

# Mogućnosti primjene pepela drvene biomase kao djelomične zamjene sitnog agregata u lijevanom betonu

---

Cerković, Sonja; Štirmer, Nina

Source / Izvornik: **8. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 2022, 201 - 212**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2022>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:318079>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Mogućnosti primjene pepela drvene biomase kao djelomične zamjene sitnog agregata u lijevanom betonu

Sonja Cerković<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Nina Štirmer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, sonja.cerkovic@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, nina.stirmer@grad.unizg.hr

## Sažetak

Prema načelima kružne ekonomije postoji veliki potencijal razvoja sinergije između građevinskog i energetskog sektora kroz upotrebu nusproizvoda iz drugih industrija ili recikliranih materijala u betonskoj industriji. Cilj je ovog istraživanja pronaći mogućnosti uporabe lokalno dostupnog pepela drvene biomase (PDB) kao djelomične zamjene za sitni agregat (pijesak) u betonu. U radu je prikazan utjecaj PDB-a na relevantna mehanička svojstva i svojstva trajnosti lijevanog betona u kojima je dio sitnog agregata (pijeska) zamijenjen s različitim vrstama PDB-a u udjelu od 15 % te je proučavan njihov utjecaj u odnosu na propisane zahtjeve proizvođača predgotovljenih elemenata.

*Ključne riječi: pepeo drvene biomase, lijevani beton, zamjena sitnog agregata, pijesak, mehanička svojstva, svojstva trajnosti*

## Possibilities of using wood biomass ash as a partial replacement of fine aggregate in precast concrete

### Abstract

According to the principles of the circular economy, there is great potential for developing synergies between the construction and energy sectors through the use of by-products from other industries or recycled materials in the concrete industry. The objective of this study is to determine the potential of using locally available wood biomass ash (WBA) as a partial substitute for fine aggregate (sand) in concrete. This paper presents the influence of WBA on the relevant mechanical properties and durability of precast concrete, where a part of fine aggregate (sand) was replaced by different types of WBA in a proportion of 15%, and its influence was investigated in relation to the prescribed requirements of precast manufacturers.

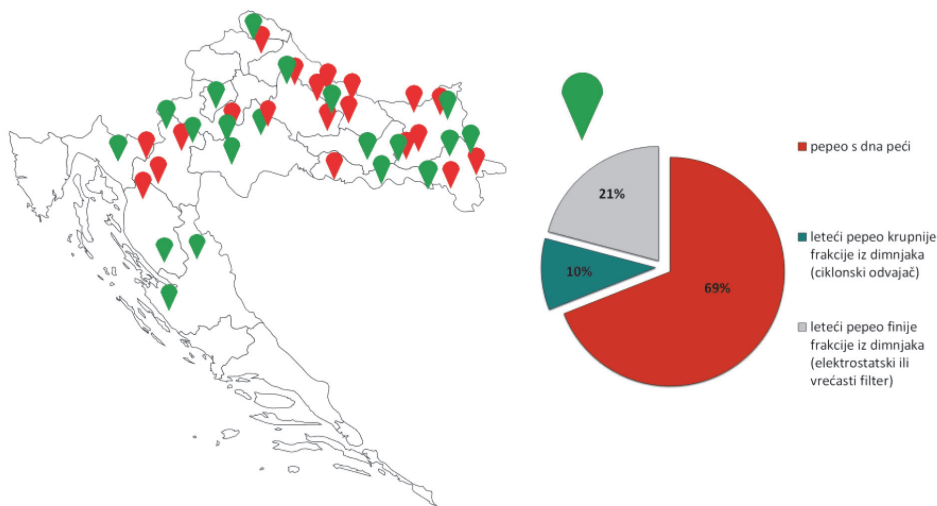
*Key words: wood biomass ash, precast concrete, replacement for fine aggregate, sand, mechanical properties, durability properties*

