

# Pepeo drvene biomase kao djelomična zamjena agregata u proizvodnji cementnih kompozita

---

**Bratić, Antea**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:835522>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij građevinarstvo

**ANTEA BRATIĆ**

**ZAVRŠNI RAD**

**PEPEO DRVNE BIOMASE KAO DJELOMIČNA ZAMJENA  
AGREGATA U PROIZVODNJI CEMENTNIH KOMPOZITA**

Zagreb, rujan 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij građevinarstvo

## **ZAVRŠNI RAD**

**Kandidat:** Antea Bratić

**Naslov rada:** Pepeo drvne biomase kao djelomična zamjena agregata u proizvodnji cementnih kompozita

**Mentor:** prof. dr. sc. Nina Štirmer

Zagreb, rujan 2023.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

OBRAZAC 2

## TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Antea Bratić**

JMBAG: **0082067920**

Završni ispit iz predmeta: **Gradiva**

Naslov teme završnog ispita:	HR	<b>Pepeo drvene biomase kao djelomična zamjena agregata u proizvodnji cementnih kompozita</b>
	ENG	<b>Wood biomass ash as a partial replacement of aggregate in the production of cement composites</b>

Opis teme završnog ispita:

Pri proizvodnji energije u energanama na drvenu biomasu, kao otpadni materijal nastaje pepeo drvene biomase (PDB) koji se uglavnom odlaže na odlagališta, djelomično se koristi u poljoprivredi, a predstavlja i potencijalnu sirovinu za primjenu u građevinarstvu. U radu je potrebno napraviti pregled postojećih istraživanja koja se bave primjenom pepela drvene biomase kao djelomične zamjene agregata u cementnim mortovima i betonima. Uzimajući u obzir zahtjeve za agregate koji su propisani u postojećim normama, potrebno je analizirati koja su fizikalna i kemijska svojstva PDB-a relevantna za njegovu primjenu te kako PDB utječe na svojstva cementnih kompozita. Pri tome je potrebno dati osvrt na optimalne količine zamjene prirodnog agregata.

Datum: **17.4.2023.**

Komentor:   
(Ime i prezime komentora)

Mentor: **prof. dr. sc. Nina Štirmer**  
(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

## **Pepeo drvne biomase kao djelomična zamjena agregata u proizvodnji cementnih kompozita**

### **Sažetak:**

Pepeo drvne biomase (PDB) nastaje kao otpadni materijal pri proizvodnji energije u energanama na drvenu biomasu. Trenutno se PDB uglavnom odlaže na odlagališta, a budući da su otpadne količine sve veće zbog povećane potrebe za energijom, odlaganje PDB-a predstavlja ekološki problem. Stoga se kroz posljednje desetljeće nastoje pronaći ekološki prihvatljivija rješenja. Iz tog razloga je sve više istraživanja u građevinskoj industriji usmjereno prema iskorištavanju PDB-a kao djelomične zamjene za agregat u cementnim kompozitima. Ovisno o vrsti cementnog kompozita, dodavanje PDB-a kao djelomične zamjene agregata može imati različit utjecaj na različita svojstva. Iako PDB može imati negativan utjecaj na fizikalna i mehanička svojstva cementnih kompozita, pregledom istraživanja vidljivo je da postoji veliki potencijal iskoristivosti PDB-a. Ako bi se mogla dobiti zadovoljavajuća svojstva cementnih kompozita, sačuvao bi se dio prirodnih agregata i smanjio bi se štetan učinak sve većih količina PDB-a na odlagalištima.

**Ključne riječi:** pepeo drvne biomase, agregat, cementni kompozit

## **Wood biomass ash as a partial replacement of aggregate in the production of cement composites**

### **Summary:**

Wood biomass ash (WBA) is generated as a waste material during energy production in wood biomass power plants. Currently, WBA is mostly disposed of in landfills, and as the waste quantities are increasing due to the growing energy demand, the disposal of WBA poses an environmental problem. Therefore, over the past decade, efforts have been made to find more environmentally friendly solutions. For this reason, there is a growing focus in the construction industry on utilizing WBA as a partial replacement for aggregate in cement composites. Depending on the type of cement composite, adding WBA as a partial aggregate replacement can have varying effects on different properties. Although WBA may have a negative impact on the physical and mechanical properties of cement composites, a review of research shows that there is significant potential for the use of WBA. If properties of cement composites that are meeting specifications could be achieved, it would help preserve natural aggregates and reduce the harmful effects of increasing WBA quantities in landfills.

**Key words:** wood biomass ash, aggregate, cement composite

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
1. UVOD .....	1
2. PEPEO DRVNE BIOMASE .....	2
2.1. Svojstva pepela drvne biomase .....	3
3. ZAHTJEVI ZA AGREGAT.....	6
4. PREGLED POSTOJEĆIH ISTRAŽIVANJA PRIMJENE PDB-A KAO DJELOMIČNE ZAMJENE ZA AGREGAT U CEMENTNIM KOMPOZITIMA.....	7
4.1. Gustoća i čvrstoća morta s mješavinom pepela drvne biomase, drobljenog gnajsa i riječnog pijeska kao finog agregata.....	7
4.2. Optimalna kombinacija pepela drvne biomase, drobljene gume i usitnjenog stakla .....	8
4.3. Mehaničko ponašanje mortova napravljenih s pepelom s dna peći biomase od masline .....	10
4.4. Pepeo drvne biomase korišten kao djelomična zamjena za pijesak i/ili cement u mortu .....	12
4.5. Utjecaj pepela drvne biomase na svojstva vapnenog morta za obnovu vlažnih povijesnih zgrada .....	14
4.6. Poboľjšani pepeo s dna peći iz spalionice komunalnog otpada kao agregat u betonu ..	19
4.7. Mogućnost korištenja letećeg pepela i pepela s dna peći drvne biomase za proizvodnju valjanog betona i betona zbijenog vibriranjem .....	20
4.8. Primjena pepela nastalog spaljivanjem kukuruznog klipa kao djelomične zamjene pijeska u betonu.....	22
4.9. Mogućnost korištenja letećeg pepela i pepela s dna peći drvne biomase u proizvodnji suhog betona.....	24
4.10. Mehanička svojstva i svojstva trajnosti betona proizvedenih s pepelom s dna peći drvne biomase (masline) i recikliranim krupnim agregatima .....	25
5. DJELOMIČNA ZAMJENA AGREGATA U CEMENTNIM KOMPOZITIMA PEPELOM DRVNE BIOMASE - OSVRT .....	28

6. ZAKLJUČAK .....	30
LITERATURA.....	31



## 1. UVOD

Drvena biomasa je jedan od najvažnijih obnovljivih izvora energije današnjice. Iako je, u usporedbi s drugim postupcima, izgaranjem biomase smanjena emisija štetnih plinova u atmosferu, i dalje postoji ekološki problem zbog odlaganja pepela koji nastaje kao nusprodukt [1]. Pepeo drvene biomase (PDB) nastaje kao otpadni materijal pri proizvodnji energije u energanama na drvenu biomasu. Budući da se PDB uglavnom odlaže na odlagališta, a otpadne količine su godinama sve veće zbog sve veće potrebe za energijom, odlaganje PDB-a predstavlja ekološki problem. Kao takav, PDB uvelike može utjecati na kvalitetu života i zdravlje ljudi. Stoga, znanstvenici kroz posljednje desetljeće nastoje pronaći ekološki prihvatljivija rješenja. Poznato je da se PDB često koristi u poljoprivredi, a kroz zadnjih par godina sve je više istraživanja u građevinskoj industriji usmjereno prema iskorištavanju pepela drvene biomase kao djelomične zamjene za agregat u cementnim kompozitima. Iako ovaj postupak nije u potpunosti definiran, kroz istraživanja se promatra utjecaj djelomične zamjene agregata PDB-om na svojstva cementnih kompozita. Na taj način, kontrolirajući različite utjecajne parametre i analizirajući dobivene rezultate će biti moguće u budućnosti optimizirati i stabilizirati ovaj postupak. U građevinskim materijalima, potražnja za betonom je porasla zbog povećane populacije i razvoja infrastrukture. Poznato je da je industrija betona jedan od najvećih potrošača različitih prirodnih agregata (šljunka, pijeska itd.). Prirodni rezervoari pijeska se iscrpljuju na globalnoj razini zbog neprekidne potrošnje agregata u betonu, a veliku zabrinutost predstavlja i štetni učinak nekontroliranog vađenja finog agregata iz riječnih korita. Iz tog razloga, zamjena prirodnog agregata PDB-om u cementnim kompozitima može biti jedno od rješenja aktualnih ekoloških problema u betonskoj industriji [2].

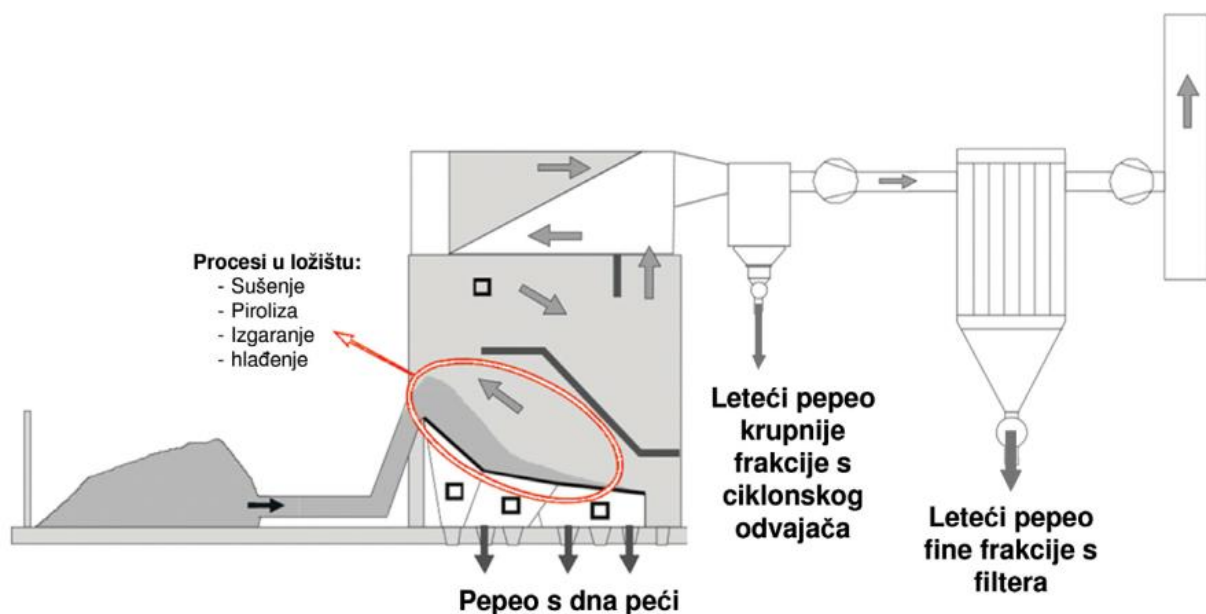
Cilj ovoga rada je analizirati koja su fizikalna i kemijska svojstva PDB-a relevantna za njegovu primjenu i različite utjecaje na svojstva cementnih kompozita. U tu svrhu, biti će prikazan pregled postojećih istraživanja na ovu temu. Nadalje, biti će dan osvrt na optimalne količine zamjene prirodnog agregata cementnih kompozita pepelom drvene biomase.

## 2. PEPEO DRVNE BIOMASE

Pepeo drvne biomase ostaje kao nusprodukt izgaranja biomase u energanama. Iako se korištenje biomase kao obnovljivog izvora energije smatra ekološki prihvatljivim, održivo upravljanje pepelom drvne biomase kao nusproduktom ostaje važan izazov za održivost procesa. Razlikuju se tri različite tehnologije izgaranja drvne biomase. Prva tehnologija je tehnologija *izgaranja na rešetki*, tehnologija koja se uglavnom koristi u manjim i srednjim postrojenjima. Druge dvije tehnologije izgaranja biomase, *tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju* i *tehnologija izgaranja u raspršujućem sloju*, su karakteristične za veća postrojenja. Najčešće korištena tehnologija je tehnologija izgaranja na rešetki jer je ekonomski više isplativa od druge dvije spomenute tehnologije [3].

