

# Utjecaj pepela biomase kao djelomične zamjene za cement na mehanička svojstva morta

---

Mirt, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:188522>

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

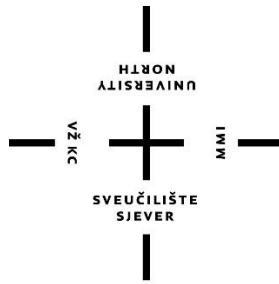
Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





# Sveučilište Sjever

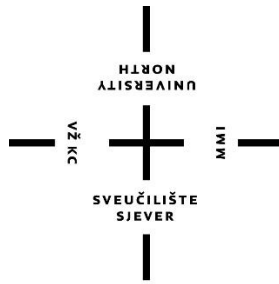
Završni rad br. 484/GR/2024

## **Utjecaj pepela biomase kao djelomične zamjene za cement na mehanička svojstva morta**

Marija Mirt, 0066324602

Varaždin, rujan 2024. godine





# Sveučilište Sjever

**Odjel za Graditeljstvo**

**Završni rad br. 484/GR/2024**

## **Utjecaj pepela biomase kao djelomične zamjene za cement na mehanička svojstva morta**

**Student**

Marija Mirt, 0066324602

**Mentor**

Prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša, dipl.inž.građ.

Varaždin, rujan 2024. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

|                             |   |              |                                     |
|-----------------------------|---|--------------|-------------------------------------|
| ODJEL                       | Odjel za graditeljstvo  |              |                                     |
| STUDIJ                      | preddiplomski stručni studij Graditeljstvo  |              | <input checked="" type="checkbox"/> |
| PRISTUPNIK                  | Marija Mirt   | MATIČNI BROJ | 0066324602                          |
| DATUM                       | 13.09.2024.   | KOLEGIJ      | Građevinski materijali              |
| NASLOV RADA                 | Utjecaj pepela biomase kao djelomične zamjene za cement na mehanička svojstva morta         |              |                                     |
| NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU | Influence of biomass ash as partial substitute for cement on the mechanical properties of m |              |                                     |
| MENTOR                      | prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša   | ZVANJE       | Redoviti profesor                   |
| ČLANOVI POVJERENSTVA        | 1. doc.dr.sc. Anđelko Crnoja  |              |                                     |
|                             | 2. prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša  |              |                                     |
|                             | 3. doc.dr.sc. Željko Kos  |              |                                     |
|                             | 4. Dalibor Kramarić, predavač   |              |                                     |
|                             | 5. _____  |              |                                     |

## Zadatak završnog rada

BROJ 484/GR/2024

OPIS

Pristupnik u radu treba prikazati pregled literature na temu primjene pepela biomase u cementnim kompozitima. U eksperimentalnom dijelu je potrebno izraditi mješavine morta sa različitim udjelima pepela biomase te ispitati njihova mehanička svojstva. Potrebno je donijeti zaključak o prednostima i nedostacima primjene pepela biomase u mortovima za zidanje te predložiti potencijalnu primjenu takvog morta.

ZADATAK PRUČEN 28.06.2024.



POTPIS MENTORA

Ivanka Netinger Grubeša

26

## Sažetak

U ovom završnom radu se obrađuje tema uporabe pepela biomase u spravljanju morta. Već postoje slična istraživanja s uporabom pepela biomase u građevinskim materijalima kao zamjena za vezivo ili dodatak materijalu. Neka od tih istraživanja daju pozitivne rezultate tako tvrdeći da pepeo poboljšava svojstva materijala. Također, postoje istraživanja i sa negativnim rezultatima koja utvrđuju da se pepeo može koristiti samo djelomično u zamjeni sa drugim materijalima ili da se uopće ne može koristiti. Ove varijacije u rezultatima istraživanja proizlaze iz činjenice da nemaju svi pepeli biomase ista svojstva. Sa sigurnošću se može reći da će polje primjene alternativnih materijala u građevini i dalje ostati dio aktivnog istraživanja i proučavanja.

Kroz završni rad se obrađuje sam pojam biomase, od kojih se ostataka dobiva biomasa te kako se kasnije može upotrijebiti u korisne svrhe. Također, značajan dio rada se osvrće na ekološki aspekt same teme s obzirom na to da je uporaba pepela biomase povezana sa smanjenjem onečišćenja. U eksperimentalnom dijelu rada se istražuje mogućnost uporabe konkretnog pepela biomase kao djelomične zamjene za cement te utjecaj zamjene na svojstva morta u svježem i očvrslom stanju. Zaključuje se da pepeo biomase loše utječe na obradivost morta i njegovu tlačnu čvrstoću ali postoji mogućnost djelomične zamjene cementa sa pepelom biomase.

**Ključne riječi: biomasa, pepeo, smanjenje onečišćenja, alternativna veziva, istraživanja, svojstva**

## **Abstract**

This paper deals with the topic of using biomass ash in mortar production. There are already similar studies with the use of biomass ash in building materials as a substitute for a binder or an addition to the material. Some of these studies give positive results, thus claiming that ash improves the properties of the material. Also, there are studies with negative results which established that ash can be used only partially in exchange with other materials or that it cannot be used at all. These variations in research results from the fact that not all biomass ashes have the same properties. It is safe to say that the field of application of alternative materials in construction will continue to be a part of active research and study.

Through this thesis, the very concept of biomass is treated, from which residues biomass is obtained and how it can later be used for useful purposes. Also, a significant part of the work reviews the eco-friendly aspect of the topic itself, given that the use of biomass ash is related to the reduction of pollution. The experimental part of the research investigates the possibility of using specific biomass ash as a partial substitute for cement and the influence of the substitute on properties of mortar in the fresh and hardened state. It is concluded that biomass ash has a bad effect on the workability of the mortar and its compressive strength, but there is a possibility of partial replacement of cement with biomass ash.

**Keywords: biomass, ash, pollution reduction, alternative binders, research, properties**

# Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| Uvod.....  | 1  |
| 1. Biomasa.....  | 2  |
| 1.1. Poljoprivredna biomasa.....                           | 2  |
| 1.2. Tehnologija prerade biomase .....                     | 3  |
| 1.3. Energetski nasadi.....                                | 4  |
| 1.4. Biogoriva i bioplin .....                             | 5  |
| 1.5. Budućnost korištenja biomase.....                     | 5  |
| 2. Pepeli iz biomase .....                                 | 8  |
| 2.1. Pepeo rižine ljuske .....                             | 8  |
| 2.2. Pepeo šećerne trske .....                             | 9  |
| 2.3. Pepeo drvnog otpada .....                             | 9  |
| 2.4. Svojstva pepela.....                                  | 10 |
| 2.4.1. <i>Kemijski sastav i pucolanska aktivnost</i> ..... | 11 |
| 2.4.2. <i>Čvrstoća</i> .....                               | 12 |
| 3. Mortovi .....   | 14 |
| 3.1. Industrija cementa .....                              | 14 |
| 3.2. Alternativni mortovi bez cementa .....                | 15 |
| 3.2.1. <i>Mortovi na bazi vapna</i> .....                  | 16 |
| 3.2.2. <i>Mortovi na bazi gline</i> .....                  | 16 |
| 3.2.3. <i>Mortovi s magnezijevim oksidom</i> .....         | 17 |
| 3.2.4. <i>Geopolimerni mortovi</i> .....                   | 17 |
| 4. Postupak istraživanja .....                             | 19 |
| 4.1. Pucolanska aktivnost pepela i čvrstoća .....          | 19 |
| 4.2. Granulometrijska krivulja cementa i pepela.....       | 21 |
| 4.3. Granulometrijska krivulja pijeska .....               | 22 |
| 4.4. Ispitivanje konzistencije mortova.....                | 23 |
| 4.5. Određivanje čvrstoće .....                            | 25 |
| Zaključak.....   | 29 |
| Literatura.....  | 30 |
| Popis slika .....  | 32 |
| Popis tablica.....   | 33 |



## Uvod

Svake godine, industrija cementa je odgovorna za otprilike 8% globalnih emisija CO<sub>2</sub>, izazivajući značajan utjecaj na okoliš. Izgradnja postrojenja, stambenih zgrada, prometnica i dr., odgovorna je za zagađenje zbog velike potražnje za energijom i emisija ugljikovog dioksida. S obzirom na to, uporaba ekološki prihvatljivih građevinskih materijala predstavlja velik izazov za današnju arhitekturu i graditeljstvo. Kako bi se ovaj negativni učinak sveo na najmanju moguću mjeru, ključno je pronaći alternative konvencionalnom cementu [1].

Neki autori analiziraju potencijal korištenja nekonvencionalnih dodataka u sastavima betona i mortova kao što su pepeli biomase. Biomasa je obnovljiv izvor energije biološkog porijekla, nakon njezinog sagorijevanja dobiva se pepeo kao nusprodukt u procesu proizvodnje energije. Obično se organski otpadni materijali spaljuju kako bi se smanjio njihov volumen ili kako bi se u ovom slučaju dobila energija. Nakon toga, po završetku upotrebe, odlažu se na odlagališta. Recikliranje dobivenog pepela omogućuje produljenje njihovog vijeka trajanja, smanjenje zagađujućeg otpada koji se nakuplja na odlagalištima i poboljšanje održivosti. Pod tim premisama, ovo istraživanje analizira izvedivost djelomične zamjene običnog portland cementa pepelom od biomase.

Na prvu, djelomična zamjena pepelom se čini izvedivom ali nama je bitno da dobivena mješavina morta zadovoljava određene standarde, stoga je potrebno provesti laboratorijsko istraživanje i dobiti konkretne rezultate.