## 1 Uvod

Klimatske promjene predstavljaju sve veću opasnost za čovječanstvo zbog čega je potrebno pronaći brza rješenja u svrhu ispunjavanja ciljeva smanjenja emisija stakleničkih plinova za 55 % do 2030., odnosno postizanja klimatske neutralnosti [1]. Jedan od planova je i Revizija Direktive 2018/2001 [2] čime će se potaknuti još veće iskorištavanje energije iz obnovljivih izvora energije (OIE), pri čemu korištenje biomase ima dominantnu ulogu s udjelom od čak 60 % u ukupnim OIE [3]. Međutim, u postrojenjima koja koriste drvenu biomasu kao sirovinu za proizvodnju električne i toplinske energije, javljaju se novi problemi vezani uz količinu otpada koji pritom nastaje i načine upravljanja njime zbog nedostatka postojeće regulative [4, 5]. Ovaj otpad poznat je kao pepeo drvene biomase (PDB) te postoje tri vrste PDB-a: pepeo s dna peći (pepeo s dna ložišta peći), leteći pepeo krupnije frakcije (pepeo s ciklonskog odvajača) te leteći pepeo finije frakcije (pepeo s elektrostatskog filtera). Pepeo s dna peći ima drugačija svojstva od letećih PDB-ova (krupnije i finije frakcije), a karakterizira ga veća veličina zrna i veća vlažnost, što ga čini prikladnim za primjenu u podlogama cesta, nekonstruktivnima betonima ili nasipima. Međutim, njegova upotreba u betonu nije dovoljno proučavana. Prema posljednjim podacima koje je objavio HROTE (Hrvatski operator tržišta energije d.o.o.) trenutno su u Republici Hrvatskoj (RH) aktivne 42 energane na biomasu (slika 1), ukupne instalirane snage 97,068 MW<sub>e</sub> [6]. Lokacijske ikone (crvene i zelene) predstavljaju ukupan broj trenutno aktivnih postrojenja na biomasu u RH. Zelene lokacijske ikone predstavljaju energane u kojima su prikupljeni različiti uzorci PDB-a te podaci o tehnologijama izgaranja, vrsti biomase, načinu upravljanja PDB-om na osnovi provedenih anketa. Međutim, potencijal RH je mnogo veći, budući da se ovi podaci odnose samo na postrojenja priključena na javnu električnu mrežu te ne uključuju pogone za proizvodnju celuloze i papira, rasadnike, sušare ili tvornice za proizvodnju drvenog namještaja. Iz dijagrama prikazanog na slici 1 vidljivo je da 10 % energana proizvodi leteći pepeo krupnije frakcije, 21 % leteći pepeo finije frakcije, a čak 69 % pepeo s dna peći. Istražena postrojenja na biomasu ukupno proizvedu 22859,1 t/god PDB-a, a očekuje se da će ove količine PDB-a biti još veće sukladno ispunjavanju zahtjeva u bliskoj budućnosti, stoga je potrebno pronaći primjereno rješenje njegove ponovne upotrebe. S druge strane, betonska industrija poznata je po svom jednostranom modelu proizvodnje i eksploatacije prirodnih sirovina pri čemu se građevni proizvodi izrađuju većinom od prirodnih sirovina te na kraju životnog vijeka postaju građevni otpad [7]. Promatrajući 1 m<sup>3</sup> betona, ovakav sustav uobičajeno se sastoji od 8 – 16 % cementa, 7 – 20 % vode i 65 – 75 % agregata, uključujući i pijesak s udjelom od približno 25 % [8]. Procjenjuje se da se svake godine iz kamenoloma, jama, rijeka, obala i morskog okoliša izvuče ukupno 40 - 50 milijardi tona agregata predstavljajući ozbiljnu prijetnju slatkovodnom i morskom ribarstvu i biološkoj raznolikosti, a tako-

đer utječe se na riječnu i obalnu eroziju [7]. Osim toga, eksploatacija agregata značajno doprinosi emisijama stakleničkog plina ( $\text{CO}_2$ ), pri čemu je izravan utjecaj povezan s emisijama iz samih procesa ekstrakcije i transporta, a neizravan s procesom proizvodnje cementa za upotrebu u betonu [9]. Dosadašnja istraživanja pokazala su da se PDB zbog svojih fizikalnih karakteristika i kemijskog sastava može ponovno upotrijebiti betonskoj industriji kao djelomična zamjena cementa i/ili agregata [4, 10, 11]. Na taj način doprinijelo bi se ispunjavanju pojedinih zahtjeva za postizanjem klimatske neutralnosti, ali bi se riješila i pitanja vezana uz upravljanje PDB-om, emisije stakleničkih plinova te iscrpljivanje prirodnih resursa stvarajući inovativni, ekološki prihvatljiviji materijal.