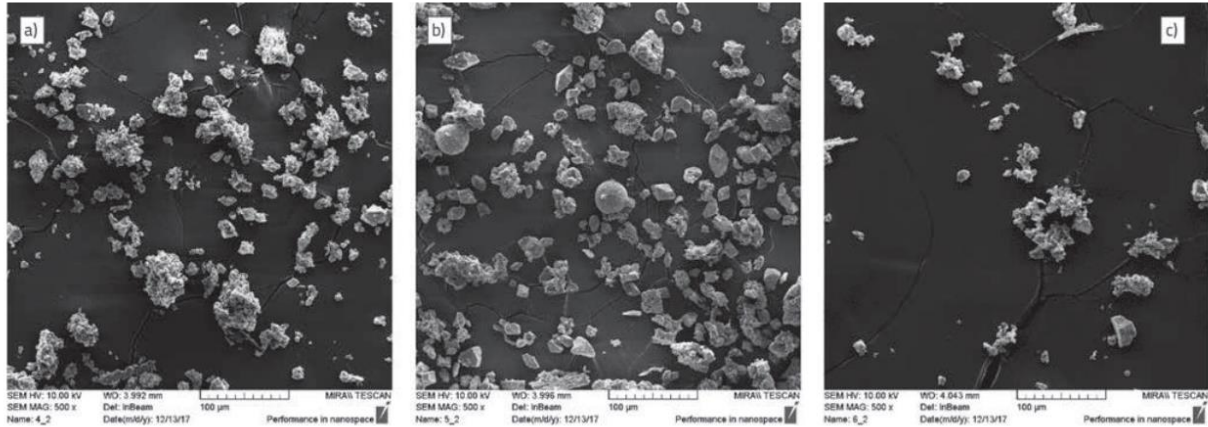
Kao rezultat izgaranja nastaju dvije vrste pepela, a prvenstveno se razlikuju prema mjestu prikupljanja: pepeo koji zaostaje na dnu peći (u literaturi se može pronaći i kao ložišni pepeo) i leteći pepeo (LP). LP se sastoji od dvije frakcije: čestice finije frakcije i čestice krupnije frakcije [3].

Slika 1 prikazuje lokacije prikupljanja različitih vrsta PDB-a; ložišni pepeo koji se prikuplja s dna peći (pepeo s dna peći – PDP), LP krupnije frakcije koji se prikuplja s ciklonskog odvajачa te LP finije frakcije koji se prikuplja s filtera [3].



Slika 1. Lokacije prikupljanja različitih vrsta PDB-a [3]

Morfologija i veličina čestica dviju vrsta pepela drvene biomase bitno se razlikuju, kao što se može vidjeti na slici 2 [3].



**Slika 2. Različnost morfologije i veličine čestica letećeg pepela i pepela s dna peći drvene biomase (a-pepeo s dna peći, b-čestice krupnije frakcije letećeg pepela, c-čestice finije frakcije letećeg pepela) [2]**

Iz literature je poznato da su čestice veće kod PDP-a nego kod LP-a. LP se dijeli ovisno o veličini čestica na krupniju i finiju frakciju. Maksimalna veličina čestica LP-a je manja od 100 µm dok se PDP razlikuje po grubljoj veličini čestica većoj od 1 mm [4].

Glede morfologije čestica PDB-a, može se očekivati nepravilna struktura i raspored čestica. Nejednolikost i heterogenost strukture, kao i visoka apsorpcija vode zbog poroznosti mogu imati negativan utjecaj na obradivost cementnih kompozita i neka druga svojstva [1], [3].

## **2.1. Svojstva pepela drvene biomase**

Pepeo drvene biomase je kompleksna mješavina anorganskih i organskih tvari čija kvaliteta, svojstva i količina variraju značajno više nego ona konvencionalnog pepela od ugljena. Svojstva PDB-a ovise o odabranoj tehnologiji izgaranja te o porijeklu i sastavu drvene biomase. Tri su vodeća utjecaja na svojstva drvene biomase. Primarni utjecaj se odnosi na vrstu odnosno sastav biomase, a određen je prije i tijekom rasta biljke te nakon sječe. Sekundarni utjecaj se odnosi na tehnologiju izgaranja tijekom vremena izgaranja biomase. Tercijarni utjecaj se odnosi na odlaganje i transport pepela po završetku procesa izgaranja biomase. Sistematizacija vodećih utjecaja je prikazana u tablici 1 [1].

**Tablica 1. Sistematizacija vodećih utjecaja na svojstva PDB-a [1]**

Skupina utjecaja	Proces formiranja	Mjesto formiranja	Vrijeme formiranja
Primarna	Prirodni	Biomasa	Prije i tijekom rasta biljke te nakon sječe
Sekundarna	Antropogeni (tehnogeni)	Tehnologija izgaranja	Tijekom izgaranja
Tercijarna	Prirodni	Postrojenje za transport i deponija pepela	Tijekom transporta i skladištenja pepela

Svojstva PDB-a mogu bitno utjecati na svojstva cementnih kompozita kao što su sposobnost očvršćivanja, trajnost, stabilnost volumena, korozijska svojstva itd [1].

Kako bi se dokazala prikladnost korištenja PDB-a kao zamjene agregata u cementnim kompozitima, potrebno je prvenstveno ispitati kemijski sastav. Kemijski sastav PDB-a je visoko varijabilan s obzirom na različita porijekla i sastave biomasa a uvelike i ovisi o parametrima postupka izgaranja, prvenstveno temperaturi. Primjerice, poznato je da pri temperaturi izgaranja nižoj od 500 °C većinski udio u kemijskom sastavu imaju karbonatni i bikarbonatni spojevi, dok na temperaturama višim od 1000 °C većinski udio u kemijskom sastavu imaju oksidi [5].

Povezanost svojstava drvene biomase i utjecaj na svojstva cementnih kompozita i dalje se istražuje. Zahtjevi koji bi se postavljali na PDB kao agregat u cementnim kompozitima trenutno nisu definirani normom, što je nužno za upotrebu u građevinskoj industriji. Na primjeru LP od ugljena koji se koristi kao agregat u betonu, dostupne su sljedeće norme kojima su definirana tražena fizikalna i kemijska svojstva i metode ispitivanja LP od ugljena u betonskoj industriji:

- HRN EN 450-1:2013 - Leteći pepeo za beton – 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnosti (EN 450-1:2012) i
- HRN EN 450-2:2005 - Leteći pepeo za beton – 2. dio: Vrednovanje sukladnosti (EN 450-2:2005).

Kemijski sastav PDB-a razlikuje se od sastava LP-a dobivenog izgaranjem ugljena, koji je trenutno najšire korištena vrsta LP-a, zbog čega se referentne vrijednosti za PDB ne mogu postavljati prema postojećim normama. Istraživanja na temu PDB-a kao agregata u cementnim kompozitima važna su zbog nedostatka znanja i definicija o potrebnim fizikalnim i kemijskim svojstvima. Iako se kroz istraživanja na ovu temu do sada uglavnom promatrao utjecaj zamjene

agregata PDB-om na svojstva cementnih kompozita, moguće je i pronaći podatke ispitivanja fizikalnih i kemijskih svojstava pepela nastalog izgaranjem biomasa različitih sastava. Svojstva koja se ispituju su:

- udio finih čestica - što je udio finih čestica veći povećava se potrebna količina vode u betonu,
- gubitak mase žarenjem - s većim gubitkom mase smanjuje se sposobnost vezivanja betona,
- sadržaj sulfata i fosfata - s povećanjem udjela sulfata i fosfata u kemijskom sastavu PBD-a smanjuje se trajnost betona,
- sadržaj magnezijevog oksida – s većim udjelom magnezijevog oksida u kemijskom sastavu PDB-a smanjuje se stabilnost betona,
- sadržaj teških metala – može predstavljati ekološki problem s obzirom na negativan učinak na okoliš i zdravlje ljudi [5].

### 3. ZAHTJEVI ZA AGREGAT

Agregat je mineralni ili organski dodatak koji se u kombinaciji s različitim vezivima koristi u građevinskoj industriji. Važna svojstva agregata su: sastav, oblik i veličina zrna, poroznost, otpornost na abraziju itd. U tablici 2 prikazane su referentne norme/metode za ispitivanje najvažnijih svojstava agregata u cementnim kompozitima. Usporedba dobivenih rezultata i odobrenje agregata određuje se prema traženim specifikacijama propisanim u normi HRN EN 12620:2008 i postavljenim zahtjevima u Tehničkom propisu za betonske konstrukcije (»Narodne novine« br. 76/07 i 38/09).

**Tablica 2. Ispitivanje svojstava agregata za beton prema HRN EN 12620:2008 [6]**

Svojstvo	Referentna norma ili metoda	Napomena
Granulometrijski sastav	HRN EN 933-1:2012	-
Udio sitnih čestica	Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sijanja	
Oblik zrna agregata – Indeks oblika (kljunasto mjerilo 1:3)	HRN EN 933-4:2008 Određivanje oblika zrna – Indeks oblika	-
Stvarna gustoća čestica	HRN EN 1097-6:2022 Određivanje gustoće i upijanja vode	piknometrijska metoda
Gustoća čestica u suhom stanju		
Gustoća čestica u zasićenom suhom stanju		
Upijanje vode		
Petrografski opis	HRN EN 932-3:2022 Ispitivanje općih svojstava agregata – 3.dio: Postupak i nazivlje za pojednostavljeni petrografski opis	-
Volumenska postojanost – Skupljanje uslijed sušenja	HRN EN 1367-4:2008 Ispitivanja toplinskog i vremenskog utjecaja na svojstva agregata – 4.dio: Određivanje skupljanja pri sušenju	-
Sadržaj klorida	HRN EN 1744-1:2012 Ispitivanja kemijskih svojstava agregata – 1.dio: Kemijska analiza	Nije potrebno ako postoji kompletna kemijska analiza
Sadržaj ukupnog sumpora		
Sadržaj sulfata topljivog u kiselini		
Raspadanje dikalcijeva silikata		
Raspadanje željeza		
Otpornost na predrobljavanje Los Angeles	HRN EN 1097-2:2020 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata – 2.dio: Metode za određivanje otpornosti na drobljenje	-
Otpornost na zamrzavanje/odmrzavanje	HRN EN 1367-2:2010 Ispitivanja toplinskog i vremenskog utjecaja na svojstva agregata – 2.dio: Ispitivanje magnezijevim sulfatom	-

## **4. PREGLED POSTOJEĆIH ISTRAŽIVANJA PRIMJENE PDB-A KAO DJELOMIČNE ZAMJENE ZA AGREGAT U CEMENTNIM KOMPOZITIMA**

### **4.1. Gustoća i čvrstoća morta s mješavinom pepela drvene biomase, drobljenog gnajsa i riječnog pijeska kao finog agregata**

Glavni cilj istraživanja [7] bio je proučiti izvedivost primjene PDB-a drvene biomase kao djelomične zamjene prirodnog riječnog pijeska ili pijeska od drobljenog gnajsa u proizvodnji morta. Točnije, proučavana je mogućnost pretvaranja otpada u resurse u građevinskoj industriji, u vidu zelenije gradnje. Korišten je PDB s maksimalnom veličinom čestica 5 mm u udjelima od 5 %, 10 %, 15 %, 20 % i 25 %, kako bi djelomično zamijenio riječni pijesak i drobljeni gnajs. Analizirana su kemijska i fizikalna svojstva PDB-a te tlačna čvrstoća i gustoća dobivenih mješavina. Ispitivanja su provedena nakon 7, 28 i 56 dana.

