

# Potencijal primjene pepela biomase kao djelomične ili potpune zamjene cementa u mikrobetonu

---

Hlebec, Ana

Master's thesis / Diplomski 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:122:468973>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD br. 114/GRD/2024

**POTENCIJAL PRIMJENE PEPELA  
BIOMASE KAO DJELOMIČNE ILI  
POTPUNE ZAMJENE CEMENTA U  
MIKROBETONU**

Ana Hlebec

Varaždin, listopad 2024.

**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**  
**Studij Graditeljstva**



DIPLOMSKI RAD br. 114/GRD/2024

**POTENCIJAL PRIMJENE PEPELA  
BIOMASE KAO DJELOMIČNE ILI  
POTPUNE ZAMJENE CEMENTA U  
MIKROBETONU**

Student:  
Ana Hlebec, 0149225830

Mentorica:  
Prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša

Varaždin, listopad 2024.

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za graditeljstvo

STUDIJ diplomski sveu ilišni studij Graditeljstvo

PRISTUPNIK Ana Hlebec

JMBAG 0149225830

DATUM 19.07.2024.

KOLEGIJ Betoni posebnih namjena

NASLOV RADA Potencijal primjene pepela biomase kao djelomične ili potpune zamjene cementa u mikrobetonu

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU The potential of using biomass ash as a partial or complete cement replacement in microconcrete

MENTOR prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša

ZVANJE Redoviti profesor

ČLANOVI POVJERENSTVA

- doc.dr.sc. Anđelko Crnoja
- prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša
- izv.prof.dr.sc. Aleksej Aniskin
- izv.prof.dr.sc. Matija Orešković-zamjenski član
- 

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 114/GRD/2024

OPIS

U preglednom dijelu rada je potrebno napraviti pregled literature na temu uporabe pepela biomase kao jedne od komponenata betona. U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno osmisлити metodologiju istraživanja na temu primjene pepela biomase kao djelomične ili potpune zamjene cementa u mikrobetonu, provesti ispitivanja sukladno važećoj regulativi, obraditi rezultate ispitivanja te izvesti zaključke.

ZADATAK URUČEN 19.07.2024.



POTPIS MENTORA

*[Handwritten signature]*




## 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, Ana Hlebec (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Potencijal primjene pepela bömase kao (upisati naslov) te da u djelomične ili potpune zamjene cementa u mikropetu navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

  
\_\_\_\_\_  
(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.

## Sažetak

Korištenjem alternativnih materijala, kao što je leteći pepeo iz drvene biomase, moguće je smanjiti upotrebu cementa i pridonijeti smanjenju ekološkog otpada. Iz navedenih razloga, cilj ovog rada je istražiti kako upotreba održivog materijala, pepela iz drvene biomase, kao zamjene za cement utječe na mehanička svojstva mikrobetona. U tu svrhu izrađene su mješavine cementnih i geopolimernih mortova. Mješavine cementnih mortova nazvane su C100P0 (100% cementa) i C50P50 (50% cementa i 50% pepela, mjereno volumno) te su pripravljene sa 1350 g pijeska, 450 g cementa (kod C100P0), odnosno 380 ml cementa i 225 g vode. Mješavine geopolimernih mortova pripravljene su sa 1350 g pijeska, 380 ml pepela biomase i s mješavinom 10-molarne otopine KOH (ili NaOH) i otopine vodenog stakla ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) u omjeru 1:2,5. Mješavina geopolimernih mortova s KOH označena je kao GP-KOH, dok je ona s NaOH označena kao GP-NaOH. Kemijska analiza pokazala je da pepeo sadrži viši udio CaO u odnosu na cement, što ukazuje na potencijalnu pucolansku aktivnost. Iako se pucolanska aktivnost pepela očituje nakon 28 dana, indeks pucolanske aktivnosti iznosi 27%, što je ispod tražene vrijednosti od 80%, čime dolazi do smanjenja čvrstoće morta. Granulometrijska analiza pokazala je da je cement sitnije strukture u usporedbi s pepelom. Ispitivanja vlačne i tlačne čvrstoće pokazala su da vlačna čvrstoća opada s povećanjem udjela pepela, dok su rezultati tlačne čvrstoće ostali pouzdani. Ovi rezultati upućuju na to da pepeo može imati ograničenu primjenu u mješavinama gdje je potrebna visoka čvrstoća.

**Ključne riječi:** leteći pepeo, drvena biomasa, cement, pucolanska aktivnost, geopolimerni mortovi, vlačna čvrstoća, tlačna čvrstoća, održivi materijali

## Abstract

The use of alternative materials, such as fly ash from wood biomass, can reduce the consumption of cement and contribute to minimizing environmental waste. For these reasons, the aim of this study is to investigate how the use of sustainable material, namely wood biomass ash, as a replacement for cement affects the mechanical properties of micro-concrete. For this purpose, mixtures of cement and geopolymer mortars were prepared. The cement mortar mixtures were named C100P0 (100% cement) and C50P50 (50% cement and 50% ash, measured volumetrically) and were prepared with 1350 g of sand, 450 g of cement (for C100P0), or 380 ml of cement and 225 g of water. The geopolymer mortar mixtures were prepared with 1350 g of sand, 380 ml of biomass ash, and a mixture of 10-molar solutions of KOH (or NaOH) and sodium silicate solution ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) in a ratio of 1:2.5. The geopolymer mortar mixture with KOH was labeled as GP-KOH, while the one with NaOH was labeled as GP-NaOH. Chemical analysis revealed that the ash contains a higher proportion of CaO compared to cement, indicating potential pozzolanic activity. Although the pozzolanic activity of the ash becomes apparent after 28 days, the pozzolanic activity index is 27%, which is below the required value of 80%, resulting in a decrease in the strength of the mortar. Granulometric analysis showed that cement has a finer structure compared to ash. Tests of tensile and compressive strength indicated that the tensile strength decreases with increasing ash content, while the compressive strength results remained reliable. These results suggest that ash may have limited applicability in mixtures where high strength is required.

**Keywords:** fly ash, wood biomass, cement, pozzolanic activity, geopolymer mortars, tensile strength, compressive strength, sustainable materials

## Popis korištenih kratica

<b>PDB</b>	Pepeo drvne biomase
<b>Ag</b>	Srebro
<b>Au</b>	Zlato
<b>B</b>	Bor
<b>Be</b>	Berilij
<b>Rb</b>	Rubidij
<b>Se</b>	Selen
<b>CEM</b>	Cement
<b>HRN EN</b>	Hrvatski standard prema europskim normama
<b>HRN ISO</b>	Hrvatska norma prema međunarodnim normama
<b>KOH</b>	Kalijev hidroksid
<b>GGBS</b>	Drobljeni granulatni trosak iz visoke peći
<b>LS</b>	Mulj vapna
<b>FA</b>	Leteći pepeo
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	Natrijev silikat
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Fosforni(V) oksid (fosforni pentoksid)
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	Natrijev oksid
<b>K<sub>2</sub>O</b>	Kalijev oksid
<b>CaO</b>	Kalcijev oksid
<b>MgO</b>	Magnezijev oksid
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Aluminijev oksid
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Titanijev dioksid
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Željezni(III) oksid (hematit)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silicijev dioksid
<b>MnO<sub>2</sub></b>	Manganov(IV) oksid
<b>SO<sub>3</sub></b>	Sumporov(VI) oksid (sumporov trioksid)
<b>As</b>	Arsen
<b>Cd</b>	Kadmij
<b>Co</b>	Kobalt
<b>Cr</b>	Krom
<b>Cu</b>	Bakar
<b>Mn</b>	Mangan
<b>Mo</b>	Molibden
<b>Ni</b>	Nikal
<b>Pb</b>	Olovo
<b>Sb</b>	Antimon
<b>V</b>	Vanadij
<b>Zn</b>	Cink
<b>Hg</b>	Živa



# SADRŽAJ

Uvod.....	1
1. Općenito o biomasi .....	2
1.1. Nastajanje biomase i svojstva .....	2
1.2. Prednosti korištenja biomase.....	4
2. Općenito o pepelu drvene biomase.....	5
2.1. Sastav pepela biomase.....	7
2.2. Utjecaj na okoliš.....	7
2.3. Ekonomska opravdanost korištenja pepela biomase .....	8
3. Moguće primjene pepela u građevinarstvu .....	9
3.1. Pepeo iz spaljivanja ugljena .....	9
3.2. Primjeri građevina koje su izgrađene uz primjenu pepela iz spaljivanja ugljena u termoelektranama.....	10
3.3. Stabilizacija tla i nosivih slojeva kolničke konstrukcije .....	12
3.4. Stabilizacijske mješavine koherentnih tala.....	12
3.5. Stabilizirani nosivi slojevi .....	12
4. Geopolimeri .....	14
4.1. Svojstva geopolimera na bazi metakaolina .....	14
4.2. Svojstva geopolimera na bazi letećeg pepela i troske .....	18
5. O betonu – sastav i svojstva .....	25
5.1. Mikrobeton .....	25
5.2. Anorganska veziva .....	25
5.2.1. Pucolanski materijali .....	26
5.3. Agregat .....	27
5.3.1. Frakcioniranje agregata .....	28
5.3.2. Ispitivanja i svojstva agregata.....	28
5.3.3. Granulometrijski sastav agregata .....	28
5.4. Voda .....	29
5.4.1. Voda za njegu betona .....	30
5.5. Svojstva svježeg betona .....	30
5.6. Tlačna čvrstoća.....	31
5.7. Vlačna čvrstoća .....	33
6. Eksperimentalno ispitivanje.....	35
6.1. Materijali .....	35
6.2. Kemijski sastav cementa i pepela.....	35
6.3. Udio teških metala u pepelu .....	36
6.4. Pucolanska aktivnost pepela.....	37
6.5. Granulometrijska krivulja cementa i pepela.....	39
6.6. Granulometrijski sastav .....	40
6.7. Priprema mješavine betona .....	42
6.8. Ispitivanje tlačne i vlačne čvrstoće.....	45
7. Zaključak.....	51
Reference .....	52
Popis slika .....	55
Popis tablica .....	57



## Uvod

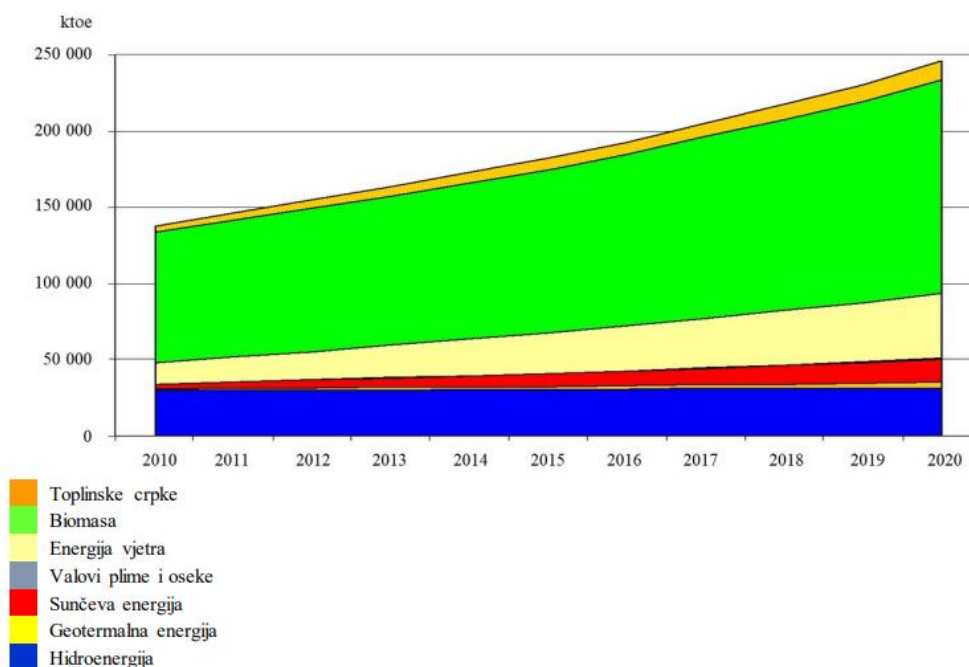
U vrijeme kada se suočavamo s izazovima iscrpljivanja prirodnih resursa i klimatskih promjena, biomasa predstavlja održivo rješenje koje ne samo da doprinosi energetskej učinkovitosti, već nudi i inovativne materijale za građevinsku industriju.

Ovaj rad istražuje različita svojstva drvne biomase, s naglaskom na njezinu komponentu pepela, koja se često deponira i zanemaruje. Kroz proučavanje pepela, geopolimera i osnovnih sastava betona istražiti ćemo kako ovi elementi mogu unaprijediti način na koji gradimo i kako se suočavamo s ekološkim izazovima, stvarajući novu budućnost za građevinsku industriju. Ovi materijali imaju potencijal da zamijene tradicionalne komponente betona, čime se smanjuje emisija ugljikovog dioksida koja se obično povezuje s proizvodnjom Portland cementa. Korištenje pepela kao zamjenske komponente ne samo da doprinosi smanjenju otpada, već također otvara vrata novim tehnologijama reciklaže koje mogu transformirati naš pristup građevinskim materijalima. U radu će se također detaljno obraditi svojstva betona, s posebnim naglaskom na tlačnu i vlačnu čvrstoću. Analizirat će se rezultati eksperimentalnih ispitivanja mješavina cementnih i geopolimernih mortova s dodatkom pepela drvne biomase.

# 1. Općenito o biomasi

Prema definiciji danoj u Direktivi 2009/28/EK, biomasa je biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog (kako biljnog, tako i životinjskog) podrijetla iz poljoprivrede, šumarstva i srodnih sektora, kao što su ribarstvo i akvakultura, ali i biorazgradivi dio industrijskog i komunalnog otpada. Biomasa se prema podrijetlu dijeli na: 1. poljoprivrednu biomasu (žetveni ostaci, uzgajane kulture, životinjski otpad i ostatci), 2. biomasu iz prehrambeno-prerađivačke industrije, 3. šumsku i drvno-prerađivačku biomasu, 4. komunalni otpad.

Slika 1. prikazuje udio uporabe energije iz pojedinih vrsta obnovljivih izvora energije. Iz nje je razvidno da se upravo od biomase očekuje najveća proizvodnja energije [1].



*Slika 1. Razvoj tehnologija za obnovljive izvore energije iz nacionalnih akcijskih planova [1]*

## 1.1. Nastajanje biomase i svojstva

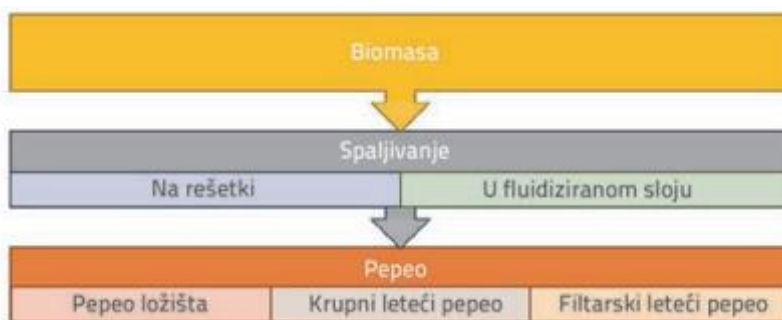
Biomasa se može podijeliti na drvnu biomasu i biomasu dobivenu od travnatih biljaka. Ona nastaje djelovanjem prirodnih procesa i ljudskih aktivnosti te uključuje različite izvore, poput drva, nusproizvoda drvene industrije, poljoprivrednog otpada, šumskog otpada i otpada iz prehrambene industrije (primjerice, ljuške riže, maslinova komina i suncokretove ljuške). Pepeo nastaje tijekom izgaranja biomase iz anorganskih tvari prisutnih u gorivu kroz složene kemijske i fizikalne procese. Sastav pepela uključuje vezane anorganske materijale koji su dio strukture same biomase,

kao i mineralne čestice koje se unose tijekom faza prikupljanja, transporta ili obrade. U tablici 1. prikazan je udio pepela koji nastaje prilikom izgaranja različitih tipova biomase [2].

**Tablica 1.** Udio pepela pri izgaranju biomase na 550 °C [2]

Vrsta biomase	Udio pepela [%]
Kora drveta	5,0-8,0
Drvena sječka s korom	1,0-2,5
Drvena sječka bez kore	0,8-1,4
Piljevina	0,5-1,1
Otpadno drvo	3,0-12,0
Slama i žitarice	4,0-12,0
Miskantus (kineska trava)	2,0-8,0
Otpad od maslina	2,0-4,0

Za proces spaljivanja biomase koriste se dva osnovna tipa peći: peći sa spaljivanjem na rešetki i peći sa spaljivanjem u fluidiziranom sloju. Peći sa spaljivanjem na rešetki pogodne su za spaljivanje biomase velike vlažnosti i visokog udjela pepela, kao i za čestice različitih veličina.



**Slika 2.** Načini spaljivanja biomase i frakcije nastalog biopepela [2]

Najkrupnije frakcije pepela, koje se prikupljaju ispod rešetke kotla, često su pomiješane s nečistoćama poput pijeska, zemlje ili materijala iz ležišta tijekom spaljivanja u fluidiziranom sloju. Ciklonski leteći pepeo, veće granulacije, većinom sadrži anorganske čestice koje dimni plinovi prenose u sekundarnu zonu sagorijevanja. Filtarski pepeo prikuplja se na elektrostatskim i vlaknastim filtrima, ili u obliku kondenzacijskog mulja. Raspon veličina i granulometrijski sastav čestica različitih frakcija pepela ovise o tehnologiji razdvajanja i prikupljanja pepela, kao i o podrijetlu biomase koja se spaljuje.

Kod spaljivanja u fluidiziranom sloju, pepeo iz ložišta čini tek 20-30 % ukupnog pepela, dok ostatak čini leteći pepeo. Značajan udio štetnih tvari, posebice teških metala, u nekim vrstama pepela ograničava njihovu uporabu, posebno u poljoprivredi, gdje se pepeo koristi kao dodatak tlu za prihranu biljaka. Dosadašnja istraživanja pokazuju da se pepeo biomase može koristiti u građevinarstvu, bilo u izvornom obliku ili nakon dodatne obrade [2].

## **1.2. Prednosti korištenja biomase**

Korištenje biomase kao goriva značajno doprinosi smanjenju emisija stakleničkih plinova i stabilizaciji njihove koncentracije u atmosferi. U usporedbi s drugim obnovljivim izvorima energije, biomasa predstavlja posebno učinkovito rješenje jer se može koristiti u svom prirodnom obliku, bez potrebe za dodatnim procesima obrade. Time se smanjuje potreba za dodatnom preradom i olakšava upravljanje, a najbolji primjer takve prakse su ogrjevna drva.