Ovo istraživanje daje pregled mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti ispitanih na mješavinama lijevanog betona s PDB-om kao djelomičnom zamjenom sitnog agregata (pijeska), budući da njegova upotreba u betonu nije dovoljno proučavana. Cilj je pronaći mogućnosti primjene PDB-a u proizvodnji predgotovljenih elemenata. Za potrebe ovog istraživanja prikupljeni su različiti PDB-ovi iz 3 energane na području RH.



Slika 1. Lokacije aktivnih postrojenja na biomasi u Republici Hrvatskoj te udjeli različitih vrsta PDB-ova koji se generiraju u 22 postrojenja na biomasi

## 2 Eksperimentalni dio

Za potrebe ovog istraživanja izrađene su različite mješavine lijevanog betona – referentna, koja nije sadržavala PDB i 3 mješavine (oznaka M1, M2, M3) u kojima je 15 % sitnog agregata (pijeska) zamijenjeno različitim vrstama PDB-a (oznaka PDB1, PDB2, PDB3) te je proučavan njihov utjecaj na relevantna mehanička svojstva i svojstva trajnosti u odnosu na propisane zahtjeve proizvođača za lijevani beton koji se uobičajeno ugrađuje u proizvode poput kanalice i/ili lijevane nadvožnjačke glave.

### 2.1 Materijali i metode

#### 2.1.1 Materijali

Prilikom izrade mješavina lijevanog betona korišteni su originalni sastavi proizvođača betonske galanterije Beton Lučko RGB d.o.o. U svim mješavinama korišteni su obični portlandski cement, prirodni agregat Trstika (frakcije 0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm) iz šljunčare “Smontara“, pitka voda iz vodovoda te dodaci superplastifikator i aerant. Osim toga, za potrebe ovog istraživanja odabrana su 3 PDB-a s dna peći prikupljena u energanama na drvenu biomasu u RH, u kojima se uglavnom koristi tehnologija izgaranja na rešetki. Drvna biomasa koju koriste kao sirovinu je čista drvena sječka, cijela drvena sječka i ostaci od pridobivanja drva, a najčešće vrste drveta su miješano drvo, hrast, grab i bukva. Tablica 1 prikazuje kemijski sastav PDB-ova koji su korišteni kao zamjena za 15 % sitnog agregata (pijeska).

Kemijski zahtjevi za agregate, u ovom slučaju pijeska, definirani su normom HRN EN 12620 [12], odnosno HRN EN 1744-1 [13]. Za primjenu PDB-a u betonu, potrebno je ograničiti sadržaj klorida, sulfata topivih u kiselini, ukupnog sumpora te sastojaka koji utječu na brzinu vezivanja i očvršćivanja betona poput organskih tvari, šećera, laganih čestica itd. Dodatno je potrebno obratiti pozornost na sadržaj alkalnoreaktivnih sastojaka [12] u PDB-u, koji mogu prouzročiti pojavu alkalnosilikatne reakcije [8]. Nepovoljnu komponentu PDB-a predstavlja i gubitak žarenjem, odnosno sadržaj neizgorenog ugljika (tablica 1), jer negativno utječe na svojstva trajnosti betona [8], poput povećanog upijanja vode [14]. Tablica 2 prikazuje fizikalna svojstva PDB-a i sitnog agregata (pijeska) prema normama za određivanje svojstava agregata [12, 13, 15].