Dobiveni rezultati pokazuju sljedeće:

- Potreba za vodom rasla je s povećanjem udjela pepela.
- S povećanjem udjela PDB-a u oba slučaja smanjuje se tlačna čvrstoća u usporedbi s kontrolnim mortom. To bi moglo biti povezano s velikim gubitkom žarenjem PDB-a, budući da organski dio (izražen kao gubitak žarenjem) neće doprinijeti tlačnoj čvrstoći, već naprotiv, organska tvar može dodati šupljine koje će smanjiti čvrstoću. Najmanja vrijednost čvrstoće postignuta je zamjenom od 20 %, a zatim se povećava za zamjenu od 25 %.
- Ako se uspoređi tlačna čvrstoća morta s riječnim pijeskom i PDB-om i tlačna čvrstoća morta s drobljenim gnajs pijeskom i PDB-om nakon 56 dana, može se primijetiti da mort napravljen s riječnim pijeskom i PDB-om ima najveću tlačnu čvrstoću. Važno je napomenuti da kod zamjene veće od 15 %, tlačna čvrstoća morta napravljenog s riječnim pijeskom i PDB-om i dalje raste, što nije slučaj za mort s drobljenim gnajsom. Nakon 56 dana, za sve zamjene s PDB-om, vrijednosti tlačne čvrstoće morta dobivenih mješavinom PDB-a i riječnog pijeska, veće su od 20 MPa, što nije slučaj za mort napravljen s drobljenim gnajsom i PDB-om. Osim toga, za 5 % zamjene PDB-om tlačne čvrstoće morta dobivenih mješavinom PDB-a i riječnog pijeska i mješavinom PDB-a i drobljenog gnajsa iznose 37 MPa odnosno 32,5 MPa nakon 56 dana. Ove vrijednosti zadovoljavaju zahtjeve za čvrstoću, stoga se preporučuje zamjena drobljenog gnajsa s 5 % PDB-a. Promatrajući tlačnu čvrstoću, zamjena pijeska PDB-om više je poželjna s

riječnim pijeskom koji sadrži manje sitnih čestica u usporedbi s drobljenim gnajsom. Ovaj rezultat je posljedica velike količine sitnih čestica sadržanih u drobljenom gnajsu i PDB-u, što potvrđuje njihov modul finoće.

- U oba slučaja se s povećanjem PDB-a smanjuje gustoća morta. Najveća gustoća postignuta je za kontrolni mort, dok je najmanja gustoća postignuta pri 25 % zamjene. Razlika između najmanjih i najvećih vrijednosti gustoće iznosi 0,37 za mort s riječnim pijeskom i PDB-om te 0,33 za mort s drobljenim gnajsom i PDB-om. Razlika između gustoće morta napravljenog s riječnim pijeskom i PDB-om i gustoće morta napravljenog s drobljenim gnajsom i PDB-om iznosi 0,1, odnosno 0,14 pri 0 % i 25 % zamjene, redom. Ova razlika je posljedica činjenice da je drobljeni gnajs gušći od riječnog pijeska, što znači da je najveća gustoća morta postignuta mješavinom drobljenog gnajsa i PDB-a.

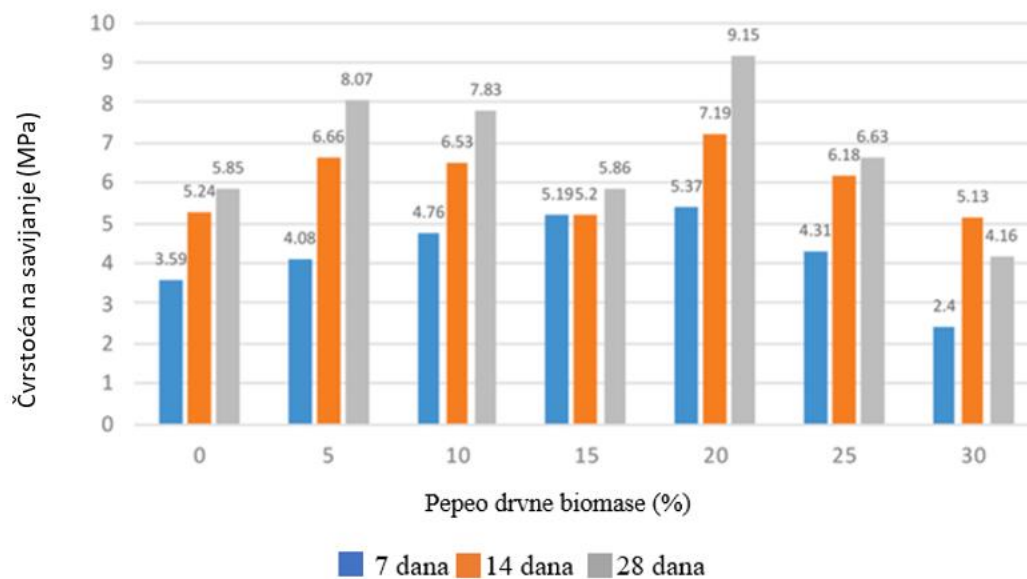
#### **4.2. Optimalna kombinacija pepela drvene biomase, drobljene gume i usitnjenog stakla**

Cilj istraživanja [2] bio je utvrditi mogućnosti korištenja PDB-a kao djelomične zamjene za cement te korištenja PDB-a, usitnjenog stakla i drobljene gume kao djelomične zamjene za prirodni agregat - pijeska u mortovima bez kemijskih tretmana ili dodataka. U okviru ovog rada, bit će prikazani oni rezultati koji se odnose na zamjenu prirodnog agregata PDB-om u mortovima. U mješavinama je agregat (pijesak) zamijenjen PDB-om u udjelima od 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % i 30 %. Provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje nakon 7, 14 i 28 dana.

Analizom rezultata provedenih ispitivanja donesen je zaključak da 20 % zamjene pijeska PDB-om daje najbolje rezultate za čvrstoću na savijanje i tlačnu čvrstoću:

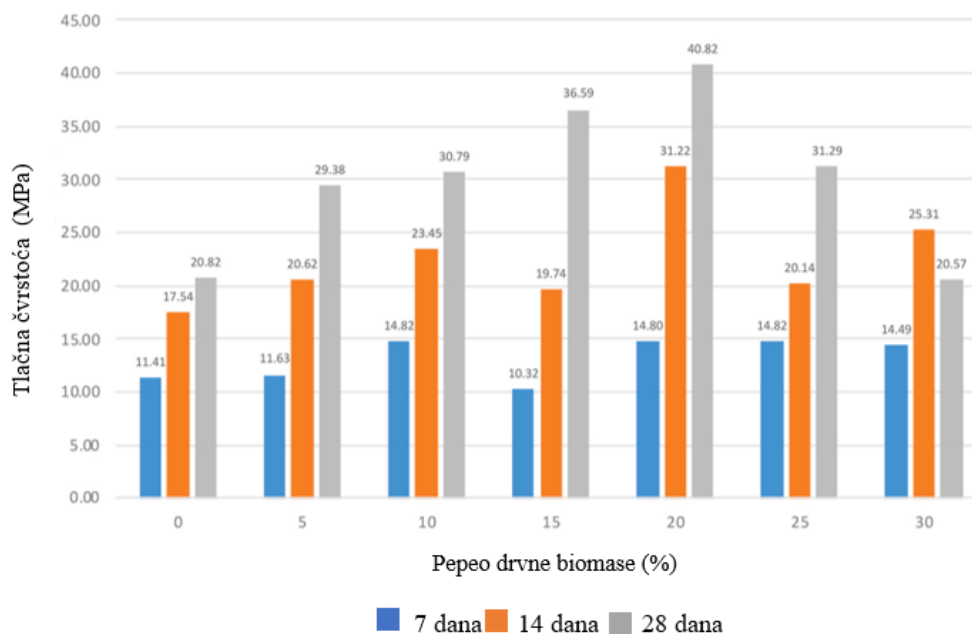
- Rezultati čvrstoće na savijanje – dobiven je blagi porast čvrstoće na savijanje s povećanjem zamjene pijeska PDB-om do 20 %. Zamjena pijeska s postotkom većim od 20 % rezultirala je smanjenjem čvrstoće na savijanje. Najveća čvrstoća na savijanje nakon 28 dana postignuta je s 20 % zamjene pijeska (povećanje od 65,46 %, slika 3).





Slika 3. Čvrstoća na savijanje morta s PDB-om kao djelomičnom zamjenom agregata [2]

- Rezultati tlačne čvrstoće – pokazano je da je tlačna čvrstoća za sve udjele zamjene do 20 % veća od referentne mješavine. Najbolji rezultat postiže se pri 20 % djelomične zamjene nakon 28 dana, što rezultira povećanjem od 138,85 % (slika 4).



Slika 4. Tlačna čvrstoća morta s PDB-om kao djelomičnom zamjenom agregata [2]

Uspoređujući rezultate ispitivanja drugih mješavina (zamjena cementa PDB-om, zamjena agregata drobljenom gumom, zamjena agregata usitnjenim staklom i dvije kombinirane mješavine), zamjena agregata PDB-om dala je najbolje rezultate. Zamjena pijeska drobljenom gumom i usitnjenim staklom rezultirala je smanjenjem tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje pri svim udjelima.

#### **4.3. Mehaničko ponašanje mortova napravljenih s pepelom s dna peći biomase od masline**

Istraživanje [8] dokazuje mogućnost izrade mortova korištenjem PDP-a drvene biomase te pruža značajne informacije o mehaničkom ponašanju takvih mortova u odnosu na četiri glavne varijable; vrsta cementa, udio cementa, udio pepela s dna peći drvene biomase i materijal zamijenjen PDP-om drvene biomase. U istraživanju su korišteni obični portlandski cement (CEMI) i cement (CEMII), na osnovi kojih su proizvedene dvije skupine mortova. U svakoj skupini korištena su tri udjela zamjene prirodnog pijeska PDP-om (0 %, 10 % i 20 %). Također su izrađeni mortovi sa zamjenom cementa PDP-om (10 % i 20 % u odnosu na volumen cementa). Ispitivana su svojstva poroznosti, gustoća, tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje.

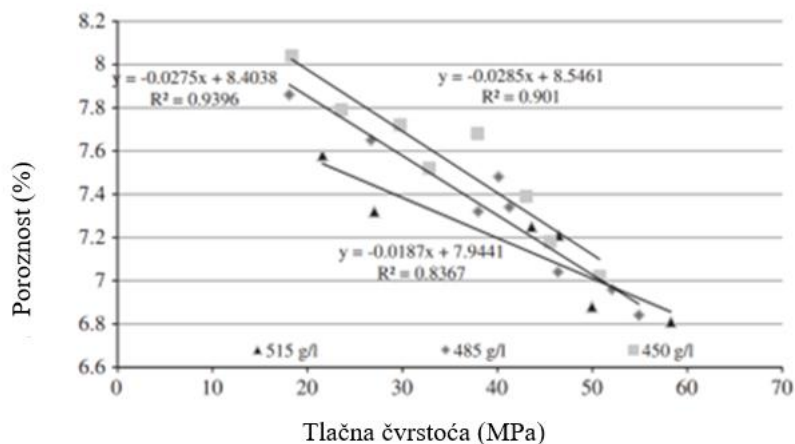
Prema dobivenim rezultatima i provedenoj analizi, primjena PDP-a nije doprinijela poboljšanju mehaničkih svojstava ispitanih mortova zbog velike poroznosti i sadržaja organske tvari u pepelu s dna peći drvene biomase. Utjecaj PDP-a na mortove s CEMI bio je manje izražen nego u mortovima s CEMII. To može biti zbog smanjene učinkovitosti u vidu interakcije između vapnenca kao punila u CEMII i PDP-a.

Povećanjem udjela PDP-a kao djelomične zamjene za prirodni pijesak poroznost se postupno povećavala, zbog velike apsorpcije PDP-a, dok se gustoća postupno smanjivala, zbog manje gustoće i većeg udjela organske tvari u PDP-u.

Poroznost je uvijek bila veća u mješavinama s CEMII nego u mješavinama s CEMI, zbog primjene vapnenca kao punila, dok je gustoća očvrstulog morta bila veća u mortovima s CEMI nego u mortovima s CEMII, zbog manje gustoće vapnenca kao punila u odnosu na klinker.

Tlačna čvrstoća postupno se smanjivala kako se povećavao udio PDP-a, kako u grupama s CEMI tako i u grupama s CEMII, zbog veće poroznosti PDP-a, što dovodi do manje zbijenosti očvrstulog morta. Osim toga, do smanjenja tlačne čvrstoće mogu dovesti i neki drugi čimbenici, kao što je veliki sadržaj organske tvari u PDP-u, povezan s velikom apsorpcijom vode te velika osjetljivost na abraziju. Smanjenje tlačne čvrstoće s povećanim sadržajem PDP-a bilo je značajnije u mortovima s CEMII, zbog njihove veće poroznosti i manje gustoće u usporedbi s mortovima s CEMI.

Značajan je i utjecaj poroznosti i gustoće na čvrstoću zbog velike apsorpcije PDP-a, što omogućuje uspostavljanje značajnih odnosa između analiziranih svojstava.