# 1. Biomasa

Pojam za kojeg su svi čuli iako nisu znali što predstavlja je pojam biomase. Biomasa označava sve biorazgradive tvari biljnog i životinjskog porijekla, dobivene od otpada i ostataka poljoprivredne i šumarske industrije koje se mogu koristiti za razne energetske potrebe. Ona dolazi u čvrstom, tekućem i plinovitom stanju a po količini uporabe predstavlja treću najčešće korištenu energiju u svijetu, nakon ugljena i nafte [2].

Jedna od prednosti korištenja biomase je u tome što se najčešće nalazi na mjestu potrošnje ili u njenoj blizini što stvara povoljne uvjete za njezino korištenje u lokalnim energetskim potrebama. S druge strane, nepovoljna karakteristika biomase je njena periodičnost nastajanja, izražena najviše kod poljoprivredne biomase, makar se to nadoknađuje velikim količinama poljoprivredne biomase u periodu nastajanja [2].

Sve vrste biomase su obnovljive, s tim da bi se zadovoljio uvjet obnovljivosti potrebna je neprekidna sadnja i/ili pošumljavanje prostora, barem toliko da godišnji prinos bude jednak godišnjem iskorištenju biomase [2].

Biomasa se može transportirati na razumno veliku udaljenost, jer bi pretjerana udaljenost tražila više energije za transport od energetskog sadržaja tvari koja se prevozi. Ona se može skladištiti i koristiti prema potrebi i samim time ima prednost nad energijom sunčeva zračenja ili vjetra [2].

Kumulativna CO<sub>2</sub> neutralnost ispunjena je ukoliko je godišnje iskorištavanje biomase jednako ili manje od godišnjeg prirasta nove mase. Tada će emisija CO<sub>2</sub> pri korištenju te biomase biti jednaka imisiji prilikom fotosinteze te biomase. Ovo vrijedi naravno za biomasu na biljnoj bazi [2].

## 1.1. Poljoprivredna biomasa

Poljoprivredna biomasa se temelji na biljnoj bazi a dobiva se iz sljedećih izvora:

- poljoprivredne kulture (uljana repica, suncokret, soja, šećerna repa, pšenica, kukuruz),
- ostaci i otpad iz ratarstva i hortikulture proizvodnje (slama, kukuruzovina, ostaci pri rezidbi voćarskih kultura i vinove loze),
- ostaci i otpad iz proizvodnje i prerade poljoprivrednih sirovina u prehrambenoj industriji,
- otpad iz stočarstva i stajski gnoj [2].

Hrvatska ima dobre potencijale za proizvodnju biomase. Sada proizvodi 2 000 000 t/god. biomase sa šumskih površina, 1 300 000 t/god. biomase sa poljoprivrednih površina i 150 000

t/god. biomase od ostataka prehrambene industrije. Najveća prepreka u sakupljanju biomase u RH jest rascjepkanost poljoprivrednih zemljišta, odnosno male površine za prikupljanje biomase [2].

Prerada biomase se može vršiti za proizvodnju električne i toplinske energije te općenito kao izvor energetskih sirovina. Moguće je korištenje slame od pšenice, ječma, raži, zobi, uljane repice i niza drugih kultura u proizvodnji toplinske energije. Primjer toga je vidljiv u Kopenhagenu u Danskoj gdje toplinska elektrana koristi slamu kao izvor energije i time osigurava održivo grijanje za tisuće domova [2].

## 1.2. Tehnologija prerade biomase

Jedna od tehnologija prerade biomase je peletiranje tj. zgušnjavanje biomase. Peletiranje je termoplastični proces oblikovanja istiskivanjem, u kojem čestice sirovine formiraju kompaktne pelete (**Slika 1.1**), pogodne za rukovanje [2].



**Slika 1.1** Pelete [3]

Tim se procesom dobiva kvalitetan proizvod što veće gustoće i bolje volumetrijske ogrjevne vrijednosti što rezultira smanjenjem troškova transporta i skladištenja. Tako dobivene pelete se koriste za dobivanje električne i toplinske energije. Vrste sirovina od kojih se dobivaju pelete uvjet su za stjecanje manje ili veće ogrjevne vrijednosti. U **Tablici 1.1** je vidljiv odnos vrsta peletirane biomase i ogrjevne vrijednosti koju ta biomasa postiže [2].

| Vrsta peletirane biomase    | Donja ogrjevna vrijednost [MJ/kg] |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Vinska i maslinova komina   | 19-20                             |
| Pšenična slama              | 14                                |
| Kukuruzovina                | 12-14                             |
| Slama uljane repice         | 16-17                             |
| Ostaci rezidbe u voćnjacima | 14-16                             |
| Ostaci rezidbe vinove loze  | 14                                |
| Mrki ugljen                 | 17                                |
| Koks                        | 29                                |
| Prirodni plin               | 34                                |
| Loživo ulje                 | 42                                |

**Tablica 1.1** *Odnos vrste peletirane biomase i donje ogrjevne vrijednosti [2]*

Druga tehnologija prerade biomase je briketiranje. Proces briketiranja podrazumijeva smanjenje volumena neke usitnjene supstance, odnosno pretvaranje praškaste tvari u kompaktnu cjelinu zbog lakšeg i jeftinijeg manipuliranja, kao i dobivanja viših energetske vrijednosti. Proizvode se od sušenih, prirodno čistih drvenih ostataka bez dodavanja vezivnih sredstava a dobivaju se uz pomoć mehaničkih i hidrauličkih preša [2].

### 1.3. Energetski nasadi

Energetski nasadi se mogu koristiti kao alternativa za proizvodnju energije s postojećim nizom energetske kulture od kojih su najpopularniji miskantus, divlje proso, industrijska konoplja i virdžinijski sljez. To su veoma otporne biljke koje se mogu uzgajati na tlima niže kvalitete ili na onim tlima koja su potpuno nepogodna za ratarske kulture, što znači da se ne okupiraju poljoprivredna zemljišta namijenjena za proizvodnju hrane. Ne osiromašuju tlo, nemaju potrebu za uporabom pesticida a nakon svake godine košnje bivaju sve veće te se samim time dobiva i veći prihod biomase. Nakon četvrte godine uzgoja, puni prinos biomase od biljke miskantus iznosi otprilike 30-40 t/ha (**Slika 1.2**). Miskantus je energetska kultura koja je već duže vrijeme poznata i uvedena među europske energetske biljne kulture kao brzorastuća trava [2].



**Slika 1.2** Puni prinosi energetske nasade biljke *Miscanthus* od 30-40 t/ha [2]

#### 1.4. Biogoriva i bioplin

Također, iz nekih poljoprivrednih kultura možemo dobiti biogoriva, biodizel ili bioetanol. Biodizel se dobiva iz biljnog ulja tj. biljaka uljarica a bioetanol iz šećernih ili polisaharidnih sirovina procesom fermentacije. U Hrvatskoj postoji nekoliko postrojenja za proizvodnju biodizela, neka od njih zauzimaju mjesta u Vukovaru, Virovitici i Ozlju, dok trenutno nema niti jedne tvornice koja proizvodi bioetanol. Još jedan produkt biomase je bioplin, to je plinsko gorivo koje se može pročistiti do kvalitete prirodnog plina da bi se koristilo kao biogorivo ili generatorski plin. U sirovine za proizvodnju bioplina spadaju organski ostaci, industrijske otpadne tvari, kanalizacijska voda i komunalni biootpad. Najisplativije korištenje bioplina kao goriva izvodi se u kogeneracijskim postrojenjima (**Slika 1.3**) za istodobnu proizvodnju toplinske i električne energije. Također, može poslužiti kao pogonsko gorivo u obliku biometana za transport s uvjetom da postoji instalacija za metan u vozilima [2].

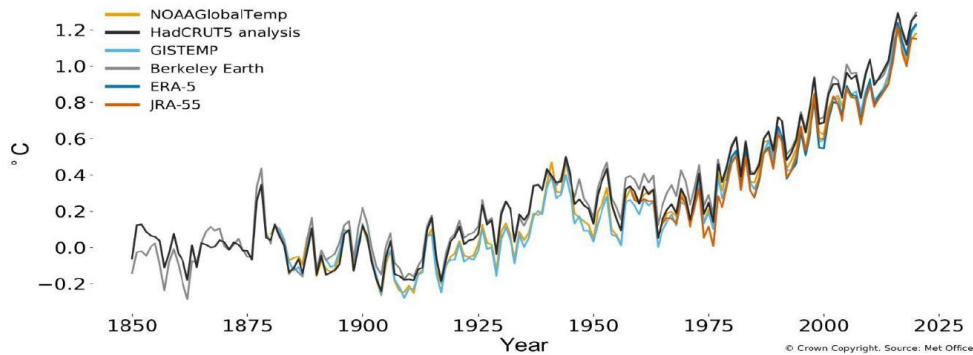


**Slika 1.3** Bioplinsko postrojenje [2]

#### 1.5. Budućnost korištenja biomase

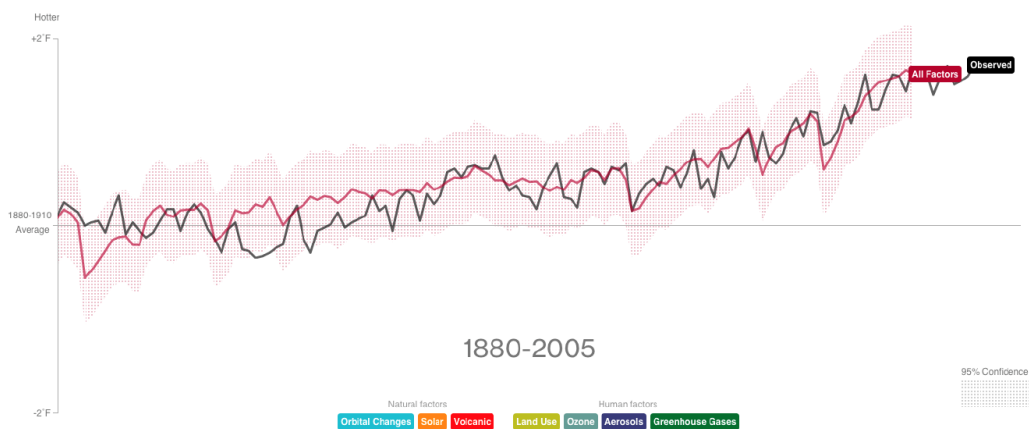
Pretpostavlja se da će se biomasa sve više početi koristiti kao potencijalni izvor energije. Razlog tome je njena učinkovitost i sama činjenica da izvori energije poput nafte nestaju a ugljen ima