Tablica 1. Kemijski sastav PDB-ova korištenih za djelomičnu zamjenu sitnog agregata (pijeska)

Svojstvo	Jedinica	PDB1	PDB2	PDB3
Gubitak žarenjem (950 °C)	mas.%	11,5	3,9	6,6
Sadržaj P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mas.%	2,86	3,36	2,93
Sadržaj Na <sub>2</sub> O	mas.%	0,47	1,07	1,17
Sadržaj K <sub>2</sub> O	mas.%	12,03	11,55	7,68
Sadržaj CaO	mas.%	49,07	36,59	27,85
Sadržaj MgO	mas.%	3,89	4,43	4,17
Sadržaj Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	mas.%	3,73	6,15	9,79
Sadržaj TiO <sub>2</sub>	mas.%	0,42	0,9	0,68
Sadržaj Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	mas.%	2,3	3,56	4,03
Sadržaj SiO <sub>2</sub>	mas.%	21,87	30,1	38,58
Sadržaj MnO	mas.%	1,26	0,72	0,34
Sadržaj SO <sub>3</sub>	mas.%	1,38	1,26	2,18
SiO <sub>2</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	mas.%	27,9	39,81	52,4
Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	mas.%	8,39	8,67	6,22
pH	-	13,61	13,22	12,89

Tablica 2. Fizikalna svojstva sitnog agregata (pijeska) i PDB-ova

Agregat	P	PDB1	PDB2	PDB3
Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	2,88	2,88	2,86	2,43
Sadržaj sitnih čestica (%)	f <sub>3</sub>	<b>11,7</b>	1,2	<b>32,3</b>
Apsorpcija vode (%)	0,7	<b>13,9</b>	<b>8,5</b>	<b>4,3</b>

Pijesak podrazumijeva dio agregata frakcije maksimalne veličine zrna do 4 mm, dok PDB-ovi sadrže i čestice veličine do 16 mm, odnosno 31,5 mm, iako udio tih čestica nije velik. Stoga, prilikom upotrebe PDB-a kao djelomične zamjene za pijesak, bilo bi preporučljivo ukloniti čestice koje su veće od 4 mm [16]. Sadržaj sitnih čestica trebao bi zadovoljavati razred propisan za pijesak odnosno f<sub>3</sub>, što znači da sadržaj sitnih čestica agregata koje prolaze kroz sito otvora 0,063 mm mora biti ≤ 3 %. Iz tablice 2 vidljivo je da PDB1 i PDB3 ne zadovoljavaju propisani kriterij, te se može očekivati nepovoljan utjecaj na obradljivost i povećanu potrebu za vodom. Apsorpcija vode i gustoća, PDB-a i pijeska, određene su prema HRN EN 1097-6 [17]. Utvrđeno je da je apsorpcija vode pijeska 0,7 %, dok je za PDB-ove od 6 do 20 puta veća, što upućuje na veliku poroznost PDB-a. Većina običnih agregata ima apsorpciju od 1 do 2 %. U ovom istraživanju niti jedan PDB nije unutar navedenih granica te se može očekivati nepovoljan utjecaj na svojstva trajnosti ispitanih uzoraka lijevanog betona [17].

## 2.1.2 Metode

Izrađene su 4 mješavine lijevanog betona – referentna (oznake M0), koja nije sadržavala PDB te 3 mješavine (oznaka M1, M2, M3) u kojima je 15 % sitnog agregata (pijeska) zamijenjeno različitim vrstama PDB-a (oznaka PDB1, PDB2, PDB3). Ovim istraživanjem želi se prikazati kako zamjena dijela sitnog agregata (pijeska) različitim vrstama PDB-ova utječe na relevantna mehanička svojstva – čvrstoću na savijanje te svojstva trajnosti – upijanje vode, otpornost na djelovanje smrzavanja sa soli za odmrzavanje i otpornost na habanje. Kako bi se navedeno utvrdilo, provedena su potrebna ispitivanja svojstava betonskih mješavina lijevanog betona u svježem i očvršnulom stanju u skladu s planom ispitivanja prikazanim u tablici 3.

