

Miješani cementi s pepelom drvene biomase

Primorac, Ivana

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:237:555719>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-04**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

Ivana Primorac

MIJEŠANI CEMENTI S PEPELOM DRVNE
BIOMASE

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

Ivana Primorac

**MIJEŠANI CEMENTI S PEPELOM DRVNE
BIOMASE**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Nina Štirmer

Student:

Ivana Primorac

Zagreb, 2023.

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivana Primorac

**BLENDED CEMENTS WITH WOOD BIOMASS
ASH**

BACCALAUREUS GRADUATE THESIS

Supervisor:

prof. Nina Štirmer, PhD

Student:

Ivana Primorac

Zagreb, 2023.



TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Ivana Primorac**

JMBAG: **0082066580**

Završni ispit iz predmeta: **Gradiva**

Naslov teme
završnog ispita:

| | |
|-----|---|
| HR | Miješani cementi s pepelom drvne biomase |
| ENG | Blended cements with wood biomass ash |

Opis teme završnog ispita:

Okolišne politike Europske unije pooštravaju kriterije za proizvodnju energije iz neobnovljivih izvora te potiču prelazak na kružno gospodarstvo. Između ostalog, planira se smanjenje broja elektrana na ugljen što će utjecati i na smanjenje dostupnih količina letećeg pepela koji se tradicionalno koristi u proizvodnji cementa i betona. S druge strane, sve je veći broj energana na drvenu biomasu u kojima nakon izgaranja nastaje pepeo drvne biomase. U radu je potrebno napraviti pregled literature vezano uz postojeće vrste cementa, prikazati vrste mineralnih dodataka koje se trenutno koriste u cementima i opisati njihov utjecaj na svojstva cementa i betona. Na osnovi novijih istraživanja, potrebno je opisati i analizirati mogućnosti primjene pepela drvne biomase kao novog mineralnog dodatka u cementima uzimajući u obzir njihova svojstva te dostupne količine.

Datum: **17.4.2023.**

Komentor:

(Ime i prezime komentora)

Mentor:

prof. dr. sc. Nina Štirmer

(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

SAŽETAK

Ovaj rad opisuje moguću primjenu pepela drvene biomase kao novog mineralnog dodatka u cementima te njegov utjecaj na svojstva cementa i morta u svježem i očvrslom stanju. Pepeo drvene biomase opisan u ovom radu najčešće potječe iz energana, a uglavnom se koristi leteći pepeo drvene biomase. Ovaj rad istražuje upotrebu pepela drvene biomase kao ekološkog veziva i kao djelomičnu zamjenu za cement. Iako je otpad od obrade drveta održiv, a drvo je obnovljiv izvor goriva za proizvodnju energije, termički proces pretvaranja drvene biomase u toplinsku energiju proizvodi značajne količine pepela drvene biomase kao nusproizvoda i ako se njime pravilno ne upravlja, može rezultirati ozbiljnim ekološkim i zdravstvenim problemima. Korištenje pepela drvene biomase kao sekundarnog cementnog materijala može smanjiti ugljični otisak betona za 40 % uz zadržavanje dobrih tehničkih i ekoloških svojstava.

Ključne riječi: pepeo drvene biomase, djelomična zamjena za cement, miješani cementi

ABSTRACT

This paper describes the potential application of wood biomass ash as a new mineral additive in cements and its influence on the properties of cement and mortar in both the fresh and hardened states. The wood biomass ash discussed in this paper is most commonly sourced from power plants, with wood biomass fly ash being the primary type used. This paper explores the utilization of wood biomass ash as an eco-friendly binder and as a partial substitute for cement. While wood processing waste is sustainable, and wood is a renewable source of energy fuel, the thermal process of converting wood biomass into thermal energy generates significant quantities of wood biomass ash as a byproduct, and if not properly managed, it can lead to significant environmental and health issues. The use of wood biomass ash as a secondary cementitious material can reduce the carbon footprint of concrete by 40 % while retaining good technical and environmental properties.

Keywords: wood biomass ash, partial cement replacement, blended cements

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. CEMENT | 2 |
| 2.1. Vrste cementa | 2 |
| 3. MINERALNI DODACI..... | 5 |
| 4. LETEĆI PEPEO OD DRVNE BIOMASE | 7 |
| 4.1. Čimbenici koji utječu na količinu i kvalitetu pepela drvene biomase | 8 |
| 4.2. Fizikalna svojstva pepela drvene biomase | 9 |
| 4.3. Kemijska svojstva pepela drvene biomase..... | 10 |
| 5. SVOJSTVA CEMENTA S PEPELOM DRVNE BIOMASE | 11 |
| 5.1. Reološka svojstva betona i morta s miješanim pepelom drvene biomase | 11 |
| 5.2. Nasipna gustoća i tlačna čvrstoća očvrstnulog betona i morta s pepelom drvene biomase . | 13 |
| 5.3. Vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje | 14 |
| 5.4. Preliminarna ispitivanja primjene PDB-a u cementnim kompozitima..... | 15 |
| 5.5. Svojstva trajnosti betona i morta s pepelom drvene biomase | 16 |
| 6. BETON S PEPELOM OTPADAKA PRERADE ŠEĆERNE TRSKE, RIŽINOM LJUSKOM I DRVNOM BIOMASOM | 17 |
| 6.1. Utjecaj BRWA na svojstva betona..... | 18 |
| 7. ZAKLJUČAK | 21 |
| LITERATURA..... | 22 |
| POPIS SLIKA | 25 |
| POPIS TABLICA..... | 26 |

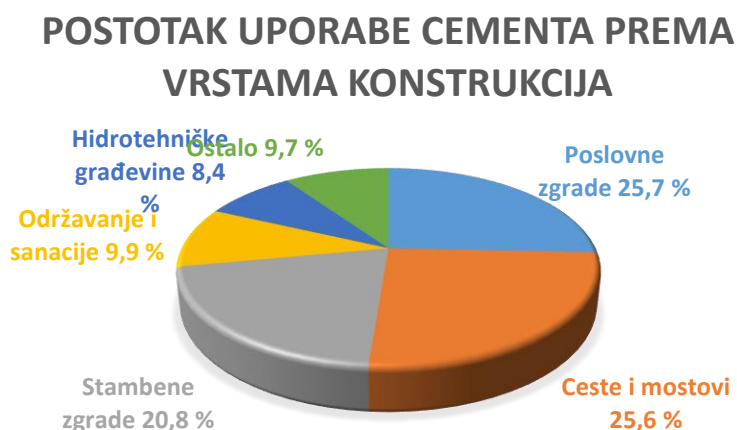
1. UVOD

Ekološki aspekti ljudskih aktivnosti predstavljaju velik izazov za današnje društvo. Betonska industrija suočava se s kritikama zbog prekomjerne proizvodnje ugljičnog dioksida. Proizvodnja cementa povezana je s iscrpljivanjem prirodnih resursa koji se kose s načelima kružne ekonomije. Pri proizvodnji portlandskog cementa javljaju se problemi zbog potrošnje velike količine energije (približno 3500 kJ/kg cementa) i emisija stakleničkih plinova (2 – 5 % ukupne svjetske emisije CO_2 u atmosferu otpada na industriju cementa). Zamjena tradicionalnog portlandskog klinkera identificirana je kao jedna od povoljnih strategija za smanjenje negativnih ekoloških posljedica povezanih s proizvodnjom cementa.. Biomasa je jedan od obnovljivih izvora energije i predstavlja dobru alternativu fosilnim gorivima. Korištenje biomase umjesto tradicionalnih goriva predstavlja prikladan način smanjenja emisije stakleničkih plinova. Najvažnije biomase uključuju ostatke iz drvoprerađivačke industrije ili šumskih aktivnosti, otpatke iz farmi i poljoprivredne industrije, organski dio komunalnog otpada te biljke koje se uzgajaju u energetske svrhe. One predstavljaju veliki potencijal za izgaranje biomase, a njihova povećana potreba u energanama na biomasu dovela je do problema vezanih za odlaganje nastalog pepela. Otpadni proizvodi izgaranja biomase mogu zamijeniti neke od trenutno korištenih pucolana. Njihova primjena u miješanim cementima proučavana je u zemljama s dominantnom poljoprivrednom industrijom, gdje upotreba poljoprivrednih otpadaka ima velik potencijal zbog svoje obilnosti. S ekološkog stajališta, upotreba pepela drvene biomase rezultirala bi brojnim korisnim učincima (smanjenje emisije CO_2 , očuvanje prirodnih resursa uključenih u proizvodnju cementa, rješavanje problema odlaganja pepela drvene biomase).