značajan utjecaj na okoliš. Ljudi postaju sve više ekološki osviješteni jer nam utjecaji globalnog zatopljenja postaju sve više vidljivi. Primjer toga je sam porast temperature u odnosu na predindustrijsko doba i današnjicu (**Slika 1.4**).



**Slika 1.4** Porast temperature od predindustrijskog razdoblja [4]

Pitanje koje se bitno zapitati jest što zapravo grije Zemlju. U te faktore spadaju vulkanske aktivnosti, prirodni utjecaji, antropogeno zagađenje, način korištenja zemljišta, emisije stakleničkih plinova i ljudski utjecaji. Svi su oni na neki način povezani, a kad ih sve zajedno zbrojimo dobijemo graf sa **Slike 1.5**. Siva linija prikazuje općenit porast temperature kroz godine, a crvena linija prikazuje utjecaj svih zajedno gore navedenih faktora na porast temperature [5].



**Slika 1.5** Porast temperature pod utjecajem faktora zatopljenja [6]

Još jedan poticaj za sve većim korištenjem biomase kao alternativnim izvorom energije je tzv. Europski zeleni plan predstavljen u prosincu 2019. godine a usvojen u prosincu 2020. godine. On postavlja pravno obvezujući okvir za Europsku uniju i države članice, samim time i Hrvatska se

obvezala na njegovo poštivanje i ispunjenje. Ono što se planira ispuniti tj. postići je klimatska neutralnost Europe do 2050. godine. Dakle, klimatska neutralnost postaje zakonska obveza i shodno tome doći će i do poduzimanja nekih drastičnih mjera. Neke od tih mjera uključuju:

- Od 2024. godine vlastite emisije CO<sub>2</sub> će plaćati brodovi.
- Od 2027. godine vlastite emisije CO<sub>2</sub> će plaćati distributeri energenata za grijanje i hlađenje zgrada i goriva za cestovna vozila.
- Postaviti će se veća ograničenja emisija CO<sub>2</sub> za automobile i kombije.
- U 2035. godini prestaje prodaja automobila i kombija s unutarnjim izgaranjem.
- Uvoditi će se svojevrsna carina na ugljik za aluminij, željezo i čelik, gnojivo, električnu energiju i cement [5].

Ovaj se zeleni plan temelji na politici "zagađivač plaća". U Republici Hrvatskoj već 44 postrojenja i 3 avio-kompanije plaćaju za svoje emisije CO<sub>2</sub>, a nakon 2050. godine svaki pojedinac će trebati plaćati neki oblik poreza za vlastite emisije CO<sub>2</sub> koje proizvede na godišnjoj bazi. Kako bi se postiglo rješenje za ove probleme jedino što preostaje jest u potpunosti rekonstruirati globalnu ekonomiju [5].

Biomasa ima velik potencijal da znatno pomogne u rješavanju globalnog zatopljenja i postizanju CO<sub>2</sub> neutralnosti. Sama ideja je inovativna jer se praktički od neželjenih ostataka i otpada na kraju ipak dobiva nešto korisno, nama potrebna energija. Smatra se da su mogućnosti za korištenje biomase velike, samo bi trebalo što više educirati ljude o ovoj temi a država pružiti poticaje za otvaranje što više postrojenja za dobivanje energije iz biomase.

## 2. Pepeli iz biomase

Korištenje pepela poljoprivredne biomase, kao djelomične zamjene veziva u konstrukcijskim mortovima ili žbukama na bazi cementa, zanimljiva je ekološka alternativa u građevinskoj industriji. Osim toga, recikliranje tog pepela omogućuje smanjenje zagađujućeg otpada koji se nakuplja na odlagalištima, poboljšavajući održivost. Pepeo iz biomase možemo definirati kao nusprodukt koji nastaje nakon sagorijevanja energetskih sirovina. Primarni proizvod koji nastaje izgaranjem biomase je energija a sporedni proizvod u ovom programu proizvodnje je pepeo. Većinom se ovaj nusproizvod etiketira kao otpad pa se zbrinjava na odlagalištima.

Alternative portland cementu se razmatraju u Eurokodu i ACI standardima te su trenutno područje aktivnog istraživanja. Razni izvori nude širok raspon različitih organskih i anorganskih zamjenskih materijala za cement analizirajući različite karakteristike tih materijala. Shodno tome pregledavaju se i potencijalne upotrebe poljoprivrednog otpada u obliku pepela iz biomase za korištenje u građevinskim materijalima kao zamjena za cement. Pepeli koji imaju mogućnost korištenja u građevinskim materijalima mogu doći od sljedeće navedenih biljnih otpada:

- pepeo rižine ljuske,
- pepeo šećerne trske,
- pepeo drvnog otpada,
- pepeo lišća bambusa,
- pepeo klipa kukuruza,
- pepeo od otpadnog pluta,
- pepeo pšenične slame,
- pepeo kokosovih ljuski [7].

### 2.1. Pepeo rižine ljuske

Riža je među analiziranim sirovinama najzastupljeniji poljoprivredni proizvod. U 2015. godini proizvedeno je oko 740,2 milijuna tona riže, pri čemu je Kina glavni proizvođač sa otprilike 200 milijuna tona godišnje. U tim količinama dobiva se veliki obujam rižine ljuske, više od 20%, koja je poljoprivredni ostatak dobiven od vanjske ovojnice rižinih zrna tijekom procesa mljevenja. Pepeo rižine ljuske je CO<sub>2</sub> neutralan zeleni proizvod dobiven iz sirove rižine ljuske koja se procesom izgaranja pretvara u pepeo (**Slika 2.1**). Mogu se primijeniti različiti postupci izgaranja, ali općenito se to provodi u pećima na 600-800°C. Izgaranje rižinih ljuski naširoko se koristi za proizvodnju topline i električne energije u Europi i Sjevernoj Americi a već i neke nerazvijene zemlje pronalaze potencijalnu priliku za proizvodnju energije uz pomoć ostataka riže [7].





**Slika 2.1** *Pepeo rižine ljuske* [7]

## **2.2. Pepeo šećerne trske**

Svjetska godišnja proizvodnja šećerne trske iznosi oko 1 700 milijuna tona prema podacima iz 2016. godine. Kada se sok ekstrahira iz šećerne trske, čvrsti otpadni materijal poznat je kao bagasa šećerne trske. Bagasa i melasa su nusproizvodi iz industrije šećera koji se obično koriste u energetske postrojenjima. Kada se bagasa sagorijeva u kontroliranim uvjetima, njezin pepeo pokazuje dobra svojstva za upotrebu kao zamjena za cement. Osim toga, pepeo šećerne trske koristi se za gnojidbu polja šećerne trske tako da on ima multifunkcionalnu ulogu. Pepeo šećerne trske je prepoznatljiv prema svojoj tamnijoj boji (**Slika 2.2**) [7].



**Slika 2.2** *Pepeo šećerne trske* [7]

## **2.3. Pepeo drvnog otpada**

Pepeo od drvnog otpada nastaje izgaranjem drva, općenito za proizvodnju energije (**Slika 2.3**). Drvni otpad jedno je od poželjnih goriva za peći na biomasu jer se, u usporedbi s drugim biljnim i poljoprivrednim otpadom, proizvodi manje zaostalih materijala. Primjene drvnog letećeg pepela su sljedeće: 70% se odlaže kao otpad na odlagalištu, 20% se reciklira kao dodatak za poboljšanje alkalnosti tla a 10% se koristi za nekoliko primjena, uključujući građevinske materijale, uporabu metala i kontrolu zagađenja. Zanimljiva opcija je pepeo od drvenih peleta. Najveća potrošnja

peleta se vrši u EU gdje je 2017. godine potrošeno 19,6 milijuna tona drvenih peleta. Dakle, drveni otpad se može prvo oblikovati u pelete, a dobiveni pepeo od peleta ima potencijal ponovne uporabe u zamjeni za cement [7].



**Slika 2.3** *Pepeo drvnog otpada* [7]

Pepeo korišten u ovom istraživačkom radu također dolazi iz drvne industrije.