**Tablica 3. Plan ispitivanja lijevanog betona s PDB-om kao zamjenom dijela sitnog agregata (pijeska)**

Svojstva	Norme
Konzistencija slijeganjem	HRN EN 12350-2:2019 [18]
Gustoća svježeg betona	HRN EN 12350-6:2019 [19]
Udio pora	HRN EN 12350-7:2019 [20]
Temperatura svježeg betona	HRN EN 12350-1:2019 [21]
Čvrstoća na savijanje	HRN EN 12390-5:2019 [22]
Upijanje vode	HRN EN 1340:2003 [23]
Otpornost na smrzavanje sa soli za odmrzavanje	
Otpornost na habanje	

## 3 Rezultati i diskusija

### 3.1 Rezultati ispitivanja lijevanog betona s PDB-om u svježem stanju

U tablici 4 prikazani su rezultati ispitivanja svojstava svježeg lijevanog betona - referentne mješavine (M0) i mješavina s različitim vrstama PDB-ova kao 15 %-tne zamjene sitnom agregatu (pijesku). Prema zahtjevu proizvođača za lijevani beton, propisani razred slijeganjem je S3 (100 – 150 mm), međutim odstupanje svih mješavina lijevanog betona ne predstavlja ograničenje za njihovu primjenu. Mješavine M2 i M3 pokazale su povećanu obradljivost u odnosu na propisani kriterij te se mogu svrstati u razrede konzistencije slijeganjem S5 i S4. S druge strane, mješavina M1 pokazala je pad obradljivosti u odnosu na referentnu mješavinu i propisani kriterij te se može svrstati u razred konzistencije slijeganjem S1. Gubitak obradljivosti može biti posljedica povećane potrebe za vodom primjenom PDB-ova zbog njegovog nepravilnog oblika i porozne strukture čestica te samim time i njegovom većom specifičnom površinom koje imaju tendenciju apsorbirati više vode [7, 16, 24]. Tablica 2

pokazuje da apsorpcija PDB1 iznosi 13,9 %, što je približno 20 puta više u usporedbi s pijeskom čija apsorpcija iznosi 0,7 %. Osim toga, na gubitak obradljivosti vjerojatno je dodatno utjecao veliki sadržaj sitnih čestica od 11,7 % [25]. Naime, sadržaj sitnih čestica mora zadovoljavati razred propisan za pijesak odnosno  $f_3$ , što znači da sadržaj sitnih čestica agregata koje prolaze kroz sito otvora 0,063 mora biti  $\leq 3$  %. Iz tablice 2 je vidljivo da PDB1 i PDB3 ne zadovoljavaju propisani kriterij te se može očekivati nepovoljan utjecaj na obradljivost i povećana potreba za vodom. S obzirom na kemijski sastav PDB1, ovakva svojstva mogu se povezati i s visokim sadržajem neizgorjelog ugljika (gubitak žarenjem), slobodnog CaO [7, 16, 24] te alkalija [8]. Rezultati ispitivanja gustoće mješavina lijevanog betona ne ukazuju na značajniju promjenu. Sadržaj zraka mješavina lijevanog betona s PDB-ovima nije zadovoljio kriterij zahtjevan od proizvođača, u rasponu od 4,5 do 7,0 %. Mješavina M3 pokazala je veći udio pora u odnosu na referentnu mješavinu za 31,5 %.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja svojstava svježeg lijevanog betona s PDB-om

Oznaka mješavine	M0	M1	M2	M3
Konzistencija [mm]	220	15	230	210
Gustoća [kg/dm <sup>3</sup> ]	2,34	2,3	2,36	2,25
Temperatura [°C]	19,5	19,1	5,7	7,5
Udio pora [%]	5	3,2	3,1	7,3

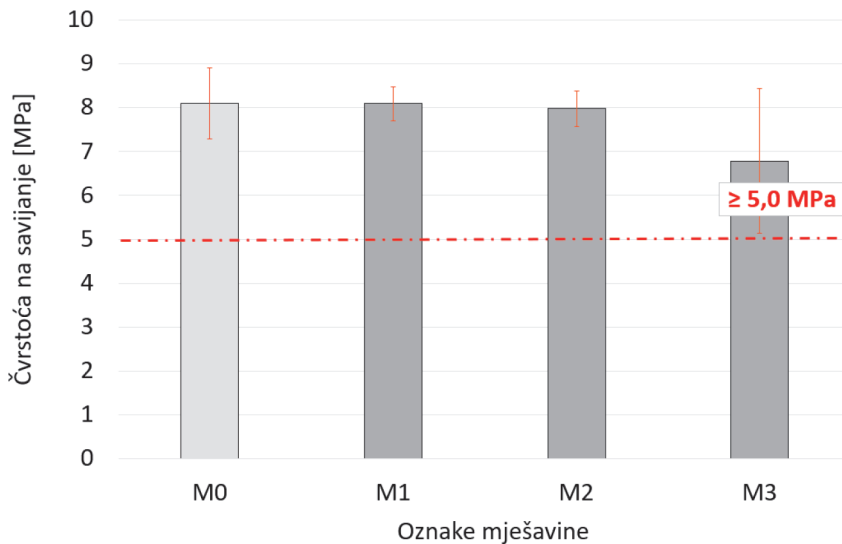
## 3.2 Rezultati ispitivanja lijevanog betona s PDB-om u očvrslulom stanju