U radu su prikazana svojstva pepela drvene biomase te kako njegova primjena u miješanim cementima utječe na svojstva morta i betona u svježem i očvrslom stanju. Dan je pregled niza istraživanja kako bi se ukazalo na dobre učinke primjene pepela drvene biomase kao djelomične zamjene za cement.

2. CEMENT

Cement je hidraulično mineralno vezivo koje samostalno očvrstne na zraku i pod vodom. U građevinarstvu se primjenjuje za proizvodnju betona i morta te se smatra najviše upotrebljavan materijalom u svijetu. Godišnja potrošnja po stanovniku zemlje kreće se između 500 i 2000 kg. Cement je praškasti materijal, koji pomiješan s vodom, kemijskim reakcijama i pratećim fizikalnim procesima prelazi u očvrstnulu cementnu pastu ili cementni kamen [1]. Na slici 1 prikazana je upotreba cementa prema vrsti konstrukcije.



Slika 1. Upotreba cementa prema vrsti konstrukcije [2].

2.1. Vrste cementa

Portlandski cement je materijal dobiven zagrijavanjem mješavine vapnenca i gline u peći na oko 1450 ° C, zatim mljevenjem u fini prah s malim dodatkom gipsa [3]. Na slici 2 prikazana je razlika cementa i klinkera.



Slika 2. Razlika između cementa (lijevo) i klinkera (desno) [3].

Podjela cementa prema HRN EN 197-1:2021 obuhvaća 27 + 4 vrsta cemenata za opće namjene. Ova podjela odnosi se na vrste cementa prema sastavu. U tablici 1 prikazane su glavne vrste cementa [2].

Tablica 1. Glavne vrste cementa prema HRN 197-1:2021 [2].

| GLAVNE VRSTE | 27 + 4 VRSTA CEMENTA ZA OPĆE NAMJENE | |
|-----------------------------|---|--------------------------|
| CEM I | Portlandski cement | CEM I |
| | Portlandski cement s dodatkom zgure | CEM II/A-S CEM II/B-S |
| CEM II | Portlandski cement s dodatkom SiO_2 prašine | CEM II/B-D |
| | Portlandski cement s dodatkom pucolana | CEM II/A-P |
| | | CEM II/B-P |
| | | CEM II/A-Q |
| | | CEM II/B-Q |
| | Portlandski cement s dodatkom letećeg pepela | CEM II/A-V |
| | | CEM II/B-V |
| | | CEM II/A-W |
| | | CEM II/B-P |
| | Portlandski cement s dodatkom pečenog škrljevca | CEM II/A-T |
| | | CEM II/B-T |
| | Portlandski cement s dodatkom vapnenca | CEM II/A-L |
| | | CEM II/B-L |
| | | CEM II/A-LL |
| CEM II/B-LL | | |
| Portlandski miješani cement | CEM II/A-M | |
| | CEM II/B-M | |
| | CEM II/C-M | |
| CEM III | Metalurški cement | CEM III/A |
| | | CEM III/B |
| | | CEM III/C |
| CEM IV | Pucolanski cement | CEM IV/A |
| | | CEM IV/B |
| CEM V | Miješani cement | CEM V/A |
| | | CEM V/B |
| CEM VI | Miješani cement | CEM VI (S-P) |
| | | CEM VI (S-V) |
| | | CEM VI (S-L) |
| | | CEM VI (S-LL) |

S – granulirana zgura visoke peći; D – silicijska prašina; P – prirodni pucolanski materijali; Q – kalcinirani pucolanski materijali; V – silicijski leteći pepeo; W – kalcijski leteći pepeo; T – pečeni škrljevac; L i LL – vapnenac; M – miješani dodaci.

Prema svojstvima, vrste cementa su:

- cement niske topline hidratacije ($> 40\%$ dodatka)
- bijeli i obojeni portlandski cement
- aluminatni cement (vatrootporan)
- sulfatnootporni cement ($< 3,5\% C_3A$, količina zguze $> 80\%$)
- ekspanzivni cement [2].

Posebne vrste cementa su:

- cement opće namjene niske topline hidratacije ($< 270\text{ J/g}$)
- metalurški cement niske rane čvrstoće
- posebni cement vrlo niske topline hidratacije ($< 220\text{ J/g}$)
- sulfatnootporni cement
- bijeli cement
- aluminatni cement [4].

Zamjena uobičajenog cementnog klinkera vapnencem, letećim pepelom od ugljena, prirodnim vulkanskim materijalima, spaljenim uljnim škrljavcem, zgurom iz visokih peći ili zeolitima omogućena je europskom normom HRN EN 197-1 za cement. Ove vrste cementa često se nazivaju miješani cementi ili portlandski kompozitni cementi [5].

3. MINERALNI DODACI

Mineralni dodaci uspješno se koriste kao dopunski materijali u cementnim betonima, mortovima i pastama, čime se ostvaruju pozitivni učinci, kao što su poboljšanje mehaničkih svojstava i trajnosti, uz smanjenje generiranja topline tijekom hidratacije cementa. Zamjena portlandskog cementa različitim nusproizvodima može donijeti značajne ekološke koristi kroz prikladno zbrinjavanje nusproizvoda, smanjenje potrošnje prirodnih sirovina, smanjenje potrošnje energije i smanjenje emisije stakleničkih plinova [6]. Mineralni dodaci mogu djelovati na 3 načina: učinkom punila, učinkom nukleusa i pucolanskom reakcijom. Mineralni dodaci koji djeluju kao punilo imaju čestice manje od čestica cementa i dodaju se betonu kako bi poboljšali određena svojstva, kao što su poboljšanje mikrostrukture, povećanje čvrstoće betona i smanjenje količine cementa bez smanjenja čvrstoće betona [7].

Uz klinker kao osnovni sastojak cementa, za proizvodnju različitih vrsta cementa primjenjuju se i sljedeći mineralni dodaci:

- granulirana zgura visoke peći
- silicijska prašina
- pucolanski materijali (prirodni i kalcinirani)
- leteći pepeo
- pečeni škriljevac
- vapnenac [1].

Zgura je nusproizvod iz proizvodnje željeza u visokim pećima. Latentni je hidraulički materijal, može se dodavati u velikim količinama, pridonosi čvrstoćama cementa. Najčešće se koristi za proizvodnju metalurških cementa i cementa niske topline hidratacije. Hlađenjem rastopljene zgure s velikim količinama vode, zgura se pretvara u staklasti materijal nalik na pijesak [2].

Prednosti primjene zgure u očvrslom betonu su:

- veće kasnije čvrstoće (14 - > dnevne čvrstoće)
- povećana čvrstoća na savijanje
- svjetlija boja (zamjena za bijeli cement)
- povećana mogućnost refleksije sunčeve topline
- smanjena propusnost i povećana trajnost
- povećana otpornost na alkalnosilikatnu reakciju (25 – 70 %)

- povećana otpornost na sulfatno djelovanje uporabom zgre s malim sadržajem glinice (40 – 70 %) [2].

Pucolan je definiran kao silikatni i aluminijski materijal koji, u prisutnosti vlage, kemijski reagira s kalcijevim hidroksidom pri uobičajenim temperaturama i formira spojeve koji imaju svojstva cementa [7].

Leteći pepeo nastaje kao nusproizvod gorenja pogonskog goriva u termoelektranama na ugljen. Mineralni dodatak leteći pepeo koristi se kao dodatak cementu zbog svog doprinosa svojstvima betona putem hidrauličnih i pucolanskih svojstava. Ističu se dvije karakteristike letećeg pepela: veličina čestica i sadržaj SiO_2 i Al_2O_3 [7].

Može se upotrijebiti kao zamjenski materijal u cementu u svrhu zaštite okoliša i poboljšanja određenih svojstava. Uporabom letećeg pepela, značajno se povećavaju kasnije čvrstoće dok su rane čvrstoće manje [2].