Ukratko i kao orijentacija za procjenu potencijala dobivanja pepela, **Tablica 2.1** prikazuje svjetsku proizvodnju usjeva ili sirovina od kojih se kasnije može dobiti pepeo korišten u građevinskim materijalima.

| Usjev ili sirovina | Godina zapisa | Proizvedena količina u milijunima tona |
|--------------------|---------------|--|
| Riža               | 2015.         | 740,2                                  |
| Šećerna trska      | 2016.         | 1700                                   |
| Drveni otpad       | 2017.         | 370                                    |
| Kukuruz            | 2015.         | 1150                                   |
| Pluto              | 2015.         | 0,34                                   |
| Pšenica            | 2016.         | 808,40                                 |
| Kokos              | 2017.         | 62,41                                  |

**Tablica 2.1** *Proizvodnja usjeva ili sirovina u milijunima tona* [7]

## 2.4. Svojstva pepela

Analiza fizikalno-kemijskih svojstava pepela je ključna u ovom istraživanju gledajući na izvedivost upotrebljavanja različitih vrsta pepela iz biomase kao ekološki učinkovitih komponenata u pravljenju morta. Kemijski sastav te reakcija između cementa i pepela biomase daju specifična svojstva koja su izravno povezana s mehaničkim ponašanjem dobivenog morta.

### 2.4.1. Kemijski sastav i pucolanska aktivnost

Vrlo značajno je svojstvo pucolanske aktivnosti, a ono je direktno povezano s kemijskim sastavom jer je opće poznato da silikatni materijali kemijski reagiraju s kalcijevim hidroksidom na uobičajenoj temperaturi tako tvoreći spojeve koji posjeduju svojstva cementiranja [7].

Prema prijašnjim istraživanjima, da bi se predstavila pucolanska aktivnost, sljedeći spojevi:

- silicijev dioksid  $\text{SiO}_2$ ,
- aluminijev oksid  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- željezov oksid  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,

trebaju biti dio kemijskog sastava pepela, zajedno ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) u omjeru većem ili jednakom 70%. Komponenta s ovim postotkom klasificirati će se kao leteći pepeo klase F, a ako je postotak između 50% i 70% radi se o klasi C. Većina navedenih pepela iz biomase u prethodnom poglavlju imaju sadržaj  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  veći od 70%. To je zato što biljke dobivaju razne minerale i silikate iz zemlje tijekom procesa rasta. Utvrđeno je da anorganskih materijala, posebno silikata, ima više u jednogodišnjim biljkama nego u dugovječnim stablima. Stoga, biljni ostaci su potencijalni izvor zamjenskog materijala za cement s pucolanskom aktivnošću. Za usporedbu, u **Tablici 2.2** su prikazani sadržaji  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  nekoliko pepela [7].

| Pepeo iz biomase    | $\text{SiO}_2$ (%) | $\text{Al}_2\text{O}_3$ (%) | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%) | $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%) |
|---------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| pepeo rižine ljuske | 86,49              | 0,01                        | 0,91                        | 87,41  |
| pepeo šećerne trske | 72,74              | 5,26                        | 3,92                        | 81,92  |
| pepeo drvnog otpada | 67,20              | 4,09                        | 2,26                        | 73,55  |

**Tablica 2.2** Sadržaj  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  u pepelu biljne biomase [7]

Podaci iz tablice dolaze iz različitih istraživanja te postotci sadržaja u pepelima istog podrijetla mogu varirati. Dakle, pepeo drvnog otpada ne mora uvijek imati isti sadržaj  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , taj sastav ovisi o lokaciji određene drvne industrije, vrsti drveta i sl.

U slučaju pucolanske aktivnosti pepela šećerne trske, autori zaključuju da iako pepeo pokazuje nisku aktivnost, na razini zamjene od 5% ovog pepela sa cementom ispada da je pepeo potencijalno pucolanski. Što se tiče pepela rižine ljuske, bogat je udjelom silicijevog dioksida i smatra se visoko pucolanskom tvari u usporedbi s drugim mineralnim dodacima. Rezultati tog istraživanja pokazuju da se mješavine koje sadrže pepeo rižine ljuske do 30% mogu klasificirati kao aktivni pucolani, jer je indeks aktivnosti veći od 75%. U slučaju pepela drvnog otpada, ako sadržaj oksida prelazi minimalno 70%, otpad je kemijski reaktivan, a vrijednost indeksa pucolanske aktivnosti iznosi

75,9%. Pucolanska aktivnost može biti niska ako pepeo drvnog otpada sadrži znatnu količinu neizgorenog ugljika [7].

#### 2.4.2. Čvrstoća

Kao što je već spomenuto, pucolanska aktivnost može biti određena sadržajem oksida  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Autori navode da kombinacija materijala, bogatih tim spojevima kao što je leteći pepeo, s visoko alkalnom otopinom i topivim silikatima omogućuje stvaranje jakih veziva. Također, velike količine reaktivnog  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  rezultiraju višim stupnjem geopolimerizacije i posljedično većom mehaničkom čvrstoćom [7].

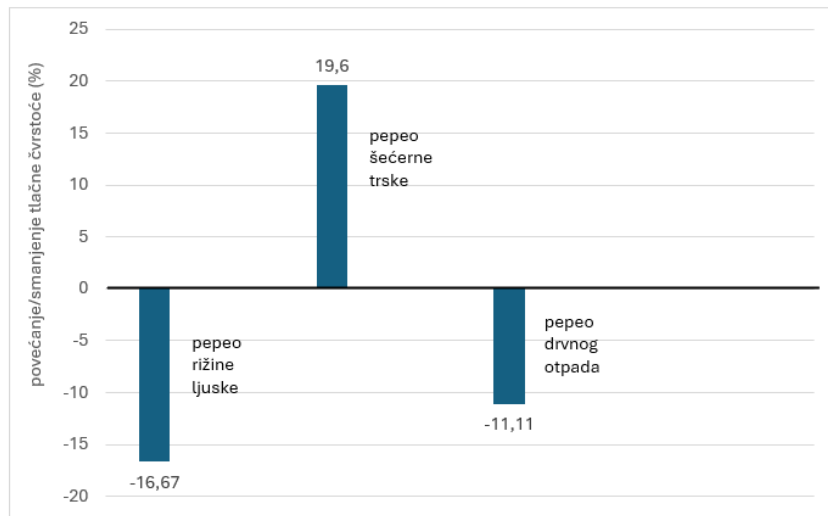
Prateći ključne čimbenike njihove potencijalne reaktivnosti, granulometrijska karakteristika pepela najjače utječe na reaktivnost. Nadalje, raspodjela veličine čestica pepela je vrlo važna za otpornost morta, imajući učinak na tlačnu čvrstoću. Tlačna čvrstoća općenito se u potpunosti postiže nakon 28 dana, a ovisi o udjelu komponenata, npr. omjer voda/vezivo ili postotak cementa zamijenjenog pepelom biomase, između ostalog. Ugradnja pepela biljne biomase u cementni mort može povećati ili smanjiti njegovu tlačnu čvrstoću. Općenito se to povezuje s pucolanskom aktivnošću, ali to nije jedina odlučujuća stavka [7].

Pepeo šećerne trske pokazuje i jedan od najvećih pucolanskih potencijala i zadovoljavajuću tlačnu čvrstoću, kada se doda cementnom mortu. Tlačna čvrstoća cementnog morta s udjelom pepela šećerne trske raste sa udjelom pepela do 10%, a zatim kod 20% pepela šećerne trske tlačna čvrstoća postiže ekvivalentnu vrijednost kao što je uočeno za kontrolni mort. Prema istraživanju, 20% zamjene je optimalna granica, a dobiveni su sljedeći postotci povećanja tlačne čvrstoće u odnosu na kontrolni uzorak: 19,39%, 19,60% i 13,25% za 5%, 10% odnosno 15% zamjene. Postotci povećanja (19,39%, 19,60%, 13,25%) tlačne čvrstoće pepela biljne biomase izračunati su u usporedbi s referentnom smjesom običnog portland cementa [7].

Pepeo rižine ljuske uzrokuje smanjenje tlačne čvrstoće morta, oko 16,67% (**Slika 2.4**). Pri omjeru veziva i pijeska 1:3, čvrstoća pepela pokazuje trend pada kada se postotak zamjene povećava. To je zato što su čestice pepela rižine ljuske grublje od čestica cementa, što stvara poroznu površinu s više šupljina. Međutim, pri omjeru veziva i pijeska 1:4, tlačna čvrstoća mortova s pepelom rižine ljuske povećava se pri 5% zamjene i smanjuje se nakon toga [7].

Pepeo drvnog otpada kao djelomičnog zamjenskog materijala za cement u betonu i mortovima općenito smanjuje čvrstoću. Međutim, upotreba na razinama zamjene do 10% ukupne mase veziva može dati prihvatljiva svojstva čvrstoće. Analizirajući uzorke s različitim udjelima pepela drvnog otpada, dobiveno je da je u svim slučajevima povećanje zamjene pepela do 28 dana obrnuto proporcionalno tlačnoj čvrstoći. Na primjer, minimalna zamjena od 5% osigurava tlačnu čvrstoću

oko 4% manju od one kontrolnog morta bez pepela, a kada se zamijeni 10%, tlačna čvrstoća opada za više od 11%. Što se tiče čvrstoće na savijanje, to smanjenje je još veće [7].



**Slika 2.4** Postotak povećanja/smanjenja tlačne čvrstoće pepela biljne biomase u odnosu na referentnu smjesu običnog portland cementa

### 3. Mortovi

Mort je mješavina vode, pijeska i veziva koja se ujedinjuje u materijal za zidanje (**Slika 3.1**). Vezivo kao jedna komponenta može predstavljati cement ili vapno što je i najčešći slučaj, međutim, postoje i alternative poput gline, pepela, geopolimera i dr. Traženje zamjena za cement je proizašlo iz zabrinutosti za okoliš s obzirom da proizvodnja cementa ima veliki utjecaj na emisije CO<sub>2</sub>.