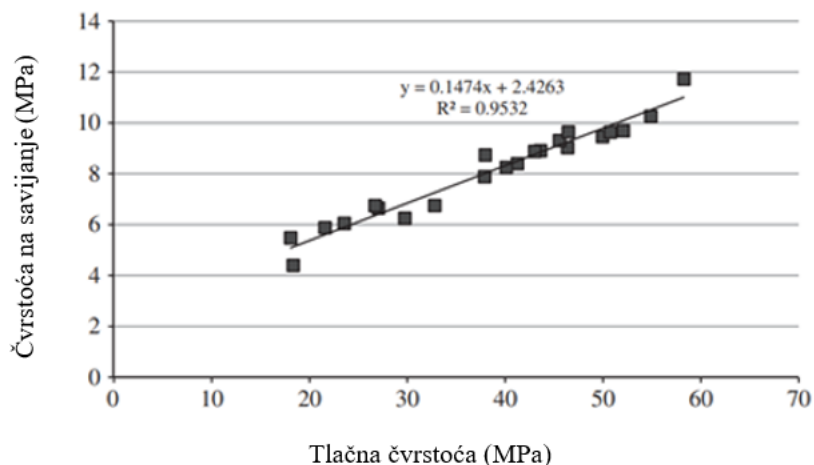


Slika 5. Ovisnost tlačne čvrstoće i poroznosti morta [8]

Čvrstoća na savijanje povećavala se s vremenom, kao i tlačna čvrstoća. Nakon 28 dana, veće čvrstoće na savijanje dobivene su u mortovima s CEMI nego u mortovima s CEMII zbog vapnenca kao punila u CEMII.

Za obje skupine mortova, čvrstoća na savijanje smanjivala se pri zamjeni prirodnog pijeska PDP-om, i to više što je udio zamjene veći. Kao i za tlačnu čvrstoću, smanjenje čvrstoće na savijanje kod mortova s PDP-om bilo je posljedica veće poroznosti i većeg sadržaja organske tvari u PDP-u.

Izvrсна korelacija dobivena je između tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje za sve mortove u svim ispitanim starostima ( $R^2 = 0,96$ ). Općenito, čvrstoća na savijanje u svim je mješavinama bila približno 20 % tlačne čvrstoće.



Slika 6. Ovisnost tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje morta [8]

#### 4.4. Pepeo drvene biomase korišten kao djelomična zamjena za pijesak i/ili cement u mortu

Istraživanje [9] uključuje eksperimentalni rad s tri različita PDB-a:

- PDB1 - pepeo drvene biomase od različitih vrsta drva iz proizvodnje parketa,
- PDB2 - leteći pepeo drvene biomase nastao izgaranjem drvnih peleta,
- PDB3 - leteći pepeo dobiven izgaranjem oko 90% drvene biomase i oko 10% bioostataka.

Cilj samog istraživanja bio je usporediti karakteristike triju PDB-a i povezati ih sa svojstvima dobivenih mješavina tako da se: raspravi utjecaj na tlačnu čvrstoću morta s PDB-om kao djelomičnom zamjenom za cement ili pijesak, kao i učinak prethodnog pranja PDB-a u vodi te upotreba tako opranog pepela kao kombinirane zamjene za pijesak i cement. Ispitivane su tlačna čvrstoća i poroznost morta.

Karakterizacijom triju PDB-a utvrđeno je sljedeće:

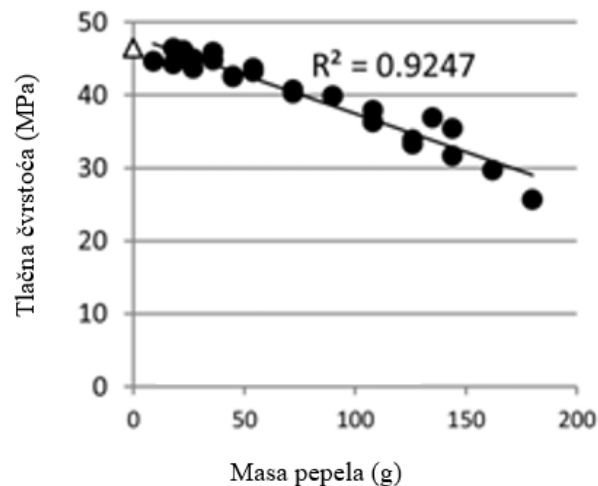
- PDB općenito sadrži visoke razine topivih soli
- ukupni topivi udio PDB-a kreće se između 17,8 % i 28 %
- pH vrijednost PDB-a je velika, što ukazuje na ispiranje hidroksida, a usporedba vodotopivog udjela K i Na s ukupnim koncentracijama istih elemenata pokazuje da je veći dio ovih elemenata topiv u vodi

Karakteristike pepela korištenog u ovom istraživanju znatno su varirale. Na primjer, jedan pepeo imao je vrlo veliki gubitak žarenjem od 14 %, u usporedbi s 3 % kod drugih pepela, a korištenje takvog pepela rezultiralo je najmanjom tlačnom čvrstoćom. Dva pepela bila su suha i uzeta odmah nakon izgaranja, dok je treći pepeo imao udio vode od 15 %, uslijed prskanja vodom u postrojenju za termičku obradu kako bi se izbjeglo stvaranje prašine, čime je došlo do samoočvršćivanja i stvaranja grudica.

Izrađena je matrica s 28 različitih sastava mortova (variran je postotak zamjene pijeska i/ili cementa). Za sve sastave vodovezivni omjer ostao je konstantan.

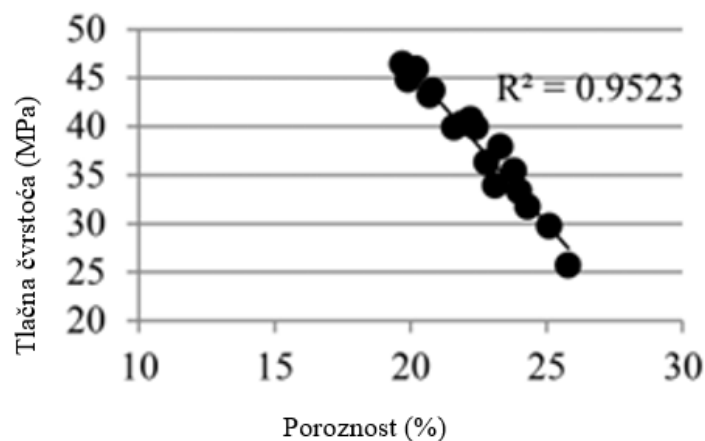
U onim uzorcima u kojima je PDB korišten kao zamjena za pijesak dodana je dodatna voda, stoga je smanjenje tlačne čvrstoće kombinacija pepela i većeg vodovezivnog omjera. To smanjenje tlačne čvrstoće bilo je najviše izraženo kod uzoraka s PDB3, što se može povezati s velikim udjelom gubitka žarenjem, s obzirom da organski dio (izražen kao gubitak žarenjem) neće doprinijeti tlačnoj čvrstoći, već će ju stvaranjem šupljina smanjiti. Također, pranje pepela vodom, kako bi se eliminirao topivi udio, blago je smanjilo čvrstoću morta u usporedbi s neopranim pepelom.

Prema slici 7, vidljivo je da je tlačna čvrstoća linearno ovisna o masi pepela u mortu, bez obzira na to zamjenjuje li pijesak ili cement. Vodovezivni omjer bio je konstantan kod svih mješavina morta, ali tlačna čvrstoća mortova varirala je od 25,7 do 45,3 MPa, pa stoga tlačna čvrstoća nije ovisna o vodovezivnom omjeru. Naprotiv, veza između vodocementnog omjera i tlačne čvrstoće je linearna ( $R^2 = 0,95$ ) i kako se i očekivalo, čvrstoća se smanjuje s povećanjem vodocementnog omjera.



Slika 7. Ovisnost tlačne čvrstoće morta o masi pepela drvene biomase [9]

Rezultati ispitivanja pokazali su da je tlačna čvrstoća snažno ovisila o vodocementnom omjeru. Činilo se da postoji ovisnost tlačne čvrstoće o količini pepela u mortu, ali ta ovisnost izazvana je prije svega vodocementnim omjerom, jer je vodovezivni omjer ostao konstantan. Poroznost morta linearno se povećavala sa smanjenjem vodocementnog omjera.



Slika 8. Ovisnost tlačne čvrstoće morta o poroznosti [9]

U istraživanju su ispitane različite varijacije, a unaprijed je odlučeno da se vodovezivni omjer zadrži konstantnim na 0,5. Stoga, kako bi se procijenio učinak na tlačnu čvrstoću uzrokovan upotrebom samo PDB-a, potrebno je odabrati mješavinu morta s vodocementnim omjerom većim od 0,5. Veći vodovezivni omjer potreban kod pripreme mortova s PDB-om može biti posljedica poroznosti čestica PDB-a te nepravilne i nedovoljno zaobljene morfologije čestica pepela.

#### **4.5. Utjecaj pepela drvene biomase na svojstva vapnenog morta za obnovu vlažnih povijesnih zgrada**

Cilj istraživanja [10] bio je utvrditi utječe li i u kojoj mjeri dodavanje različitih količina PDB-a na svojstva zračnog i prirodnog hidrauličnog vapnenog morta. Ovo istraživanje biti će prikazano kako bi se dobio uvid u moguće druge varijante iskorištavanja PDB-a u građevinskoj industriji. Mort bi trebao imati visoku stopu isparavanja, dobru propusnost te minimalno skupljanje i pucanje. Očekuje se da mortovi s dodatkom PDB-a povećavaju paropropusnost te sposobnost sušenja i isparavanja za obje vrste morta (zbog strukture pepela). U ovom istraživanju korištene su dvije vrste vapna: zračno vapno i prirodno hidraulično vapno. Agregat koji je korišten bio je oštar silikatni pijesak s česticama od 0,09 do 4 mm. PDB, s maksimalnom veličinom čestica 2 mm, dodavan je u sljedećim udjelima: 0 % (kontrolna mješavina), 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 70 % i 100 %.

U istraživanju su ispitivana sljedeća svojstva i dobiveni su sljedeći rezultati:

##### **1. Poroznost**

Otvorena poroznost za obje mješavine morta nije se bitno promijenila pri zamjeni od 10 do 20 % PDB-om, dok je značajan porast vidljiv iznad 30 % zamjene.

Ukupna poroznost u obje mješavine morta s malim do srednjim sadržajem PDB-a (10 – 40 %) prilično je slična, između 32 % i 38 %. U usporedbi s kontrolnim mortom, kod prirodnog hidrauličnog vapnenog morta ukupna poroznost je manja, dok je otvorena poroznost veća. To pokazuje da je veći dio poroznosti u prirodnim hidrauličnim vapnenim mortovima otvorena poroznost, što je bitno za prijenos vode. Kod zračnog vapnenog morta i ukupna i otvorena poroznost rastu u usporedbi s kontrolnim mortom. U obje vrste morta, kod 40 % udjela PDB-a veći dio poroznosti čini otvorena poroznost. Kod prirodnih hidrauličnih vapnenih mortova dodavanje PDB-a u udjelu do 30 % povećava volumen pora u rasponu od 0,4 do 10,5  $\mu\text{m}$ , dok se finije kapilarne pore (između 0,01 i 0,4  $\mu\text{m}$ ) održavaju konstantnima. Kod 40 % udjela PDB-a raspodjela

veličine pora jasno se povećava između 0,01 i 11  $\mu\text{m}$ , time povećavajući volumen pora za kapilarnu apsorpciju. Zračni vapneni mortovi s do 30 % PDB-a pokazuju jasno povećanje manjih kapilarnih pora za difuziju pare, s raspodjelom veličine pora između 0,03 i 0,4  $\mu\text{m}$ , istovremeno zadržavajući konstantan volumen pora promjera između 0,4 i 100  $\mu\text{m}$ . Kod 40 % dodatka PDB-a, primjećuje se slična raspodjela veličine pora, ali s povećanjem volumena pora između 2 i 11  $\mu\text{m}$  promjera te jasnim smanjenjem od 11 do 100  $\mu\text{m}$ . Kod 70 % udjela PDB-a, prirodni hidraulični mortovi pokazuju promjenu s jasnim vrhom kapilarnih pora od 3 do 11  $\mu\text{m}$ . Tanki presjeci odabranih mortova pokazuju da što je više PDB-a u mješavini, struktura pora čini se gušćom, tj. s nedostatkom pijeska i s potpuno pomiješanim PDB-om u vapnu, matrica je zbijenija. Struktura pora uglavnom se razvija isparavanjem vode kroz proces stvrdnjavanja i očvršćivanja, formirajući složeni sustav međusobno povezanih pora. Prirodni hidraulični mortovi prepoznatljivi su po okruglim porama i složenoj strukturi koja proizlazi iz stvrdnjavanja kroz karbonatizaciju i hidraulično vezivanje. Zračni vapneni mortovi pokazuju mnogo mikropukotina u kontrolnom mortu i u mortovima s PDB-om, što je u skladu s opažanjima skupljanja tijekom sušenja. Stoga su pore u zračnim vapnenim mortovima više međusobno povezane nego u prirodnim hidrauličnim mortovima, uglavnom zbog prisutnosti mikropukotina.