Prednosti primjene letećeg pepela od ugljena su:

- poboljšanje obradljivosti
- smanjenje segregacije betona
- povećava koheziju među česticama betona – pogodniji za pumpani beton
- plinopropusnost
- povećava čvrstoću
- povećava trajnost [2].

Silicijska prašina je sporedni proizvod koji nastaje pri proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura u elektrolučnim pećima [1]. Primjenom amorfnog silicijske prašine SiO_2 prašine smanjuje se ukupni volumen pora i poboljšavaju se svojstva betona (stabilnost svježe mješavine betona, povećanje čvrstoće, povećana otpornost u agresivnoj okolini i trajnost) [2].

4. LETEĆI PEPEO OD DRVNE BIOMASE

Za razliku od dosadašnjeg načina dobivanja električne i toplinske energije, pojava energana na biomasu (šumarski i poljoprivredni otpad) predstavlja obećavajući izvor obnovljive energije s malim operativnim troškovima uz trajno obnovljivo gorivo [8]. Tijekom proizvodnje energije uporabom drvene biomase nastaje pepeo drvene biomase (PDB). Pepeo drvene biomase je neizgorivi kruti ostatak koji nastaje izgaranjem drvene biomase i sadrži najveći dio mineralnih frakcija koje potječu iz biomase. PDB je složena mješavina organskog i anorganskog sastava i sastoji se od velikog broja spojeva. Pepeo je heterogenog sastava koji može znatno varirati [9]. Pepeo koji nastaje tijekom izgaranja drvene biomase može se podijeliti na pepeo s dna peći (ložišni pepeo) i leteći pepeo (koji se dijeli na finu i krupniju frakciju), (slika 3) [10].



Slika 3. Uzorci pepela drvene biomase: a) pepeo s dna peći; b) leteći pepeo krupnije frakcije; c) finiji leteći pepeo [10].

Iskorištavanje otpada iz proizvodnje proizvoda od drveta i šumarstva poput piljevine, drvene sječke, kore drveta, otpada iz pilana i tvrdih sječki kao izvora goriva za proizvodnju električne energije predstavlja visoko učinkovitu strategiju za rješavanje problema zbrinjavanja ovih otpadnih materijala [8]. Ključna biomasa uključuje ostatke od prerade drva i šumskih aktivnosti, otpad s farmi i poljoprivrednih poduzeća, organsku frakciju komunalnog otpada te biljke uzgojene s namjerom korištenja u energetske svrhe. Pepeo drvene biomase može se ponovno upotrebljavati kao građevinski materijal za zamjenu granuliranog materijala u geotehničkim radovima, poput temelja cesta. Ponovna upotreba pepela drvene biomase u poljoprivredi ili industriji može izazvati okolišne probleme povezane s većim udjelom te mogućnošću izluživanja teških metala ovog letećeg pepela, u usporedbi s pepelom s dna peći. Ispitivanje izluživanja provedeno na uzorcima letećeg pepela drvene biomase pokazali su da postoji raspon pH vrijednosti ispirajuće tekućine (ispod 7,5) unutar kojeg se oslobađaju teški metali koji su posebno zabrinjavajući za okoliš iznad granica za odlaganje letećeg pepela drvene biomase na odlagalištima neopasnog otpada. Ovakvo izluživanje može biti nespojivo s

ponovnom upotrebom letećeg pepela drvene biomase u poljoprivredi, dok bi bilo kompatibilno sa sigurnom upotrebom ovog pepela u materijalima na bazi cementa, kao mineralnog dodatka (djelomična zamjena cementa) ili kao punila [11].

S ekološkog stajališta, upotreba letećeg pepela drvene biomase kao mineralnog dodatka imala bi nekoliko korisnih učinaka kao što su:

- značajno smanjenje emisije CO_2 u vezi s industrijskom proizvodnjom cementa iz tradicionalnih sirovina
- očuvanje prirodnih resursa koji se uobičajeno koriste u proizvodnji cementa
- rješenje ekološkog problema vezanog uz odlaganje letećeg PDB-a [11].

4.1. Čimbenici koji utječu na količinu i kvalitetu pepela drvene biomase

Karakteristike pepela drvene biomase ovise o nekoliko ključnih čimbenika. To zahtijeva odgovarajuću karakterizaciju pepela drvene biomase prije nego se koristi kao materijal u proizvodnji betona. Ti čimbenici uključuju temperaturu obrade, vrste i hidrodinamiku peći te vrstu drveća od kojeg su dobiveni drveni otpaci. Temperatura izgaranja sirove drvene biomase u peći ima značajan utjecaj na količinu i kemijski sastav pepela. Izgaranje drvene biomase pri višim temperaturama obično rezultira manjom količinom pepela. Prema [8], smanjenje količine pepela drvene biomase bilo je do 45 % s povećanjem temperature izgaranja od 538 °C do 1093 °C. Izgaranje drvene biomase na temperaturama iznad 1000 °C, uzrokuje smanjenje sadržaja karbonata. Različiti pristupi termičkoj preradi drvene biomase značajno utječu na fizikalna i kemijska svojstva pepela. Variranje temperatura zbog različitih vrsta peći utječe na promjene kemijskog sastava i karakteristike pepela. Različite vrste tehnologija izgaranja imaju značajan utjecaj na fizikalna svojstva pepela. Različite vrste drveća utječu na kemijski sastav pepela. Značajne varijacije kemijskog sastava ključnih oksida koji određuju prikladnost pepela drvene biomase kao zamjenskog materijala za cement, poput silicijevog dioksida (SiO_2), aluminijskog oksida (Al_2O_3), željezovog oksida (Fe_2O_3) i kalcijevog oksida (CaO), pojavljuju se ovisno o različitim vrstama drveća [8]. Varijacije u kemijskom sastavu pepela proizvedenog od različitih vrsta drveća mogu se vidjeti u tablici 2.

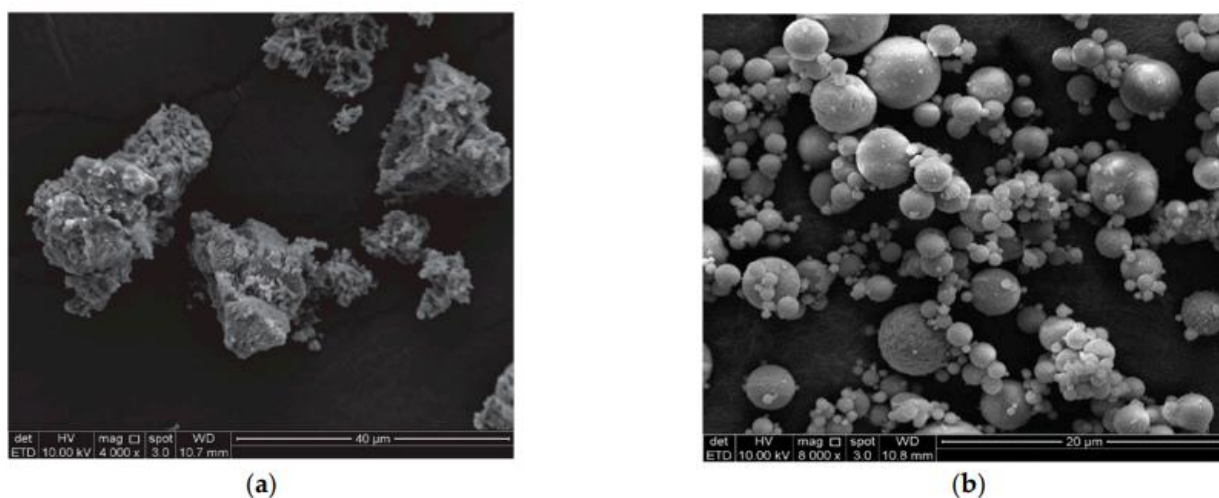
Tablica 2. Kemijski sastav pepela ovisno o podrijetlu [12].