Hrvatska, zahvaljujući svom reljefu i bogatim prirodnim resursima, posjeduje značajan potencijal za korištenje biomase kao izvora energije. Može se reći da bi upravo biomasa mogla igrati ključnu ulogu u budućem energetske razvoju zemlje. U posljednje vrijeme sve je očitije da trenutni način korištenja energetske resursa nije dugoročno održiv. Prirodni izvori se iscrpljuju, a onečišćenje zraka i okoliša postaje sve ozbiljniji problem. Stoga je od iznimne važnosti prepoznati prednosti korištenja biomase u proizvodnji energije.

Biomasa čuva okoliš, lako se proizvodi, ne iziskuje dodatnu preradu i ne stvara višak ugljikovog dioksida u atmosferi! Također, u svom izgaranju biomasa ispušta onoliko ugljikova dioksida koliko je potrebno jednoj biljci za njezin rast. Time se stvara cirkularno korištenje biomase, bez straha da će se u atmosferi stvoriti višak CO<sub>2</sub>. Ova karakteristika čini biomasu idealnim rješenjem za budućnost, s potencijalom da u potpunosti zamijeni fosilna goriva poput benzina i dizela, te druge energente koji nepovoljno utječu na okoliš [3].

## 2. Općenito o pepelu drvene biomase

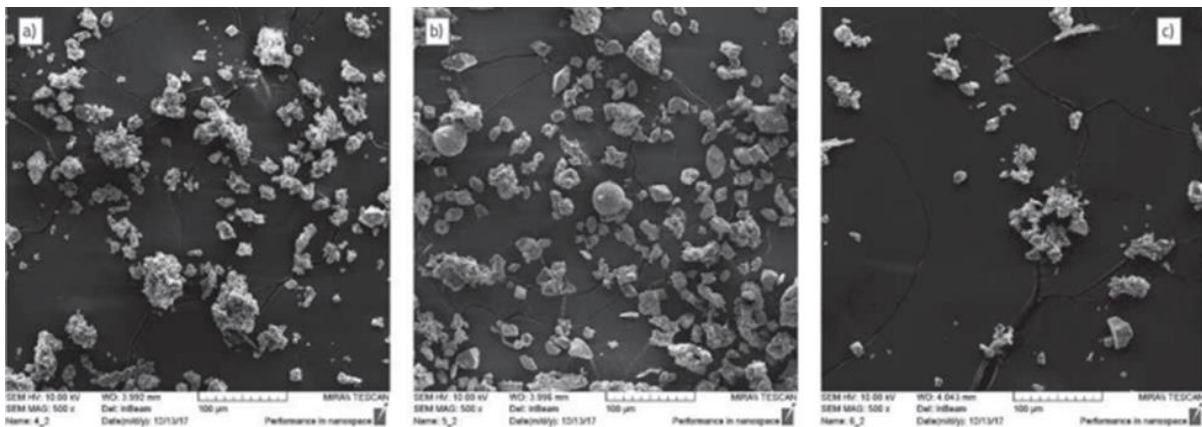
Pepeo drvene biomase (PDB) čini složenu mješavinu anorganskih i organskih spojeva, pri čemu se njegov sastav može značajno razlikovati. Tijekom proizvodnje energije spaljivanjem drvene biomase nastaje pepeo drvene biomase, koji se može podijeliti na pepeo s dna peći (ložišni pepeo) i leteći pepeo, koji se dodatno dijeli na fine i krupnije frakcije (slika 4) [4].



*Slika 3. Drvna biomasa [5]*



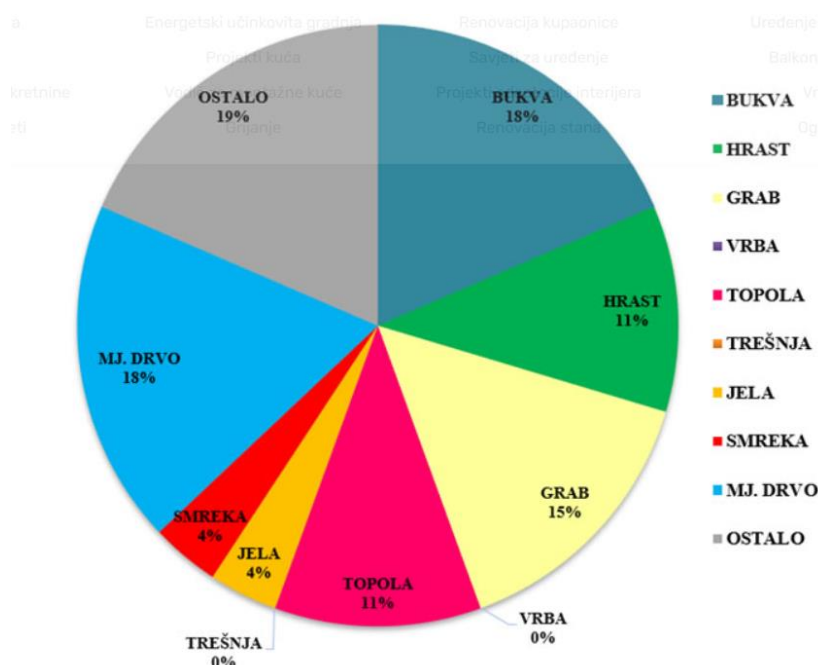
*Slika 4. Uzorci pepela drvene biomase: a) pepeo s dna peći; b) leteći pepeo krupnije frakcije; c) finiji leteći pepeo [6]*



*Slika 5. SEM-SE mikrografi koji prikazuju veličinu i morfološku raznolikost letećeg PDB-a krupne frakcije [6]*

Kako bi Europska unija ostvarila dugoročne ciljeve smanjenja emisije stakleničkih plinova za 80 do 95 % te očuvala prirodne resurse, nužno je provoditi inovacije u području održive gradnje, posebno u vezi s materijalima na bazi cementa. U tom kontekstu, primjena pepela drvene biomase u građevinskoj industriji predstavlja ekološki opravdan izbor koji doprinosi smanjenju troškova zbrinjavanja otpada, emisije stakleničkih plinova i očuvanju prirodnih resursa.

Pepeo drvene biomase već se koristi u građevinskom sektoru za različite namjene, uključujući izradu blokova od silika kserogela koji djeluju kao toplinska izolacija, sintezu geopolimera, samonivelirajuće mortove, posteljice cesta, kolničke konstrukcije, lagane (ekspandirane) agregate, lagane opeke, betonske blokove, gipskartonske ploče, ćelijasti beton, kao vezivo za materijale manje čvrstoće, te u asfaltu i bitumenskim proizvodima.



*Slika 6. Vrste drveta koje se najčešće koriste kao gorivo u 9 energana na biomasu u Republici Hrvatskoj [5]*

Drvena biomasa obuhvaća svu šumsku drvenu masu, uključujući stabla, krošnje, grane, kao i drvene ostatke nastale preradom drveta te druge vrste drvnog otpada, poput otpada iz uređenja parkova, čišćenja vodotokova i trasa dalekovoda, te održavanja zelenih površina i hortikulturnih radova. Pepeo dobiven iz drvene biomase može se koristiti u mješavinama na dva načina: Kao vezivna komponenta: U ovom slučaju, dodatak pepela potiče kemijske reakcije uslijed pucolanske aktivnosti. Ova primjena zahtijeva posebnu pažnju na kemijski sastav pepela, koji igra ključnu ulogu u učinkovitosti ovog procesa. Kao punilo: Pepeo se koristi za poboljšanje fizikalnih



svojstava mješavina povećanjem udjela finih čestica, što predstavlja neposredan način njegove primjene. Ovaj način primjene naglašava važnost granulometrijskog sastava pepela, koji je bitan za postizanje željenih karakteristika materijala [6].

## 2.1. Sastav pepela biomase

Fizikalna i kemijska svojstva pepela ovise o raznim čimbenicima, uključujući porijeklo drvene biomase, dijelove biljke od kojih pepeo potječe (kao što su korijenje, stablo, kora, grane i lišće), te lokaciji izvora. Količina mineralnih nečistoća, način prikupljanja i obrade biomase, kao i tehnologija i temperatura spaljivanja također utječu na ova svojstva. [6].

Kemijski sastav pepela ovisi o anorganskom sastavu biomase, dok mineraloški sastav pepela ovisi o samom procesu izgaranja. Stoga, čak i kada se spaljuje isti tip biomase, svojstva pepela mogu znatno varirati. Pored porijekla biomase, ključnu ulogu igra i temperatura izgaranja. Biomasa često sadrži štetne spojeve, uključujući teške metale kao što su Ag, Au, Be, B, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Rb, Se i Zn, koji mogu biti prisutni u većim koncentracijama nego u pepelu dobivenom spaljivanjem ugljena [2].

Gustoća pepela može se kretati između 150 i 1300 kg/m<sup>3</sup>, dok se uži raspon kreće od 230 do 770 kg/m<sup>3</sup>. Veličina čestica pepela obično varira između 150 i 250 µm. Drvni pepeo karakterizira nizak sadržaj organskih tvari, pri čemu udio organskih spojeva (OT) ili ugljika (C) ovisi o učinkovitosti izgaranja. Zbog visokih temperatura tijekom izgaranja, organska tvar gotovo potpuno sagorijeva, ostavljajući samo male količine elementarnog ugljika, koji se uglavnom javlja u obliku ugljena otporan na mikrobiološku razgradnju, što može pozitivno utjecati na fizikalna svojstva tla.

Sastav drvnog pepela većinom čine oksidi različitih elemenata, posebno Si (SiO<sub>2</sub>), Ca (CaO), Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) i Fe (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), kao i silikati i nitrati. Od makroelemenata, kalcij (Ca) čini najveći udio, s prosječnim vrijednostima od 10,6 % u pepelu iz poljoprivredne biomase i 30,8 % u drvnom pepelu. Slijedi kalij (K) s udjelom od 8,9 % u pepelu iz drvene biomase i 22,1 % u pepelu iz poljoprivredne biomase. Fosfor (P) je zastupljen u manjoj količini, prosječno 1,5 % u pepelu iz drvene biomase i 2,8 % u pepelu iz poljoprivredne biomase [7].

## 2.2. Utjecaj na okoliš

Drvni pepeo je otpadni materijal s promjenjivim kemijskim i mineraloškim sastavom, čija bi nekontrolirana upotreba mogla imati štetne posljedice po ljudsko zdravlje, tlo i vodu. Naime,

prisutnost hlapljivih i teških metala, kao što su arsen (As), kadmij (Cd), bakar (Cu), krom (Cr), živa (Hg), olovo (Pb) i cink (Zn), kao i organskih spojeva poput benzena i fenola te fine prašine s toksičnim i organskim komponentama, može predstavljati ozbiljan rizik za okoliš i zdravlje ljudi.

Zbog ovih rizika, korištenje pepela drvene biomase (PDB) ima značajan ekološki motiv. Osim što doprinosi smanjenju troškova zbrinjavanja, korištenje PDB-a također smanjuje energetske potrošnje koja bi inače bila potrebna za proizvodnju cementnog klinkera. Ovaj pristup pomaže u očuvanju prirodnih resursa, kao što su vapnenac, pijesak i prirodni agregati, te smanjuje emisiju stakleničkih plinova (CO<sub>2</sub>) koji se ispuštaju tijekom procesa proizvodnje klinkera [5].

Kada se procjenjuju potencijalni negativni učinci biopepela na okoliš, važno je uzeti u obzir više čimbenika, uključujući položaj sloja u konstrukciji (bilo da se nalazi u tlu ili kao dio kolničke konstrukcije), projektiranu debljinu sloja, vrstu primarnog veziva (bitumen ili cement) i količinu korištenog pepela. Materijali koji sadrže veziva, poput bitumena ili cementa, imaju znatno smanjenu propusnost jer okružuju slojeve pepela, sprječavajući prolazak vode. Najveći rizik od ispiranja štetnih elemenata u tlo i vodu javlja se tijekom gradnje, kada je sloj izložen kiši prije nego što bude adekvatno zaštićen. Ipak, drveni pepeo može se sigurno koristiti u konstrukcijama koje su prekrivene zaštitnim slojem [2].

### **2.3. Ekonomska opravdanost korištenja pepela biomase**

Iako volumen pepela nastalog spaljivanjem poljoprivredne biomase nije toliko velik kao onaj koji proizlazi iz izgaranja fosilnih goriva poput ugljena, njegovo odlaganje predstavlja značajan izazov. Stoga je ključno razviti učinkovite metode za njegovo upravljanje i primjenu. Trenutno se pepeo od poljoprivredne biomase odlaže na nesustavan način, većinom na komunalnim odlagalištima otpada, poljima i u šumama, često bez ikakvog nadzora, što može predstavljati potencijalni izvor rizika za okoliš i zdravlje ljudi.

Važnost pronalaska rješenja za ovaj problem potvrđuju podaci koji pokazuju da se u Hrvatskoj godišnje spali oko 676.786 tona drvene biomase, pri čemu nastaje oko 20.890 tona pepela. Uzimajući u obzir da se pepeo drvene biomase može koristiti kao zamjena za cement do maksimalnih 20 %, ta količina pepela mogla bi zadovoljiti potrebe za cementom u 20 betonskih postrojenja s prosječnim kapacitetom proizvodnje od 50.000 do 110.000 m<sup>3</sup> betona godišnje. Međutim, veći postotak zamjene nije preporučljiv jer bi mogao negativno utjecati na tehnička svojstva cementa i njegovih kompozita [1].

### **3. Moguće primjene pepela u građevinarstvu**

U svijetu su provedena istraživanja primjene biopepela u građevinarstvu, pri čemu su istraživani biopepeli koji se bitno razlikuju po porijeklu i svojstvima, kao i njihova primjena i svrha [2].

#### **3.1. Pepeo iz spaljivanja ugljena**

Sagorijevanje ugljena u elektranama širom svijeta generira velike količine različitih ostataka (ostatci iz sagorijevanja ugljena, CCRs), pri čemu su najzastupljeniji leteći pepeo (FA), pepeo iz donjeg dijela ugljena (CBA), šljaka iz kotlova i materijali za desulfurizaciju dimnih plinova (FGD). Ovi proizvodi obično su se upravljali kao otpadni materijali i odlagali na odlagališta. Međutim, mogu se koristiti u korisnim alternativnim primjenama, gdje se nazivaju proizvodima iz sagorijevanja ugljena (CCPs) umjesto CCRs.

Materijali FGD-a nastaju procesom koji ima za cilj minimiziranje emisija sumpor-dioksida ( $\text{SO}_2$ ) iz sustava ispušnih plinova kotla na ugljen. FGD materijali sastoje se od Ca-SO<sub>x</sub> spojeva i koriste se u raznim korisnim aplikacijama u građevinskoj industriji, kao što su izrada panela, blokova i žbuka.

Leteći pepeo je sitno podijeljeni ostatak proizveden sagorijevanjem mljevenog ili sitnog ugljena koji se prenosi dimnim plinovima. Čestice u letećem pepelu su sferne i imaju hidraulička i/ili pucolanska svojstva, ovisno o njihovom kemijskom sastavu. Leteći pepeo već je popularan proizvod u industriji betona i koristi se kao dodatak cementu već desetljećima. Ova korisna upotreba značajno je doprinijela održivosti betona, smanjujući upotrebu običnog Portland cementa u širokom spektru primjena. Zamjena letećeg pepela za OPC ima ekološke i ekonomske prednosti, a može poboljšati i tehnička svojstva betona, posebno ona koja se odnose na trajnost.

CBA se sastoji od aglomeriranih čestica pepela koje su prevelike da bi se nosile dimnim plinovima, stoga ostaju na dnu kotla. CBA se obično naziva tim nazivom kada dolazi iz tradicionalnih kotlova na sitni ugljen, gdje se prikuplja suhim procesom. Međutim, drugi ostaci, koji su grublji od letećeg pepela, proizvode se u raznim vrstama peći ili se prikupljaju različitim metodama, kao što su šljaka iz kotlova i ribnjaci. Svi ovi ostaci su granulirane prirode, što je ključna karakteristika vezana za njihovu upotrebu u građevinskom sektoru, jer se mogu koristiti kao agregati u materijalima na bazi cementa i drugim primjenama.

Koristi se opći termin "granularni proizvod iz sagorijevanja ugljena" (GCCP). Ovaj termin obuhvaća sve različite vrste granularnih nusproizvoda iz sagorijevanja ugljena koji se spominju u znanstvenim studijama kao zamjena za konvencionalne agregate, bez obzira na procese uključene u njihovu proizvodnju ili prikupljanje. GCCP čini približno 20 % ukupnog pepela proizvedenog u elektranama na ugljen (ostatak čini leteći pepeo). GCCP se koristi u mješavinama za asfaltno podlogu i kao osnovni granularni materijal za ceste i parkirališta. Glavne korisne primjene GCCP-a u Europskoj uniji su u rekultivaciji i obnovi. Međutim, uključivanje GCCP-a u materijale na bazi cementa rijetko se prakticira [8].

### **3.2. Primjeri građevina koje su izgrađene uz primjenu pepela iz spaljivanja ugljena u termoelektranama**



*Slika 7. " Puylaurent" [9]*

Puylaurent je jedna od najvećih lučnih brana u Francuskoj, a količina pepela korištena u cijeloj građevini iznosi 10.000 tona [9].



*Slika 8. Castor i Pollux Tornjevi u Francuskoj [9]*

Tornjevi su izgrađeni na betonskoj ploči, koja sadrži 180 kg cementa i 120 kg letećeg pepela po  $\text{m}^3$  [9].



*Slika 9. Burj Khalifa, Dubai, UAE [9]*

Kao najviša zgrada na svijetu, Burj Khalifa koristi mješavinu betona s visokim udjelom letećeg pepela kako bi se smanjila količina Portland cementa. Zbog ekstremnih klimatskih uvjeta u Dubaiju, leteći pepeo je poboljšao trajnosti betona i otpornosti na toplinsko skupljanje [9].