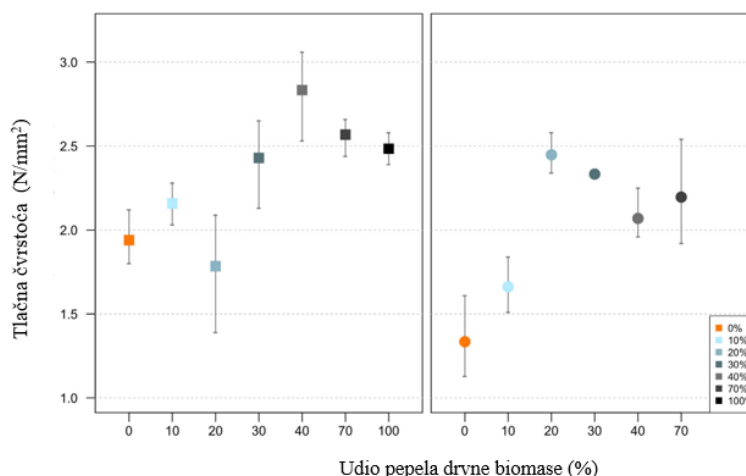
## 2. Skupljanje uslijed sušenja

Skupljanje uslijed sušenja ispitano je nakon 7 i 28 dana. Nije bilo značajne razlike u skupljanju izmjenom nakon 7 i 28 dana. Za obje vrste morta vidljiv je utjecaj sadržaja PDB-a na vodovezivni omjer i skupljanje uslijed sušenja, te se primjećuje isti uzorak. Kako udio PDB-a raste, i vodovezivni omjer i skupljanje se povećavaju. Čini se da PDB zahtijeva više vode kako bi se postigla slična konzistencija, pa dodavanje veće količine pepela rezultira povećanjem vodovezivnog omjera. Zračni vapneni mortovi općenito pokazuju veće skupljanje nakon 28 dana u usporedbi s prirodnim hidrauličnim vapnenim mortovima. To je vjerojatno izravno povezano s hidrauličnim vezivanjem prirodnih hidrauličnih vapnenih mortova koji koriste vodu i vlagu iz zraka za stvrdnjavanje, čime se smanjuje skupljanje u usporedbi sa zračnim vapnenim mortovima. Na skupljanje obično utječe količina dodane vode u mješavinu i veličina agregata. Krupni agregati također doprinose stabilnosti volumena uzoraka vapnenog morta, smanjujući skupljanje, dok upotreba sitnih agregata nosi rizik od većeg

skupljanja. Stoga veći udio PDB-a uvodi veći udio sitnih čestica, rezultirajući većim skupljanjem uslijed sušenja.

### 3. Čvrstoća

Tlačna čvrstoća obično ovisi o brzini očvršćivanja vapnenog morta i razvoju strukture pora. U navedenom istraživanju uzorci su bili ispitani nakon 90 dana. Rezultati su prikazani na slici 9 i pokazuju opći porast tlačne čvrstoće s povećanjem udjela PDB-a kod oba morta u usporedbi s kontrolnim mortovima. Prirodni hidraulični vapneni mortovi obično imaju veće tlačne čvrstoće od zračnih vapnenih mortova, dok u kombinaciji s PDB-om obje vrste morta postižu sličnu tlačnu čvrstoću. Kod prirodnih hidrauličnih vapnenih mortova jasno se primjećuje porast tlačne čvrstoće pri udjelu PDB-a većem od 30 %. Zračni vapneni mortovi pokazuju značajan porast tlačne čvrstoće pri udjelu PDB-a većem od 20 %. Čini se da je optimalan udio PDB-a za obje vrste morta 20 %.



Slika 9. Tlačna čvrstoća zračnog i prirodnog hidrauličnog vapnenog morta s PDB-om kao djelomičnom zamjenom agregata [10]

### 4. Apsorpcija vode i isparavanje

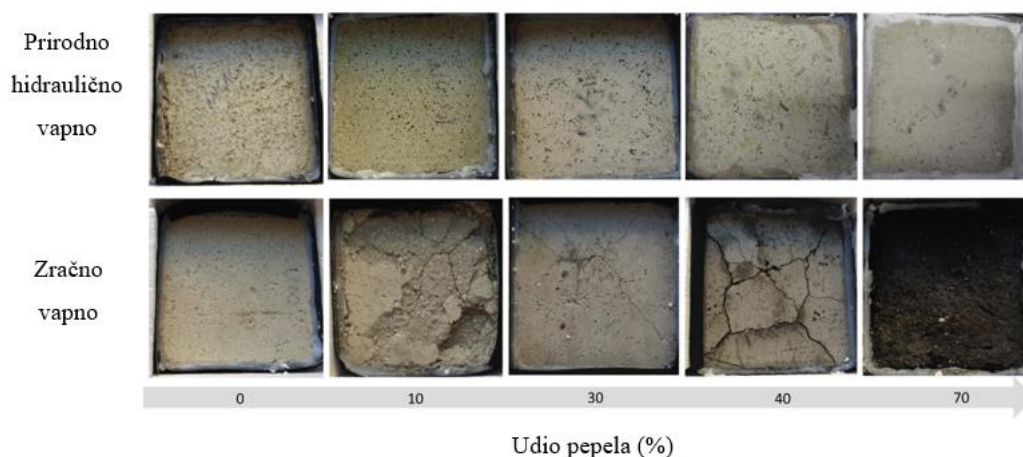
Kod oba morta, kada se postigne zasićenje kapilarnom apsorpcijom, uzorci s PDB-om apsorbiraju sličnu količinu ili više ukupne vode od kontrolnih mortova. To ponovno pokazuje higroskopnu sposobnost PDB-a tj. sposobnost materijala da zadržava vodu. Također se može primijetiti da uzorci s PDB-om pokazuju kašnjenje točke kapilarnog zasićenja za 15 minuta, jer je potrebno više vremena da uzorak postigne potpuno



kapilarno zasićenje. Apsorbiranje veće količine vode tijekom više vremena pozitivan je učinak, jer bi to omogućilo mortu da bolje upija vlagu iz okolnog zidnog elementa i pomaže mu da se osuši. Proučavajući stupanj apsorpcije mortova s do 40 % PDB-a uočeno je da je stupanj apsorpcije kao kod kontrolnih mortova ili značajno smanjen. To je zato što ove mješavine mortova imaju veći ukupni sadržaj vode pri zasićenju za isti volumen i isto vrijeme pa apsorpcija traje duže. Međutim, kada je ovaj fenomen prekomjeran, kod mortova s visokim udjelima PDB-a (70-100 %), količina apsorbirane vode za postizanje zasićenja toliko je veća da se stupanj kapilarne apsorpcije značajno povećava (zbog velike poroznosti i većeg udjela kapilarnih pora kod obje vrste morta s udjelom PDB-a od 70 %). Kada se postigne konstantna masa, mortovi s PDB-om zadržavaju više vode nego kontrolni mortovi (ne isušuju se toliko kao kontrolni mortovi), ponovno pokazujući higroskopna svojstva. Pri usporedbi dviju mješavina morta, prirodni hidraulični vapneni mortovi sporije upijaju vodu i brže se isušuju.

##### 5. Otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Slika 10 prikazuje oštećenje površine i nastale pukotine na odabranim uzorcima tijekom ispitivanja. Prema slici, veća se trajnost može očekivati kod prirodnih hidrauličnih vapnenih mortova. Zračni vapneni mortovi pokazuju znakove propadanja već nakon 7 ciklusa i pukotine nakon 14 ciklusa s većim intenzitetom nakon 32 ciklusa. Što je veći udio PDB-a, na površini se primjećuje veći stupanj oštećenja. Rezultati su posljedica sposobnosti prirodnih hidrauličkih vapnenih mortova da sporije upijaju vodu i brže je otpuštaju od zračnih vapnenih mortova tj. općenito imaju veću propusnost vodene pare. Također se primjećuje promjena boje na zračnim vapnenim mortovima kod 40 % udjela PDB-a i ozbiljno oštećenje površine kod 70 % udjela PDB-a.



**Slika 10. Površinsko oštećenje prirodnog hidrauličnog i zračnog vapnenog morta s PDB-om nakon 32 ciklusa smrzavanja-odmrzavanja [10]**

Četiri odrednice proizlaze zbog finih čestica i higroskopskih svojstava PDB-a:

- PDB zbog svojstva higroskopsnosti daje mortovima sposobnost apsorpcije veće ukupne količine vode pri kapilarnom zasićenju, čime se odgađa njihovo zasićenje u vremenu i općenito usporava kapilarna apsorpcija.
- Iako apsorbiraju više vode, mortovi s PDB-om imaju povećanu sposobnost sušenja, pokazujući povećan stupanj sušenja.
- Fine čestice stvaraju gušću strukturu koja dovodi do većeg udjela pora u kapilarnom rasponu. Mortovi s PDB-om imaju veću otvorenu poroznost i propusnost vodene pare, povezanu s količinom PDB-a u mortu.
- Gušća struktura vapna i PDB-a povećava tlačnu čvrstoću.

Rezultati istraživanja ukazuju na to da PDB, kada se koristi u umjerenim količinama (20-40 %), dodan vapnenom mortu daje potencijalno dobru mješavinu posebno u vlažnom okolišu. Vapneni mort s PDB-om može imati sposobnost očvršćivanja pod vlažnim uvjetima, postizanje čvrstoće, dobre propusnosti i sposobnosti sušenja, uz malo skupljanje i pukotine. Međutim, kod visokih udjela (70-100 %) primjećuju se neki negativni učinci, poput velikog stupnja skupljanja pri sušenju.

#### **4.6. Poboljšani pepeo s dna peći iz spalionice komunalnog otpada kao agregat u betonu**

Cilj istraživanja [11] bio je ispitati svojstva poboljšanog PDP-a iz spalionice komunalnog otpada kao potencijalnog finog i krupnog agregata u betonu. Uzorci PDP-a drvene biomase poboljšani su dodatnim tretiranjem - mokri i suhi proces, čime su izdvojene vrlo porozne čestice. Nakon toga, utvrđen je učinak djelomične zamjene prirodnog pijeska i šljunka poboljšanim PDP-om na relevantna svojstva betona (tehnološka svojstva i strukturu, trajnost i ponovnu upotrebu kao recikliranog agregata). Na osnovi tih saznanja, formulirana je tehnička smjernica za upotrebu poboljšanog PDP-a iz spalionice komunalnog otpada u predgotovljenom betonu.

Uzorci poboljšanog PDP-a od komunalnog otpada karakterizirani su prema europskoj normi EN 12620 za agregate za beton. Za svaku proizvedenu veličinu agregata određena su sljedeća svojstva: distribucija veličine čestica (EN 933-1), finoće (63  $\mu\text{m}$ ; EN 933-1), gustoća čestica (EN 1097-6), apsorpcija vode (EN 1097-6), kloridni (EN 1744-1), sulfatni (EN 1744-1) i alkalni (EN 196-21) sadržaj. Osim toga, izmjeren je gubitak pri žarenju (tj. postotak mase izgubljen prilikom zagrijavanja tijekom 4 sata) na 500 °C i utjecaj na vezivanje cementa (EN 1744-6).