| Vrsta biomase | SiO_2 (%) | CaO (%) | K_2O (%) | P_2O_5 (%) | Al_2O_3 (%) | MgO (%) | Fe_2O_3 (%) | SO_3 (%) | Na_2O (%) | TiO_2 (%) |
|--|----------------|--------------|---------------|-----------------|------------------|--------------|------------------|---------------|----------------|----------------|
| Drvo i drvena biomasa | 37,49 | 26,41 | 6,1 | 2,02 | 12,23 | 4,04 | 8,09 | 0,83 | 1,81 | 0,98 |
| Sjeckani drvni otpad od crne topole i jele | 26,06 | 45,76 | 10,7 | 4,87 | 1,91 | 2,33 | 2,65 | 2,86 | 2,65 | 0,21 |
| Kora balsamika | 12,4 | 68,2 | 2,6 | 2,3 | 0,12 | 11,5 | 1,1 | 0,8 | 0,9 | 0,1 |
| Kora bukve | 4,38 | 69,06 | 8,99 | 4,13 | 0,55 | 5,92 | 2,24 | 2,75 | 1,85 | 0,13 |
| Kora breze | 39,91 | 9,75 | 8,06 | 2,46 | 15,12 | 2,59 | 9,54 | 11,66 | 0,54 | 0,37 |

4.2. Fizikalna svojstva pepela drvne biomase

Berra i suradnici [11] proučavali su različite vrste pepela drvne biomase i njihove veličine čestica te su istraživali kako te karakteristike utječu na svojstva betona i morta. Manja veličina čestica pepela drvne biomase povećava reaktivnost. Ovo je vrlo važno jer pokazuje da se promjenom veličine čestica pepela može kontrolirati njegova sposobnost za interakciju s drugim materijalima, poput cementa. Gustoća pepela drvne biomase manja je od gustoće cementa, što ukazuje na mogućnost smanjenja ukupne težine materijala dodavanjem pepela drvne biomase u beton ili mort. Čestice drvne biomase često imaju nepravilan oblik i veliki postotak neizgorjelog organskog materijala, što rezultirala velikom razlikom u površinama [13]. Carević i suradnici [14] tvrde da su čestice pepela s dna peći grublje od čestica letećeg pepela i cementa. Veličine čestica pepela s dna peći kretale su se između 10 i 100 μm , a letećeg pepela između 0,2 do 100 μm [15]. Abdulkareem i suradnici [16] primijetili su da čestice

letećeg pepela drvene biomase imaju veću površinsku poroznost i oštrijeg su oblika od čestica letećeg pepela (Slika 4).



Slika 4. Mikroskopske slike a) drvene biomase i b) letećeg pepela [16].

Nasipna gustoća drvnog letećeg pepela iznosi 490 kg/m^3 , a specifična težina 2,48 [8]. Istraživanja Naik i suradnika [17] pokazala su varijacije u jediničnoj težini pepela drvene biomase, s vrijednostima od 162 kg/m^3 do 1376 kg/m^3 , a specifična težina uzoraka pepela od drvene mase iznosi se između 2,26 i 2,60.

4.3. Kemijska svojstva pepela drvene biomase

Kemijski sastav pepela drvene biomase značajno varira ovisno o vrsti drveta od kojeg potječe biomasa, ali općenito je bogat spojevima vapna i silicija [10]. Kemijski sastav pepela drvene biomase značajno utječe na njegovu primjenu kao pucolanskog materijala u cementu i betonu. Prema ASTM C618 [18], pucolan je silicijev materijal s aluminijem koji obično nema svojstva vezivanja cementa, ali u fino usitnjenom obliku može reagirati s portlanditom iz hidratacije cementa i stvoriti proizvod s cementnim svojstvima. Pepeo drvene biomase dobiven nekontroliranim izgaranjem piljevine na otvorenom ima visoku alkalnost s vrijednostima pH od 9,5 do 10,1, a utvrđeno je da sadrži značajnu količinu hlapljive tvari između 4,63% i 8,4%, izraženo kao gubitak mase pri paljenju pepela na temperaturi od $750 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ [19], [20], [21]. Rezultati rendgenske difrakcijske analize (XRD) pepela drvene biomase pokazuju prisutnost silicija i kalcijevih karbonata kao glavnih faza unutar pepela [20], [21]. Analiza XRD otkrila je u uzorcima pepela drvnog otpada dodatne dominantne faze poput portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) i vapna (CaO) [22], [23].

5. SVOJSTVA CEMENTA S PEPELOM DRVNE BIOMASE

Miješanje pepela drvene biomase s običnim portlandskim cementom (OPC) u različitim udjelima stvara novu vrstu miješanog cementa s promijenjenim svojstvima u usporedbi s OPC–om. Miješani cementi s pepelom drvene biomase kao djelomičnom zamjenom za OPC imaju veću normiranu konzistenciju te kasniji početak i kraj vezivanja. Beton s pepelom drvene biomase ima tendenciju biti stabilniji, ali s manjim stupnjem razvoja topline u usporedbi s OPC pastom [8]. Uključivanje pepela drvene biomase zahtijeva se više vode kako bi se postigla normirana konzistencija cementne paste. Potreba za više vode raste s povećanjem udjela zamjene cimenta pepelom drvene biomase, a povećanje potrebe za vodom posljedica je veće površine poroznih čestica pepela drvene biomase u usporedbi s česticama OPC-a [20], [21], [24]. Cementne paste s pepelom drvene biomase imaju niže temperature hidratacije, što je posljedica sporije reakcije hidratacije [8].

5.1. Reološka svojstva betona i morta s miješanim pepelom drvene biomase

Istraživanje [21] pokazalo je da dodavanje pepela drvene biomase dobivenog termičkom obradom piljevine u betonu razreda čvrstoće C16/20 ima znatan utjecaj na njegovu obradljivost. Postupno povećanje zamjene cimenta pepelom drvene biomase od 5 % do 30 % utjecalo je na smanjenje konzistencije slijeganjem betonske mješavine u rasponu od 5 do 40 mm u usporedbi s kontrolnom betonskom mješavinom. Također, faktor zbijenosti betonske mješavine smanjuje se s povećanjem zamjene cimenta pepelom drvene biomase, a u mješavinama s velikim udjelom zamjene (20 – 30 %) slijeganja uopće nema. To smanjenje obradljivosti mješavine vjerojatno je posljedica velikog sadržaja organskih tvari u pepelu drvene biomase [8].

Povećanjem zamjene cimenta pepelom drvene biomase, konzistencija samozbijajućeg morta (SCM) se smanjuje, što utječe na smanjenje protoka svježih SCM mješavina. Iz navedenog je vidljivo da se dodavanjem pepela drvene biomase u beton i mort može značajno utjecati na njihova reološka svojstva, uključujući obradljivost. Zbog toga je potrebno pažljivo razmatranje i kontroliranje ovih navedenih svojstava prilikom korištenja PDB-a [8].

Istraživanje [25] provedeno je na 5 uzoraka s postupnim povećanjem zamjene cimenta pepelom drvene biomase (0 – 20 %) sa stalnim omjerom miješanja cimenta, pijeska, vodovezivnog omjera te doziranjem superplastifikatora (SP). Konzistencija rasprostiranjem SCM mješavina smanjivala se s 270 mm na 200 mm, vrijeme protoka svježih SCM mješavina povećalo se s 4 sekunde na 18 sekundi, kako je prikazano u tablici 3.

Tablica 3. Sastavi i obradljivost SCM mješavina [25].

| Mješavina br. | Cement (kg/m^3) | PDB % (kg/m^3) | Pijesak (kg/m^3) | Voda (kg/m^3) | SP (%) | v/c | Konzistencija morta (cm) | Vrijeme protoka (s) |
|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|-----|--------------------------|---------------------|
| SCM1 | 441 | 0 (0) | 662 | 265 | 2,5 | 0,6 | 27 | 4 |
| SCM2 | 419 | 5 (22) | 662 | 265 | 2,5 | 0,6 | 25 | 7 |
| SCM3 | 397 | 10 (44) | 662 | 265 | 2,5 | 0,6 | 24 | 7 |
| SCM4 | 375 | 15 (66) | 662 | 265 | 2,5 | 0,6 | 23 | 12 |
| SCM5 | 353 | 20 (88) | 662 | 265 | 2,5 | 0,6 | 20 | 18 |

Rajamma i suradnici [13] istraživali su utjecaj dodavanja pepela drvene biomase iz energana na drvenu biomasu na svojstva svježeg i očvrtnulog morta. Korištenje pepela drvene biomase kao djelomične zamjene za OPC u mortu, s udjelom od 10 % mase veziva, utjecalo je na produljenje vremena vezivanja u usporedbi s kontrolnom mješavinom morta, dok se skraćivanje vremena vezivanja javljalo pri većem udjelu zamjene cementa (20 – 30 % ukupne mase veziva).