### 3.2.1 Mehanička svojstva

Mehaničko ponašanje uzoraka lijevanog betona s PDB-om kao djelomične zamjene za sitni agregat (pijesak) prikazano je kroz ispitivanje čvrstoće na savijanje nakon 28 dana te usporedbu s propisanim kriterijima dobivenim od proizvođača. Potrebno je naglasiti da je ispitivanje čvrstoće na savijanje mješavina M0 i M1 provedeno na uzorcima gotovih proizvoda (lijevanih nadvožnjačkih glava) prema HRN EN 1340:2004, dok je na ostalim mješavinama lijevanog betona M2 i M3 provedeno na uzorcima prizmi dimenzija 10 x 10 x 40 cm ili 10 x 10 x 50 cm prema normi HRN EN 12390-5:2019.

Na slici 2 prikazane su srednje vrijednosti čvrstoće na savijanje uzoraka lijevanog betona s različitim vrstama PDB-a. Rezultati pokazuju da je mješavina lijevanog betona M3 pokazala blagi pad čvrstoće na savijanje u odnosu na referentnu mješavinu od 16,17 %. Međutim, sve mješavine lijevanog betona - referentna (M0) i s PDB-om (M1, M2 i M3) zadovoljavaju propisane kriterije proizvođača za lijevani beton razreda 2, odnosno  $T \geq 5$  MPa.





Slika 2. Rezultati ispitivanja čvrstoće savijanjem uzoraka lijevanog betona s PDB-om

### 3.2.2 Svojstva trajnosti

Svojstva trajnosti uzoraka lijevanog betona s PDB-om kao djelomične zamjene za sitni agregat (pijesak) prikazana su kroz ispitivanje upijanja vode, otpornosti na djelovanje smrzavanja sa solima za odmrzavanje i otpornosti na habanje ovisno o propisanim zahtjevima dobivenim od proizvođača. Rezultati ispitivanja trajnosti i kriteriji propisani od proizvođača prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja svojstava trajnosti uzoraka lijevanog betona s PDB-om

Oznaka mješavine	Upijanje vode [%]					Kriterij
	M0	M1	M2	M3	Razred	
Srednja vrijednost, B	5,2	7,4	4,5	5,4	2	≤ 6 %
Otpornost na djelovanje smrzavanja sa solima za odmrzavanje [kg/m <sup>2</sup> ]						
Gubitak mase nakon 28 ciklusa, D	0,0	3,6	0,2	0,2	3	≤ 1,0 kg/m <sup>2</sup>
Otpornost na habanje [mm <sup>3</sup> ]						
Gubitak volumena, I	8337	9769	6016	5847	4	≤ 18000 mm <sup>3</sup> /5000 mm <sup>2</sup>