Sadržaj neželjenih sastojaka poput klorida, sulfata, alkalija, gubitka žarenjem i finoća sitnih čestica u poboljšanom PDP-u iz mokrog postupka bio je mali i zadovoljava zahtjeve za primjenu u betonu. Kao što se moglo očekivati, suhi postupak rezultirao je PDP-om s većim sadržajem tih sastojaka. Mala gustoća, što odgovara visokoj apsorpciji vode čestica, rezultira slabijim betonom. Za konstrukcijski beton, nije poželjna gustoća čestica manja od 2,100 kg/m<sup>3</sup>. Sve tri betonske mješavine (referentni beton, mješavina s 20% zamjene riječnog šljunka, mješavina s 20% zamjene riječnog pijeska i 20% zamjene šljunka) imale su dobru obradljivost. Smanjenje obradljivosti tijekom vremena kod obje mješavine s poboljšanim PDP-om od komunalnog otpada bilo je slično referentnom betonu.

Vrijeme vezivanja betona bilo je odgođeno u slučaju primjene PDP-a za 1 sat u kod mješavine samo sa zamjenom šljunka i za 3 sata u slučaju mješavine sa zamjenom i pijeska i šljunka.

Kod sve tri betonske mješavine uočeno je smanjenje tlačne čvrstoće zbog djelomične zamjene PDP-om od otprilike 10 i 20 %.

Skupljanje i puzanje betonskih mješavina u kojima je 20 % šljunka zamijenjeno PDP-om otprilike su isti kao i za referentni beton. Međutim, zamjena 20 % riječnog pijeska + 20 % riječnog šljunka poboljšanim PDP-om od komunalnog otpada rezultira značajnim povećanjem skupljanja (+ 40 %) i puzanja (+ 70 %).

Otpornost na karbonatizaciju i cikluse smrzavanja-odmrzavanja betona s (mokrim) poboljšanim PDP-om slična je ili čak bolja nego za referentnu mješavinu. Manja karbonatizacija može se objasniti dodatnom vlagom koju apsorbira porozniji PDP u usporedbi s riječnim pijeskom i šljunkom koji su veće gustoće. Budući da je karbonatizacija povezana s isušivanjem betona i stoga sadržajem vode, to će biti prednost za betone s poboljšanim PDP-om.

Koeficijent difuzije klorida za obje betonske mješavine s poboljšanim PDP-om puno je veći u usporedbi s referentnim betonom, što znači da treba poduzeti posebne mjere pri primjeni takvog betona u okolišu s kloridima. Utjecaj vrste cementa puno je izraženiji od utjecaja PDP-a.

Iz rezultata provedenog istraživanja može se zaključiti sljedeće:

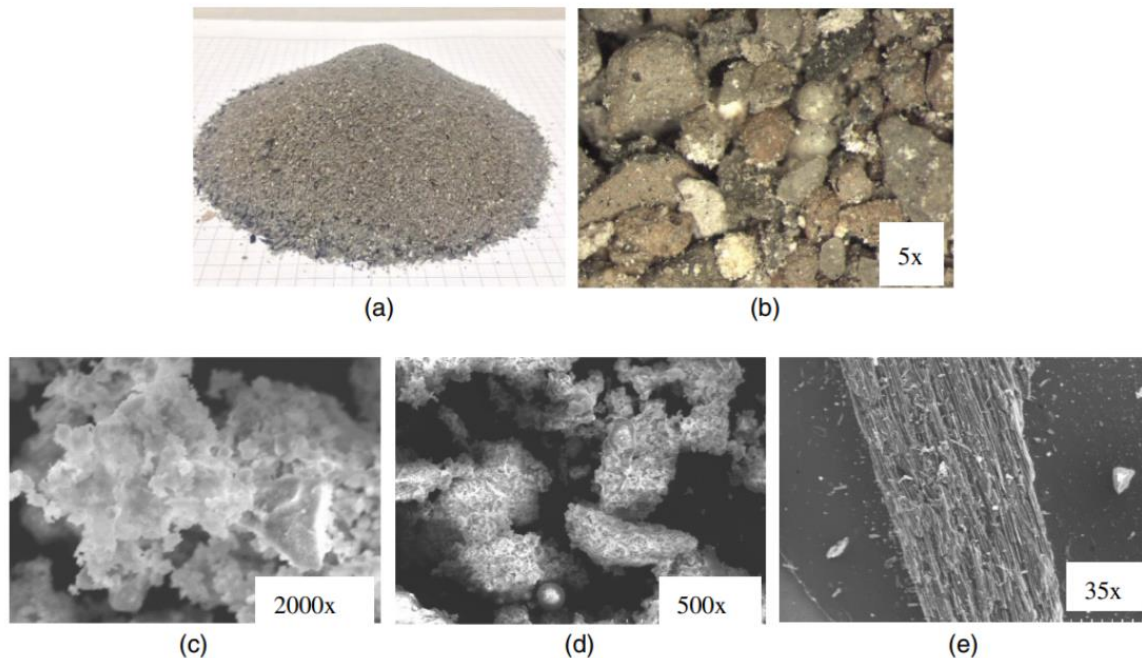
- Poboljšani PDP od komunalnog otpada prikladan je za primjenu kao agregat za (konstrukcijski) beton. Međutim, da bi to bilo moguće, potrebno je ispunjavati dodatne zahtjeve u vezi s gustoćom čestica, udjelom Al + Zn, sadržajem sulfata, alkalija i klorida, gubitkom pri žarenju i učinkom na vezivanje.
- U ovom slučaju, beton se može proizvesti s do 20 % (armirani beton) ili 50 % (obični beton) zamjene pijeska i/ili šljunka poboljšanim PDP-om od komunalnog otpada slične veličine zrna. Primjena u prednapetom betonu nije preporučljiva zbog mogućeg većeg rizika od korozije čelika za prednapinjanje.
- Ako se takav beton projektira s istom tlačnom čvrstoćom, ostala mehanička svojstva i svojstva trajnosti su ista kao i kod betona proizvedenog samo s pijeskom i šljunkom, osim za skupljanje, puzanje i koeficijent difuzije klorida koji su puno veći nego kod referentnog betona.
- Beton koji sadrži poboljšani PDP od komunalnog otpada rezultira recikliranim agregatima slične kvalitete kao i reciklirani beton bez sekundarnih agregata.

#### **4.7. Mogućnost korištenja letećeg pepela i pepela s dna peći drvene biomase za proizvodnju valjanog betona i betona zbijenog vibriranjem**

U istraživanju [4] je prikazana optimizacija LP-a drvene biomase kao alternativnog cementnog materijala i PDP-a drvene biomase kao alternativnog agregata (pijeska) za proizvodnju valjanog betona i zbijenog betona. Također je provedena optimalna stopa zamjene kombinirajući LP i PDP drvene biomase. U okviru ovog rada, biti će prikazani rezultati koji se odnose na djelomičnu (50 %) i potpunu (100 %) zamjenu agregata (silikatnog pijeska) u valjanom i zbijenom betonu. Uz kontrolne mješavine su pripremljene dvije mješavine za valjani beton i dvije mješavine za zbijeni beton. Ispitivana su svojstva obradljivosti i gustoće, tlačne čvrstoće i čvrstoće na

savijanje nakon 7, 28 i 91 dana, kao i svojstva poroznosti i električne otpornosti nakon 28 i 91 dana.

Slika 11 prikazuje PDP korišten u ovom istraživanju u prirodnom obliku (slike 4a i 4b) te pri mikroskopskim povećanjima od 2000x, 500x i 35x.



**Slika 11. Pepeo s dna peći [4]**

Rezultati su pokazali da zamjena prirodnog pijeska PDP-om proporcionalno, gotovo linearno smanjuje obradljivost valjanog i zbijenog betona. Nadalje, povećanjem udjela zamjene agregata PDP-om, linearno se smanjuje gustoća što je rezultat smanjene kompaktnosti dobivene mješavine (pore su porasle s 9,2 na 13,2 %). Ova pojava rezultat je nepravilne morfologije čestica PDP-a. Karakteristike pepela su velika poroznost, te veliki stupanj apsorpcije vode - 5,25 % u usporedbi s prirodnim agregatom (silikatnim pijeskom) - 1,3 %.

Primjena PDP-a u zbijenom i valjanom betonu kao zamjene za pijesak nije imala utjecaj na električnu otpornost nakon 28 dana, a smanjenje je bilo neznatno nakon 91 dana. Za sve ispitane mješavine s PDP-om i bez PDP-a vrijednosti električne otpornosti bile su u kategoriji vrlo male propusnosti, što ukazuje na malu sposobnost prodora kloridnih iona i drugih agresivnih tvari.

Općenito, upotreba PDP-a u valjanom i zbijenom betonu uglavnom je utjecala na smanjenje mehaničkih svojstava: tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje.

U zbijenom betonu, pri udjelu zamjene agregata od 50 %, dobivene su slične vrijednosti čvrstoće na savijanje nakon 7 i 28 dana, dok su vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 7, 28 i 91 dana

bile 18-23 % manje u usporedbi s kontrolnom mješavinom. Pri udjelu zamjene agregata od 100 %, dobivene su ponovno slične vrijednosti čvrstoće na savijanje nakon 7 i 28 dana, a tlačne čvrstoće nakon 7, 28 i 91 dana bile su 15 % manje u usporedbi s kontrolnom mješavinom. U valjanom betonu, pri udjelu zamjene agregata od 50 %, tlačna čvrstoća smanjena je za 18 %, a čvrstoća na savijanje za 31 % u usporedbi s kontrolnom mješavinom. Pri udjelu zamjene agregata od 100 %, smanjenje je bilo još veće – 32 % tlačne čvrstoće i 44 % čvrstoće na savijanje. Kao zaključak istraživanja [4], preporučuje se optimalni postotak zamjene agregata PDP-om od 50 % u valjanom i zbijenom betonu.

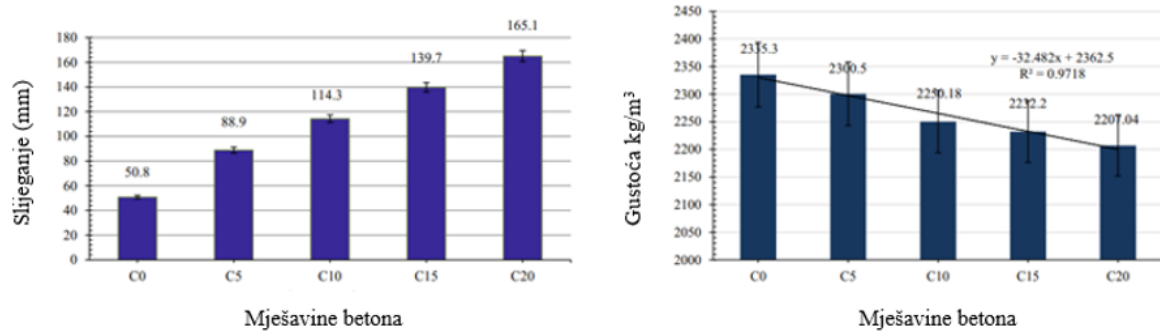
#### **4.8. Primjena pepela nastalog spaljivanjem kukuruznog klipa kao djelomične zamjene pijeska u betonu**

U istraživanju [12] su ispitivane karakteristike betona u kojem je agregat (pijesak) zamijenjen pepelom od kukuruznog klipa. Kako bi se odredila prikladnost ove vrste pepela kao finog agregata određena su njegova fizikalna i kemijska svojstva te je ispitana morfologija čestica. Rezultati su pokazali da je dobro granuliran, i ima izrazito veliku poroznost. Poznato je da organske nečistoće mogu usporiti reakciju hidratacije te je provedeno ispitivanje organskih nečistoća i utvrđeno je da uzorak ne sadrži organske nečistoće. U istraživanju je korišten obični portlandski cement. Pepeo od kukuruznog klipa korišten je kao zamjena za fini agregat u udjelima 0 % (C0), 5 % (C5), 10 % C(10), 15 % C(15) i 20 % C(20). Provedena su ispitivanja slijeganja, skupljanja, gustoće, tlačne čvrstoće, apsorpcije vode i kiselinske i korozijske otpornosti betona nakon 7, 28, 56 i 90 dana i analizirani su dobiveni rezultati.