SCC mješavine s 20 mm krupnijim agregatom i 10 % zamjene cementa pepelom drvene biomase, ispitane su pomoću sljedećih postupaka: rasprostiranje slijeganjem, V-lijevka, T-5 minuta, U-posuda i L-posuda. Svaka mješavina pokazala je dobru usklađenost s EFNARC [26] specifikacijama prikazanim u tablici 4.

Tablica 4. Svojstva u svježem stanju SCC mješavina s 10 % pepela drvene biomase [25].

| Mjerenje | Oznaka mješavine | | Preporuka (EFNARC, 2002) |
|---------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| | Kontrolna SCC mješavina | SCC mješavina s 10 % PDB-a | |
| Protok (mm) | 680 | 665 | 650 – 800 |
| V-lijevak (s) | 8,4 | 8,2 | 8 – 12 |
| T5 minuta (s) | 9,8 | 9,9 | 8 – 15 |
| U-posuda (mm) | 29 | 28,5 | 0 – 30 |
| L-posuda | 0,85 | 0,85 | 0,8 – 1,0 |

5.2. Nasipna gustoća i tlačna čvrstoća očvrsnulog betona i morta s pepelom drvene biomase

Primjena pepela drvene biomase kao zamjene za cement u betonu smanjuje gustoću očvrsnulog betona. Smanjenje gustoće postaje značajnije pri većim udjelima zamjene cementa pepelom drvene biomase [20]. Istraživanja [19], [20], [21] pokazala su da korištenje pepela drvene biomase u udjelu od 5 % do 30 % zamjene cementa smanjuje tlačnu čvrstoću betona u odnosu na OPC beton, neovisno o vremenu očvršćivanja. Udoeyo i suradnici [27] navode da čestice pepela drvene biomase djeluju više kao punilo unutar cementne paste nego kao vezivni materijal. Povećanjem udjela pepela kao zamjene za cement, povećala se površina punila, što je uzrokovalo smanjenje čvrstoće betona uslijed smanjenja količine cementa. Elinwa i Mahmood [21] uočili su malu razliku u tlačnoj čvrstoći između betona s pepelom drvene biomase i kontrolnog OPC betona. Ova razlika se smanjuje produljenjem vremena očvršćivanja betona, posebno nakon 28 dana. Mort s 10 % pepela drvene biomase ima najveću tlačnu čvrstoću do 60 dana očvršćivanja. Nakon 60 dana, mort s 10 % pepela drvene biomase ima sličnu tlačnu čvrstoću kao mort s OPC-om kao vezivom [20]. Naik i suradnici [28] ispitivali su razvoj tlačne čvrstoće betona s pepelom drvene biomase do starosti 365 dana. Pepeo drvene biomase uključen je u mješavinu pri udjelima zamjene veziva od 5 %, 8 % i 12 % ukupne mase veziva, a količine ostalih komponenata ostale su nepromijenjene.

Na osnovi rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće zaključeno je sljedeće:

- kontrolna betonska mješavina postiže čvrstoću od 34 MPa (28 dana) i 44 MPa (365 dana)
- betonska mješavina s pepelom drvene biomase postiže čvrstoću od 33 MPa (28 dana) i 42 – 46 MPa (365 dana)
- djelomična zamjena cementa pepelom drvene biomase do 12 % doprinijela je razvoju čvrstoće betonskih mješavina [28].

Tijekom produljenih razdoblja očvršćivanja, postizana je kontinuirana čvrstoća betonskih mješavina s pepelom drvene biomase, što ukazuje na pucolansku reakciju između pepela drvene biomase i produkta hidratacije cementa. Primjenom pepela drvene biomase kao djelomične zamjene za cement u udjelu od 10 % ukupne mase veziva u samozbijajućem mortu, poboljšava se tlačna čvrstoća mješavine u usporedbi s kontrolnom mješavinom morta koja sadrži samo OPC kao vezivo, što je još jedan od dokaza o pucolanskom svojstvu pepela drvene biomase [25]. Mješavine samozbijajućeg morta s pepelom drvene biomase iznad 10 % ukupne mase veziva,

imaju manju tlačnu čvrstoću od čistog OPC betona do starosti 28 dana. Kod produljenja očvršćivanja do 90 dana, betonske mješavine s pepelom drvne biomase udjela 15 % imale su tlačnu čvrstoću sličnu OPC betonu.

5.3. Vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje

Prema istraživanju [19], smanjenje vlačne čvrstoće betona s PBD-om sve je izraženije s povećanjem udjela pepela od drvne biomase. Nakon 7 dana, razlike u čvrstoći bile su značajnije u odnosu na OPC beton, a nakon 28 dana razlike u čvrstoći su se smanjile. Vlačna čvrstoća betonskih uzoraka sa udjelom PBD-a do 25 % iznosila je 90 % vlačne čvrstoće OPC betona, kako je prikazano u tablici 5.

Tablica 5. Vlačna čvrstoća cijepanjem betona od pepela drvne biomase [19].

| Udio PDB-a (%) | Vlačna čvrstoća (N/mm^2) | |
|----------------|------------------------------|---------|
| | 7 dana | 28 dana |
| 0 | 2,14 | 2,8 |
| 10 | 2,05 | 2,76 |
| 15 | 1,83 | 2,69 |
| 20 | 1,79 | 2,61 |
| 25 | 1,44 | 2,53 |
| 30 | 1,14 | 1,91 |

Iz analize rezultata laboratorijskih ispitivanja Naika i suradnika [28] proizlazi da su kontrolne betonske mješavine bez pepela drvne biomase postigle vlačnu čvrstoću 3,8 MPa nakon 28 dana i 4,3 MPa nakon 365 dana. Vlačna čvrstoća betonskih mješavina s pepelom drvne biomase varirala je između 3,6 i 4,0 MPa nakon 28 dana i između 4,3 i 5,3 MPa nakon 365 dana. Za beton starosti od 28 do 365 dana, betonske mješavine s udjelom pepela od drvne biomase od 8 % ukupne mase veziva pokazale su najbolje ponašanje razvoja vlačne čvrstoće.

U istraživanjima čvrstoće na savijanje [28], Naik i suradnici primjenjivali su pepeo drvne biomase u betonu u udjelima zamjene cementa od 0 (kontrolni beton), 5, 8 i 12 % mase cementa. Rezultati su pokazali da je kontrolna mješavina postigla čvrstoću pri savijanju od 4,1 MPa nakon 28 dana i 4,4 MPa nakon 365 dana, dok su mješavine s pepelom drvne biomase imale čvrstoću pri savijanju između 3,9 MPa i 5,3 MPa. Mješavine s pepelom drvne biomase su nakon 7 dana pokazale bolju čvrstoću na savijanje. Mješavina s 5 % pepela drvne biomase imala je

najveću čvrstoću pri savijanju. Prema [27] pokazano je da je zamjena cementa pepelom drvene biomase rezultirala smanjenjem čvrstoće na savijanje s povećanjem postotka zamjene. Rajamma i suradnici [13] ispitivali su utjecaj dodavanja pepela drvene biomase na čvrstoću pri savijanju mješavina morta. Rezultati su pokazali da je zamjena cementa pepelom drvene biomase do 20 % imala prihvatljivu čvrstoću pri savijanju, dok je veća zamjena utjecala na smanjenje čvrstoće.