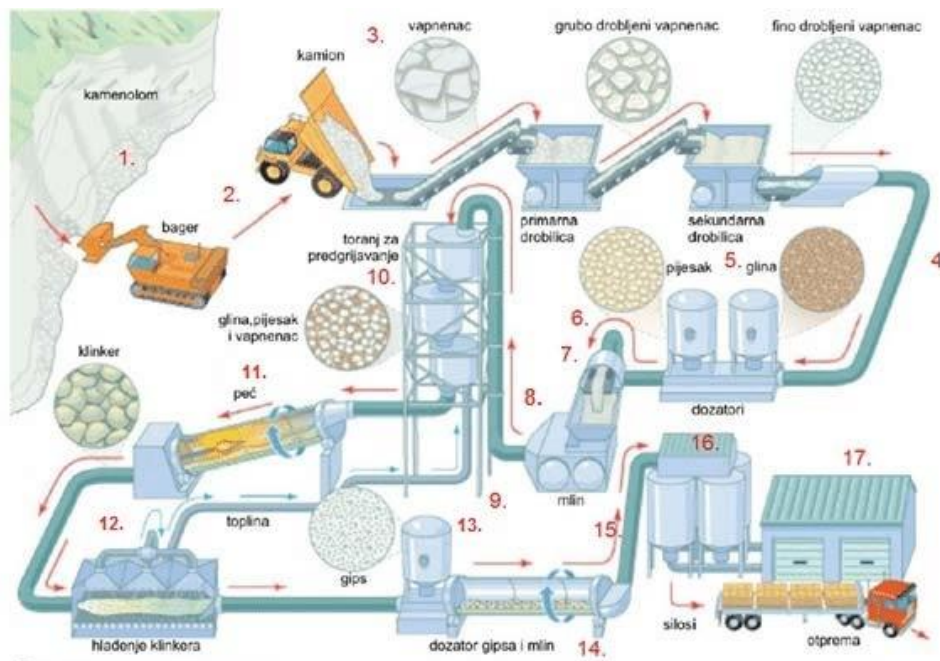


*Slika 3.1 Zidanje mortom na bazi cementa [8]*

#### 3.1. Industrija cementa

Cementna industrija je industrija s vrlo visokim energetske zahtjevima koji se mogu zadovoljiti samo fosilnim gorivima. Postotak emisije CO<sub>2</sub> plina na globalnoj razini za proizvodnju cementa iznosi 8%. Osim ugljikovog dioksida, dolazi i do ispuštanja drugih čestica i tvari poput dušikovih oksida i sumporovog dioksida. Te emisije negativno utječu na zdravlje ljudi i okoliš te ih je stoga potrebno kontrolirati [1].

Na **Slici 3.2** je prikazana shema proizvodnje cementa. Proces proizvodnje započinje iskopom sirovina koje uključuju vapnenac i glinu, ti se materijali potom melju u fini prah koji se naziva sirovinsko brašno. Produkt mljevenja odlazi u cementnu peć gdje se zagrijava na temperaturi od 1450°C. U ovom se procesu kemijske veze između sirovina razgrađuju i zatim ponovo spajaju u nove spojeve. Rezultat ovog postupka se naziva klinker, to su zaobljene grudice promjera od 1 mm do 25 mm. Klinker se melje u fini prah u mlinu za cement i miješa sa gipsom kako bi se dobio cement. Cement se kasnije miješa sa vodom i agregatom kako bi se dobili betoni i malteri korišteni u građevinarstvu [9].



Slika 3.2 *Proizvodnja cementa* [9]

Jedan od načina za smanjenje utjecaja cementa na okoliš je smanjenje upotrebe ovog materijala odabirom održivijih alternativa sa manjim ugljičnim otiskom i manjom potrošnjom energije. Drugi način smanjenja utjecaja cementa na okoliš je poboljšanje energetske učinkovitosti proizvodnje cementa korištenjem obnovljivih izvora energije, poput sunca, vjetera ili hidroelektrane, te optimizacijom korištenja resursa i procesa. Na primjer, otpadna toplina iz peći može se koristiti za proizvodnju električne energije ili grijanje vode, ili se voda koja se koristi za hlađenje klinkera može reciklirati. Treći način smanjenja utjecaja cementa na okoliš je smanjenje udjela klinkera u cementu zamjenom s drugim materijalima koji imaju slična ili bolja svojstva, poput letećeg pepela, metakaolina, troske iz visokih peći ili geopolimera. Ti se materijali nazivaju hibridni cementi i imaju prednost u smanjenju faktora klinkera, odnosno udjela klinkera u cementu, što znači manju emisiju CO<sub>2</sub> i veću mehaničku čvrstoću. Sve te mjere za smanjenje utjecaja na okoliš moraju se na neki način pratiti i mjeriti. To zahtijeva sustave za praćenje i kontrolu emisija [1].

### 3.2. Alternativni mortovi bez cementa

Mortovi na bazi cementa su dominantna vrsta mortova. Međutim, radi zabrinutosti oko utjecaja proizvodnje cementa na okoliš, traže se zamjene za ovaj materijal a s time i nove vrste mortova koje ne sadrže cement. Neki od ovih alternativnih mortova su se već pokazali kao dobre opcije za korištenje u zidarstvu.



### 3.2.1. Mortovi na bazi vapna

Vapneni mort je već provjerena alternativa mortu na bazi cementa. Vapneni mort, prikladan za zahtjeve gradnje 21. stoljeća, napravljen je od hidratiziranog vapna, pijeska i vode. Mortovi na bazi vapna nude nekoliko prednosti, uključujući:

- manju emisiju CO<sub>2</sub>; proizvodnja vapna emitira manje stakleničkih plinova u usporedbi s proizvodnjom cementa,
- kompatibilnost s povijesnim građevinama; vapneni mortovi se često koriste u projektima obnove povijesnih građevina (**Slika 3.3**) jer vrlo dobro oponašaju tradicionalna svojstva morta,
- fleksibilnost i prozračnost; vapneni mortovi su elastičniji od cementnih mortova te tako smanjuju rizik od pucanja, također se mogu nazvati prozračnima jer sprečavaju oštećenja uzrokovana vlagom [10].



**Slika 3.3** Korištenje vapnenog morta za obnovu svoda povijesne građevine [11]

### 3.2.2. Mortovi na bazi gline

Glineni mortovi koriste prirodnu glinu kao vezivo. Postaju sve popularniji radi svoje održivosti i kompatibilnosti s tehnikama zemljane gradnje. Glavne prednosti mortova na bazi gline uključuju:

- mala potreba energije; gline ima u izobilju i zahtjeva minimalnu obradu, što dovodi do niskog ugljičnog otiska u toku proizvodnje,
- toplinska svojstva; glineni mort nudi izvrsnu toplinsku izolaciju, pridonoseći energetskej učinkovitosti u zgradama,



- bez kemikalija; glineni mortovi nisu toksični i ne ispuštaju štetne kemikalije tokom vremena [10].

S druge strane, glineni mortovi ponekad nisu najbolja opcija te nisu prikladni za sve vrste zgrada s obzirom na to da mogu biti osjetljivi na eroziju kada su izloženi jakoj kiši [10].

### **3.2.3. Mortovi s magnezijevim oksidom**

MgO mortovi su alternativa u nastajanju koja koristi magnezijev oksid kao vezivo. Ovaj materijal je privukao pozornost zbog svog potencijala za smanjenjem ugljičnog otiska tijekom proizvodnje. Ključne karakteristike MgO mortova uključuju:

- brza karbonizacija; MgO apsorbira ugljikov dioksid iz atmosfere tijekom stvrdnjavanja, što rezultira neto ugljično negativnim materijalom,
- vatrootpornost; MgO mortovi imaju izvrsna svojstva otpornosti na vatru,
- trajnost; pokazuju dobru izdržljivost i otpornost na vremenske uvjete [10].

Loša strana jest da su MgO mortovi rjeđe dostupni i mogu imati ograničenja u određenim primjenama [10].

### **3.2.4. Geopolimerni mortovi**

Geopolimerni mortovi su inovativna alternativa koja se oslanja na geopolimere kao vezivo. Geopolimeri se obično proizvode od industrijskih nusproizvoda ili prirodnih materijala, čime se smanjuje utjecaj na okoliš. Glavne prednosti geopolimernih mortova uključuju:

- nizak ugljični otisak; geopolimeri često koriste industrijske otpadne materijale, preusmjeravajući ih s odlagališta i smanjujući potrebu za tradicionalnim cementom,
- visoka izdržljivost; geopolimerni mortovi pokazuju izvrsnu otpornost na kemijsku koroziju i vremenske uvjete,
- brzo stvrdnjavanje; mogu ponuditi brzo vrijeme stvrdnjavanja što može poboljšati učinkovitost konstrukcije [10].

Međutim, uporaba geopolimera može zahtijevati specijalizirano znanje i kontrolu kvalitete prilikom miješanja i primjene [10].