### **3.3. Stabilizacija tla i nosivih slojeva kolničke konstrukcije**

Tradicionalne metode stabilizacije slabo nosivih tala koriste vapno kod koherentnih materijala, dok se cement primjenjuje kod nekoherentnih materijala i onih koji predstavljaju prijelaz između ovih tipova. Ovaj pristup potiče istraživanja o mogućnostima korištenja ovih materijala. Stabilizacijska svojstva biopepela ovise o njegovom kemijskom sastavu i reaktivnosti određenih spojeva, ali su također uvjetovana vrstom osnovnog materijala koji se stabilizira. S obzirom na energetske i ekološke aspekte, primjena odgovarajuće vrste biopepela može značajno smanjiti troškove stabilizacije tla, budući da na troškove veziva otpada između 50 i 70 % ukupnih troškova. Kada se biopepeli koriste kao vezivo, ključno je da sadržavaju najmanje 20 % CaO kako bi se osigurala zadovoljavajuća vezivna svojstva. U protivnom, nužno je dodati aktivatore, poput cementa ili vapna. Osim udjela CaO, veličina čestica pepela također utječe na vezivna svojstva, pri čemu se veća reaktivnost i razvoj čvrstoće povezuju s većom specifičnom površinom sitnijih čestica [2].

### **3.4. Stabilizacijske mješavine koherentnih tala**

Koherentna tla stabiliziraju se dodavanjem vapna (kalcijevog hidroksida). Vapno reagira s mineralima gline, disocirajući u  $\text{Ca}^+$  i  $\text{OH}^-$  ione. Ova kemijska reakcija dovodi do zamjene određenih tipova iona koji oblažu koloidne čestice gline (kationske izmjene), pri čemu kalcij ulazi u strukturu gline i mijenja svojstva glinovitog tla. Laboratorijska istraživanja ukazuju na to da je pri primjeni biopepela kao sredstva za stabilizaciju ključno precizno odrediti optimalni udio biopepela koji poboljšava svojstva mješavina. Naime, dodatno povećanje udjela biopepela iznad optimalne razine može rezultirati pogoršanjem učinaka stabilizacije [2].

### **3.5. Stabilizirani nosivi slojevi**

U nosivim slojevima potencijalnu primjenu imaju i fini leteći pepeli i krupniji pepeli ložišta zbog dva mehanizma: poboljšanja nosivosti kroz mehaničku stabilizaciju i poboljšanje granulometrijskog sastava, ili zbog djelovanja biopepela kao hidrauličnog veziva. Laboratorijska ispitivanja drvnih pepela, kao i pepela nastalog spaljivanjem otpada iz tvornica papira, pokazuju zadovoljavajuće vrijednosti, te je njihova primjena značajna. Naime, biopepeli reagiraju s vlagom

i počinju vezivati, pa ako se planiraju koristiti kao vezivo kasnije, treba ih pravilno skladištiti na suhom. Biopepeo ložišta moguće je upotrebljavati i kao zamjenu za agregat, ako to zadovoljava njegova granulometrija [2].

**Tablica 2.** Prikaz moguće primjene biopepela u cestogradnji prema istraživanjima [2]

Primjena	Funkcija	Vrsta
Stabilizacija koherentnog materijala	Djelomična ili potpuna zamjena za vezivo	Drvni pepeo Pepeo iz proizvodnje maslinova ulja Pepeo rižinih ljuski
Mehanička stabilizacija nevezanog materijala	Sitnozrnati agregat	Drvni pepeo
Vezani nosivi slojevi	Vezivo	Pepeo od drveta, treseta i otpada iz tvornice papira
	Agregat	Pepeo ložišta od drveta i ostataka proizvodnje maslinova ulja
Vruće asfaltne mješavine	Punilo	Pepeo rižinih ljuski Pepeo poljoprivrednih usjeva (slama)
Konstruktivski betoni	Djelomična zamjena za cement	Pepeo rižinih ljuski
Nearmirani i betoni niže kvalitete	Punilo ili zamjena za agregat	Pepeo od drveta, maslina i druge biomase

## 4. Geopolimeri

Geopolimeri se dobivaju aktivacijom alumosilikatnih materijala poznatih kao prekursori s alkalnim aktivatorom [10].

### 4.1. Svojstva geopolimera na bazi metakaolina

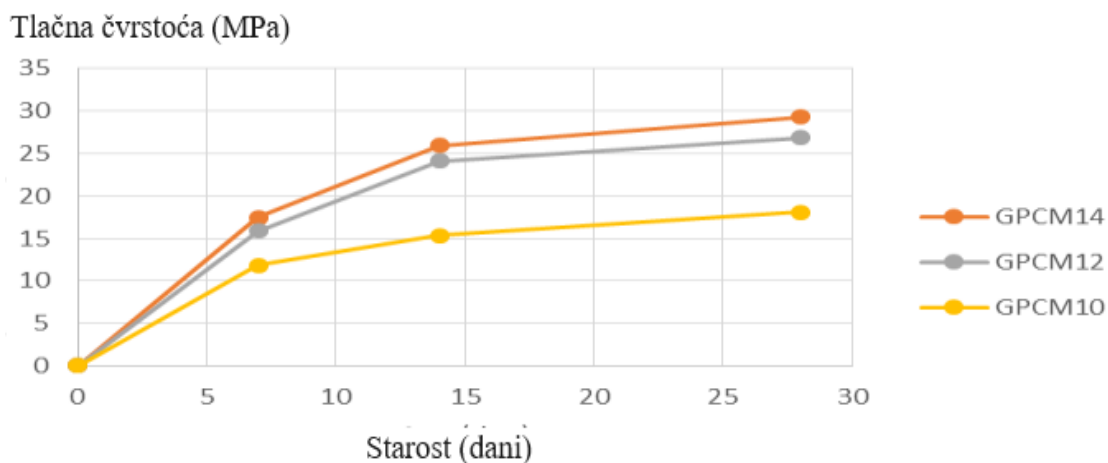
Herwani i dr.[11] u svom istraživanju proizvode geopolimerni beton iz letećeg pepela (prekursor) a kao alkalni aktivator koriste mješavine 10, 12 i 14 molarne otopine NaOH (natrij hidroksid) i Na<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (vodeno staklo). Sa svakom kombinacijom ovih dviju alkalija (ukupno 3 kombinacije) su izradili po dvije mješavine betona, jednu kruće konzistencije (Mješavina 1) a drugu više plastične konzistencije (Mješavina 2), čiji je sastav prikazan Tablicom 3.

*Tablica 3. Sastav mješavina geopolimernih betona [11]*

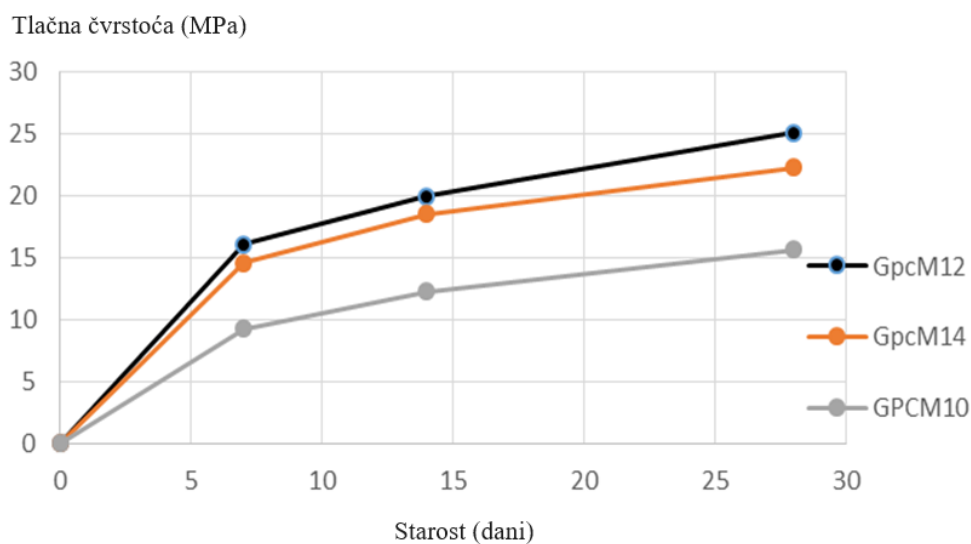
Komponente	Mješavina 1 (M)	Mješavina 2 (M2)
Leteći pepeo	450	410
NaOH otopine (10, 12, 14 M)	80	110
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> otopina	120	120
Superplastifikator	9	8,2
Voda	-	2,3
Pijesak	600	521,8
Drobljeni agregat 4,5-19,5 mm	1200	1142,7

Iz svake mješavine geopolimernog betona izradili su po 9 cilindričnih uzoraka promjera 100 mm i visine 200 mm koje su njegovali pri sobnoj temperaturi a potom im ispitali tlačne čvrstoće u starosti 7, 14 i 28 dana. Pri svakoj starosti uzoraka ispitali su po tri uzorka i iz dobivenih tlačnih čvrstoća izračunali srednju vrijednost. Razvoj tlačnih čvrstoća za mješavinu M1 je prikazana Slikom 10, za mješavinu M2 Slikom 11. Slika 12 prikazuje usporedbu čvrstoća mješavina M1 i M2 u starosti 28 dana s obzirom na molarnost otopine NaOH.

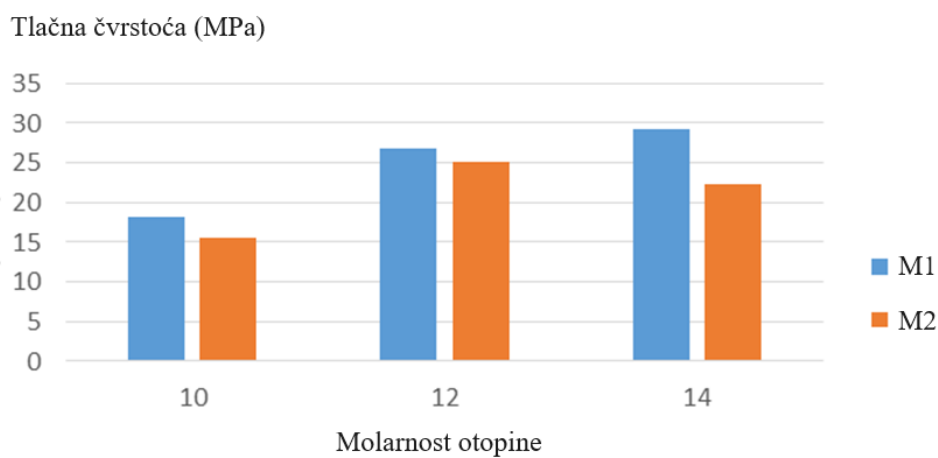




*Slika 10.* Razvoj čvrstoće u danima kod mješavine M1 ovisno o molarnosti NaOH otopine [11]



*Slika 11.* Razvoj čvrstoće u danima kod mješavine M2 ovisno o molarnosti NaOH otopine [11]



*Slika 12.* Usporedba čvrstoća mješavina M1 i M2 pri 28 dana starosti uzorka ovisno o molarnosti NaOH otopine [11]

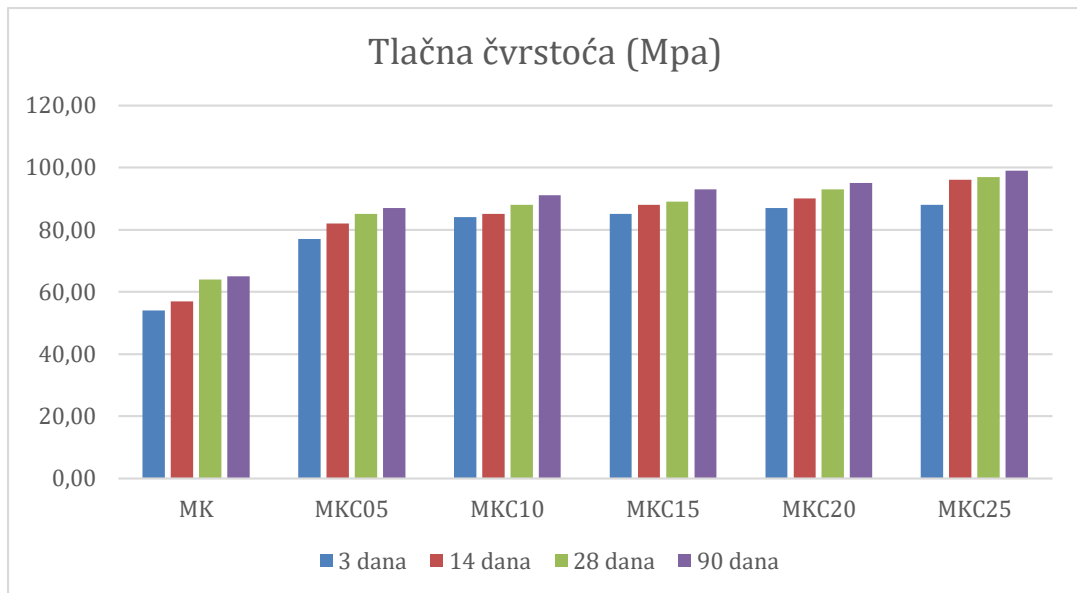
Iz prikazanih slika je vidljivo da kod mješavine M1 najbolju čvrstoću u vremenu razvija mješavina s 14 molarnom otopinom NaOH (Slika 10) dok kod mješavine M2 najbolju čvrstoću u vremenu razvija mješavina s 12 molarnom otopinom NaOH (Slika 11). Mješavina 2 generalno ostvaruje niže vrijednosti tlačnih čvrstoća u svim starostima pa i u starosti od 28 dana (Slika 12). Autori zaključuju da osim molarnosti alkalne otopine na razvoj čvrstoće ima ulogu i dodatak vode u mješavini geopolimernog betona tako da dodana voda negativno utječe na čvrstoću betona. Ipak, uvidom u Tablicu 3 se opaža da mješavina M2 ima manju količinu letećeg pepela (veziva) u sebi pa se niža tlačna čvrstoća treba djelomično i time obrazložiti [11].

Karatas i dr. [12] su u svom istraživanju kao prekursor koristili metakaolin kojemu su dodavali 0, 5, 10, 15, 20, 25 % Portland cementa kako je to prikazano Tablicom 4. Kao alkalni aktivator su koristili mješavinu otopina natrij hidroksida i natrij silikata u količini 65 % na masu prekursora. Također, u mješavinama su koristili superplastifikator u iznosu 2 % na masu prekursora.

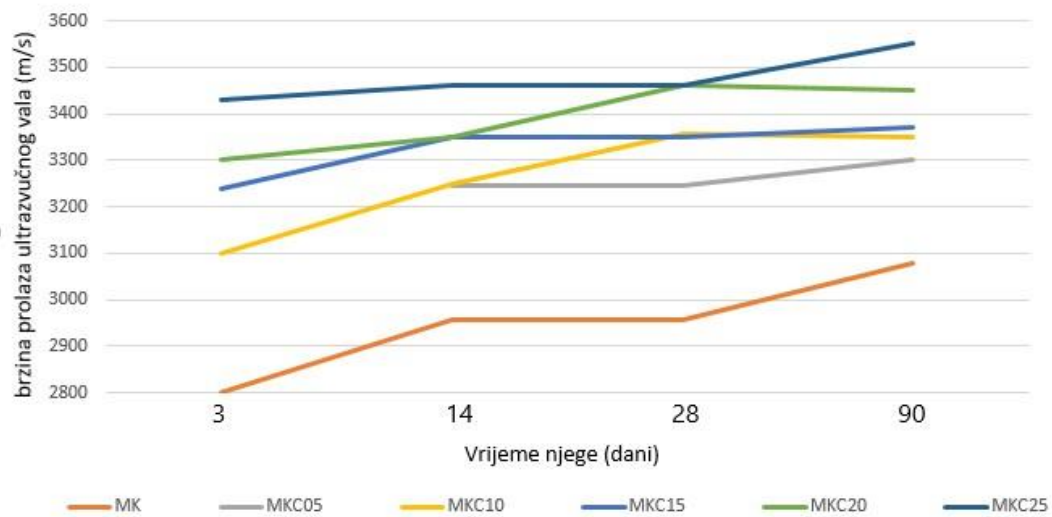
**Tablica 4.** Sastav pripremljenih mješavina [12]

Formula	Zamjena (težinski)		SiO <sub>2</sub> /Na	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> /NaC	L/S	SP (%)
	MK	PC				
MK	100	-	3,1	3	0,65	2
MKC05	95	5	3,1	3	0,65	2
MKC10	90	10	3,1	3	0,65	2
MKC15	85	15	3,1	3	0,65	2
MKC20	80	20	3,1	3	0,65	2
MKC25	75	25	3,1	3	0,65	2

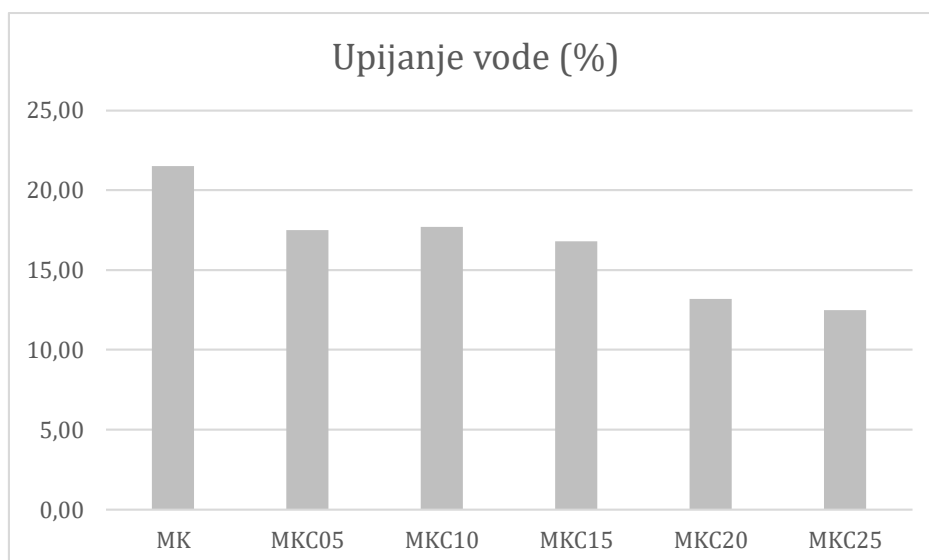
Iz svih pripremljenih mješavina su izradili uzorke 50 x 50 x 50 mm koje su u kalupu njegovali pri 70 °C u trajanju od 72 sata. Nakon toga su uzorci izvađeni iz kalupa i njegovani na sobnoj temperaturi do trenutka ispitivanja. Na uzorcima su se ispitivali tlačna čvrstoća i brzina prolaza ultrazvučnog vala u starosti uzoraka od 3, 14, 28 i 90 dana te upijanje vode na uzorcima starim 28 dana. Dobiveni rezultati su prikazani Slikama 13 do 15.



