion and co-firing, *IEA Bioenergy Task 32*, 2018.
- [16] Ban. C. C. & Ramli, M.: The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55 (2011) Br. 7, str. 669-685, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.002>
- [17] Udoeyo F. F, Inyang H, Young D. T. & Oparadu, E. E.: Potential of wood waste ash as an additive in concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18 (2006) Br. 4, str. 605–611.
- [18] Hrvatske šume, O nama, *Dostupan na* <https://www.hrsume.hr/index.php/hr/tvrtka/onama> *Pristupljeno*: 2021-01-12
- [19] Milovanović, B., Štirmer, N., Carević, I. & Baričević, A.: Pepeo drvne biomase kao sirovina u betonskoj industriji, *Građevinar*, Vol. 71 (2019) Br. 6, str. 505–514, <https://doi.org/10.14256/JCE.2546.2018>
- [20] Bogdan, A.: U Karlovcu pokrenuta bioelektrana toplane, *Građevinar*, Vol. 72 (2020) Br. 11, str. 1041-1048.
- [21] Chowdhury, S., Mishra, M. & Suganya, O.: The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 6 (2015) Br. 2, str. 429-437, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005>
- [22] Ban, C.C., Nordin, N.S.A., Ken, P.W., Ramli, M. & Hoe, K.W.: The high volume reuse of hybrid biomass ash as a primary binder in cementless mortar block, *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 11 (2014) Br. 8, str. 1369-1378, <https://doi.org/10.3844/ajassp.2014.1369.1378>
- [23] Campbell, A.G.: Recycling and disposing of wood ash, *Tappi Journal*, Vol. 73 (1990) Br. 9, str. 141-146, ISSN: 0734-1415
- [24] Hrvatska agencija za okoliš i prirodu, Izvod iz Pravilnika o katalogu otpada (NN 90/15) - Katalog otpada, Narodne novine, Zagreb, (2015).
- [25] European Parliament and the Council of the European Union: Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste, *Official Journal of the European Union*, Vol. 61 (2018), str. 109-140, ISSN 1977-0677
- [26] Tomić, I.: Obnovljiva toplinska energija je ključ za energetske zaokret, Hrvatske šume, Vol. 202 (2013) Br. 10, str. 5-7.

- [27] Pavelić, I., Kuric, D.: Realizacija projekata i investicija u energetska postrojenja na drvenu biomasu, 8. Hrvatski dani biomase znanstveno - stručni skup, Obnovljiva toplina: ključ za energetski zaokret, Našice, (2013)
- [28] Pesonen, J., Kuokkanen, T., Rautio, P. & Lassi, U.: Bioavailability of nutrients and harmful elements in ash fertilizers: Effect of granulation, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 100 (2017), str. 92–97, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.019>
- [29] Steenari, B.M. & Lindqvist, O.: Stabilisation of biofuel ashes for recycling to forest soil, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 13 (1997) Br. 1–2, str. 39–50, [https://doi.org/10.1016/S0961-9534-\(97\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534-(97)00024-X)
- [30] Maresca, A., Hansen, M., Ingerslev, M. & Astrup, T.F.: Column leaching from Danish forest soil, amended with wood ashes: fate of major and trace elements, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 109 (2017) Br. December, str. 91–99, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.014>
- [31] Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva: An overview of the composition and application of biomass ssh. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification, *Fuel*, Vol. 105 (2013), str. 40-76, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>
- [32] Ukrainczyk, N., Vrbos, N. & Koenders, E. A. B.: Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, Vol. 30 (2016) Br. 2, str. 137–48, <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2231>
- [33] Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A., Allen, G. C. & Labrincha, J. A.: Characterisation and Use of Biomass Fly Ash in Cement-Based Materials, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 172 (2009) Br. 2-3, str. 1049–60., <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>
- [34] Vassilev, S. V., Baxter, D., Andresen, L. K. & Vassileva, C. G.: An Overview of the Composition and Application of Biomass Ash.: Part 2. Potential Utilisation, Technological and Ecological Advantages and Challenges, *Fuel*, Vol. 105 (2013), str. 19-39, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.001>
- [35] Eijk, van R. J., Supancic, K. & Obernberger, T.: Options for increased utilization of ash from biomass combustion and co-firing, (2012).
- [36] Obernberger, I, Fluch, J. & Brunner, T.: Comparative characterization of high temperature aerosols in waste wood fired fixed-bed and fluidized-bed combustion systems, *17th Eur. Biomass Conf. Exhib.*, Hamburg, (2009)
- [37] Carević, I., Baričević, A, Štirmer, N. & Šantek Bajto, J.: Correlation between physical and chemical properties of wood biomass ash and cement composites performances, *Construction and Building Materials*, Vol. 256 (2020) Br. 119460, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119450>
- [38] European Parliament and the Council: Regulation of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC, *Official Journal of the European Union*, Vol 54 (2011), str. 43–88, ISSN 1725-2555
- [39] Carević, I., Štirmer, N., Trkmić, M. & Kostanić Jurić, K., Leaching Characteristics of Wood Biomass Fly Ash Cement Composites, *Applied Sciences-Basel*, Vol. 10 (2020) Br. 10, 8704, doi:10.3390/app10238704
- [40] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350-2: 2019, „Ispitivanje svježega betona -- 6. dio: Gustoća (EN 12350-6:2019)“, (2019)
- [41] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350 - 7: 2019, „Ispitivanje svježega betona -- 7. dio: Sadržaj pora -- Tlačne metode (EN 12350-7:2019)“, (2019)
- [42] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12390 - 3: 2019, „Ispitivanje očvrstnuloaga betona -- 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka (EN 12390-3:2019)“, (2019)

- [43] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1340:2004/AC:2007, „*Betonski rubnjaci -- Zahtjevi i ispitne metode (EN 1340:2003/AC:2006)*”, (2007)
- [44] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12390 - 8:2019, „*Ispitivanje očvrsluloga betona -- 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom (EN 12390-8:2019)*”, (2019)