Prilikom odabira alternativnih mortova za zidanje bez cementa, građevinari i arhitekti bi trebali uzeti u obzir nekoliko čimbenika. Jedan od čimbenika je kompatibilnost s postojećim strukturama s obzirom da povijesne i tradicionalne građevine mogu zahtijevati posebne vrste mortova za

održavanje strukturalnog integriteta. Drugi čimbenik je lokalna dostupnost jer dostupnost materijala može varirati ovisno o mjestu gradnje, što utječe na izvedivost korištenja određenih vrsta mortova. Sljedeće, predviđena uporaba morta i specifični zahtjevi projekta trebale bi biti vodeće smjernice za odabir alternativnog morta. Također, treba se razmatrati o troškovima, neki alternativni mortovi mogu biti skuplji od tradicionalnih mortova na bazi cementa [10].

Kako se građevinska industrija nastavlja razvijati prema većoj održivosti, ove alternative mortova igrati će ključnu ulogu u smanjenju ugljičnog otiska istovremeno osiguravajući trajnost i učinkovitost.

## 4. Postupak istraživanja

Cilj ovog rada jest otkriti da li se pepeo iz biomase može koristiti kao alternativno vezivo u pravljenju morta. Kako bi se došlo do odgovora i zaključilo da li postoji ova mogućnost provedeno je laboratorijsko istraživanje. Pepeo biomase korišten kroz praktični dio ovog istraživačkog rada dobiven je spaljivanjem drvene biomase u drvnjoj industriji Spačva u Vinkovcima.

### 4.1. Pucolanska aktivnost pepela i čvrstoća

Za početak, kako bi mu se uklonile nečistoće, pepeo je prosijan na situ veličine otvora od 1 mm (Slika 4.1).



Slika 4.1 Prosijavanje pepela kroz sito otvora 1 mm

Pepelu biomase je određena pucolanska aktivnost sukladno normi HRN EN 450-1:2013 Leteći pepeo za beton -- 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnosti [12].

Sukladno navedenoj normi, izrade se cementne prizmice referentne mješavine i mješavine u kojoj je cement zamijenjen pepelom u određenom postotku. Referentne prizmice su izrađene od mješavine 450 g cementa CEM I 52,5 R, 1350 g kvarcnog pijeska i 225 g vode. Mješavina s 25% pepela sadrži 337,5 g cementa, 112,5 g pepela iz biomase, 1350 g kvarcnog pijeska i 225 g vode. Referentna mješavina i mješavina sa udjelom pepela se ugrađuju u trodijelne metalne kalupe standardnih dimenzija za ispitivanja uzoraka morta (Slika 4.2). Nakon 24 sata, prizmice se vade iz kalupa, označuju i stavljaju u vodu na daljnju njegu gdje će odstajati 28 dana (Slika 4.3).



**Slika 4.2** Mješavine ugrađene i izvađene iz kalupa



**Slika 4.3** Prizmice uronjene u vodu

U starosti od 28 dana prizmice su izvađene iz vode i na njima su određene čvrstoće prema HRN EN 1015-11;2019 Metode ispitivanja mortova za zide -- 11.dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrsllog morta [13].

Određivanje tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom prikazano je na **Slici 4.4** a dobiveni rezultati ispitivanja i indeksi pucolanske aktivnosti su prikazani u **Tablici 4.1**.



**Slika 4.4** Ispitivanje tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom

| Tip prizmice                   | Pojedinačne vrijednosti tlačne čvrstoće [N/mm <sup>2</sup> ]                            |       |       | Srednja vrijednost tlačne čvrstoće [N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------------------------|---|-------|-------|---|
| Referentne prizmice            | 65,92   | 65,24 | 59,95 | 63,70   |
| Prizmice sa pepelom iz biomase | 16,53   | 18,25 | 17,13 | 17,30   |
| Indeks pucolanske aktivnosti   | $PA = 100 \times \left( \frac{17,30}{63,70} \right) = 27\%$ za 90 dana starosti uzoraka |       |       | = 75% za 28 dana, 85% za 90 dana                        |

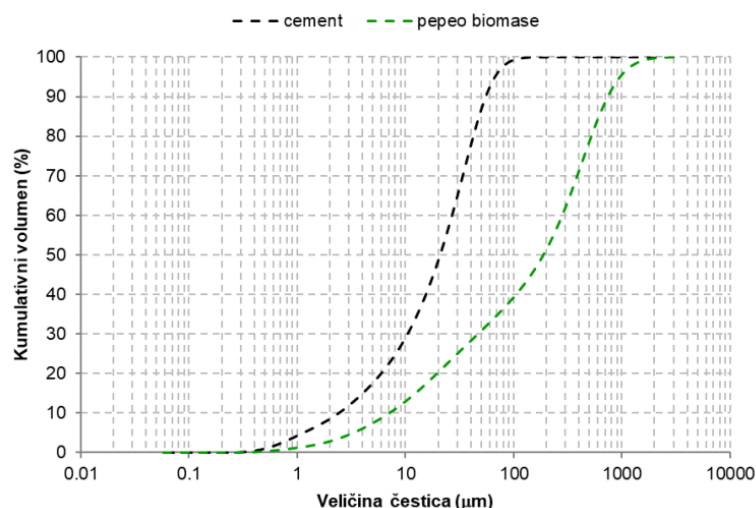
**Tablica 4.1** Tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom i pucolanska aktivnost

Iz rezultata prikazanih u **Tablici 4.1** vidljivo je da je indeks pucolanske aktivnosti  $PA = 27\%$  što je manje od 80% kako glasi zahtjev za pucolanski aktivne materijale. Navedeno znači da pepeo nije pucolanski aktivan što znači da neće pridonijeti razvoju čvrstoće morta već će na nju utjecati negativno.

## 4.2. Granulometrijska krivulja cementa i pepela

Granulometrijska krivulja cementa i pepela određena je prema HRN ISO 13320:2021 Analiza veličine čestica -- Metode laserske difrakcije [14].

Granulometrijske krivulje cementa i pepela nalaze se na **Slici 4.5**. Iz **Slike 4.5** je vidljivo da je cement sitniji materijal od pepela, npr. na situ otvora veličine 239  $\mu\text{m}$  prolazi 100% cementa ali tek 55% pepela iz biomase.



**Slika 4.5** Granulometrijske krivulje cementa i pepela biomase

### 4.3. Granulometrijska krivulja pijeska

Agregat korišten za izradu mortova je bio riječni pijesak čija je granulometrijska krivulja određena prema HRN EN 933-1:2012 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata -- 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava -- Metoda sijanja [15].

Nakon što agregat prođe kroz proces sušenja u sušioniku do stalne mase (M1), odabire se odgovarajući niz sita za svaku frakciju i poreda po veličini počevši sa najvećim otvorima na vrhu a završivši s najmanjima na dnu. Uređaj za sijanje ili tzv. treskalica se uključi i frakcije agregata se rasporede na sitima različitih veličina otvora. Po završetku sijanja važu se ostaci na pojedinim sitima s točnošću do 1 g i zapisuju u tablicu rezultata. Ostaci na sitima se međusobno zbroje (M2). Gubitak materijala za vrijeme sijanja ne smije biti veći od 1% mase uzorka da bi prosijavanje bilo valjano. Rezultati prosijavanja se prikazuju tako da se izražavaju u postocima mase (p) kao zbroj količina koje su prošle kroz odgovarajuće sito. Iz izračunatih postotaka mase (p) po pojedinim sitima i veličine otvora sita crta se granulometrijska krivulja frakcije agregata. Prosijavanje na sitima normirane veličine otvora prikazano je **Slikom 4.6** a dobivena granulometrijska krivulja **Tablicom 4.2** i **Slikom 4.7**.



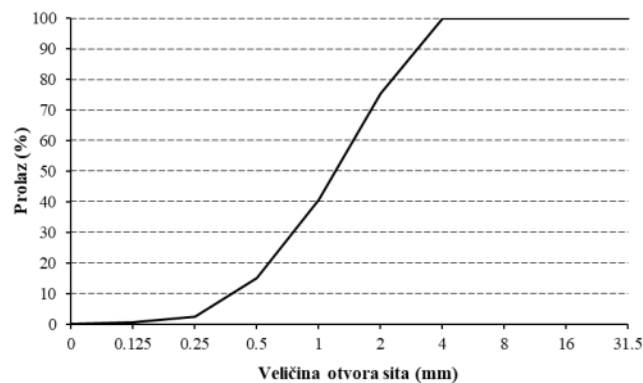
**Slika 4.6** Prosijavanje agregata

| Otvori sita [mm] | Ostatak na situ [g] | Prolaz kroz sito [g] | Prolaz kroz sito, p [%] |
|------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| 31,5             | 0                   | 199                  | 100                     |
| 16               | 0                   | 199                  | 100                     |
| 8                | 0                   | 199                  | 100                     |
| 4                | 0                   | 199                  | 100                     |
| 2                | 49                  | 150                  | 75,4                    |
| 1                | 69                  | 81                   | 40,7                    |
| 0,5              | 51                  | 30                   | 15,1                    |
| 0,25             | 25                  | 5                    | 2,5                     |
| 0,125            | 4                   | 1                    | 0,5                     |
| Dno = 0          | 1                   | 0                    | 0                       |
| Suma M2          | 199                 |                      |                         |
| M1               | 200                 |                      |                         |

**Tablica 4.2** Rezultati prosijavanja agregata frakcija 0-4 mm

Valjanost ispitivanja:

$$\frac{M2}{M1} \times 100 = \frac{199 \text{ g}}{200 \text{ g}} \times 100 = 99,5\%.$$



**Slika 4.7** Granulometrijska krivulja pijeska

#### 4.4. Ispitivanje konzistencije mortova

U nastavku su zamiješani mortovi u kojima je varirao volumni udio pepela biomase u iznosima 0%, 25%, 50% i 75 % od ukupnog udjela veziva/cementa. Mješavine mortova su imale nazive:

- C100P0; 100% cementa i 0% pepela,
- C75P25; 75% cementa i 25% pepela,
- C50P50; 50% cementa i 50% pepela,
- C25P75; 25% cementa i 75% pepela.