**Slika 13.** Tlačna čvrstoća uzoraka u starosti od 3, 14, 28 i 90 dana [12]



**Slika 14.** Brzina prolaska ultrazvučnog vala na uzorcima starosti 3, 14, 28 i 90 dana [12]



*Slika 15. Upijanje vode kod uzoraka starih 28 dana [12]*

Iz Slike 13 je vidljivo da s porastom udjela Portland cementa u mješavinama rastu i tlačne čvrstoće uzoraka u svim starostima uzoraka te tako najbolje tlačne čvrstoće ostvaruje mješavina MKC25 a najlošije MK. Brzina prolaska ultrazvučnog vala je direktno povezana sa kvalitetom mješavine tako da viša brzina prolaska ultrazvučnog vala znači bolju kvalitetu mješavine. Najveće brzine prolaska ultrazvučnog vala pri svim starostima je opet postigla mješavina MKC25 a najmanje mješavina MK (Slika 14) te je ovo u potpunom skladu s rezultatima tlačne čvrstoće. Najveće upijanje vode je postigla mješavina MK a najmanje MKC25 (Slika 15). Zaključak je da povećanje udjela Portland cementa u geopolimeru poboljšava kvalitetu/tlačnu čvrstoću geopolimera i smanjuje upijanje vode a time i poboljšava otpornost geopolimera na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [12].

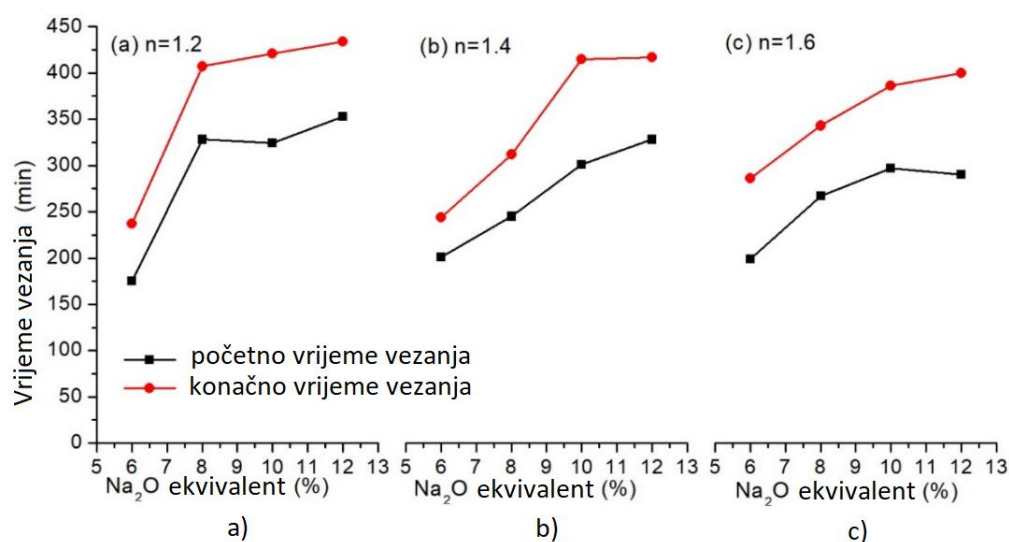
#### **4.2. Svojstva geopolimera na bazi letećeg pepela i troske**

Liu i dr.[13] u svom istražianju deponirani leteći pepeo niske kvalitete i trosku aktiviraju natrijevim silikatom (vodenim staklom) i natrij hidroksidom kako bi istražili mogućnost pripreme održivog geopolimera na bazi letećeg pepela na sobnoj temperaturi. Kao prekursor je korišten leteći pepeo (FA) i troska (GGBS) u omjerima 80:20, 75:25 i 70:30. Alkalna otopina je napravljena tako da je natrijevom silikatu modula n (molarni omjer  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) od 1,2, 1,4 i 1,6 dodan natrij hidroksid i voda. Količina vode je određena na temelju  $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalenta (korišten ekvivalenti od 6, 8, 10 i 12 %) te usvojenih omjera vode i prekursora od 0,35, 0,4, 0,45 i 0,5. Navedeno je prikazano Tablicom 5.

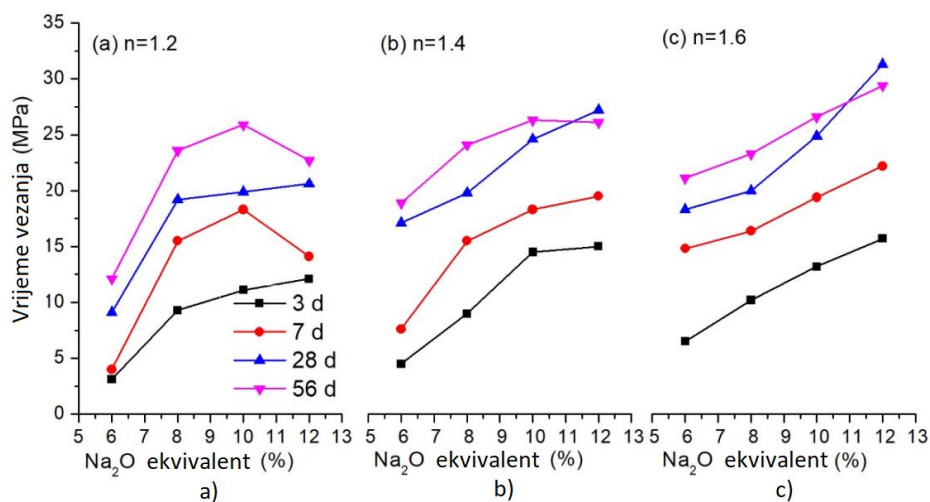
**Tablica 5.** Detalji mješavina geopolimera [13]

Čimbenici	Vrijednosti
sadržaj GGBS	20 %, 25 % i 30 %
Modul alkalne otopine (n)	n = 1,2, 1,4 i 1,6 %,
Sadržaj Na <sub>2</sub> O (omjer mase čvrstih materijala)	8 %, 10 % i 12 %
Omjer vode i prekursora (w/s)	0,35, 0,40, 0,45 i 0,50

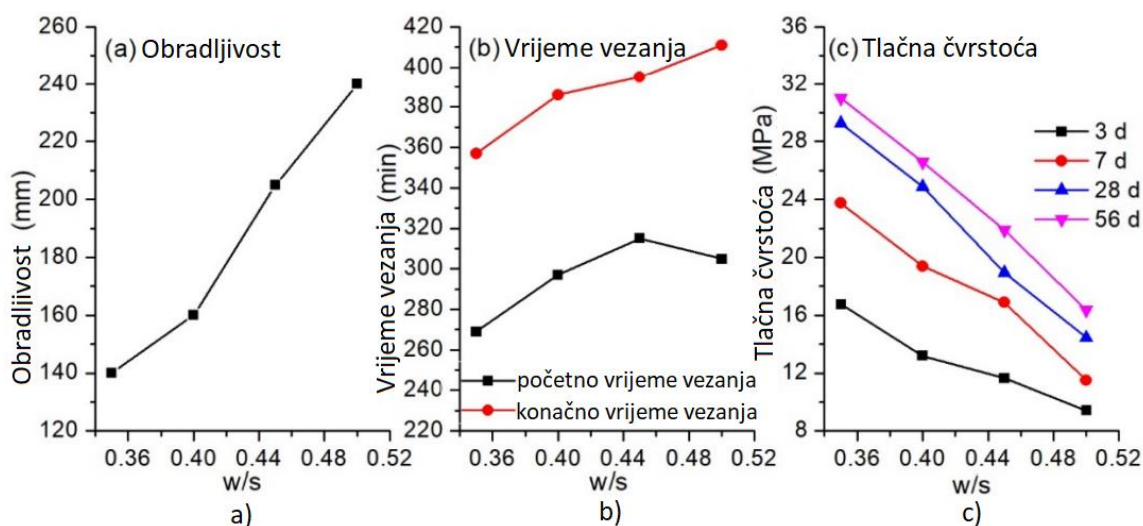
Na tako pripremljenim pastama geopolimera su mjerili vrijeme vezanja (početak i kraj vezanja) i obradljivost u svježem stanju te tlačnu čvrstoću u očvrslom stanju. Za ispitivanje tlačne čvrstoće su priredili uzorke izmjera 40 x 40 x 40 mm te ih njegovali 1 dan u kalupu pri 95% vlage i 20 °C i ostalo vrijeme do trenutka ispitivanja u vodi. Tlačna čvrstoća uzorka je ispitana u starosti uzorka od 3, 7, 28 i 56 dana. Slika 16 prikazuje utjecaj Na<sub>2</sub>O ekvivalenta iz alkalne otopine za različite module n na vrijeme vezanja geopolimera. Slika 17 prikazuje utjecaj Na<sub>2</sub>O ekvivalenta iz alkalne otopine za različite module n na tlačnu čvrstoću geopolimera. Slika 18 prikazuje utjecaj omjera vode i prekursora na obradljivost, vrijeme vezanja i tlačne čvrstoće uzoraka geopolimera. Slika 19 prikazuje utjecaj udjela troske u ukupnoj masi prekursora na vrijeme vezanja i tlačnu čvrstoću uzoraka geopolimera.



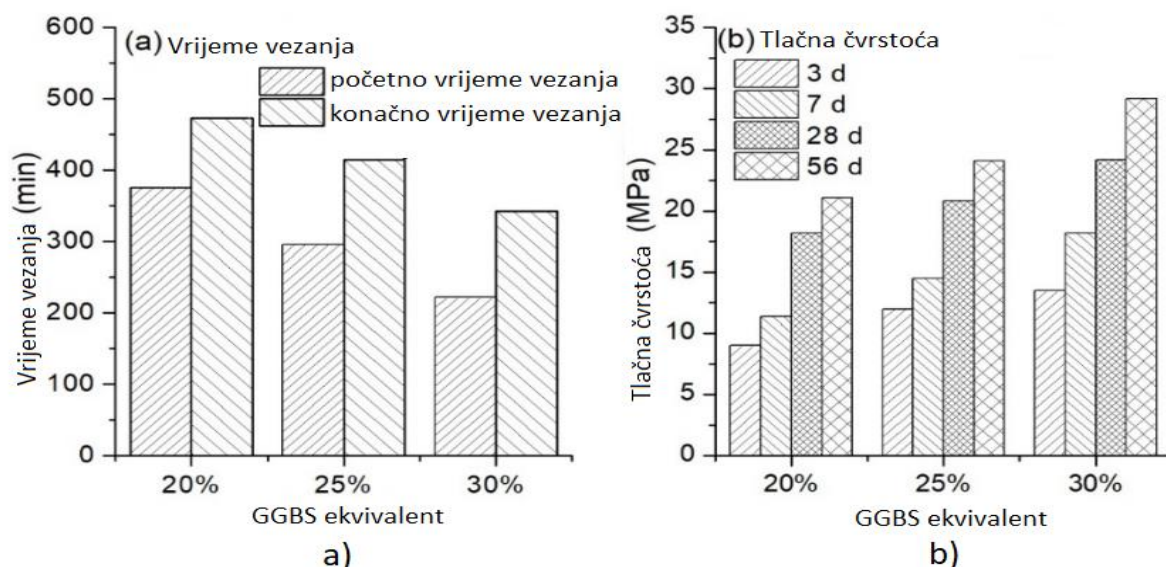
**Slika 16.** Vrijeme vezanja FA-GGBS hibridnog veziva aktiviranog alkalijском otopinom (sadržaj GGBS = 25 %, omjer voda/prekursor = 0,4): (a) modul vodenog stakla n = 1,2; (b) modul vodenog stakla n = 1,4; (c) modul vodenog stakla n = 1,6 [13]



**Slika 17.** Tlačna čvrstoća alkalijski aktiviranog FA-GGBS hibridnog veziva aktiviranog alkalijskom otopinom (sadržaj GGBS = 25 %, omjer voda/prekursor = 0,4): (a) modul vodenog stakla  $n = 1,2$ ; (b) modul vodenog stakla  $n = 1,4$ ; (c) modul vodenog stakla  $n = 1,6$  [13]



**Slika 18.** Svojstva alkalijski aktiviranog FA-GGBS hibridnog veziva s različitim omjerima voda/prekursor (sadržaj GGBS = 25 %, Na<sub>2</sub>O ekvivalent = 10 %,  $n = 1,6$ ): (a) obradljivost; (b) vrijeme vezanja; (c) tlačna čvrstoća [13]



**Slika 19.** Utjecaj sadržaja troske na: (a) vrijeme vezanja i (b) tlačnu čvrstoću alkalno aktiviranog FA-GGBS hibridnog veziva ( $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalent = 10 %,  $n = 1,4$  i  $w/s = 0,4$ ) [13].

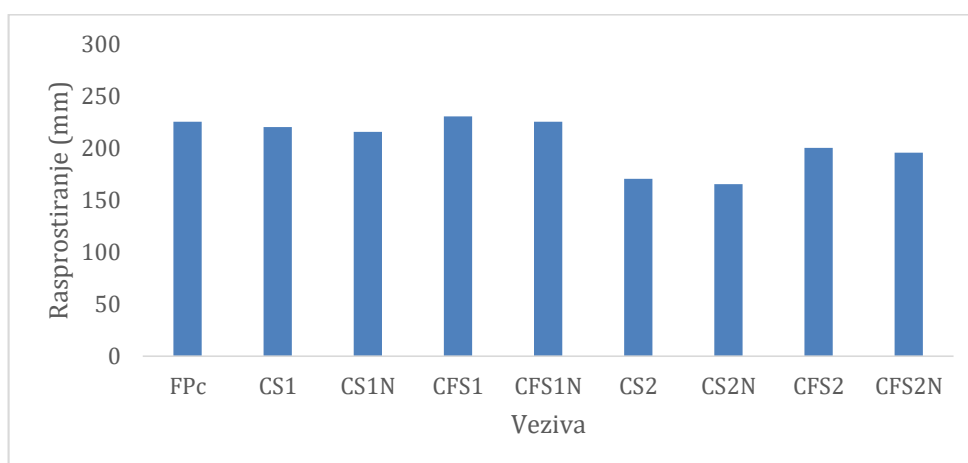
Iz Slike 16 je vidljivo da vezanje najprije započinje (početak vezanja) i završava (kraj vezanja) kod geopolimera sa  $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalentom od 6 % kod  $n=1,2$ . Općenito, i početak i kraj vezanja se povećavaju kako raste  $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalent. Porast  $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalenta najviše ima utjecaja kod geopolimera sa najmanjim  $n$  a najmanje kod geopolimera s najvećim  $n$ . Iz Slike 17 je vidljivo da veći  $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalent rezultira većom tlačnom čvrstoćom u svim starostima uzoraka (3, 7, 28 i 56 dana). Iz Slike 18 je vidljivo da veći omjer vode i prekursora rezultira boljom obradljivošću, kasnijim početkom i završetkom vezanja te očekivano, lošijom tlačnom čvrstoćom u svim starostima uzoraka. Iz Slike 19 je vidljivo da veći udio troske rezultira ranijim početkom i završetkom vezanja te većom tlačnom čvrstoćom u svim starostima uzoraka [13].

Sood i Hossain [14] su istraživali obradljivost i tlačne čvrstoće geopolimernih mješavina napravljenih s dvije vrste letećeg pepela (FA-C i FA-F), troskom (GGBFS) i Portland cementom (PC) kao prekursorima i dva različita praškasta alkalna aktivatora. Alkalni aktivator 1 je napravljena od kalcij hidroksida i natrij meta-silikata u omjeru 1:2,5 a alkalni aktivator 2 je napravljena od kalcij hidroksida i natrij sulfata u omjeru 2,5:1. Omjer vode i prekursora je bio 0,27 za mješavinu FPC te od 0,35 do 0,375 za sve ostale mješavine. Mješavina FPC je sadržavala 0,06 % superplastifikatora na masu cementa a sve ostale mješavine 2 % superplastifikatora na masu cementa. Detaljni prikaz mješavina je dan Tablicom 6.

**Tablica 6.** Prikaz sastava mješavina veziva [14]

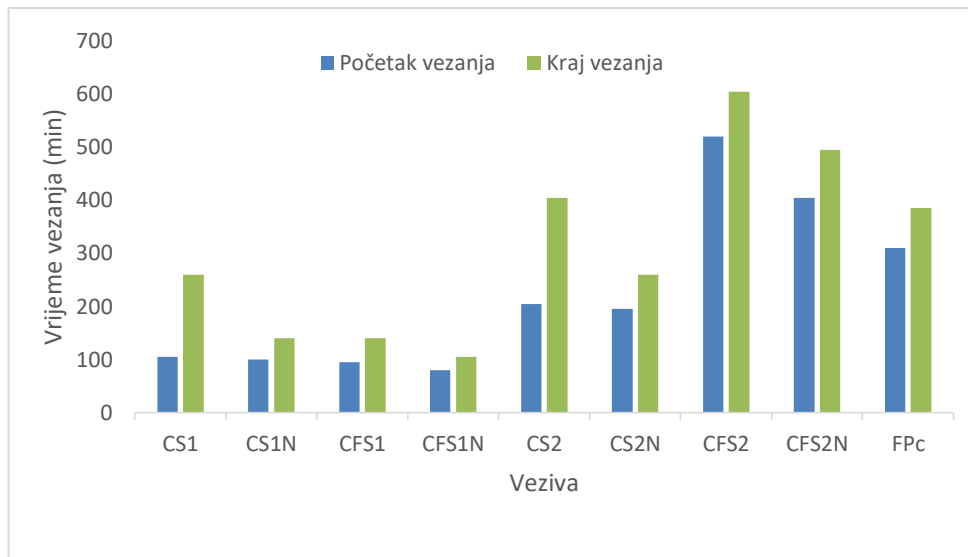
Mješavine veziva	SCM s	Pc	SCM s			28-dnevna tlačna čvrstoća (MPa)
			FA- C	FA-F	GGBF S	
CS1	1	0	0,55	0	0,45	47,8
CS1N	1	0	0,50	0	0,5	41,5
CFS1	1	0	0,25	0,35	0,4	41,3
CFS1N	1	0	0,25	0,25	0,5	38
CS2	1	0	0,55	0	0,45	56,3
CS2N	1	0	0,50	0	0,5	43,4
CFS2	1	0	0,25	0,35	0,4	52,2
CFS2N	1	0	0,25	0,25	0,5	39,1
FPc	1	0,45	0	0,55	0	40,3

Mješavinama geopolimernih veziva su u svježem stanju ispitani obradljivost i vrijeme vezanja (početak i kraj vezanja) te su iz istih mješavina za potrebe ispitivanja tlačne čvrstoće izrađeni uzorci kocaka brida 50 mm i njegovani pri 23 °C i 95% vlage 24 sata a nakon toga držani u vlažnoj komori do dana ispitivanja. Rezultati ispitivanja su prikazani Slikama 20 do 23.