Rezultati ispitivanja upijanja vode prikazani su kao srednja vrijednost (B) triju uzorka prizmi. Vrijednosti upijanja vode kretale su se u rasponu od 4,5 % do 7,4 %. U usporedbi s referentnom mješavinom (M0), sve mješavine s PDB-om imale su veće upijanje vode uz iznimku mješavine M2. Isti trend uočen je u ranijim istraživanjima pri zamjeni pijeska u različitim udjelima [25, 26], što se povezuje s poremećajem u strukturi zbog neoptimalne raspodjele veličine čestica, odnosno većeg broja šupljina [27]. Mješavina M1 pokazala je najveću vrijednost upijanja vode što se može povezati s velikom vrijednošću apsorpcije vode PDB1 od 13,9 %. Promatrajući rezultate u odnosu na kriterije propisane od proizvođača, sve mješavine lijevanog betona - referentna (M0) i s PDB-om (M2 i M3) - zadovoljile su propisani kriterij od  $B \leq 6\%$  za razred 2 te i u ovom slučaju mješavina M1 nije zadovoljila. Ovi rezultati pokazuju da zamjena dijela sitnog agregata (pijeska) u udjelu od 15 % ima pozitivan učinak na ovo svojstvo, osim u slučaju mješavine M1.

U tablici 5 prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na djelovanje smrzavanja sa soli za odmrzavanje kao srednje vrijednosti (D). Srednja vrijednost predstavlja gubitak mase oljuštenog materijala s ispitne površine 4 uzorka svake mješavine lijevanog betona s PDB-om tijekom njihovog izlaganja 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u prisustvu soli za odmrzavanje. Prema propisanom kriteriju od proizvođača za razred 3, srednja vrijednost gubitka mase oljuštenog materijala nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima za odmrzavanje treba biti  $D \leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ . Sve mješavine lijevanog betona s PDB-om, osim mješavine M1, zadovoljile su propisani kriterij. Ovakav trend može se povezati s visokim gubitkom žarenjem (11,5 %) [28] i alkalijama (8,39 %) [29] sadržanim u PDB1. Gubitak mase oljuštenog materijala mješavine lijevanog betona M1 iznosio je  $2,58 \text{ kg/m}^2$  nakon samo 14 ciklusa.

Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje uzoraka lijevanog betona s PDB-om kao djelomičnom zamjenom sitnog agregata (pijeska) dobiveni su kao srednja vrijednost (I) na 3 ispitna uzorka dimenzija  $71 \times 71 \times 50 \text{ mm}$  nakon 16 ciklusa habanja. Srednja vrijednost (I) predstavlja gubitak volumena po površini od  $5000 \text{ mm}^2$ . Iz rezultata je vidljivo da su sve mješavine lijevanog betona – referentna (M0) i s PDB-om (M1, M2 i M3) zadovoljile propisani kriterij za razred 4 od  $I \leq 18000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$ .

## 4 Zaključak

Ovim istraživanjem prikazan je potencijal primjene PDB-a kao zamjene dijela sitnog agregata (pijeska) od 15 % u mješavinama lijevanog betona kroz zadovoljenje većine propisanih kriterija od proizvođača na relevantna mehanička svojstva – čvrstoću na savijanje te svojstva trajnosti – upijanje vode, otpornost na djelovanje smrzavanja sa soli za odmrzavanje i otpornost na habanje. Sve mješavine lijevanog betone s PDB-om zadovoljile su većinu propisanih kriterija za dane razrede, osim mješavine M1 (PDB1), pri čemu je potrebno obratiti pozornost na kemijski sastav i fizikalne

karakteristike PDB-a. Upotrebom PDB-a u betonu kao djelomične zamjene sitnog agregata (pijesku) utječe se na ekološki prihvatljiviju proizvodnju betona kojim se smanjuje prekomjerna emisija stakleničkih plinova, iscrpljivanje prirodnih resursa i potrošnja energije. S druge strane, pomaže se u rješavanju problema upravljanja PDB-om te smanjenja s time povezanih troškova.