Mješavine morta zamiješane su u miješalici prikazanoj na **Slici 4.8**.



**Slika 4.8** Miješalica za izradu mješavina morta

Na mješavinama svježeg morta određene su konzistencije sukladno HRN EN 1015-3:2000/A2:2008 Metode ispitivanja mortova za zide -- 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje): Određivanje konzistencije potresnim stolićem [16].

Podloga i kalup se prije samog početka ispitivanja navlaže vlažnom krpom te se kalup namjesti na podlogu tj. stolić. Nakon toga kalup se napuni mortom. Svježi mort se sabija pomoću šipke propisanih dimenzija u kalup oblika šupljeg krnjeg stošca. Nakon sabijanja šipkom deset puta, doda se još malo morta i izravna površina sa rubovima kalupa. Stožac se podigne i pomoću ručke stolića uzorak se potresa 15 puta tako da se oslobođeni mort može slegnuti i rasprostrijeti. Mjeri se duljina novonastalog oblika uzorka u dvije strane te srednja duljina za koju se isti mort rasprostrio predstavlja mjeru konzistencije morta.

Koraci određivanja konzistencije prikazani su **Slikom 4.9** a rezultati ispitivanja konzistencije prikazani su **Tablicom 4.3**.



**Slika 4.9** Određivanje konzistencije morta na stoliću za potresanje

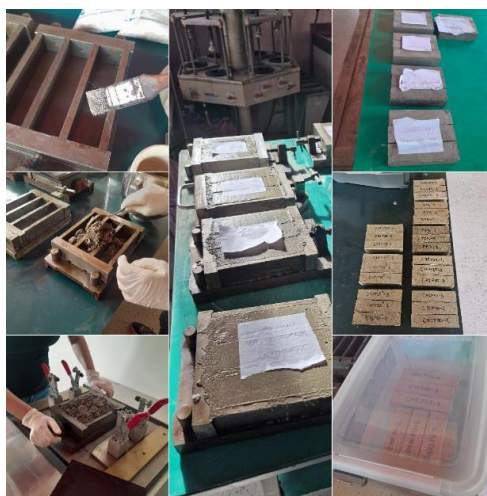


| Mort   | Konzistencija [cm] |
|--------|--------------------|
| C100P0 | 19,5               |
| C75P25 | 16                 |
| C50P50 | 15                 |
| C25P75 | 15,5               |

**Tablica 4.3** Konzistencije mortova

Kao što je vidljivo iz **Tablice 4.3**, sa povećanjem udjela pepela smanjivala se konzistencija tj. obradivost morta. Ovo je očekivano obzirom da pepeo ima veće upijanje vode od cementa pa upije više vode iz mješavine morta čineći je manje obradivom.

Mješavine morta se ugrađuju u trodijelne kalupe dimenzija 40×40×160 mm. Kalupi se prvo premažu oplatnim uljem kako bi ih poslije lakše izvadili van. Nakon što se kalupi napune sa mortom, stavljaju se na vibrostol gdje se mort izravna sa rubovima kalupa a moguće pore uklone iz morta. Nakon 24 sata, očvrslu uzorci prizmica su izvađeni iz kalupa, označeni i uronjeni u vodu na daljnju njegu (**Slika 4.10**).



**Slika 4.10** Ugrađivanje mješavine morta u kalupe i njegovanje očvrsljih prizmica

## 4.5. Određivanje čvrstoće

U 28 danu starosti na prizmicama su određene vlačne i tlačne čvrstoće prema HRN EN 1015-11:2019 Metode ispitivanja mortova za zide -- 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrsllog morta [13].

Vlačna čvrstoća se određuje opterećivanjem uzoraka kako je to prikazano na **Slici 4.11** te uz primjenu sljedeće formule:

$$f_t = \frac{3 \times F_m \times l}{2 \times b \times h^2}$$

Prizmice se opterećuju jednolično brzinom 10-50 N/s tako da slom nastane unutar 30-90 sekundi. Izmjerene i izračunate veličine zapisujemo. Polovice prizmi dobivenih u ovom postupku koristimo za određivanje tlačne čvrstoće morta. Tlačna čvrstoća se određuje opterećivanjem uzoraka jednoličnom brzinom uz sljedeću formulu:

$$f_c = \frac{F_m}{A}$$

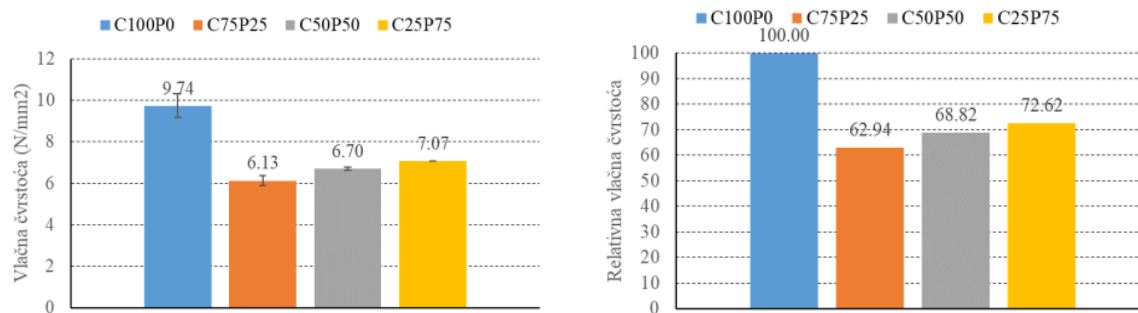
Određivanje vlačne i tlačne čvrstoće prizmica morta prikazano je **Slikom 4.11** a dobiveni rezultati ispitivanja **Tablicom 4.4** i **Slikama 4.12** i **4.13**. **Slika 4.14** prikazuje neobičan slom uzoraka prizmica sa pepelom prilikom određivanja vlačne čvrstoće.



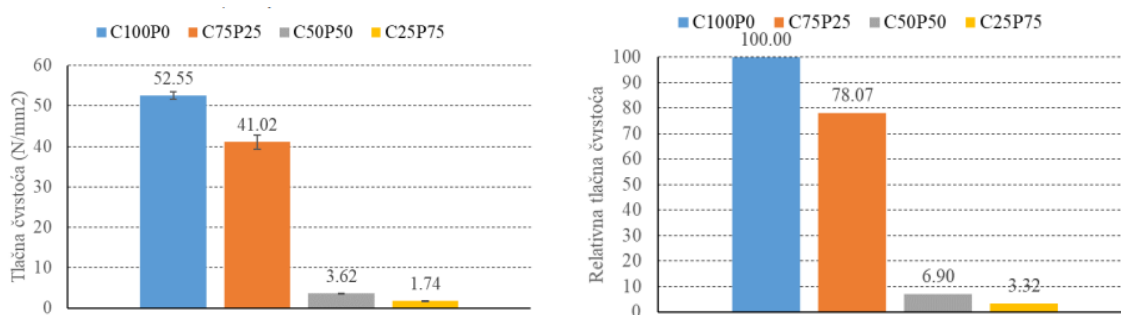
**Slika 4.11** *Određivanje vlačne i tlačne čvrstoće*

| Mort   | Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ] |                    |  | Tlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ] |                    |  |
|--------|--------------------------------------|--------------------|--|--------------------------------------|--------------------|--|
|        | Pojedinačna vrijednost               | Srednja vrijednost | Standardna devijacija [N/mm <sup>2</sup> ] | Pojedinačna vrijednost               | Srednja vrijednost | Standardna devijacija [N/mm <sup>2</sup> ] |
| C100P0 | 9,49                                 | 9,74               | 0,56                                       | 52,53                                | 52,55              | 0,92                                       |
|        | 9,21                                 |                    |  | 51,43                                |                    |  |
|        | 10,52                                |                    |  | 53,69                                |                    |  |
| C75P25 | 5,96                                 | 6,13               | 0,24                                       | 38,61                                | 41,02              | 1,74                                       |
|        | 6,47                                 |                    |  | 41,83                                |                    |  |
|        | 5,96                                 |                    |  | 42,63                                |                    |  |
| C50P50 | 6,75                                 | 6,70               | 0,07                                       | 3,75                                 | 3,62               | 0,10                                       |
|        | 6,76                                 |                    |  | 3,52                                 |                    |  |
|        | 6,60                                 |                    |  | 3,60                                 |                    |  |
| C25P75 | 7,09                                 | 7,07               | 0,02                                       | 1,70                                 | 1,74               | 0,06                                       |
|        | 7,05                                 |                    |  | 1,83                                 |                    |  |
|        | 7,08                                 |                    |  | 1,70                                 |                    |  |

**Tablica 4.4** *Rezultati ispitivanja vlačnih i tlačnih čvrstoća mortova*



**Slika 4.12** Rezultati ispitivanja vlačnih čvrstoća mortova; a) apsolutne vrijednosti, b) relativne vrijednosti



**Slika 4.13** Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća mortova; a) apsolutne vrijednosti, b) relativne vrijednosti



**Slika 4.14** Slom prizmice sa pepelom biomase prilikom određivanja vlačne čvrstoće

Iz **Slika 4.12** pod a) i b) vidljivo je da povećanjem udjela pepela rastu vlačne čvrstoće mortova što je nemoguće jer je prethodno pokazano da pepeo nije pucolanski aktivan. Uzrok takvim rezultatima nalazi se u sasvim neobičnom načinu sloma uzoraka sa pepelom biomase kako je to

prikazano **Slikom 4.14**. Naime, po nastanku prve pukotine preša je nastavljala sa unosom sile i pritom se odupirala o donju metalnu ploču preše. Stoga ovakvi rezultati nisu mjerodavni.