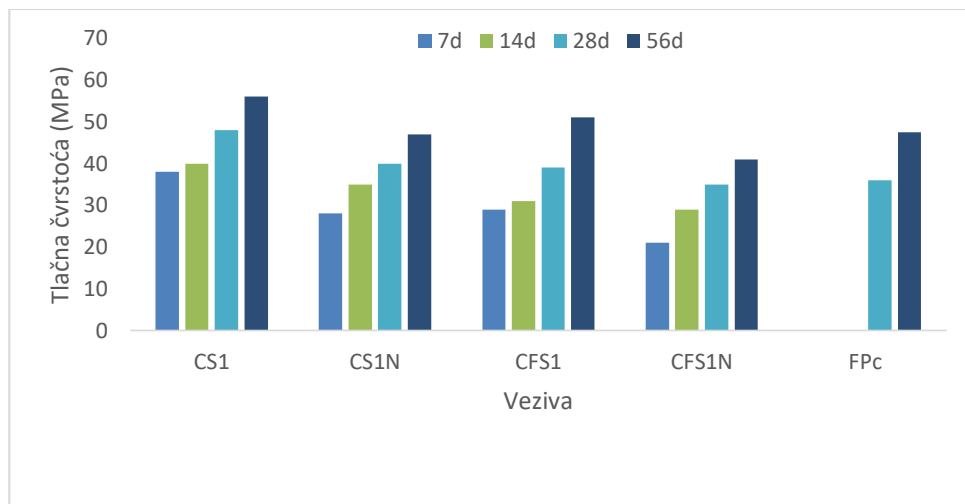


**Slika 20.** Obradivost geopolimernog veziva [14]

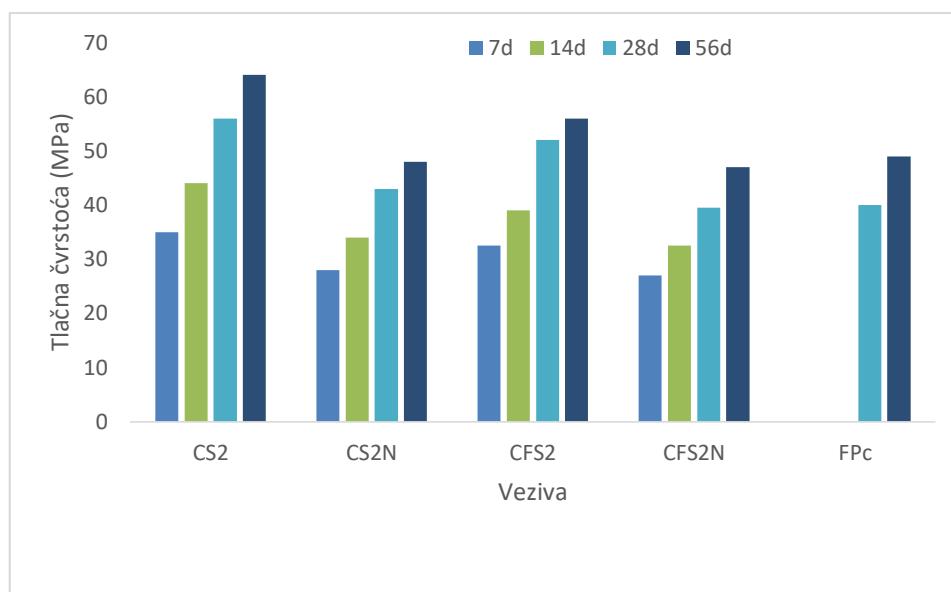




**Slika 21.** Vrijeme vezanja geopolimernih veziva [14]



**Slika 22.** Tlačna čvrstoća geopolimernog veziva u vremenu: utjecaj alkalnog aktivatora 1 [14]



*Slika 23. Tlačna čvrstoća geopolimernog veziva u vremenu: utjecaj alkalnog aktivatora 2 [14]*

Slika 20 pokazuje da najbolju obradljivost imaju mješavine CFS1, CFS1N i FPC dok najlošiju obradljivost imaju mješavine CS2 i CS2N. Općenito, alkalni aktivator 1 rezultira boljom obradljivošću mješavina od alkalnog aktivatora 2 za istu mješavinu prekursora. Slika 21 pokazuje da alkalni aktivator 1 rezultira u mješavinama bržim početkom i krajem vezanja nego alkalni aktivator 2 za istu mješavinu prekursora. Najbrže vezanje ima mješavina CFS1N a najsporije CFS2. Slika 22 prikazuje kako alkalni aktivator 2 (Slika 23) rezultira boljim tlačnim čvrstoćama u svim starostima uzoraka (3, 14, 28 i 56 dana) od alkalnog aktivatora 1 (Slika 22) za istu mješavinu prekursora. Najveće vrijednosti tlačne čvrstoće ostvarile su mješavine CS1 i CS2 [14].

## **5. O betonu – sastav i svojstva**

Beton je drugi najviše konzumirani materijal na svijetu, s godišnjom potrošnjom od tri tone po osobi, a nadmašuje ga samo voda navode Gagg i drugi [13]. Kao ključni građevinski materijal, beton se koristi u infrastrukturi i sastoji se od tri glavne komponente: agregata (60–75 %), vode (14–20 %) i cementa (7–15 %). Proizvodnja betona doprinosi između 7 i 10 % globalnih emisija CO<sub>2</sub>, pri čemu Portland cement predstavlja značajan izvor tih emisija. Iako cement čini samo 10 do 15 % sastava betona, odgovoran je za većinu emisija ugljika zbog kemijskih reakcija koje se javljaju tijekom kalcinacije vapnenca. Industrijski otpadni materijali, poput drobljenog granularnog troska iz visokih peći (GGBS), mulja vapna (LS) i letećeg pepela (FA), mogu se koristiti kao zamjena za Portland cement u betonu. Mineralni aditivi su dodatni cementni materijali i mogu se koristiti samostalno ili u mješavinama betona. Navedeni dodatni cementni materijali ne samo da odgovaraju čvrstoći Portland cementa, već također poboljšavaju trajnost betona, čineći ga lakšim za obradu i jačim. FA je posebno popularan zbog svojih pucolanskih svojstava i obično zamjenjuje oko 30 % Portland cementa u betonu, što poboljšava njegove karakteristike [15].

### **5.1. Mikrobeton**

Mikrobeton je visoko učinkovit cementni materijal koji se proizvodi korištenjem mikroagregata i cementa u točno određenim omjerima. Zbog svojih izvanrednih svojstava, mikrobeton ima veliki potencijal za primjenu u konstrukcijskim popravcima postojećih građevinskih elemenata [16].

### **5.2. Anorganska veziva**

Anorganska mineralna veziva predstavljaju tvari koje, kada se pomiješaju s vodom, nakon određenog vremena formiraju građevinske materijale različitih svojstava, pri čemu kvaliteta tih materijala ovisi o njihovom mineraloško-kemijskom sastavu. Ova veziva se najčešće nalaze u praškastom stanju, a nakon miješanja s vodom stvaraju plastičnu pastu koja postupno očvrstne putem fizičkih i kemijskih procesa.

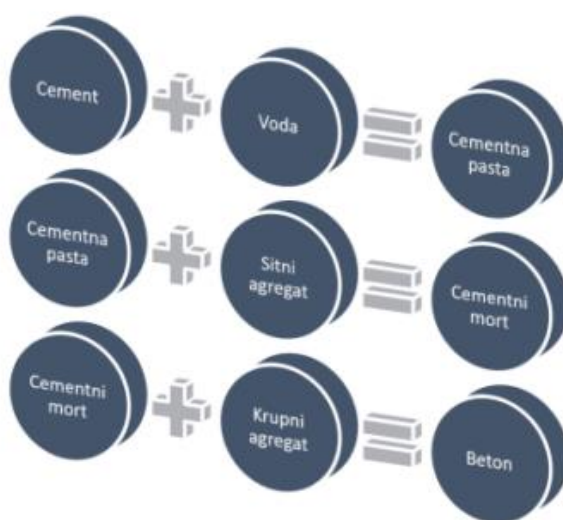
Upotreba veziva bez dodatka agregata rijetko se upotrebljavaju zbog ekonomske neisplativosti te zbog nepovoljnih svojstava, kao što su nestabilnost, skupljanje i smanjena postojanost volumena. Udio i vrsta agregata bitno utječu na svojstva cementnih kompozita, što je prikazano na slici 24.

Prema načinu očvršćivanja, anorganska mineralna veziva dijelimo na:

Nehidraulična (zračna) veziva – očvršćuju izlaganjem zraku, ali nisu otporna na vodu. Primjeri su ilovača, vapno, gips i vodeno staklo.

Hidraulična veziva – očvršćuju u kontaktu s vodom i otporna su na njezino djelovanje. Primjeri uključuju hidraulično vapno, Portland cement i različite vrste cementa.

Veziva se primarno koriste za povezivanje različitih građevinskih materijala, poput kamena i opeke, za izradu mortova te za proizvodnju betonskih [17].



*Slika 24. Odnos cementnih kompozita u ovisnosti o udjelu i vrsti agregata [17]*

### 5.2.1. Pucolanski materijali

Pucolanski materijali (pucolani) su silikatni ili alumosilikatni materijali koji sami po sebi imaju vrlo malo ili nimalo cementnih svojstava. Međutim, njihova ključna karakteristika je sposobnost reakcije s vapnom ili Portland cementom u prisutnosti vode. Konkretno,  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , koji se nalaze u pucolanskim materijalima, reagiraju s kalcijevim hidroksidom ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), stvarajući hidratizirane kalcij-silikatne i kalcij-aluminatne spojeve. Ovi spojevi nisu topljivi u vodi.

Pucolanski materijali dijele se na prirodne (kao što su vulkanski pepeo, dijatomejska zemlja) i umjetne (kao što su leteći pepeo, mikrosilika, metakaolin i sl.). Leteći pepeo je fino raspršeni produkt sagorijevanja ugljena u termoelektranama, izdvojen iz dimnih plinova, a veličina zrna varira od 0 do 1 mm. Radi se o heterogenom materijalu sastavljenom od čestica različitih fizičkih,

kemijskih, mineraloških i morfoloških svojstava, što ovisi o kvaliteti ugljena te uvjetima i tehnologiji sagorijevanja.

Zahvaljujući pucolanskim svojstvima letećeg pepela, ovaj materijal može se koristiti u proizvodnji hidrauličnih veziva i betona (posebno u proizvodnji Portland cementnog klinkera kao aktivna komponenta koja djelomično može zamijeniti cement, ili kao agregat u betonu). Da bi leteći pepeo djelomično zamijenio cement, mora ispuniti određene standarde u pogledu kemijskih i fizikalno-mehaničkih svojstava. Unatoč tome, većina letećeg pepela još uvijek nije pronašla svoju primjenu te se skladišti na odlagalištima pepela [18].

### **5.3. Agregat**

Agregat za beton, kao ključna komponenta u proizvodnji betonskih mješavina, ima značajnu ulogu u definiranju svojstava betona. Definiran kao skup čestica različitih veličina koje se miješaju s vezivom, agregat se dijeli na dva glavna tipa: prirodni i umjetni. Prirodni agregati, poput pijeska i šljunka, dobivaju se iz prirodnih izvora, dok se umjetni agregati koriste za specifične građevinske zahtjeve i mogu uključivati reciklirane materijale.

Funkcija agregata u betonskim mješavinama uključuje poboljšanje čvrstoće, otpornosti i stabilnosti gotovog proizvoda. Važno je istaknuti da veličina agregata značajno utječe na fizička svojstva betona, poput čvrstoće i poroznosti. Manji agregati omogućuju bolje ispunjavanje prostora i poboljšanu koheziju, dok veći agregati mogu povećati stabilnost i trajnost betona [17].

Tijekom prošlih stoljeća riječni pijesak intenzivno se koristio kao fini agregat u proizvodnji betona, što je dovelo do njegove velike eksploatacije. Međutim, kao neobnovljivi resurs, prekomjerna eksploatacija riječnog pijeska može dovesti do iscrpljivanja resursa, štete okolišu, pa čak i ugrožavanja stabilnosti riječnih obala i mostova. S uvođenjem politika koje ograničavaju iskopavanje riječnog pijeska u mnogim zemljama, građevinska industrija zahtijeva održive alternative riječnom pijesku.

Proizvedeni pijesak, također poznat kao pijesak od drobljenog kamena ili umjetni pijesak, proizvodi se drobljenjem vapnenca, granita, šljunka, kvarca itd. Nudi nekoliko prednosti, uključujući slobodu od regionalnih i sezonskih ograničenja, korištenje lokalnih materijala, nizak transport troškova i kvalitete koja se može kontrolirati. Zbog toga se široko koristi kao zamjena za

riječni pijesak u pripremi betona. Dodatno, u usporedbi s riječnim pijeskom, proizvedeni pijesak karakterizira hrapava površina, nepravilan oblik čestica i visok sadržaj kamenog praha [19].

### **5.3.1. Frakcioniranje agregata**

Svaki agregat ne posjeduje optimalan granulometrijski sastav za izradu betona, a agregati s različitim veličinama zrna skloni su segregaciji. Kako bi se ti nedostaci otklonili, agregat se razdvaja prema veličini zrna u više dijelova, pri čemu se svaki dio koji sadrži zrna određenih veličina naziva frakcijom. Granice između frakcija biraju se tako da svaka frakcija sadrži dovoljno različitih veličina zrna kako bi se smanjila mogućnost segregacije na prihvatljivu razinu. Manje frakcije općenito su manje sklone segregaciji, pa su granice razdvajanja u tom području šire. Frakcioniranje se u pravilu provodi uz pranje, iako se kod drobljenog agregata često izvodi i bez pranja. Broj frakcija ovisi o maksimalnoj veličini zrna agregata, dok se granice razdvajanja nazivaju donjom i gornjom nazivnom veličinom frakcije. Najveće zrno u betonu predstavlja gornju nazivnu veličinu najveće frakcije [14].

### **5.3.2. Ispitivanja i svojstva agregata**

Ispitivanja pokazuju da je tlačna čvrstoća nepovoljnija što je veća veličina zrna krupnog agregata, što se pripisuje slabijoj prijelaznoj zoni krupnog agregata veće veličine. Čestice cementa blizu površine grubog agregata imaju nižu gustoću i veći sadržaj vode, što povećava poroznost prijelazne zone. Također, krupni agregat veće veličine čestica lako akumulira više vode oko sebe i ima veći vodocementni faktor oko svoje površine [21].

### **5.3.3. Granulometrijski sastav agregata**

Granulometrijski sastav agregata odnosi se na podatke koji opisuju veličine zrna unutar agregata i količine svake vrste zrna. Taj se sastav ispituje prosijavanjem potpuno suhog uzorka agregata kroz standardizirana sita. Masa agregata koja prođe kroz svako sito izražava se kao postotak ukupne mase uzorka, a svaki rezultat naziva se prolaz.

Glavni nedostatak metode suhog prosijavanja jest taj što sitna zrna manja od 0,063 mm zbog privlačnih intermolekularnih sila čvrsto prijanjaju uz veća zrna, što ni najenergičnijim otresanjem nije moguće spriječiti. To može rezultirati manjim prolazom kroz sito od stvarnog. Kada se

prosijavanje vrši uz pomoć pranja mlaza vode, ove privlačne sile se neutraliziraju, čisteći površinu većih zrna, što omogućuje stvarni prolaz kroz sito. Primjerice, kod sita s otvorom od 0,125 mm, mokrim prosijavanjem može se dobiti gotovo dvostruko veći prolaz u odnosu na suho prosijavanje.

Sita su izrađena od mreže ili perforiranog lima s kvadratnim otvorima, pri čemu je veličina otvora definirana duljinom stranice kvadrata. Promjer žice i dimenzije lima propisani su standardima. Prema međunarodnom standardu ISO (International Standard Organization), za ispitivanje agregata koristi se standardna serija sita s otvorima u milimetrima: 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 31,5, 63 i 125. Osim ovih, postoje i sita s drugim standardnim dimenzijama, ali ona ne pripadaju standardnoj seriji. Za posljednja sita u seriji, kod svih proračuna, uzimaju se vrijednosti otvora od 32, 64 i 128 mm.

Najvažniji razlog za odabir manjih otvora kod posljednja tri sita u seriji leži u činjenici da broj zrna na tim sitima, pri istoj masi materijala, bude znatno manji nego na sitima s manjim otvorima. Zbog toga svako zrno ima veću mogućnost da se povoljno namjesti i lakše prođe kroz otvor. Posljedica toga je veći broj zrna koje su tek neznatno manje od otvora u usporedbi s otvorima manjim od 31,5 mm. Time se izjednačavaju uvjeti prosijavanja za sva sita u seriji [14].

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava agregata mogu se prikazati s pomoću dijagrama na kojem se prolaz kroz sito prikazuje na ordinati, dok se veličina otvora sita postavlja na apscisu. Kako bi dijagram bio pregledniji, veličine otvora sita prikazuju se u logaritamskom mjerilu, što znači da se umjesto stvarnih veličina otvora koristi logaritam tih vrijednosti. Preporučuje se korištenje sustava sita u kojem je otvor svakog sita dvostruko veći od prethodnog, jer se u logaritamskom mjerilu razmaci između oznaka za različite otvore tada prikazuju jednako. Ovakav sustav prvi je uveo Amerikanac Tyler, a njegova tvrtka "Tyler" i dalje je jedan od najvećih proizvođača laboratorijskih sita. Područje između dva susjedna sita unutar standardne serije naziva se razred veličine zrna [14].

## **5.4. Voda**

Voda za piće obično se smatra prikladnom za spravljanje betona, no prisutnost viših koncentracija natrija ili kalija može izazvati alkalno-agregatnu reakciju u betonu, što predstavlja potencijalni rizik. Voda koja nije pitka također može biti prikladna za spravljanje betona, pod uvjetom da joj je pH vrijednost između 6 i 8 te da ne sadrži soli poput klorida. Umjerena kiselost vode obično nema značajan utjecaj na svojstva betona, jer se kiseline neutraliziraju prisutnošću alkalnih oksida i vapna iz cementa. Međutim, veći sadržaj humusnih kiselina može usporiti proces vezanja i

smanjiti konačnu čvrstoću betona, stoga takvu vodu treba temeljito ispitati prije uporabe i usporediti s kriterijima za vodu za spravljanje betona. Koncentracije različitih tvari u vodi obično se izražavaju u ppm (parts per million).