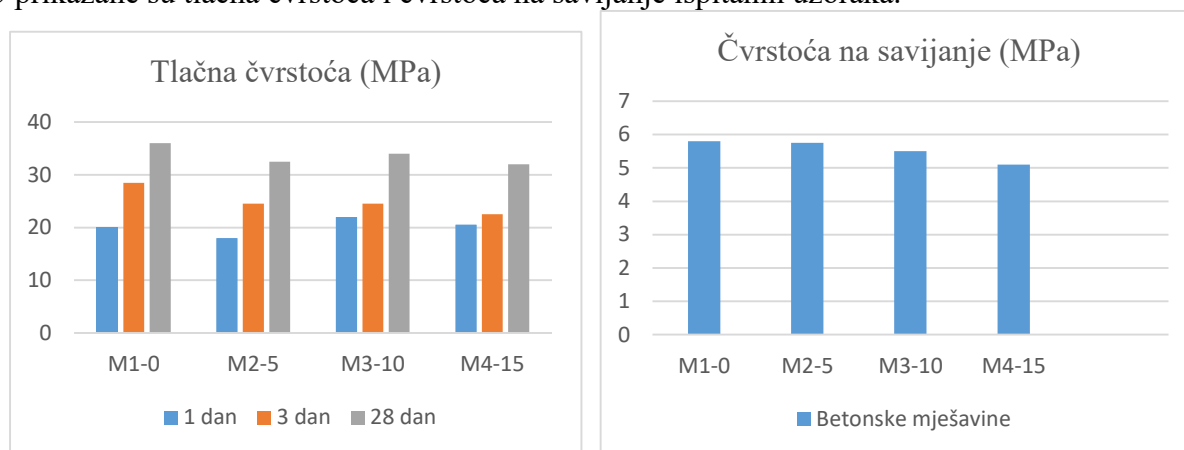
5.4. Preliminarna ispitivanja primjene PDB-a u cementnim kompozitima

U Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu napravljena su preliminarna ispitivanja primjene pepela drvene biomase u betonu [29], [30]. U ovim istraživanjima, kao zamjena za cement u betonu korišten je leteći PDB dobiven iz koogeneracijskog postrojenja u Hrvatskoj koje koristi šumske ostatke iz drvene industrije. Različiti udjeli PDB-a zamijenili su dio cementa u betonskim mješavinama: 5 % (M2-5), 10 % (M3-10) te 15 % na masu cementa (M4-15). M1-0 predstavlja referentnu mješavinu. Detalji su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Sastavi betonskih mješavina [30].

| Materijal | M1-0 | M2-5 | M3-10 | M4-15 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Cement (kg) | 350,0 | 332,5 | 315 | 295,5 |
| PDB (kg) | 0 | 17,5 | 35 | 52,5 |
| Voda (kg) | 175 | 175 | 175 | 175 |
| Superplastifikator (%) | 0,4 | 0,5 | 0,8 | 1,4 |
| Aerant (%) | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Agregat | 1766,0 | 1753,6 | 1746,2 | 1739,3 |

Nakon 28 dana, sve betonske mješavine imale su tlačnu čvrstoću veću od 30 MPa, ali se ta čvrstoća smanjivala s povećanjem udjela PDB-a. Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana se s povećanjem udjela PDB-a smanjila do 10 % (M4-15) u usporedbi s referentnom mješavinom (M1-0). Ispitivanje tlačne čvrstoće provodilo se na uzorcima dimenzija 15 x 15 x 15 cm prema normi HRN EN 12390-3:2009 [31], dok se ispitivanje čvrstoće na savijanje provodilo na prizmama dimenzija 10 x 10 x 40 cm u skladu s normom HRN EN 12390-5:2009 [32]. Na slici 5 prikazane su tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje ispitanih uzoraka.



Slika 5. Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje betona s dodatkom PDB-a [29, 30].

5.5. Svojstva trajnosti betona i morta s pepelom drvene biomase

Betonske mješavine s pepelom drvene biomase kao djelomičnom zamjenom za cement pokazale su veću otpornost na koroziju uzrokovanu monobaznim kiselinama u usporedbi s ekvivalentnim OPC mješavinama. Međutim, suprotno se događa kada su betonske mješavine izložene korozivnom djelovanju dibaznih kiselina [20].

Povećanje udjela pepela drvene biomase u sastavu betonskih mješavina obično rezultira povećanjem apsorpcije vode [20], [27].

Prema [8], upotreba pepela drvene biomase kao djelomične zamjene za cement do 25 % ukupne mase veziva, nema štetnih učinaka na otpornost betona na difuziju kloridnih iona. Osim toga, upotreba miješanih mineralnih dodataka koji se sastoje od 20 % pepela drvene biomase i 80 % pepela od ugljena značajno su poboljšale otpornost betona na difuziju kloridnih iona s udjelima zamjene cementa do 25 % [8].

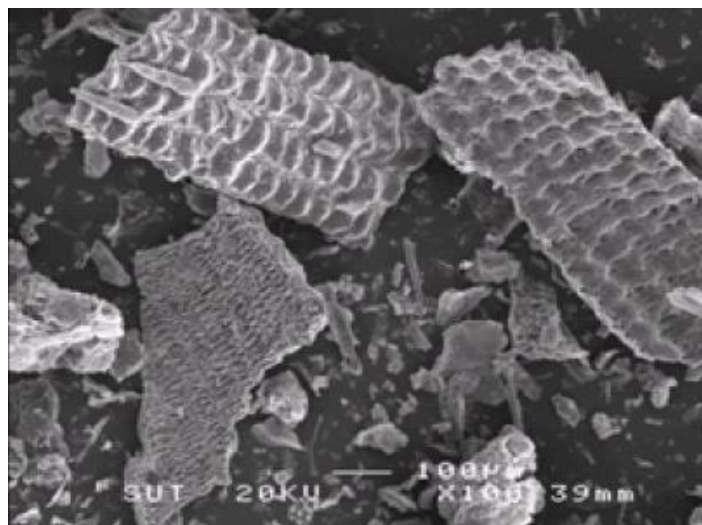
6. BETON S PEPELOM OTPADAKA PRERADE ŠEĆERNE TRSKE, RIŽINOM LJUSKOM I DRVNOM BIOMASOM

Korozija čelika u armiranobetonskim konstrukcijama predstavlja značajan problem. Iako se obično stvara pasivni sloj koji štiti čelik, kloridni ioni mogu oštetiti zaštitni sloj oko čelika i potaknuti koroziju. Tajland proizvodi velike količine šećera i riže, stvarajući značajne količine biomase u obliku otpadaka prerade šećerne trske i rižinih ljuski. Ova biomasa koristi se za proizvodnju električne energije, pri čemu nastaju velike količine pepela [33]. Većina pepela otpadaka prerade šećerne trske - rižine ljuske - drvene biomase (BRWA) odlaže se kao otpad na odlagalištima, što uzrokuje ekološke probleme poput zagađenja zraka i problema s kvalitetom podzemnih voda zbog izluživanja metala iz pepela. Na slici 6 prikazane su sirovine kao gorivo i njihov otpadni pepeo. Na slici 6 prikazane su sirovine kao gorivo i njihov otpadni pepeo.



Slika 6. Sirovine kao gorivo i njihov otpadni pepeo: a) otpaci od prerade šećerne trske; b) rižina ljuska; c) nacijepana drva; d) BRWA [33].

Prirodno dobiveni BRWA ima velike čestice, nepravilan oblik, vrlo mikroporoznu strukturu i izrazito veliku površinu, kako je prikazano na slici 7 [33].

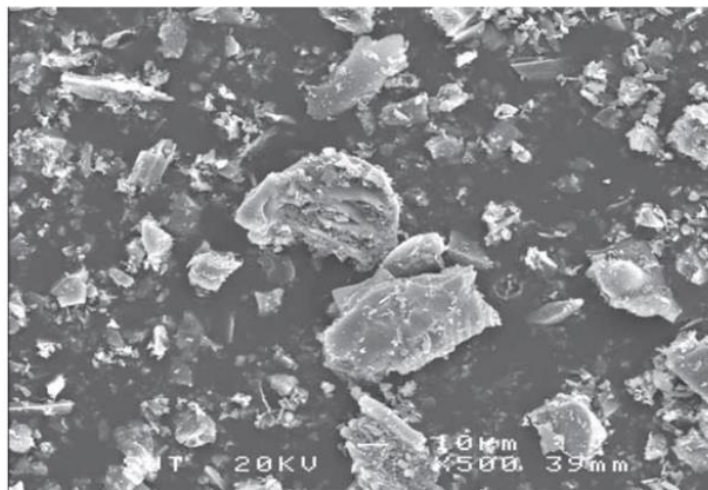


Slika 7. Pepeo otpadaka šećerne trske – rižine ljuske – drvne biomase [33].

