

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

Sonja Cerković¹, prof. dr. sc. Nina Štirmer²

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, sonja.cerkovic@grad.unizg.hr

²Sveučilište 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.

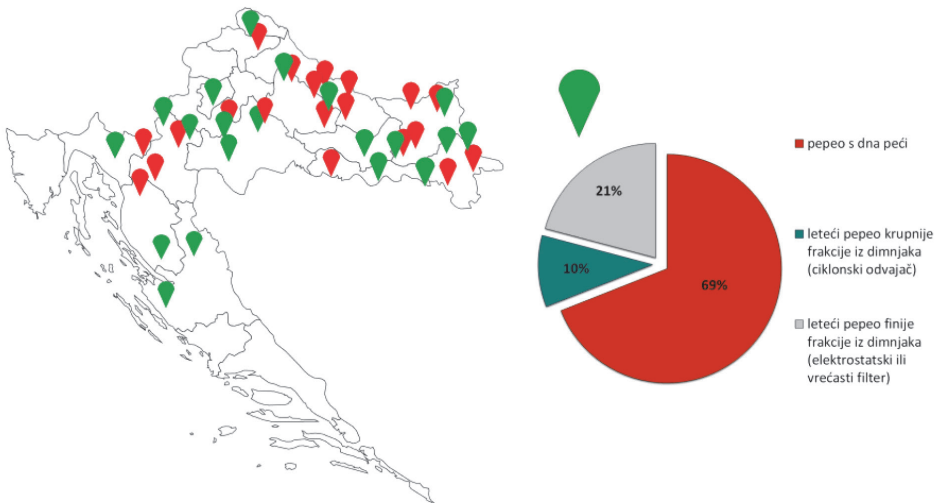
Key words: wood biomass ash, precast concrete, replacement for fine aggregate, sand, mechanical properties, durability properties

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_e [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 m³ 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 (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 ₂ O ₅ | mas.% | 2,86 | 3,36 | 2,93 |
| Sadržaj Na ₂ O | mas.% | 0,47 | 1,07 | 1,17 |
| Sadržaj K ₂ 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 ₂ O ₃ | mas.% | 3,73 | 6,15 | 9,79 |
| Sadržaj TiO ₂ | mas.% | 0,42 | 0,9 | 0,68 |
| Sadržaj Fe ₂ O ₃ | mas.% | 2,3 | 3,56 | 4,03 |
| Sadržaj SiO ₂ | mas.% | 21,87 | 30,1 | 38,58 |
| Sadržaj MnO | mas.% | 1,26 | 0,72 | 0,34 |
| Sadržaj SO ₃ | mas.% | 1,38 | 1,26 | 2,18 |
| SiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ | mas.% | 27,9 | 39,81 | 52,4 |
| Na ₂ O _{eq} | 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 ³) | 2,88 | 2,88 | 2,86 | 2,43 |
| Sadržaj sitnih čestica (%) | f ₃ | 11,7 | 1,2 | 32,3 |
| Apsorpcija vode (%) | 0,7 | 13,9 | 8,5 | 4,3 |

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 f₃, 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 ≤ 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

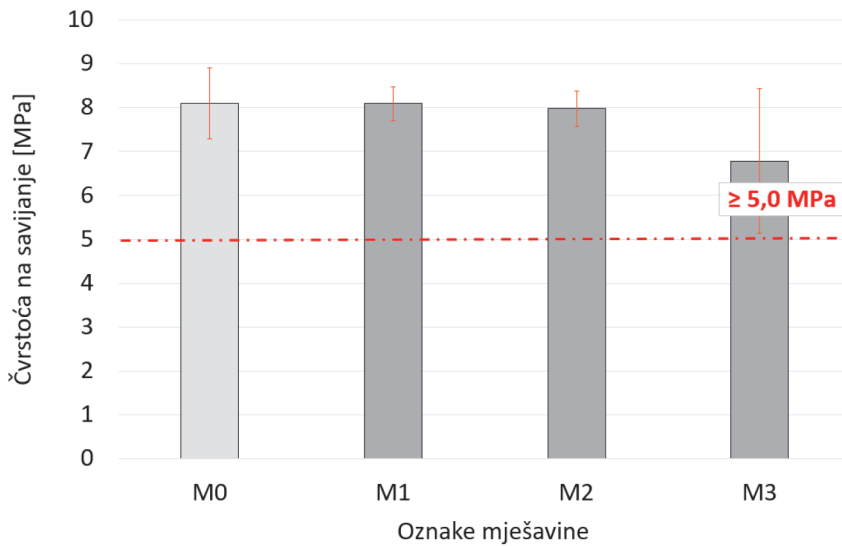
| Oznaka mješavine | M0 | M1 | M2 | M3 |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Konzistencija [mm] | 220 | 15 | 230 | 210 |
| Gustoća [kg/dm ³] | 2,34 | 2,3 | 2,36 | 2,25 |
| Temperatura [°C] | 19,5 | 19,1 | 5,7 | 7,5 |
| Udio pora [%] | 5 | 3,2 | 3,1 | 7,3 |

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 | $\leq 6\%$ |
| Otpornost na djelovanje smrzavanja sa solima za odmrzavanje [kg/m ²] | | | | | | |
| Gubitak mase nakon 28 ciklusa, D | 0,0 | 3,6 | 0,2 | 0,2 | 3 | $\leq 1,0\text{ kg/m}^2$ |
| Otpornost na habanje [mm ³] | | | | | | |
| Gubitak volumena, I | 8337 | 9769 | 6016 | 5847 | 4 | $\leq 18000\text{ mm}^3/5000\text{ mm}^2$ |

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 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.