Upotreba morske vode za spravljanje betona često je predmet rasprava. Morska voda sadrži otprilike 3,5 % soli, prvenstveno natrijevog klorida (NaCl), ali i magnezijevog klorida (MgCl) te magnezijevog sulfata (MgS). Ove soli ubrzavaju proces vezanja cementa i rani prirast čvrstoće, ali rezultiraju nešto manjom konačnom čvrstoćom betona. Također, betoni napravljeni s morskom vodom skloni su zadržavanju vlage i izlučivanju soli na površini, što dovodi do pojave eflorescencije. Zbog ovih razloga, morska voda nije pogodna za proizvodnju betona tamo gdje je važan izgled, a ne smije se koristiti ni za armirani beton jer povećava rizik od korozije armature. Osim kemijskog ispitivanja i uspoređivanja s kriterijima, prikladnost vode može se provjeriti i jednostavnim ispitivanjima u laboratoriju na gradilištu. U tu svrhu izrađuju se usporedne serije mortnih prizmica – jedna serija koristi vodu koja se provjerava, dok se druga serija izrađuje s poznatom kvalitetnom vodom, kao što je pitka voda. Ako se rezultati ispitivanja sedmodnevne čvrstoće prizmica iz obje serije ne razlikuje za više od 10%, smatra se da je testirana voda pogodna za spravljanje betona [22].

#### **5.4.1. Voda za njegu betona**

Voda koja se koristi za spravljanje betona obično je prikladna i za njegovo njegovanje, no postoje iznimke. Ako voda sadrži organske nečistoće ili okside željeza, a koristi se u većim količinama te se polagano slijeva preko površine betona, može izazvati nepoželjne tragove. Prekomjerno polijevanje, osobito vodom koja sadrži slobodni ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>) ili je vrlo mekana, može dovesti do površinskih oštećenja svježeg betona. Osim toga, njegovanje armiranog betona morskom vodom nije dozvoljeno zbog povećanog rizika od korozije armature, što može ozbiljno ugroziti trajnost konstrukcije [22].

#### **5.5. Svojstva svježeg betona**

Konzistencija, uz pokretljivost i mogućnost zbijanja (kompatibilnost), predstavlja ključnu mjeru obradljivosti građevinskih mješavina. Ona opisuje sposobnost materijala da se odupre trajnim promjenama oblika. Budući da je konzistencija definirana ovisnošću posmičnog naprezanja o tečenju, njezino mjerenje zahtijevalo bi složene uređaje i dugotrajna ispitivanja. Zbog toga se u praksi najčešće primjenjuju empirijske metode ispitivanja. Drugi razlog za primjenu empirijskih



metoda je taj da se konzistenciju potrebno ispitivati često, u kratkom vremenu od pripreme mješavine do njezine ugradnje. Konzistencija ovisi o udjelu sastojaka i njihovim svojstvima. Vlažnije mješavine općenito su obradljivije od suhih, no mješavine s istom konzistencijom mogu se razlikovati po obradljivosti [17].

Faktori koji utječu na rezultat ispitivanja slijeganja betona uključuju:

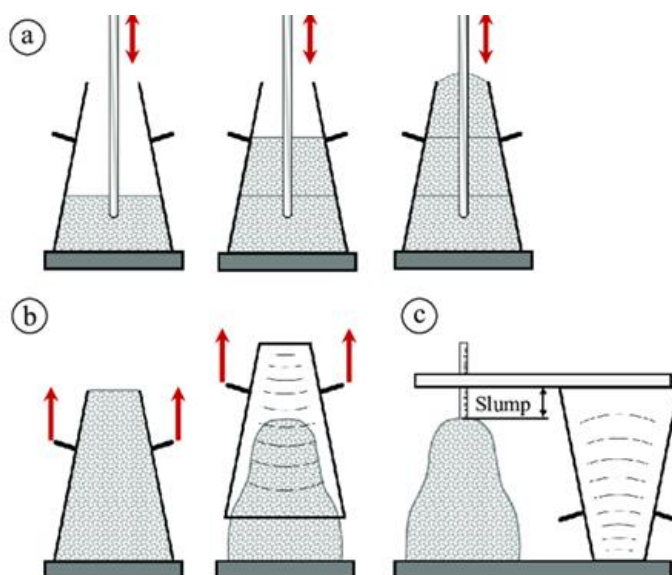
Karakteristike materijala u betonskoj mješavini: omjer frakcija agregata, finoća agregata, količina vlage, temperatura cementa te čistoća agregata.

Prisutnost aditiva: količina, vrsta i kombinacija aditiva, kao i njihova međusobna interakcija.

Zapremina zračnih pora u svježem betonu.

Količina slobodne vode u betonu.

Vrijeme proteklo od pripreme betona do ispitivanja [20].

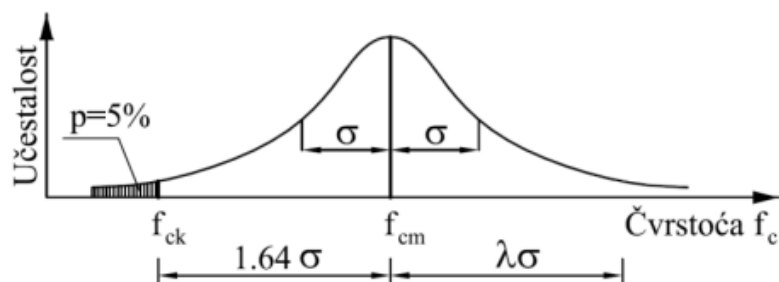


*Slika 25. Ispitivanje slijeganja betona a) Punjenje konusa svježom betonskom mješavinom b) Zaravnanje površine betona i podizanje kalupa c) Bilježenje razlike između početne i konačne visine betonskog uzorka [20]*

## 5.6. Tlačna čvrstoća

Karakteristična tlačna čvrstoća određuje se na osnovi računa vjerojatnosti i statistike korištenjem rezultata ispitivanja probnih uzoraka u obliku valjka dimenzija 150/300 mm ili, alternativno kocka brida 150 mm, starih 28 dana. Zahtijeva se da najmanje 95 % svih rezultata pokaže čvrstoću veću ili jednaku propisanoj klasi betona, odnosno da najviše 5 % rezultata može biti manje čvrstoće od

određene klase betona (5 % fraktil). Pretpostavka je da će statistička raspodjela rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće slijediti lognormalnu (Gaussovu) krivulju (slika 26).



*Slika 26. Gaussova (lognormalna) krivulja raspodjele rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće betona [23]*

Karakteristična čvrstoća dobivena ispitivanjem valjaka označava se kao  $f_{ck,cyl}$  ili skraćeno  $f_{ck}$ . Međutim, kako neke zemlje određuju karakterističnu čvrstoću betona preko rezultata dobivenih ispitivanjem kocki stranice 200 mm, označava se kao  $f_{ck,cube}$ . Stoga je potrebna tablica za pretvorbu ovih čvrstoća. Ako je potrebno poznavati srednju tlačnu čvrstoću betona, ona se može približno odrediti po izrazu:

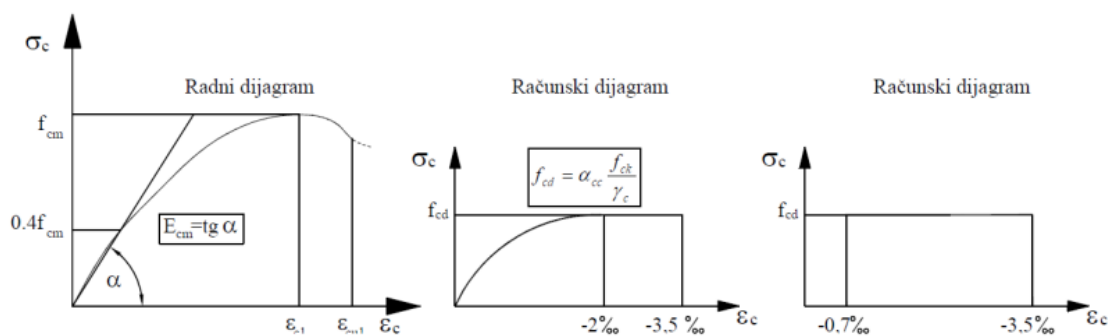
$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$f_{cm}$  je srednja vrijednost tlačne čvrstoće betona nakon 28 dana

*Tablica 7. Razredi betona [23]*

Razredi betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60
$f_{cm}$	20	24	28	33	38	43	48	53	58

Na slici 27. vrijednost  $f_{ck}$  predstavlja karakterističnu tlačnu čvrstoću betona dobivenu ispitivanjem valjka, dok  $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$  predstavlja računsku čvrstoću betona. Koeficijentom  $\alpha_{cc} = 1.0$  uzima se u obzir nepovoljno djelovanje dugotrajnog opterećenja i drugih nepovoljnih čimbenika na čvrstoću betona. Eurocode 2 predlaže dva računski dijagrama betona. Prvi je oblika pravokutnik plus parabola, a drugi oblika pravokutnika. Oba dijagrama imaju graničnu deformaciju  $\epsilon_{cu} = -3.5 \%$ . Kod centričnog tlaka granična deformacija ne smije prelaziti  $-2.0 \%$  [23].



Slika 27. Radni i računski dijagrami betona [23]

## 5.7. Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća betona definirana je prema obliku uzorka i metodi ispitivanja na vlak. Tako se razlikuje:

$f_{ct,ax}$  - vlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem uzorka na središnji vlak

$f_{ct,sp}$  - vlačna čvrstoća dobivena cijepanjem

$f_{ct,fl}$  - vlačna čvrstoća dobivena savijanjem uzorka.

Kako se za proračun koristi  $f_{ct,ax}$ , to su izrazi za pretvorbu:

$$f_{ct,ax} = 0.9 f_{ct,sp}$$

$$f_{ct,ax} = 0.5 f_{ct,fl}$$

Budući da vlačna čvrstoća u pravilu jako varira za neku klasu betona, a može biti značajna u analizi sigurnosti i trajnosti, uvodi se srednja vrijednost za vlačnu čvrstoću između donje granice za karakterističnu vlačnu čvrstoću  $f_{ctk,0.05}$  i gornje granice  $f_{ctk,0.95}$ , odnosno one s 5 %-tnim i druge s 95 %-tnim fraktilom. Ovisno o klasi betona, vlačne čvrstoće su dane u tablici 8 u  $N/mm^2$ .

Tablica 8. Vlačne čvrstoće betona [23]

Klasa betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ct,m}$	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1
$f_{ctk, 0,05}$	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9
$f_{ctk, 0,95}$	2.0	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3

Također daju se približni izrazi za procjenu srednje vlačne čvrstoće te karakterističnih:

$$f_{ct,m} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} \text{ za razred betona } \leq C50/60$$

$$f_{ct,m} = 2.12 \cdot \ln[1+(f_{cm} / 10)] \text{ za razred betona } > C50/60$$

$$f_{ctk, 0,05} = 0.70 \cdot f_{ct,m}$$

$$f_{ctk, 0,95} = 1.3 \cdot f_{ct,m}$$

Donja granična vrijednost za vlačnu čvrstoću  $f_{ctk,0.05}$  predstavlja veličinu koju će imati ili čak premašiti 95 % rezultata ispitivanja, a samo će 5 % biti ispod nje. Gornja granična vrijednost za vlačnu čvrstoću  $f_{ctk,0.95}$ , predstavlja veličinu koju će premašiti samo 5 % rezultata, a 95 % će dati vrijednost jednaku ili manju od nje.

Računska vlačna čvrstoća betona računa se po izrazu:  $f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk,0.05} / \gamma_c$

Kada se određuje deformacija betona pod opterećenjem, koristi se sekantni modul elastičnosti između naprezanja  $\sigma_c = 0$  i  $\sigma_c = 0.4 f_{ck}$ , a označuje se za beton normalne gustoće kao  $E_{cm}$ . Ako nema točnijeg podatka za sekantni modul elastičnosti betona, dopušta se približni izraz za njegovo prognoziranje:

$$E_{cm} = 9500 \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Vrijednosti dobivene s pomoću izraza zaokružene su i svrstane u tablicu. [23]

*Tablica 9. Moduli elastičnosti betona*

Razred betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$E_{cm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	26000	27500	29000	30500	32000	33500	35000	36000	37000

## 6. Eksperimentalno ispitivanje

Cilj ovog eksperimentalnog ispitivanja je odrediti potencijal primjene pepela biomase kao djelomične ili potpune zamjene cementu. Za potrebe ovog ispitivanja spravile su se referentne prizmice izrađene od mješavine koja je sadržavala 450 g cementa CEM I 52,5 R, 1350 g kvarcnog pijeska te 225 g vode.

Prizmice s pepelom su izrađene od mješavine 337,5 g cementa, 112,5 g pepela biomase i 225 g vode. Mješavine cementnih mortova su imale nazive C100P0 (100 % cementa) 380 ml cementa te 225 g vode. C50P50 (50 % cementa i 50 % pepela, mjereno volumno) te su pripremljene sa 1350 g pijeska, 450 g cementa Mješavine geopolimernih mortova su pripremljene sa 1350 g pijeska, 380 ml pepela biomase i sa mješavinom 10 molarne otopine KOH (ili NaOH) i otopine vodenog stakla ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) u omjeru 1:2,5. Mješavina geopolimernih mortova sa KOH je označena sa GP-KOH a sa NaOH je označena sa GP-NaOH

Svojstva betona ispitana su u svježem i očvrslom stanju. Uzorcima u svježem stanju ispitana konzistencija metodom potresnog stolića.

U nastavku je prikazan detaljan opis postupka ispitivanja i postignutih rezultata. Rezultati ispitivanja prizmica pružili su uvid u mehanička svojstva dobivenih materijala, poput tlačne čvrstoće i otpornosti na druge mehaničke utjecaje. Podaci su ukazali na određena poboljšanja ili promjene u odnosu na referentne mješavine, ovisno o primijenjenim dodacima ili modifikacijama.

### 6.1. Materijali

Prilikom izrade eksperimenta korišteni su sljedeći materijali:

- Kvarcni pijesak
- Pepeo biomase, drvna industrija „Spačva“, Vinkovci
- Cement CEM I 52,5 R
- 10 molarna otopina KOH (ili NaOH)
- Otopina vodenog stakla ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )
- Voda

### 6.2. Kemijski sastav cementa i pepela

Pepeo je prosijan na situ veličine otvora 1 mm kako bi mu se uklonile nečistoće (slika 28).



**Slika 28.** Prosijavanje pepela

Kemijski sastav cementa i pepela biomase proveden je prema HRN EN 196-2:2013 Metode ispitivanja cementa -- 2. dio: Kemijska analiza cementa [24] i prikazan Tablicom 10.

**Tablica 10.** Kemijski sastav cementa i pepela [24]

Značajke kvalitete/Materijal	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
Cement	0,18	<0,10	1,09	62,00	3,14	4,29	0,33	2,79	19,75	0,05	6,37
Pepeo biomase	0,98	<0,10	5,45	78,6	3,25	0,96	1,95	1,82	4,22	0,22	2,59

Iz kemijskog sastava se može vidjeti da pepeo ima visok udio CaO, čak veći od cementa, te se očekuje i da će pokazati pucolansku aktivnost.

### 6.3. Udio teških metala u pepelu

Udio teških metala u pepelu određen je prema ISO/TS 16996:2015 Solid biofuels -- Determination of elemental composition by X-ray fluorescence [25] i prikazan je Tablicom 11.

**Tablica 11.** Udio teških metala u pepelu biomase [25]

Značajke kvalitete	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	V	Zn	Hg
Pepeo biomase	28,8	2,12	<0,500	24,1	47,2	910	8,87	15,8	28,9	<0,500	18,6	196	1,05

Tablicom 12. propisane su dopuštene količine teških metala u poljoprivrednim tlima sukladno hrvatskom zakonodavstvu [26].

*Tablica 12. Dopuštene količine teških metala u tlu prema [26]*

<b>Teški metal/vrsta tla</b>	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>	<b>Ni</b>	<b>Hg</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>
Pjeskovito tlo	0-0,5	0-50	0-30	<b>0-0,5</b>	<b>0-60</b>	0-60	0-40
Muljevito ilovasto tlo	0,5-1	50-100	30-50	<b>0,5-1</b>	<b>60-150</b>	60-90	40-80
Ilovasto tlo	1,0-2,0	100-150	50-75	1,0-1,5	150-200	90-120	80-120

Usporedbom rezultata iz Tablice 11 sa dopuštenim vrijednostima teških metala u Tablici 12 je vidljivo da se ovakvi pepeli ne bi trebali rasprostirati po poljima kao poboljšivač tla jer sadrže prekomjernu količinu Hg i Zn za pjeskovita i muljevita ilovasta tla. Stoga je pametnije vezati ih u cementne kompozite.

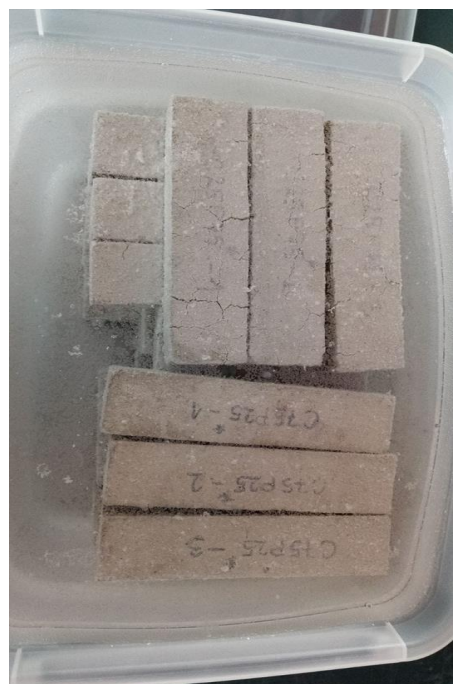
#### **6.4. Pucolanska aktivnost pepela**

Pepelu biomase je određena pucolanska aktivnost sukladno normi HRN EN 450-1:2013 Leteći pepeo za beton -- 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnost [27]. Sukladno navedenoj normi, izrade se cementne prizmice referentne mješavine i mješavine u kojoj je 25 % cementa zamijenjeno sa pepelom. Referentne prizmice su izrađene od mješavine 450 g cementa CEM I 52,5 R, 1350 g kvarcnog pijeska i 225 g vode. Prizmice sa pepelom su izrađene od mješavine 337,5 g cementa, 112,5 g pepela biomase i 225 g vode. Referentna mješavina i mješavina sa pepelom biomase su ugrađene u trodijelne kalupe (Slika 29). Nakon 24 sata, očvrslili uzorci prizmica su izvađeni iz kalupa, označeni i uronjeni u vodu na daljnju njegu (Slika 30).