Zbog toga se u betonu javlja veća potreba za vodom za održavanje obradljivosti i manja tlačna čvrstoća. Međutim, BRWA se usitnjava u sitne čestice koje djelomično zamjenjuju cement u betonu, što rezultira poboljšanjem čvrstoće betona. Primjenom usitnjenog BRWA znatno se poboljšava čvrstoća i otpornost na koroziju. Optimalni udio zamjene cementa iznosi 20 % mase veziva [34].

6.1. Utjecaj BRWA na svojstva betona

BRWA je nusproizvod dobiven iz malih elektrana u sjeveroistočnom Tajlandu koje koriste 82,5 % otpadaka šećerne trske, 15 % rižinih ljuski i 2,5 % drva koji se spaljuju pri visokim temperaturama za dobivanje električne energije za opskrbu šećerana. BRWA se melje kugličnim mlinom dok čestice na situ otvora 0,325 mm ne budu manje od 2 %. U sirovom obliku, čestice BRWA nepravilnog su oblika s hrapavim površinama, visoko mikroporoznom teksturom i vrlo velikom površinom i zahtijevaju veliki sadržaj vode u betonskoj mješavini kako bi se očuvala obradljivost. To utječe na manju čvrstoću betona [35], [36]. Mljeveni BRWA ima medijan veličine čestica 15,5 μm , a specifična gustoća mu je 2,1, nepravilnog je oblika, a tekstura i dalje porozna, kako je prikazano na slici 8 [33].



Slika 8. Mljeveni BRWA [33].

Ispitivanja utjecaja BRWA na svojstva betona obuhvaćena su ispitivanjem brze migracije klorida (engl. *Rapid chloride migration test* - RCMT), ispitivanjem ubranog dreniranja (engl. *Accelerated salt ponding test* - ASPT) i ispitivanjem ubrzane korozije pomoću napona (engl. *Accelerated corrosion test by impressed voltage* - ACTIV). Za potrebe ispitivanja korišten je portlandski cement tipa I prema ASTM normi [33]. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće predstavljaju prosjek 3 ispitivanja [33].

RCMT ispitivanje provedeno je na betonu starosti 28 dana. Betonski valjci režu se na kolutove, suše, potapaju u destiliranu vodu i podvrgavaju vakuumskoj obradi [33].

ASPT ispitivanje koristi se za ubrzano prodiranje klorida u beton i određivanje koeficijenta difuzije klorida u nestacionarnom stanju. Ispitivanje se provodi na uzorcima pod naponom 60 V istosmjernog strujnog napona tijekom 12 sati. Dubina prodiranja klorida mjeri se kolorimetrijskom metodom, a koeficijent difuzije klora izračuna iz rezultata [37].

ACTIV ispitivanje obavlja se nakon 28 dana izlaganja betonskih valjaka otopini natrijevog klorida od 3 %. Valjci se djelomično potapaju, a na njima se primjenjuje istosmjerni napon. Prolaz struje kroz uzorke mjeri se svaki dan. Svi postupci ispitivanja izvedeni su prema odgovarajućim normama NT BUILD 256 [38], a trajanje izloženosti uzoraka u otopini natrijevog klorida bilo je 90 dana [33].

Zaključeno je da dodavanje visokoreaktivnog mljevenog BRWA poboljšava razvoj čvrstoće betona, s optimalnom zamjenom od 20 %. Pucolanska reakcija doprinosi kontinuiranom rastu čvrstoće tijekom vremena, čineći BRWA korisnim dodatkom za poboljšanje svojstava betona [33].

Također se pokazalo da primjena BRWA utječe na smanjenje dubine prodora iona klorida s povećanjem udjela zamjene, što znači da dodatak BRWA poboljšava otpornost betona na prodor klorida. Koeficijent difuzije klorida smanjuje se u betonima s dodatkom BRWA, a smanjenje je izraženije s povećanjem udjela zamjene. To ukazuje na pozitivne učinke BRWA pri izloženosti betona prodiranju klorida [33].

Veći udio BRWA dovodi do smanjenja provodljivosti za električnu struju, što se podudara s ispitivanjem otpornosti na prodor klorida. To ukazuje na poboljšanu otpornost na koroziju betona s dodatkom BRWA. Primjena pucolanskih materijala u betonu općenito rezultira manjom prosječnom veličinom pora, ispunjavanjem praznina finim česticama i pucolanskom reakcijom, što dalje poboljšava otpornost betona na koroziju i prodor klorida [33].

Povećanje udjela BRWA u betonu smanjuje vrijeme pojave početnih pukotina. Vrijeme pojave početnih pukotina varira ovisno o udjelu BRWA. Prema provedenom istraživanju [33], beton s 20 % BRWA nije pokazao pukotine niti nakon 90 dana izloženosti. Otpornost betona na prodor klorida povećava se s većim udjelom BRWA, što je posljedica smanjenja $Ca(OH)_2$ i poboljšane raspodjele veličine pora. Rezultati ispitivanja gubitka mase ugrađenog čelika također pokazuju smanjenje korozije s povećanjem udjela zamjene BRWA u betonu.

Zamjena portlandskog cementa, s otpacima prerade šećerne trske i rižine ljske ima pozitivne učinke na nekoliko svojstava betona. Ova zamjena uzrokuje blagi porast granice tečenja i manje smanjenje plastične viskoznosti u običnim betonima i betonima visokih performansi zbog veće količine ultrafinih čestica u usporedbi s referentnim betonima [36]. Kombinirani utjecaj otpadaka od šećerne trske i rižine ljske omogućuje veliki udio zamjene cementa bez potrebe za dodavanjem velike količine superplastifikatora zbog pozitivnog utjecaja otpadaka šećerne trske na reologiju [39]. Betoni koji sadrže pepeo od otpadaka prerade šećerne trske i pepeo od rižine ljske pokazuju konstantnu ili povećanu tlačnu čvrstoću zbog svoje velike pucolanske aktivnosti. Prema tome, upotreba BRWA kao dodatka betonu može smanjiti ekološke probleme i potrebu za odlagalištima za zbrinjavanje BRWA [33].

7. ZAKLJUČAK

Pregledom dostupne literature vidljivo je da upotreba pepela drvene biomase kao zamjene za dio cementa može utjecati na smanjenje negativnih ekoloških utjecaja. Učinkovitost pepela drvene biomase kao mineralnog dodatka u cementu ovisi o njegovim fizikalno – kemijskim karakteristikama, koje variraju ovisno o vrsti drvene biomase i procesu izgaranja u termoelektrani. Općenito, zamjena cementa pepelom drvene biomase smanjuje čvrstoću betona, ali manji udjeli PDB-a mogu povećati tlačnu čvrstoću. Cilj navedenih istraživanja bio je pronaći optimalni udio zamjene cementa pepelom drvene biomase. Obzirom na sve učinke djelomične zamjene cementa pepelom drvene biomase, optimalni udio zamjene iznosi 10 – 20 % u odnosu na masu veziva. Važno je napomenuti da se ovi rezultati zasnivaju na konkretnim eksperimentalnim ispitivanjima i analizama iz citiranih izvora, ali optimalni udio zamjene može varirati ovisno o specifičnim uvjetima projekta, zahtjevima čvrstoće i drugim čimbenicima. Pri odabiru optimalnog udjela zamjene, uvijek je preporučljivo provesti vlastita preliminarna ispitivanja i prilagoditi ga specifičnim potrebama betonskog projekta.