## 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.”

## Literatura

- [1] Europska komisija: Komunikacija komisije Europskom parlamentu, Europskom Vijeću, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i odboru regija, Bruxelles, 2019.
- [2] Europski parlament i Vijeće: Direktiva (EU) 2018/2001 Europskog parlamenta i Vijeća od 11. prosinca 2018. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora, Službeni list Europske Unije, L 328, Bruxelles, 2018.
- [3] Europska komisija, Zajednički istraživački centar: Brief on biomass for energy in the European Union, Publikacije EU-a, 2019.
- [4] Agrela, F., Cabrera, M., Morales, M. M., Zamorano, M., Alshaaer, M.: Biomass fly ash and biomass bottom ash, *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. pp. 23–58, 2018.
- [5] Pettersson, M., Bjornsson, L., Borjesson, P. Recycling of ash from co-incineration of waste wood and forest fuels: An overlooked challenge in a circular bioenergy system, *Biomass and Bioenergy*, 142, pp. 1-9, 2020.
- [6] Hrvatski operator tržišta energije d.o.o. (HROTE): Povlašteni proizvođači s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija su postrojenja u sustavu poticanja (stanje na dan 30.04.2022.), Zagreb, 2022.
- [7] Carević, I., Serdar, M., Štirmer, N, Ukrainczyk, N.: Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials, *J. Clean. Prod.*, vol. 229, pp. 1045–1064, 2019.
- [8] Bjegović D., Štirmer, N.: Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.

- [9] United Nations Environment Programme (UNEP): Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance and global sand resources, Geneva, Switzerland, 2019.
- [10] Cheah C. B., 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, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, pp. 669–658, 2011.
- [11] Udoeyo, F. F., Inyang, H., Young, D. T., Oparadu, E. E.: Potential of wood waste ash as an additive in concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol 18, br. 4, pp. 605–611, 2006.
- [12] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12620:2008 Agregati za beton (EN 12620:2002+A1:2008), 2008.
- [13] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1744-1:2012 Ispitivanja kemijskih svojstava agregata - 1. dio: Kemijska analiza (EN 1744-1:2009+A1:2012), 2012.
- [14] Carević, I., Baričević, A., Štirmer, N., Šantek Bajto, J.: Correlation between physical and chemical properties of wood biomass ash and cement composites performances, *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, 2020.
- [15] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1097 - 5: 2008 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata -- 5. dio: Određivanje sadržaja vode sušenjem u ventilirajućem sušioniku (EN 1097-5:2008), 2008.
- [16] Ukrainczyk, N., Vrbos, N.: Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, vol. 30, br. 2, pp. 137-148, 2016.
- [17] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1097-6:2013 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata -- 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode (EN 1097-6:2000+AC:2002), 2013.
- [18] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350 - 2: 2019 Ispitivanje svježega betona - 2. dio: Ispitivanje slijeganjem (EN 12350-2:2019), 2019.
- [19] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350 - 6: 2019, Ispitivanje svježega betona - 6. dio: Gustoća (EN 12350-6:2019), 2019.
- [20] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350 - 7: 2019 Ispitivanje svježega betona - 7. dio: Sadržaj pora - Tlačne metode (EN 12350-7:2019), 2019.
- [21] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350 - 1: 2019, Ispitivanje svježega betona - 1. dio: Uzorkovanje i uobičajena oprema (EN 12350-1:2019), 2019.
- [22] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12350-5 Ispitivanje svježega betona - 5. dio: Ispitivanje rasprostiranjem (EN 12350-5:2009), 2009.
- [23] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1340:2003, Betonski rubnjaci - Zahtjevi i ispitne metode (EN 1340:2003), 2004.

- [24] Rissanen, J., Ohenoja, K., Kinnunen, P., Romagnoli, M., Illikainen, M.: Milling of peat-wood fly ash: Effect on water demand of mortar and rheology of cement paste, *Constr. Build. Mater.*, vol. 180, pp. 143–153, 2018.
- [25] Lessard, J.-M., Omran, A. F., Tagnit-Hamou, A., Gagne, R.: Feasibility of Using Biomass Fly and Bottom Ashes to Produce RCC and PCC, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, br. 4, 2016.
- [26] Beltrán, M. G. Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J., Ramírez, A.: Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates, *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 231–238, 2014.
- [27] Medina, J. M., Sáez del Bosque, I. F., Frías, M., Sánchez de Rojas, M. I., Medina, C.: Durability of new blended cements additioned with recycled biomass bottom ASH from electric power plants, *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 429–440, 2019.
- [28] Wang, S., Llamazos, E., Baxter, L., Fonseca, F.: Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests, *Fuel*, vol. 87, br. 3, pp. 359–364, 2008.
- [29] Wang S., Baxter, L.: Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability, *Fuel Process. Technol.*, vol. 88, pp. 1165–1170, 2007.