Uvidom u **Sliku 4.13 a)** vidljivo je da mješavina sa cementom (referentna mješavina) ima najveću tlačnu čvrstoću, 52,55 MPa, te se tlačne čvrstoće mješavina sa dodatkom pepela biomase smanjuju kako se povećava udio pepela biomase. Tlačna čvrstoća mješavine spravljene sa 75% pepela biomase iznosi tek 3,32 MPa. Za mortove za zidanje u seizmički aktivnim područjima prema HRN EN 1998-1:2011 zahtjeva se tlačna čvrstoća od 5 MPa. Mortovi sa udjelom pepela do 25% ostvaruju tu čvrstoću. Relativno gledajući (**Slika 4.13 b)**), potpuna zamjena cementa sa pepelom biomase rezultira sa 78,07% tlačne čvrstoće mješavine. Sve standardne devijacije su manje od 10% srednje vrijednosti što znači da su rezultati mjerodavni.

## Zaključak

U radu se istražuje utjecaj zamjene cementa kao standardnog veziva sa pepelom biomase na konzistenciju morta te njegovu vlačnu i tlačnu čvrstoću. Zamiješani su mortovi u kojima je varirao volumni udio pepela od 0 do 75% s inkrementom od 25%. Sa povećanjem udjela pepela smanjivala se konzistencija tj. obradivost morta što je očekivano obzirom da pepeo ima veće upijanje vode od cementa pa upije više vode iz mješavine morta čineći je manje obradivom. Sa povećanjem udjela pepela smanjivale su se tlačne čvrstoće morta jer je pepeo pucolanski neaktivan materijal. Ipak, mortovi sa do 25% pepela biomase kao veziva su dostatne čvrstoće za zidanje građevina u seizmički aktivnim područjima.

Iako pepeo biomase korišten u ovom istraživanju nije dao dobre rezultate vezane uz konzistenciju i čvrstoću, ne možemo u potpunosti isključiti potencijal uporabe pepela biomase kao alternative za cement u spravljanju mortova. Uporaba alternativnih veziva za cement u građevinskim materijalima smatra se neophodnim u budućnosti cijele građevinske industrije obzirom da se počinju uvoditi restrikcije vezane uz očuvanje okoliša i postizanje klimatske neutralnosti. Imajući to na umu, istraživanja poput ovog će vjerojatno postati česti slučaj u grani građevinarstva.

## Literatura

- [1] *Utjecaj cementa na okoliš, praćenje kvalitete zraka*, <https://kunakair.com/cement-industry-environment-air-quality/>, 23.08.2024.
- [2] Predavanja iz kolegija „Zaštita okoliša“; naslov: *Biomasa i biogoriva poljoprivrednog porijekla*; Autor: Neven Voća, prof. dr. sc.; Varaždin, godina: 2023.
- [3] *Sezona grijanja*, <https://regionalni.com/sezona-grijanja-cijena-drvenih-peleta-dosegla-je-vrhunac-pojeftinjenje-mozemo-ocekivati-tek-u-veljaci/>, 10.05.2024.
- [4] *Efekti globalnog zatopljenja*, <https://www.metoffice.gov.uk>, 08.05.2024.
- [5] Predavanja iz kolegija „Zaštita okoliša“; naslov: *Klimatske (i s njima povezane) promjene*; Autor: Dunja Mazzocco Drvar, direktorica programa zaštite prirode, WWF Adria; Varaždin, godina: 2023.
- [6] *Što zagrijava Zemlju*, <https://www.bloomberg.com/graphics/2015-whats-warming-the-world/>, 08.05.2024.
- [7] R. N. González-Kunz, P. Pineda, A. Bras, L. Morillas: *Plant biomass ashes in cement-based building materials & Feasibility as eco-efficient structural mortars and grouts*, Sustainable cities and Society journal, 2017.
- [8] *Vrste mortova za zidanje i spojevi*, <https://www.archtoolbox.com/masonry-mortar-types-and-joints/>, 28.08.2024.
- [9] *Postupak proizvodnje cementa*, [https://www.researchgate.net/figure/Cement-production-process-in-the-case-factory-2-3-Mapiranje-toka-vrijednosti-u\\_fig2\\_313527018](https://www.researchgate.net/figure/Cement-production-process-in-the-case-factory-2-3-Mapiranje-toka-vrijednosti-u_fig2_313527018), 23.08.2024.
- [10] *Istraživanje alternativnih mortova za zidanje bez cementa*, <https://www.limetec.co.uk/exploring-cement-free-masonry-mortar.html>, 22.08.2024.
- [11] *Vapneni mort*, <https://www.lime-green.co.uk/products/lime-mortar/natural-lime-mortar>, 28.08.2024.
- [12] HRN EN 450-1:2013 Leteći pepeo za beton -- 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnosti
- [13] HRN EN 1015-11:2019 Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 11.dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrslog morta
- [14] HRN ISO 13320:2021 Analiza veličine čestica -- Metode laserske difrakcije
- [15] HRN EN 933-1:2012 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata -- 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava -- Metoda sisanja

- [16] HRN EN 1015-3:2000/A2:2008 Metode ispitivanja mortova za zide -- 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje): Određivanje konzistencije potresnim stolićem

## Popis slika

|  |    |
|--|----|
| <b>Slika 1.1</b> Pelete [3] .....  | 3  |
| <b>Slika 1.2</b> Puni prinos energetskog nasada biljke miskantus od 30-40 t/ha [2].....  | 5  |
| <b>Slika 1.3</b> Bioplinsko postrojenje [2].....   | 5  |
| <b>Slika 1.4</b> Porast temperature od predindustrijskog razdoblja [4].....  | 6  |
| <b>Slika 1.5</b> Porast temperature pod utjecajem faktora zatopljenja [6] .....  | 6  |
| <b>Slika 2.1</b> Pepeo rižine ljuske [7] .....   | 9  |
| <b>Slika 2.2</b> Pepeo šećerne trske [7] .....   | 9  |
| <b>Slika 2.3</b> Pepeo drvnog otpada [7] .....   | 10 |
| <b>Slika 2.4</b> Postotak povećanja/smanjenja tlačne čvrstoće pepela biljne biomase u odnosu na referentnu smjesu običnog portland cementa ..... | 13 |
| <b>Slika 3.1</b> Zidanje mortom na bazi cementa [8] .....  | 14 |
| <b>Slika 3.2</b> Proizvodnja cementa [9] .....   | 15 |
| <b>Slika 3.3</b> Korištenje vapnenog morta za obnovu svoda povijesne građevine [11] .....  | 16 |
| <b>Slika 4.1</b> Prosijavanje pepela kroz sito otvora 1 mm .....   | 19 |
| <b>Slika 4.2</b> Mješavine ugrađene i izvađene iz kalupa .....   | 20 |
| <b>Slika 4.3</b> Prizmice uronjene u vodu .....  | 20 |
| <b>Slika 4.4</b> Ispitivanje tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom.....  | 20 |
| <b>Slika 4.5</b> Granulometrijske krivulje cementa i pepela biomase .....  | 21 |
| <b>Slika 4.6</b> Prosijavanje agregata .....   | 22 |
| <b>Slika 4.7</b> Granulometrijska krivulja pijeska.....  | 23 |
| <b>Slika 4.8</b> Miješalica za izradu mješavina morta .....  | 24 |
| <b>Slika 4.9</b> Određivanje konzistencije morta na stoliću za potresanje .....  | 24 |
| <b>Slika 4.10</b> Ugrađivanje mješavine morta u kalupe i njegovanje očvrsljih prizmica .....   | 25 |
| <b>Slika 4.11</b> Određivanje vlačne i tlačne čvrstoće .....   | 26 |
| <b>Slika 4.12</b> Rezultati ispitivanja vlačnih čvrstoća mortova; a) apsolutne vrijednosti, b) relativne vrijednosti .....                       | 27 |
| <b>Slika 4.13</b> Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća mortova; a) apsolutne vrijednosti, b) relativne vrijednosti .....                       | 27 |
| <b>Slika 4.14</b> Slom prizmice sa pepelom biomase prilikom određivanja vlačne čvrstoće .....  | 27 |



## Popis tablica

|  |    |
|--|----|
| <b>Tablica 1.1</b> Odnos vrste peletirane biomase i donje ogrjevne vrijednosti [2] .....                                   | 4  |
| <b>Tablica 2.1</b> Proizvodnja usjeva ili sirovina u milijunima tona [7] .....   | 10 |
| <b>Tablica 2.2</b> Sadržaj $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ u pepelu biljne biomase [7]..... | 11 |
| <b>Tablica 4.1</b> Tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom i pucolanska aktivnost .....                              | 21 |
| <b>Tablica 4.2</b> Rezultati prosijavanja agregata frakcija 0-4 mm .....   | 23 |
| <b>Tablica 4.3</b> Konzistencije mortova .....   | 25 |
| <b>Tablica 4.4</b> Rezultati ispitivanja vlačnih i tlačnih čvrstoća mortova.....   | 26 |



### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Marija Mint (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom \_\_\_\_\_ (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Utjecaj pepela biomase kao  
djelomične zamjene za  
cement na mehanička  
svojstva morta

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Marija Mint  
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.