LITERATURA

- [1] N. Štirmer, D. Bjegović, Teorija i tehnologija betona, udžbenik, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb: Tiskara Zelina, 2015.
- [2] N. Štirmer, D. Bjegović, "Teorija i tehnologija betona," [Online]. Available: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/2._Predavanje_Cement.pdf. [Accessed 17 8 2023].
- [3] "Some basic definitions used in cement and concrete," [Online]. Available: <https://www.understanding-cement.com/basic.html>. [Accessed 17 8 2023].
- [4] N. Štirmer, I. Banjad Pečur, "Gradiva, 5. predavanje - Mineralna veziva," [Online]. Available: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/5-predavanje-mineralna_veziva.pdf. [Accessed 17 8 2023].
- [5] C. Maschowski, P. Kruspan, A. T. Arif, P. Garra, G. Trouve, "Use of biomass ash from different sources and processes in cement," *Journal of Sustainable Cemenr-Based Materials*, 2020.
- [6] G. C. Corderio, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares, E. M. R. Fairbairn, "Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes," *Construction and Building Materials*, pp. 641-646, 2011.
- [7] I. Ereš, "Radovi," 2019. [Online]. Available: [file:///C:/Users/DT%20User6/Downloads/mikrostruktura-betona-s-pepelom-drvene-biomase-pri-TDFUpCjjih%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/DT%20User6/Downloads/mikrostruktura-betona-s-pepelom-drvene-biomase-pri-TDFUpCjjih%20(1).pdf). [Accessed 30 8 2023].
- [8] C. B. Cheah, R. Mahyuddin, "The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview," *Resousces, Conservation and Recycling*, pp. 669-685, 2011.
- [9] N. Štirmer, "Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću," 2016. [Online]. Available: <https://bib.irb.hr/datoteka/929289.Tarec-brosura.pdf>. [Accessed 15 9 2023].
- [10] B. Milovanović, N. Štirmer, I. Carević, A. Baričević, "Pepeo drvene biomase kao sirovina u betonskoj industriji," *Građevinar 71*, pp. 504-514, 10 7 2019.
- [11] M. Berra, T. Mangialardi, A. E. Paolini, "Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials," *Construction and Building Materials*, pp. 286-296, 2014.
- [12] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, C. G. Vassileva, "An overview of the chemical composition of biomass," *Fuel*, pp. 913-33, 2010.

- [13] R. Rajamma, R. J. Ball, L. A. C. Tarelho, G. C. Allen, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, "Characterisation and Use of Biomass Fly Ash in Cement-Based Materials," *Journal Hazard Materials*, pp. 2049-1060, 2009.
- [14] I. Carević, M. Serdar, N. Štirmer, N. Ukrainczyk, "Preliminary screening of wood biomass ashes for partial resources replacements in cementitious materials," *Journal of Cleaner Production*, vol. 229, pp. 1045-1064, 2019.
- [15] E. E. T. Ercan, L. Andreas, A. Cwirzen, K. Habermehl-Cwirzen, "Wood Ash as Sustainable Alternative Raw Material for the Production of Concrete," *Materials*, 2023.
- [16] O. A. Abdulkareem, J. C. Matthews, A. M. M. A. Bakri, "Strength and Porosity Characterizations of Blended Biomass Wood Ash-Based Geopolymer Mortar," in *AIP Conf. Proc.*, 2018.
- [17] T. R. Naik, R. N. Kraus, R. Siddique, "CLSM containing mixtures of coal ash and a new pozzolanic material," *ACI Materials Journal*, pp. 208-15, 2003.
- [18] ASTM C618-00: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, 2017.
- [19] F. F. Udoeyo, P. U. Dashibil, »Sawdust ash as concrete material,« *Journal of materials in civil engineering*, pp. 173-6, 2002.
- [20] A. U. Elinwa, S. P. Ejeh, "Effects of incorporation of sawdust incineration fly ash in cement pastes and mortars," *Journal Asiam Architecture Build Eng*, pp. 1-7, 2004.
- [21] A. U. Elinwa, Y. A. Mahmood, "Ash from timber waste as cement replacement material.," *Cement and Concrete Composites*, pp. 219-22, 2002.
- [22] A. G. Campbell, "Recycling and disposing of wood ash," *TAPPI Journal*, pp. 141-3, 1990.
- [23] L. Etiegni, A. G. Campbell, "PHYSICAL and chemical characteristics of wood ash," *Bioresource Technol*, pp. 173-8, 1991.
- [24] M. Abdullahi, "Characteristics of wood ash/OPC concrete.," *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, pp. 9-16, 2006.
- [25] A. U. Elinwa, S. P. Ejeh, A. M. Mamuda, "Assessing of the fresh concrete properties of self-compacting concrete containing sawdust ash," *Construction and Building Materials*, pp. 1178-82, 2008.
- [26] EFNARC, "Specification and Guidelines," 2 2002. [Online]. Available: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/c.especiais/Efnarc.pdf>. [Accessed 2 9 2023].
- [27] F. F. Udoeyo, H. Inyang, D. T. Young, E. E. Oparadu, "Potential of wood waste ash as an additive in concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 605-11, 2006.

- [28] T. R. Naik, R. N. Kraus, R. Siddique, "Demonstration of manufacturing technology for concrete and VLSM utilizing wood ash from Wisconsin," 2002.
- [29] I. Carević, I. Banjad Pečur, N. Štirmer, B. Milovanović, A. Baričević, "Potential of use wood biomass ash (WBFA) in the cement composites," *Proceedings of the 1st International Conference*, pp. 109-114, 2017.
- [30] I. Carević, N. Štirmer, I. Banjad Pečur, "Utilization of wood biomass (WBFA) in the cement composites," in *Proceedings of the Second International RILEM Conference*, 2017.
- [31] *HRN EN 12390-3:2009: Testing hardened concrete -- Part 3: Compressive strength of test specimens.*
- [32] *HRN EN 12390-5:2009: Testing hardened concrete -- Part 5: Flexural strength of test specimens.*
- [33] V. Horsakulthai, S. Phiuvanna, W. Kaenbud, "Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage," *Construction and Building Materials*, pp. 54-60, 2010.
- [34] V. Horsakulthai, K. Paopongpaiboon, "Strength, Chloride Permeability and Corrosion of Coarse Fly Ash Concrete with Bagasse-Rice Husk-Wood Ash Additive," *American Journal of Applied Sciences*, pp. 239-246, 2013.
- [35] P. K. Mehta, "Properties of blended cements made from rice husk ash," *ACI Journal*, pp. 440-2, 1977.
- [36] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares, E. M. R. Fairbairn, "Puzzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars," *Cement and Concrete Compositions*, pp. 410-8, 2008.
- [37] L. Tang, L. O. Nilsson, "Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field," *ACI Materials Journal*, pp. 49-53, 1992.
- [38] N. B. 365, Concrete, repairing materials and protective coating: embedded steel method, chloride permeability, 1989.
- [39] F. De Larrard, "Concrete mixture proportioning: a specific approach," *1st ed. London: E&FN Spon*, p. 1999.

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Upotreba cementa prema vrsti konstrukcije [2]. | 2 |
| Slika 2. Razlika između cementa (lijevo) i klinkera (desno) [3]. | 2 |
| Slika 3. Uzorci pepela drvene biomase: a) pepeo s dna peći; b) leteći pepeo krupnije frakcije; c) finiji leteći pepeo [10]. | 7 |
| Slika 4. Mikroskopske slike a) drvene biomase i b) letećeg pepela [16]. | 10 |
| Slika 5. Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje betona s dodatkom PDB-a [29, 30]. | 16 |
| Slika 6. Sirovine kao gorivo i njihov otpadni pepeo: a) otpaci od prerade šećerne trske; b) rižina ljuska; c) nacijepana drva; d) BRWA [33]. | 17 |
| Slika 7. Pepeo otpadaka šećerne trske – rižine ljuske – drvene biomase [33]. | 18 |
| Slika 8. Mljeveni BRWA [33]. | 19 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Glavne vrste cementa prema HRN 197-1:2021 [2]..... | 3 |
| Tablica 2. Kemijski sastav pepela ovisno o podrijetlu [12]. | 9 |
| Tablica 3. Sastavi i obradljivost SCM mješavina [25]..... | 12 |
| Tablica 4. Svojstva u svježem stanju SCC mješavina s 10 % pepela drvene biomase [25]. | 12 |
| Tablica 5. Vlačna čvrstoća cijepanjem betona od pepela drvene biomase [19]. | 14 |
| Tablica 6. Sastavi betonskih mješavina [30]..... | 15 |