Vrijednosti slijeganja su porasle s povećanjem udjela pepela od kukuruznog klipa u betonu. Povećanje vrijednosti slijeganja za C20 bilo je čak 3,2 puta veće od vrijednosti za mješavinu C0.

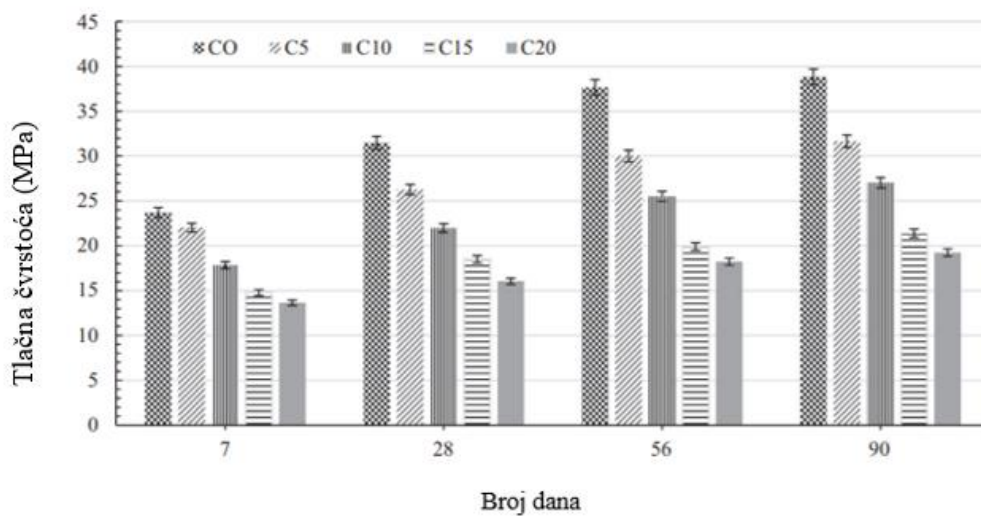
Gustoća svježeg betona C0 bila je manja od one u kontrolnoj mješavini i utvrđeno je da se smanjuje s povećanjem udjela pepela. Smanjenje gustoće svježeg betona za mješavine C5, C10, C15 i C20 iznosilo je redom 1,5 %, 3,65 %, 4,41 % i 5,5 %, što je posljedica velike poroznosti pepela od kukuruznog klipa u usporedbi s prirodnim finim agregatom i male gustoće pepela od kukuruznog klipa u usporedbi s onom finog agregata. Gustoća svježeg betona linearno se smanjivala sa korelacijskim faktorom od 0,972 (slika 12). Smanjenje gustoće očvrstnalog betona bilo je manje intenzivno nakon 90 dana u usporedbi s drugim ispitivanjima. To pokazuje da se gustoća očvrstnalog betona poboljšava starošću. Ovakvi rezultati mogu se povezati i s

rezultatima ispitivanja tlačne čvrstoće, a iz literature je već poznato da postoji linearna veza između tlačne čvrstoće i gustoće očvrstnalog betona.



Slika 12. Sljeganje i gustoće različitih betonskih mješavina [12]

U usporedbi s kontrolnom mješavinom, skupljanje mješavina C5, C10, C15 i C20 smanjeno je redom na 86,9 %, 68,16 %, 51,76 % i 26,93 %. To pokazuje da je mješavina C5 dimenzijski najstabilnija. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće pokazuju da je tlačna čvrstoća rasla s povećanjem starosti betona (slika 13). Također se može primijetiti da se kod svih starosti (7, 28, 56 i 90 dana) tlačna čvrstoća smanjivala s povećanjem udjela pepela u mješavini. Smanjenje tlačne čvrstoće može biti povezano s velikim početnim sadržajem slobodne vode ili s velikom poroznošću čestica pepela od kukuruznog klipa, a rezultati se mogu povezati i sa smanjenjem gustoće mješavine.



Slika 13. Tlačna čvrstoća različitih mješavina betona ovisno o starosti [12]

U svakoj starosti, vrijednosti apsorpcije vode pokazale su porast s povećanjem udjela pepela od kukuruznog klipa. Dodatno, provedeno je i ispitivanje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa i ispitivanje postojanosti na kiseline. Poznato je da su vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa izravno proporcionalne kvaliteti betona; što su vrijednosti brzine impulsa veće, beton je kompaktniji, trajniji i manje porozan. Vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnog impulsa smanjivale su se s povećanjem udjela pepela od kukuruznog klipa, što se ponovno može povezati s poroznom strukturom. Postojanost na kiseline određena je držanjem uzoraka u klorovodičnoj i sumpornoj kiselini tijekom perioda od 28 dana. U oba slučaja, gubitak mase povećavao se s povećanjem udjela pepela od kukuruznog klipa u mješavini. Gubitak mase u sumpornoj kiselini bio je izraženiji nego u klorovodičnoj kiselini zbog agresivnije i razornije prirode sumporne kiseline.

#### **4.9. Mogućnost korištenja letećeg pepela i pepela s dna peći drvne biomase u proizvodnji suhog betona**

U istraživanju [13] je prikazana optimizacija sastava suhog betona pri primjeni LP drvne biomase kao djelomične zamjene cementa te pri primjeni PDP-a drvne biomase kao zamjene sitnog agregata. Također, procjenjuje se optimalni postotak zamjene prilikom kombiniranja LP-a i PDP-a drvne biomase. U okviru ovog rada bit će prikazani rezultati ispitivanja koji se odnose na zamjenu sitnog agregata PDP-om u proizvodnji suhog betona. Ispitivane su dvije različite serije suhog betona, koristeći vodovezivne omjere od 0,35 i 0,37. Udjeli zamjene pijeska PDP-om bili su 0 %, 20 % i 40 % za vodovezivni omjer od 0,35 i 0 %, 40 %, 60 % i 80 % za vodovezivni omjer od 0,37. U kontrolnoj mješavini su kao agregat korišteni prirodni silikatni pijesak i zdrobljeni vapnenački agregati s nominalnom maksimalnom veličinom čestica od 5 mm. Ispitivana su svojstva u svježem stanju (moćnost zbijanja), mehanička svojstva (tlačna i vlačna čvrstoća), kao i svojstva poroznosti, električne otpornosti i apsorpcije vode do nakon 91 dana.

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata doneseni su sljedeći zaključci:

- Upotreba PDP-a za zamjenu pijeska smanjila je obradljivost prije svega zbog manjeg modula finoće i manje gustoće PDP-a u usporedbi s pijeskom. Budući da je zamjena izvršena po masi, te dvije karakteristike povećale su ukupni volumen sitnih čestica u granuliranoj strukturi, te smanjile pokretljivost paste, a time i mogućnost zbijanja. Utjecaj 40 % zamjene pijeska PDP-om na mogućnost zbijanja mješavina betona s vremenom je približno sličan utjecaju pijeska. Na osnovi rezultata ispitivanja i kako bi



se osigurala zadovoljavajuća svojstva u svježem stanju s vremenom, kao maksimalni postotak zamjene pijeska PDP-om smatra se 40 %, pri vodovezivnom omjeru od 0,37.

- Povećanjem postotka zamjene pijeska PDP-om u suhom betonu (za oba vodovezivna omjera), tlačna i vlačna čvrstoća su se smanjivale u usporedbi s kontrolnim mješavinama. To smanjenje čvrstoće rezultat je smanjenja mogućnosti zbijanja. Na osnovi dobivenih rezultata, donesene su preporuke za maksimalne postotke zamjene pijeska PDP-om od 10% za vodovezivni omjer od 0,35 i 30% za vodovezivni omjer od 0,37.
- Uočeno je blago povećanje apsorpcije vode i poroznosti očvrstnalog betona s povećanjem udjela zamjene pijeska PDP-om. Glavni razlog blagog povećanja poroznosti je smanjenje mogućnosti zbijanja uzoraka, što je povećalo količinu šupljina.
- Ispitane mješavine suhog betona (s PDP-om i bez njega) pokazale su umjerenu propusnost na osnovi vrijednosti električne otpornosti nakon 28 dana, a propusnost se smanjila na vrlo nisku razinu u starosti od 91. dana, uz vrlo malu mogućnost prodiranja kloridnih iona i drugih agresivnih tvari.

#### **4.10. Mehanička svojstva i svojstva trajnosti betona proizvedenih s pepelom s dna peći drvene biomase (masline) i recikliranim krupnim agregatima**

U istraživanju [14] je proučavan PDP drvene biomase dobiven od izgaranja grančica maslina radi utvrđivanja njegove primjenjivosti za različite zamjene cementa i prirodnog pijeska u nekonstrukcijskim recikliranim betonima. Istraživanje donosi saznanja o udjelima, optimalnim zamjenama i promjenama svojstava pri primjeni recikliranog agregata i PDP-a u proizvodnji betona.

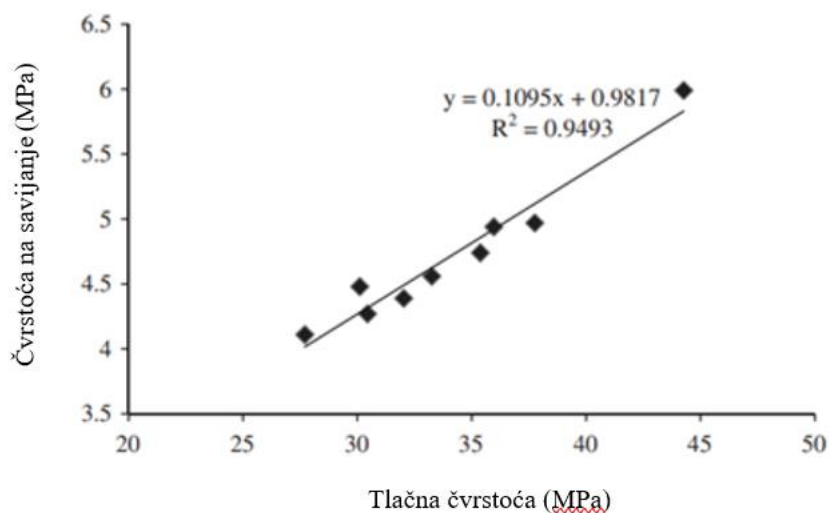
U istraživanju su korišteni obični portlandski cement i dvije vrste recikliranih agregata, reciklirani agregat dobiven drobljenjem betonskih blokova i morta (REC1) i miješani reciklirani agregat (REC2), dobiven drobljenjem betonskih i zidanih blokova. Korištene su tri vrste prirodnih agregata: prirodni krupni šljunak, prirodni šljunak srednje veličine i prirodni pijesak. Pripremljene su tri mješavine samo s pepelom, tri mješavine s pepelom i REC1 te tri mješavine s pepelom i REC2 kao zamjene za prirodni agregat. U svim kombinacijama, PDP dodavan je u udjelima od 0 %, 3 % i 6 %. Učinkoviti vodocementni omjer, količina cementa i konzistencija slijeganjem od 8–9 cm bili su isti kod svih proizvedenih serija betona.

Ispitivana su fizikalna svojstva (gustoća, poroznost i apsorpcija vode), mehanička svojstva (tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje) te svojstva trajnosti (prodor klorida, vodopropusnost i

skupljanje) recikliranih betona s različitim postotcima zamjene cementa i prirodnih agregata. Ispitivanja su provedena nakon 7, 28 i 90 dana.