*Slika 29. Mješavine ugrađene u kalupe*



*Slika 30. Prizmice u vodi*

U 28 danu starosti na prizmicama su određene tlačne čvrstoće prema HRN EN 1015-11:2019 Metode ispitivanja mortova za zide -- 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrslog morta [28]. Određivanje tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom prikazano je Slikom 31. a dobiveni rezultati ispitivanja i indeks pucolanske aktivnosti su prikazani Tablicom 13.



*Slika 31. Određivanje tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom*



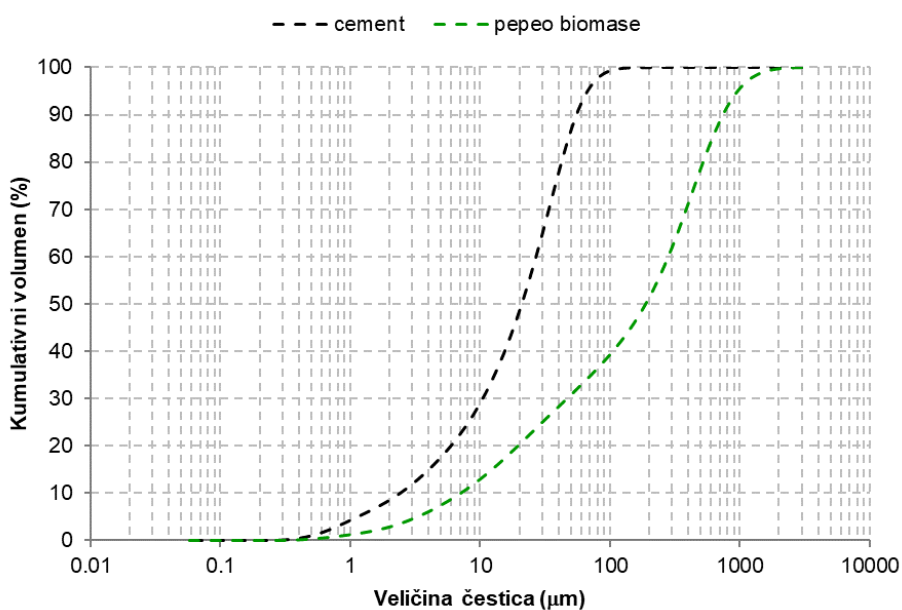
**Tablica 13.** Tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom

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	63,7
Prizmice sa pepelom biomase	16,53	18,25	17,13	17,3
<b>Indeks pucolanske aktivnosti</b>	PA=100*(17.30/63.20)=27 % za 90 dana starosti uzoraka			=75% za 28 dana, 85% za 90 dana

Iz rezultata prikazanih u Tablici 13 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 doprinosti razvoju čvrstoće morta već će na nju utjecati negativno.

## 6.5. Granulometrijska krivulja cementa i pepela

Granulometrijska krivulja cementa i pepela određeni su prema HRN ISO 13320:2021 Analiza veličine čestica -- Metode laserske difrakcije [29] i prikazani Slikom 32.



**Slika 32.** Granulometrijske krivulje cementa i pepela

Iz Slike 32. vidljivo je da je cement sitniji materijal od pepela. Npr. na situ veličine otvora 239  $\mu\text{m}$  prolazi 100 % cementa ali tek 55 % pepela biomase.

U nastavku su zamiješani cementni mortovi i geopolimerni mortovi. Mješavine cementnih mortova su imale nazive C100P0 (100 % cementa) i C50P50 (50 % cementa i 50 % pepela, mjereno volumno) te su pripremljene sa 1350 g pijeska, 450 g cementa (kod C100P0) tj. 380 ml cementa te 225 g vode. Mješavine geopolimernih mortova su pripremljene sa 1350 g pijeska, 380 ml pepela biomase i sa mješavinom 10 molarne otopine KOH (ili NaOH) i otopine vodenog stakla ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) u omjeru 1:2,5. Mješavina geopolimernih mortova sa KOH je označena sa GP-KOH a sa NaOH je označena sa GP-NaOH.



*Slika 33. 10 molarna otopina i otopina vodenog stakla*

## 6.6. Granulometrijski sastav

Ispitivanje granulometrijskog sastava provodi se nizu sita za frakciju agregata 0-4 mm. Sita su raspoređena tako da se na vrhu nalazi ono s najvećim otvorima, a na dnu s najmanjim. Nakon postavljanja, uređaj se pokreće kako bi izvršio prosijavanje. Po završetku prosijavanja, masa ostataka na svakom situ se mjeri i rezultati se unose u tablicu. Ukupna masa ostataka na svim sitima ( $M_2$ ) se zbraja, pri čemu je dozvoljeno da gubitak materijala tijekom prosijavanja ne prelazi 1 % početne mase uzorka, kako bi se osiguralo da je postupak valjan ( $M_2/M_1 > 99 \%$ ).

Rezultati prosijavanja prikazuju se u postotcima mase kao suma materijala koji je prošao kroz odgovarajuće sito. Iz tih postotaka mase (p), za pojedina sita, i dimenzija otvora sita, izrađuje se granulometrijska krivulja za dotičnu frakciju agregata.

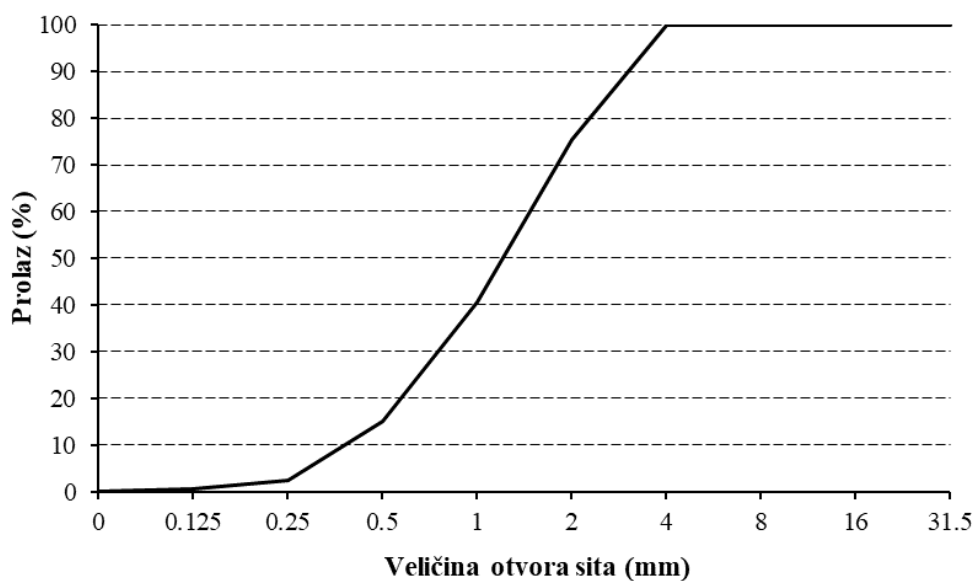
Agregat korišten za pripremu mortova bio je riječni pijesak, a njegova granulometrijska krivulja određena je prema normi HRN EN 933-1:2012 "Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sijanja". Proces prosijavanja prikazan je na Slici 34., dok su dobivena granulometrijska krivulja i podaci navedeni u Tablici 14 i Slici 35.



*Slika 34. Niz sita*

**Tablica 14.** Rezultati prosijavanja agregata frakcije 0-4 mm

Otvor sita (mm)	Ostatak na situ (g)	Prolaz kroz sito (g)	Prolaz kroz sito, p (%)
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		



*Slika 35. Granulometrijska krivulja pijeska*

## 6.7. Priprema mješavine betona



*Slika 36. Cement*



*Slika 37. Dodavanje vode*

Količine sastojaka za svaku mješavinu precizno su izmjerene na vagi, uz pažljivo rukovanje kako bi se izbjegli gubici vode i cementa. Miješanje je započeto što je moguće brže, uz istovremeno praćenje vremena trajanja procesa. Nakon prvih 30 sekundi miješanja, pijesak se postepeno dodavao tijekom sljedećih 30 sekundi. Po završetku miješanja, proces je zaustavljen te su

provedena daljnja ispitivanja konzistencije morta u svježem stanju. Mješavine morta zamiješane su u miješalici prikazanoj Slikom 38.



*Slika 38.* Miješalica za izradu mješavina morta

Na mješavinama svježeg cementnog 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):

Mort se stavlja u kalup u obliku krnjeg stošca, visine 20 cm, u dva sloja. Svaki sloj zbija se 10 puta. Nakon što se napuni kalup, uklanja se gornji dio koji služi za punjenje, a površina morta se poravnava do visine kalupa. Zatim se kalup podiže, a potresni stol, s pločom postavljenom na ekscentrat, pokreće se tako da se ploča diže i slobodno pada. Ova radnja ponavlja se 15 puta. Promjer rasprostiranja morta mjeri se u dva međusobno okomita smjera i izražava u milimetrima. Prosječna vrijednost ta dva mjerenja smatra se konzistencijom morta.

Određivanje konzistencije potresnim stolićem [31] prikazano je Slikom 39 rezultati ispitivanja konzistencije prikazani su Tablicom 15. Za geopolimerne mortove nije bilo moguće odrediti konzistenciju zbog izrazito brzog vezanja.



*Slika 39. Određivanje konzistencije potresnim stolićem*

**Tablica 15.** Konzistencije mortova

<b>Mort</b>	<b>Konzistencija (cm)</b>
C100P0	19,5
C50P50	15

Kao što je vidljivo iz Tablice 15. udio pepela smanjuje konzistencija tj. obradljivost morta. Ovo je očekivano s obzirom na to da pepeo ima veće upijanje vode od pijeska pa upije više vode iz mješavine morta čineći je manje obradivom.

Trodijelni kalup potrebno je temeljito očistiti i lagano premazati uljem za oplatu. Zatim se kalup puni mortom, a svaki sloj vibrira na vibracijskom stolu (slika 40) kako bi se osigurala bolja ugradnja morta i uklonio zarobljeni zrak. Površina morta poravnava se s rubom kalupa, a zatim prekriva plastičnom folijom kako bi se spriječio gubitak vode. Mješavine morta su ugrađene u trodijelne kalupe (Slika 41). Nakon 24 sata, očvršli uzorci prizmica vade se iz kalupa, označavaju i stavljaju u vodu (za cementne mortove) radi daljnje njege ili pak ostavljeni na zraku (geopolimerni mortovi) (Slika 42).





*Slika 40. Vibracijski stol*



*Slika 41. Mješavine morta ugrađene u kalupe*



*Slika 42. Prizmice geopolimernog morta*

## 6.8. Ispitivanje tlačne i vlačne 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 očvrstlog morta [28].

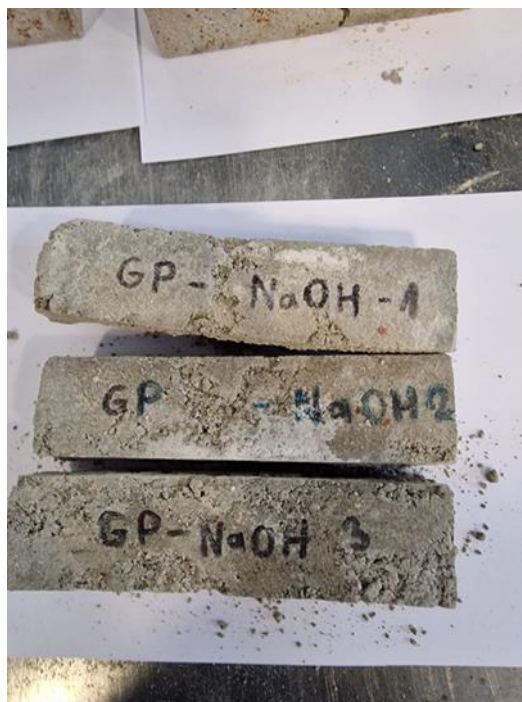
Određivanje vlačne i tlačne čvrstoće prizmica morta prikazano je Slikom 43 i 44 a dobiveni rezultati ispitivanja Tablicom 16 i Slikama 46 i 47. Uzorci GP-NaOH su bili vrlo loše zbijenosti (Slika 45) te izrazito nepravilnog poprečnog presjeka zbog čega im nije bilo moguće odrediti mehanička svojstva.



*Slika 43. Ispitivanje vlačne čvrstoće*



*Slika 44. Ispitivanje tlačne čvrstoće*

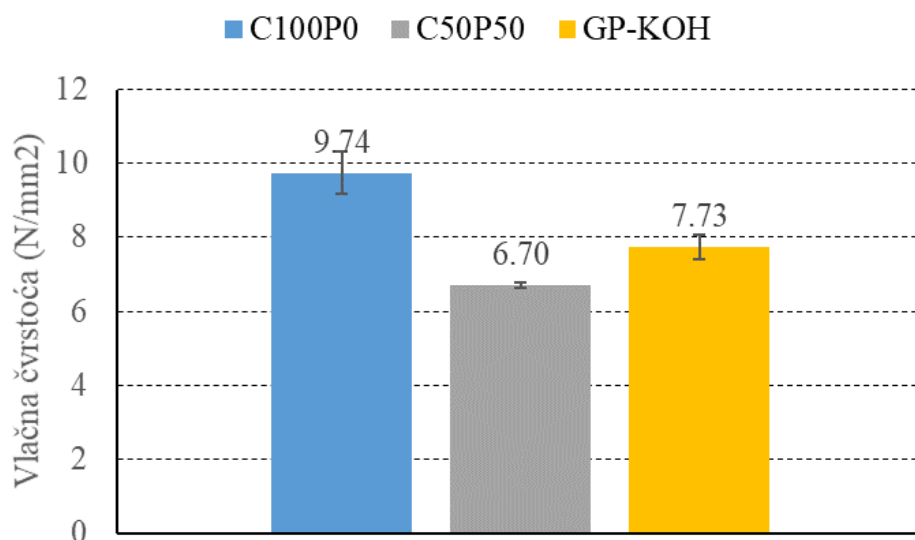


*Slika 45. Uzorci GP-NaOH*

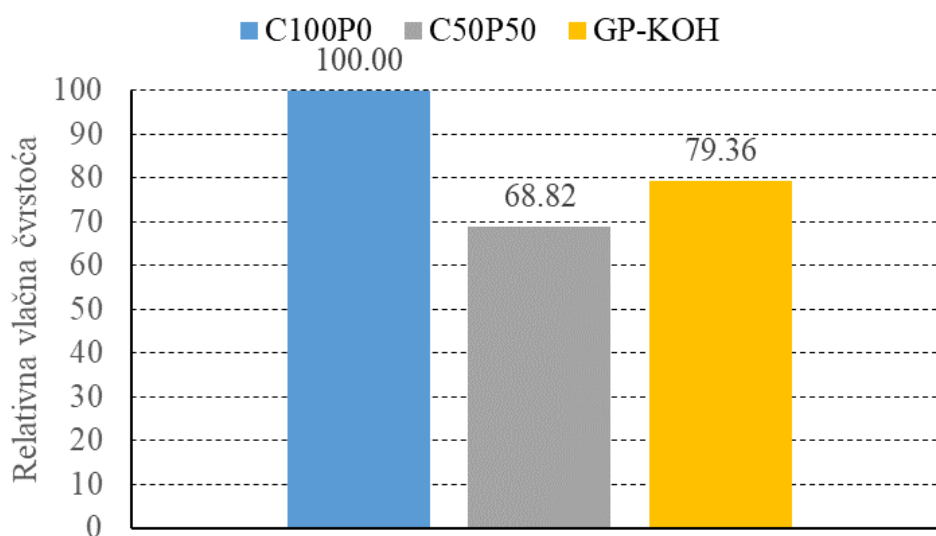


**Tablica 16.** Rezultati ispitivanja vlačnih i tlačnih čvrstoća mortova

Mort	Vlačna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> )		Tlačna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> )	
	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost
C100P0	9,49	9,74	52,53	52,55
			51,43	
	9,21		53,69	
	10,52			
C50P50	6,75	6,70	3,75	3,62
			3,52	
	6,76		3,6	
	6,6			
GP-KOH	7,54	7,73	5,1	5,26
			5,12	
	7,46		5,57	
	8,19			

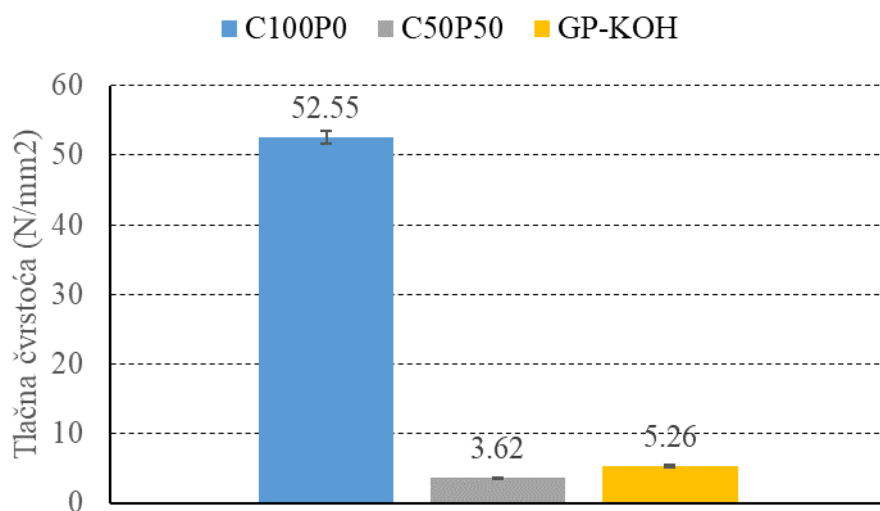


a) apsolutne vrijednosti

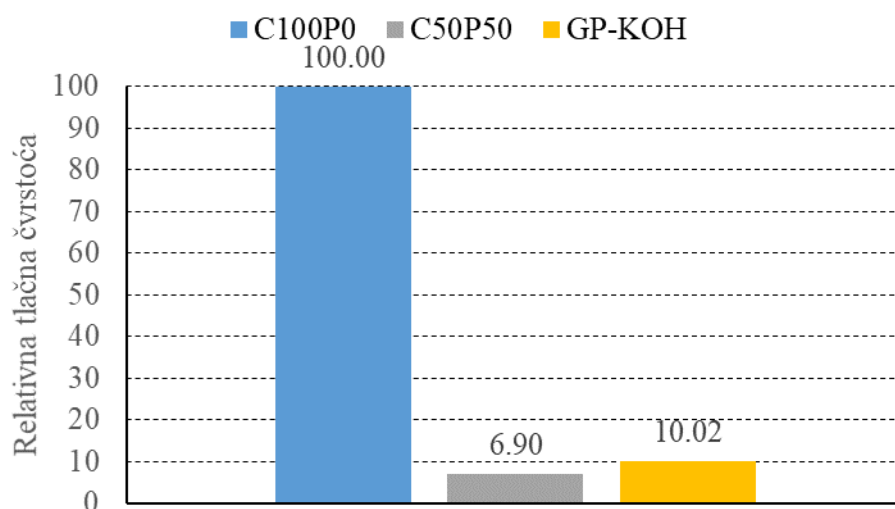


b) relativne vrijednosti

**Slika 46.** Rezultati ispitivanja vlačnih čvrstoća mortova



a) apsolutne vrijednosti



b) relativne vrijednosti

*Slika 47. Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća mortova*

Iz Slika 46 vidljivo je da pri udjelu pepela vlačna čvrstoća opada sa 9,74 MPa (C100P0) na 6,7 MPa (C50P50). Geopolimerni uzorak je ostvario čvrstoću od 7,73 MPa. Međutim, kod ispitivanja vlačne čvrstoće uzorka je opažen neobičan način sloma uzorka sa pepelom biomase. Naime, po nastanku prve pukotine preša je nastavljala sa unosom sile i pritom se odupirala o donju metalnu ploču preše. Stoga ovakvi rezultati za geopolimer nisu mjerodavni. Standardne devijacije prve dvije serije uzorka (C100P0 i C50P50) su manje od 10 % srednje vrijednosti što znači da su rezultati mjerodavni.