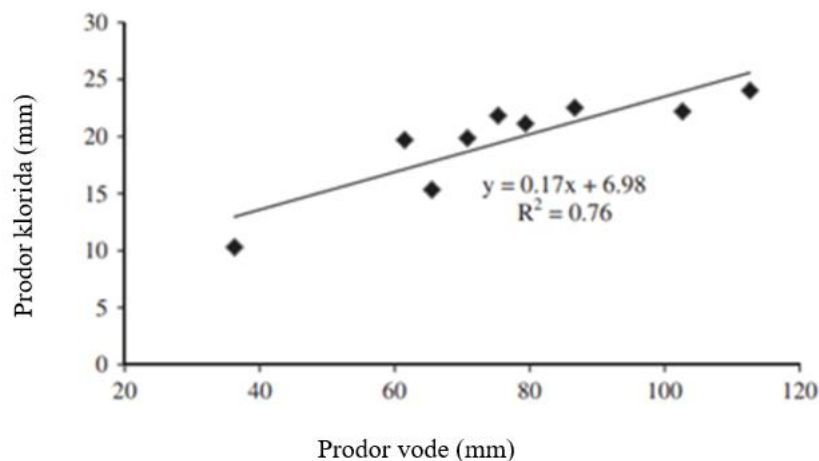
Dobiveni su sljedeći rezultati:

- Što se tiče ispitivanja skupljanja tijekom sušenja, betoni sa zamjenom PDP-om imali su velike vrijednosti skupljanja, dok su u serijama s recikliranim agregatima vrijednosti skupljanja bile veće u usporedbi s kontrolnim betonom.
- Tlačna čvrstoća smanjivala se sukladno povećanju udjela PDP-a za sve starosti pri ispitivanju i sve proizvedene serije. Za udio od 3 % i 6 %, u mješavinama samo s PDP-om, smanjena je tlačna čvrstoća za 15 % odnosno 20 % u odnosu na onu kontrolne mješavine. Što se tiče učinka dodavanja PDP-a i recikliranog agregata, smanjenje tlačne čvrstoće bilo je približno jednako kod zamjene u kombinacijama s REC1 i REC2 pri svim udjelima. Stoga, reciklirani betonski i miješani agregati nisu utjecali na učinak PDP-a na tlačnu čvrstoću. Smanjenje tlačne čvrstoće bilo je nešto veće kod betona s REC1 (25-32 % za postotke zamjene od 3 % i 6 %) nego kod betona s REC2 (31-37 % za postotke zamjene od 3 % i 6 %).
- Dodatak PDP-a betonu s prirodnim šljunkom nepovoljno je utjecao na čvrstoću na savijanje. U tim slučajevima, smanjenja čvrstoće na savijanje iznosila su 17 % i 21 % za dodatke od 3 % i 6 %. Slika 14 pokazuje linearnu korelaciju između tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje za sve betone ( $R^2 = 0,94$ ).



Slika 14. Korelacija tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje u betonu [14]

- PDP negativno je utjecao na apsorpciju: povećanje apsorpcije bilo je proporcionalno s povećanjem udjela PDP-a (5 % kod 3 % zamjene PDP-om i 11 % kod 6 % zamjene PDP-om u odnosu na kontrolni beton).
- Dodatak PDP-a negativno je utjecao na prodor vode, povećavajući se za 69 % i 110 %, za zamjene od 3 % i 6 % prirodnog pijeska PDP-om. Što se tiče svih betona s PDP-om i recikliranim agregatom, prodor vode bio je veći. Međutim, povećanje je bilo proporcionalno manje u usporedbi sa sličnim betonima s 0 % PDP-a. Prodiranje klorida značajno se povećalo s dodatkom PDP-a (91 % i 112 % za zamjene od 3 % i 6 %) u usporedbi s kontrolnom mješavinom. Prodiranje klorida manje se povećalo dodatkom PDP-a u serijama s betonima s recikliranim agregatom (38 % i 45 % za seriju s REC1 te 13 % i 21 % za seriju S REC2). Stoga je dodatak PDP-a značajno više utjecao na betone s recikliranim betonskim i miješanim agregatima u odnosu na betone s PDP-om. Slika 15 pokazuje korelaciju između prodora vode pod pritiskom i prodiranja klorida. Obje karakteristike su se povećale povećanjem udjela PDP-a za sve tri serije proizvedenog betona. Za sve betone, prodiranje klorida proporcionalno se povećavalo s prodorom vode pod pritiskom i obrnuto, pri čemu se obje karakteristike mogu pouzdano odrediti iz druge karakteristike.



Slika 15. Korelacija prodora vode i prodora klorida u betonu [14]

## 5. DJELOMIČNA ZAMJENA AGREGATA U CEMENTNIM KOMPOZITIMA PEPELOM DRVNE BIOMASE - OSVRT

U tablici 3 dan je sažeti prikaz postojećih istraživanja s različitim udjelima PDB-a kao djelomične zamjene za agregat u mortu/betonu, kao i učinak zamjene na neka od karakterističnih svojstava. Osim prikazanih svojstava ispitivani su i koeficijent difuzije, skupljanje, puzanje, gustoća, električna otpornost, slijeganje itd. Može se primijetiti da su pri malim udjelima promjene svojstava neznatne, dok se pri većim udjelima primjećuje značajnija promjena.

**Tablica 3. Sažeti prikaz pregleda postojećih istraživanja zamjene agregata PDB-om u cementnim kompozitima (+ označava poboljšanje svojstava, - označava pogoršanje svojstava, / označava da svojstvo nije ispitivano)**

Istraživanje	Primjena	Vrsta pepela	Udjeli	Poroznost	Tlačna čvrstoća	Čvrstoća na savijanje
[7]	mort	PDP	5, 10, 15, 20 i 25 %	/	-	/
[2]	mort	PDB	5, 10, 15, 20, 25 i 30 %	/	-	-
[8]	mort	PDP	0, 10 i 20 %	-	-	-
[9]	mort	PDB, LP	10 %	-	-	/
[10]	mort	PDB	0, 10, 20, 30, 40, 70 i 100 %	-	-	/
[11]	beton	PDP	20 %	/	-	/
[4]	beton	LP	50 i 100 %	-	-	-
[12]	beton	Pepeo kukuruznog klipa	0, 5, 10, 15 i 20 %	-	-	/
[13]	beton	PDP	0, 20, 40, 60 i 80%	-	-	/
[14]	beton	PDP (maslina)	0, 3 i 6 %	-	-	-

Ovisno o vrsti cementnog kompozita, dodavanje PDB-a kao djelomične zamjene agregata može imati različit utjecaj na različita svojstva – poboljšanje ili pogoršanje svojstava. Pregledom recentnih istraživanja čiji su zaključci sistematično prikazani u ovom završnom radu, bit će dan kratak osvrt na utjecaj PDB-a na svojstva različitih cementnih kompozita. PDB općenito karakterizira velika higroskopsnost, fina veličina čestica tj. manja veličina čestica od one prirodnih agregata (pijeska, šljunka itd.) i velika varijabilnost kemijskog sastava (ovisno o porijeklu biomase i parametrima postupka izgaranja). Glede fizikalnih svojstava, zbog higroskopsnosti i finih čestica te visoke poroznosti, dodavanje PDB-a kao djelomične zamjene agregata u cementnim kompozitima uglavnom povećava poroznost i gustoću za koje je poznata pozitivna korelacija. Također, povećava se i apsorpcija te zadržavanje vode cementnih kompozita. Smanjuje se otpornost na prodiranje klorida tj. dodavanje PDB-a općenito negativno utječe na svojstva trajnosti cementnih kompozita. PDB kao djelomična zamjena agregata također uglavnom negativno utječe na obradljivost, odnosno smanjuje obradljivost cementnih kompozita. Općenito, PDB smanjuje vrijednosti mehaničkih svojstava cementnih kompozita. Dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje, za koje je poznata pozitivna korelacija, s PDB-om pripremljenih cementnih mješavina su ili slične ili manje od vrijednosti kontrolnih mješavina (cementnih mješavina s prirodnim agregatima). PDB općenito nema značajan utjecaj na električnu otpornost cementnih kompozita. Ono što se također može zaključiti pregledom postojećih istraživanja jest da se povećanjem udjela PDB-a proporcionalno povećava intenzitet utjecaja na svojstva; primjerice smanjenje mehaničkih svojstava bit će izraženije što je veći udio PDB-a u agregatu. Korelacija kao i sam utjecaj uvelike ovisi o svim odabranim parametrima. Ono što je nedostatak ovog postupka jest što ne postoje norme koje definiraju kriterije za PDB kako bi mogao biti prikladan agregat/djelomična zamjena agregata u cementnim kompozitima. Ovisno o namjeni konačnog proizvoda i o postavljenim zahtjevima, PDB može doprinijeti ekološkom razvoju kao djelomična zamjena agregata u cementnim kompozitima. Ako bi se mogla dobiti zadovoljavajuća svojstva cementnih kompozita, sačuvao bi se dio prirodnih agregata i smanjio bi se štetan učinak sve većih količina PDB-a na odlagalištima. Upravo su iz tog razloga istraživanja potencijala PDB-a izuzetno važna.

## 6. ZAKLJUČAK

Pepeo drvene biomase nastaje kao nusprodukt izgaranja drvene biomase. S obzirom da sve veće količine PDB-a odložene na odlagalištima predstavljaju ekološki problem, potrebno je pronaći inovativna ekonomična i ekološka rješenja zbrinjavanja ove vrste otpada. Kroz brojna istraživanja predstavljena u ovom radu može se vidjeti da je upravo PDB kao djelomična zamjena agregata u cementnim kompozitima jedna od aktualnijih tema današnjice u građevinskoj industriji. Razlog tome je vjerojatno nedostatak znanja i informacija, ali i pravila tj. normi kojima bi se definirala važna svojstva i zahtjevi na svojstva PDB-a u namjeni kao djelomične zamjene agregata u cementnim kompozitima. Iako PDB može imati negativan utjecaj na fizikalna i mehanička svojstva cementnih kompozita, pregledom istraživanja vidljivo je da postoji veliki potencijal iskoristivosti PDB-a. Ono što je potrebno je istražiti problematiku velike varijabilnosti svojstava PDB-a te različite parametre postupka izgaranja kao i različite kombinacije udjela i mješavina u cementnim kompozitima. S dovoljno podataka i analiza, uspostavljanjem normi i optimalnih parametara, PDB bi potencijalno mogao biti djelomična zamjena agregata u cementnim kompozitima u brojnim primjenama u građevinskoj industriji.

## LITERATURA

- [1] Carević I., Štirmer N., Pečur I.: Utilization of wood biomass ash (WBA) in the cement composites. *Acad J Civ Eng.* 2017;35(2):196–201.
- [2] Gerges N., Issa C.A., Antoun M., Sleiman E., Hallal F., Shamoun P. et al.: Eco-friendly mortar: Optimum combination of wood ash, crumb rubber, and fine crushed glass. *Case Stud Constr Mater.* 2021;15(2):e00588.
- [3] Milovanović B., Štirmer N., Carević I., Baričević A.: Pepeeo drvne biomase kao sirovina u betonskoj industriji. *Građevinar.* 2019;71(6):504–14.
- [4] Lessard J.-M., Omran A., Tagnit-Hamou A., Gagne R.: Feasibility of Using Biomass Fly and Bottom Ashes to Produce RCC and PCC. *J Mater Civ Eng.* 2017;29(4):1–12.
- [5] Carević I., Serdar M., Štirmer N., Ukrainczyk N.: Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials. *J Clean Prod.* 2019;229:1045–64.
- [6] Netinger I., Jelčić M., Bjegović D.: Mogućnost primjene domaće zgure kao agregat u betonu. *Građevinar.* 2010;62(01):35–43.
- [7] Leroy M.N.L., Hermann K.T.J., Rose A.N.E., Joseph N., Dupont F.M.C., Bienvenu N.J.-M.: Density and Strength of Mortar Made with the Mixture of Wood Ash, Crushed Gneiss and River Sand as Fine Aggregate. *J Mater Sci Chem Eng.* 2018;06(04):109–20.
- [8] Beltrán M.G., Barbudo A., Agrela F., Jiménez J.R., De Brito J.: Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash. *Constr Build Mater.* 2016;112(2016):699–707.
- [9] Ottosen L.M., Hansen E.Ø., Jensen P.E., Kirkelund G.M., Golterman P.: Wood ash used as partly sand and/or cement replacement in mortar. *Int J Sustain Dev Plan.* 2016;11(5):781–91.
- [10] Fusade L., Viles H., Wood C., Burns C.: The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings. *Constr Build Mater.* 2019;212:500–13.
- [11] Van der Wegen G., Hofstra U., Speerstra J.: Upgraded MSWI bottom ash as aggregate in concrete. *Waste and Biomass Valorization.* 2013;4(4):737–43.
- [12] Ali S., Javed U., Arsalan R.: Eco-friendly utilization of corncob ash as partial replacement of sand in concrete. *Constr Build Mater [Internet].* 2019;195:165–77.

- [13] Lessard J., Omran A., Tagnit-hamou A., Gagne R.: Feasibility of using biomass fly and bottom ashes in dry-cast concrete production. *Constr Build Mater.* 2017;132:565–77.
- [14] 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.* 2014;72:231–8.