Uvidom u Sliku 47 vidljivo je da mješavina sa cementom (referentna mješavina) ima najveću tlačnu čvrstoću (52,55 MPa), dok je tlačna čvrstoća uzoraka sa 50 % pepela (C50P50) 3,62 MPa a geopolimernog morta (GP-KOH) 5,26 MPa. Za mortove za zidanje u seizmički aktivnim područjima prema HRN EN 1998-1:2011 (5) zahtjeva se tlačna čvrstoća od 5 MPa. Referentni mort (C100P0) i geopolimerni mort (GP-KOH) ostvaruju tu čvrstoću. Relativno gledajući (Slika 13b), mješavina C50P50 ostvaruje 6,9% a mješavina GP-KOH ostvaruje 10,02 % tlačne čvrstoće referentne mješavine (C100P0). Sve standardne devijacije su manje od 10 % srednje vrijednosti što znači da su rezultati mjerodavni.

## 7. Zaključak

U ovom radu istražen je potencijal primjene pepela drvene biomase kao djelomične ili potpune zamjene cementa u mikrobetonu. Biomasa, kao obnovljiv izvor energije, te pepeo, njezin nusproizvod, pokazali su mogućnost smanjenja upotrebe cementa i time pridonijeli smanjenju emisija CO<sub>2</sub> i otpada. Ispitivanja su pokazala da pepeo drvene biomase posjeduje određena pucolanska svojstva, no njegov učinak na vlačnu i tlačnu čvrstoću betona nije u potpunosti zadovoljavajući za potpunu zamjenu cementa.

Mješavine s većim udjelom pepela (C50P50) pokazale su značajno smanjenje tlačne i vlačne čvrstoće u usporedbi s referentnom cementnom mješavinom (C100P0), što ukazuje na potrebu za dodatnim istraživanjima i optimizacijom ovih mješavina. S druge strane, geopolimerni mortovi, posebno GP-KOH, pokazali su zadovoljavajuće rezultate u pogledu tlačne čvrstoće, čime se potvrđuje njihov potencijal za primjenu u određenim građevinskim aplikacijama.

Eksperimentalni rezultati potvrđuju potencijal geopolimernih mortova za specifične primjene, dok pepeo biomase može imati ograničenu primjenu u mješavinama betona gdje su potrebna visoka mehanička svojstva, no njegova uporaba kao djelomične zamjene cementa može pridonijeti razvoju održivih građevinskih materijala.

## Reference

- [1] Netinger Grubeša, Ivanka; Barišić, Ivana; Dokšanović, Tihomir; Šandrk Nukić, Ivana; Kralik, Davor; Glavaš, Hrvoje; Ivanović, Milan: Različiti aspekti primjene pepela biomase, 2021.
- [2] Zagvozda, M. ., Dimter, S., Rukavina, T., Grubeša, I. N.: Possibilities of bioash application in road building, GRAĐEVINAR, 70 (2018) 5, pp. 393-402, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2074.2017> 21.8.2024.
- [3] <https://regulator.hr/zanimljivosti/sto-je-biomasa-i-kako-se-koristi/> Što je biomasa i kako se koristi? 21.8.2024.
- [4][https://www.hkig.hr/docs/Opatija\\_2021/prezentacije/01web\\_prezentacije/Ceste/Potencijal%20primjene%20pepela%20iz%20drvne%20biomase%20u%20odr%C5%BEivog%20gradnji%20cesta.pdf](https://www.hkig.hr/docs/Opatija_2021/prezentacije/01web_prezentacije/Ceste/Potencijal%20primjene%20pepela%20iz%20drvne%20biomase%20u%20odr%C5%BEivog%20gradnji%20cesta.pdf) Potencijal primjene pepela iz drvne biomase u održivoj gradnji cesta 21.8.2024
- [5]<https://webgradnja.hr/clanci/razvoj-inovativnih-gradevnih-kompozita-primjenom-biopepela/4190> Razvoj inovativnih građevnih kompozita primjenom biopepela 21.8.2024.
- [6] Milovanović, B., Štirmer, N., Carević, I., Baričević, A. .: Wood biomass ash as a raw material in concrete industry, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 6, pp. 504-514, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2546.2018>
- [7]<https://hrcak.srce.hr/file/405687#:~:text=Pepeo%20iz%20biomase%20sadr%C5%BEi%20zna%C4%8Dajne,kona%C4%8Dnici%20pove%C4%87ava%20produktivnost%20poljoprivrednih%20kultura>. Primjena pepela iz biomase na travnjacima 21.8.2024.
- [8] Roberto Rodríguez-Álvaro, Sindy Seara-Paz, Belén González-Fonteboa, Fernando Martínez-Abella: Use of granular coal combustion products as aggregates in structural concrete: Effects on properties and recommendations regarding mix design, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121690> 16.10.2024
- [9] Upotreba elektrofilterskog pepela i sljake u građevinarstvu, putogradnji i sire <https://www.slideshare.net/slideshow/upotreba-elektrofilterskog-pepla-i-sljake-proizvedenih-iz-termoenergetskih-postrojenja-ljljiana-tanasijevi/10690015> 28.9.2024
- [10] SEMINARSKI RAD IZ KOLEGIJA BETONI POSEBNIH NAMJENA U AKADEMSKOJ GODINI 2023/2024, PRIMJENA OTPADNOG MATERIJALA IZ LOKALNE OPEKARSKE INDUSTRIJE U PROIZVODNJI ALKALNO AKTIVIRANIH SITNOZRNATIH BETONA, Seminar izradili: Toni Baković, Lucija Budišćak, Marin Čerkez, Nikola Dugopoljac, Helena Frančić, Milena Frntić, Bernard Gavez, Ana Hlebec, Antonio Jaguljnjak, Matija Kancijan, Florijan Kolarić, Danijela Nedoklan, Magdalena Remetović, Mario Svrta, Ante Šibenik, Dominik Veverec, Matija Vrkljan, Ivana Zeleničić

- [11] Herwani, I. Pane, I. Imran, B. Budiono: Compressive Strength of Fl ash-based Geopolymer Concrete with a Variable of Sodium Hydroxide (NaOH) Solution Molarity, MATEC Web of Conferences, (2018), Vol. 147, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814701004> 28.9.2024.
- [12] M. Karatas, M. Dener, M. Mohabbi, A. Benli, *A study on the compressive strength and microstructure characteristic of alkali-activated metakaolin cement*, Revista Materia, (2019), 24(4), e-12507, <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0832> 16.10.2024.
- [13] W. Liu, L. Lin, S. Wang, X. Peng, B. Wu, K. Sun, L. Zeng: Setting and Hardening Behaviour of Alkali-Activated Landfilled Fly Ash–Slag Binder at Room Temperature, Materials (2020), 13, 3130; doi:10.3390/ma13143130 28.9.2024
- [14] Sood, D.; Hossain, K.M.A. Strength, Shrinkage and Early Age Characteristics of One-Part Alkali-Activated Binders with High-Calcium Industrial Wastes, Solid Reagents and Fibers. J. Compos. Sci. 2021, 5, 315. <https://doi.org/10.3390/jcs5120315> 28.9.2024.
- [15] V.V. Praveen Kumar, Subhashish Dey, Ganugula Taraka Naga Veerendra , Akula Venkata Phani Manoj , Siva Shanmukha Anjaneya Babu Padavala ; A systematic analysis of binary blend cement concrete infused with lime sludge and fly ash <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2024.100065> 17.10.2024.
- [16] Ešli, S.: Effect of glass sand used as aggregate on micro-concrete properties, GRAĐEVINAR, 75 (2023) 1, pp. 39-51, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3538.2022> 20.8.2024.
- [17] Inženjerstvo mineralnih veziva [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/IMV\\_LAB-skripta\\_2023s.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/IMV_LAB-skripta_2023s.pdf) 10.9.2024 28.9.2024.
- [18] Mehaničke karakteristike maltera koji sadrži leteći pepeo tretiran različitim fizičkim postupcima <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1451-0162/2012/1451-01621204161J.pdf> 27.9.2024.
- [19] Investigation on compressive strength and splitting tensile strength of manufactured sand concrete: Machine learning prediction and experimental verification <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224024203> 27.9.2024.
- [20] <https://www.gradnja.me/clanak/743/metoda-slijeganja-za-odredjivanje-konzistencije-betona> Metoda slijeganja za određivanje konzistencije betona 10.9.2024.
- [21] Effects of coarse aggregate size on thickness and micro-properties of ITZ and the mechanical properties of concrete <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946524003500> 27.9.2024.
- [22] Ukrainczyk V.: Beton-Struktura svojstva tehnologija
- [23] BETONSKE KONSTRUKCIJE I <https://nastava.tvz.hr/gukov/pdf/predavanja-beton.pdf> 28.9.2024.
- [24] HRN EN 196-2:2013 Metode ispitivanja cementa -- 2. dio: Kemijska analiza cementa

- [25] ISO/TS 16996:2015 Solid biofuels -- Determination of elemental composition by X-ray fluorescence
- [26] Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja. Zagreb,
- [27] HRN EN 450-1:2013 Leteći pepeo za beton -- 1. dio: Definicije, specifikacije i kriteriji sukladnost
- [28] HRN EN 1015-11:2019 Metode ispitivanja mortova za zide -- 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrslog morta
- [29] HRN ISO 13320:2021 Analiza veličine čestica -- Metode laserske difrakcije
- [30] HRN EN 933-1:2012 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata -- 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava -- Metoda sisanja
- [31] 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.</b> Razvoj tehnologija za obnovljive izvore energije iz nacionalnih akcijskih planova [1] ...	2
<b>Slika 2.</b> Načini spaljivanja biomase i frakcije nastalog biopepela [2] .....	3
<b>Slika 3.</b> Drvna biomasa [5].....	5
<b>Slika 4.</b> Uzorci pepela drvene biomase: a) pepeo s dna peći; b) leteći pepeo krupnije frakcije; c) finiji leteći pepeo [6].....	5
<b>Slika 5.</b> SEM-SE mikrografi koji prikazuju veličinu i morfološku raznolikost letećeg PDB-a krupne frakcije [6] .....	5
<b>Slika 6.</b> Vrste drveta koje se najčešće koriste kao gorivo u 9 energana na biomasu u Republici Hrvatskoj [5].....	6
<b>Slika 7.</b> " Puylaurent" [9].....	10
<b>Slika 8.</b> Castor i Pollux Tornjevi u Francuskoj [9] .....	11
<b>Slika 9.</b> Burj Khalifa, Dubai, UAE [9].....	11
<b>Slika 10.</b> Razvoj čvrstoće u danima kod mješavine M1 ovisno o molarnosti NaOH otopine [11] .....	15
<b>Slika 11.</b> Razvoj čvrstoće u danima kod mješavine M2 ovisno o molarnosti NaOH otopine [11] .....	15
<b>Slika 12.</b> Usporedba čvrstoća mješavina M1 i M2 pri 28 dana starosti uzorka ovisno o molarnosti NaOH otopine [11] .....	15
<b>Slika 13.</b> Tlačna čvrstoća uzoraka u starosti od 3, 14, 28 i 90 dana [12].....	17
<b>Slika 14.</b> Brzina prolaska ultrazvučnog vala na uzorcima starosti 3, 14, 28 i 90 dana [12] .....	17
<b>Slika 15.</b> Upijanje vode kod uzoraka starih 28 dana [12] .....	18
<b>Slika 16.</b> Vrijeme vezanja FA-GGBS hibridnog veziva aktiviranog alkalijском otopinom (sadržaj GGBS = 25 %, omjer voda/prekursor = 0,4): (a) modul vodenog stakla $n = 1,2$ ; (b) modul vodenog stakla $n = 1,4$ ; (c) modul vodenog stakla $n = 1,6$ [13] .....	19
<b>Slika 17.</b> Tlačna čvrstoća alkalijски aktiviranog FA-GGBS hibridnog veziva aktiviranog alkalijском otopinom (sadržaj GGBS = 25 %, omjer voda/prekursor = 0,4): (a) modul vodenog stakla $n = 1,2$ ; (b) modul vodenog stakla $n = 1,4$ ; (c) modul vodenog stakla $n = 1,6$ [13].....	20
<b>Slika 18.</b> Svojstva alkalijски aktiviranog FA-GGBS hibridnog veziva s različitim omjerima voda/prekursor (sadržaj GGBS = 25 %, $\text{Na}_2\text{O}$ ekvivalent = 10 %, $n = 1,6$ ): (a) obradljivost; (b) vrijeme vezanja; (c) tlačna čvrstoća [13] .....	20
<b>Slika 19.</b> Utjecaj sadržaja troske na: (a) vrijeme vezanja i (b) tlačnu čvrstoću alkalno aktiviranog FA-GGBS hibridnog veziva ( $\text{Na}_2\text{O}$ ekvivalent= 10 %, $n = 1,4$ i $w/s = 0,4$ ) [13].....	21

<b>Slika 20.</b> Obradivost geopolimernog veziva [14] .....	22
<b>Slika 21.</b> Vrijeme vezanja geopolimernih veziva [14].....	23
<b>Slika 22.</b> Tlačna čvrstoća geopolimernog veziva u vremenu: utjecaj alkalnog aktivatora 1 [14].	23
<b>Slika 23.</b> Tlačna čvrstoća geopolimernog veziva u vremenu: utjecaj alkalnog aktivatora 2 [14].	24
<b>Slika 24.</b> Odnos cementnih kompozita u ovisnosti o udjelu i vrsti agregata [17].....	26
<b>Slika 25.</b> Ispitivanje slijeganja betona a) Punjenje konusa svježom betonskom mješavinom .....	31
<b>Slika 26.</b> Gaussova (lognormalna) krivulja raspodjele rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće betona [23].....	32
<b>Slika 27.</b> Radni i računski dijagrami betona [23].....	33
<b>Slika 28.</b> Prosijavanje pepela .....	36
<b>Slika 29.</b> Mješavine ugrađene u kalupe	<b>Slika 30.</b> Prizmice u vodi.....
	38
<b>Slika 31.</b> Određivanje tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom.....	38
<b>Slika 32.</b> Granulometrijske krivulje cementa i pepela .....	39
<b>Slika 33.</b> 10 molarna otopina i otopina vodenog stakla .....	40
<b>Slika 34.</b> Niz sita .....	41
<b>Slika 35.</b> Granulometrijska krivulja pijeska.....	42
<b>Slika 36.</b> Cement	<b>Slika 37.</b> Dodavanje vode.....
	42
<b>Slika 38.</b> Miješalica za izradu mješavina morta.....	43
<b>Slika 39.</b> Određivanje konzistencije potresnim stolićem .....	44
<b>Slika 40.</b> Vibracijski stol	<b>Slika 41.</b> Mješavine morta ugrađene u kalupe .....
	45
<b>Slika 42.</b> Prizmice geopolimernog morta.....	45
<b>Slika 43.</b> Ispitivanje vlačne čvrstoće	<b>Slika 44.</b> Ispitivanje tlačne čvrstoće.....
	46
<b>Slika 45.</b> Uzorci GP-NaOH.....	46
<b>Slika 46.</b> Rezultati ispitivanja vlačnih čvrstoća mortova .....	48
<b>Slika 47.</b> Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća mortova .....	49

## Popis tablica

<b>Tablica 1.</b> Udio pepela pri izgaranju biomase na 550 °C [2] .....	3
<b>Tablica 2.</b> Prikaz moguće primjene biopepela u cestogradnji prema istraživanjima [2] .....	13
<b>Tablica 3.</b> Sastav mješavina geopolimernih betona [11] .....	14
<b>Tablica 4.</b> Sastav pripremljenih mješavina [12] .....	16
<b>Tablica 5.</b> Detalji mješavina geopolimera [13] .....	19
<b>Tablica 6.</b> Prikaz sastava mješavina veziva [14] .....	22
<b>Tablica 7.</b> Razredi betona [23] .....	32
<b>Tablica 8.</b> Vlačne čvrstoće betona [23] .....	33
<b>Tablica 9.</b> Moduli elastičnosti betona .....	34
<b>Tablica 10.</b> Kemijski sastav cementa i pepela [24] .....	36
<b>Tablica 11.</b> Udio teških metala u pepelu biomase [25] .....	36
<b>Tablica 12.</b> Dopuštene količine teških metala u tlu prema [26] .....	37
<b>Tablica 13.</b> Tlačne čvrstoće prizmica sa kvarcnim pijeskom .....	39
<b>Tablica 14.</b> Rezultati prosijavanja agregata frakcije 0-4 mm .....	41
<b>Tablica 15.</b> Konzistencije mortova .....	44
<b>Tablica 16.</b> Rezultati ispitivanja vlačnih i tlačnih čvrstoća mortova .....	47