

# Betonski opločnici s pepelom od drvene biomase

---

Ćosić, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:270934>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**

Repository / Repozitorij:

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





# **BETONSKI OPLOČNICI S PEPELOM DRVNE BIOMASE**

**MARIJA ĆOSIĆ**

**Mentor: prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur**

ZAGREB, 2023.

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u okviru projekta „AshCycle – Integriranje nedovoljno iskorištenog pepela u ciklus materijala primjenom industrijsko-urbane simbioze u razdoblju 2021. – 2023.“

## SAŽETAK

U energanama na drvenu biomasu kao nusproizvod nastaje pepeo koji je mješavina organskog i anorganskog sastava. Kemijski sastav i svojstva pepela drvene biomase ovise o vrsti upotrebljene drvene biomase, tehnologiji izgradnje i lokaciji na kojoj se pepeo prikuplja. Biopepeo ima veliki potencijal u primjeni kod betona kao djelomična zamjena za cement ili agregat.

U ovom završnom radu su ispitana svojstva betona s letećim pepelom drvene biomase. Ispitivanje je provedeno na uzorcima od 3 mješavine od kojih je jedna bez dodatka pepela (referentna), a ostale dvije s udjelom pepela od 20 %.

U teorijskom dijelu rada je opisano nastajanje biopepela te osnovna svojstva koja mora zadovoljiti betonski opločnik. U sklopu eksperimentalnog dijela su ispitana svojstva lijevanog betona s letećim pepelom drvene biomase: tlačna čvrstoća, kapilarno upijanje, upijanje vode te otpornost na smrzavanje i djelovanje soli. Dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima referentne mješavine.

Ključne riječi: pepeo drvene biomase, opločnik, tlačna čvrstoća, upijanje vode

## **ABSTRACT:**

In woody biomass power plants one of the by-products is ash, consisting of a mixture of organic and inorganic components. The chemical structure and properties of wood biomass ash depending on the type of woody biomass, combustion technology and the local where ashes are collected. Biomass ash holds significant potential for use in concrete as a partial replacement for cement or aggregate.

In this work, the properties of concrete containing fly ash from biomass. The study was conducted on samples of three mixtures: one without ash (the reference mixture) and the other two with ash contents of 20%.

The theoretical part of the thesis describes the formation of bioash and essential characteristics that concrete pavers must meet. In the experimental section, the properties of cast concrete with fly ash from biomass were investigated, including compressive strength, capillary absorption, water absorption, frost resistance, and resistance to salt exposure. The obtained results were compared to those of the reference mixture.

Keyword: wood ash, concrete paver, compressive strength, water absorption

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	2
<b>2. PEPEO DRVNE BIOMASE</b> .....	3
2.1. Biomasa .....	3
2.2. Energane na drvenu biomasu .....	4
2.3. Pepeo drvne biomase .....	5
2.4. Udio pepela od drvne biomase u Hrvatskoj .....	6
<b>3. BETONSKI OPLOČNICI</b> .....	7
3.1. Svojstva betonskih opločnika .....	7
3.2. Površinska obrada opločnika .....	8
<b>4. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	10
4.1. Cilj istraživanja .....	10
4.2. Ispitivanja betona u svježem stanju .....	11
4.3. Metode ispitivanja betona u svježem stanju i analiza rezultata .....	11
4.3.1. Miješanje .....	11
4.3.2. Konzistencije slijeganjem – Slump test .....	12
4.3.3. Gustoća svježeg betona .....	14
4.3.4. Temperatura svježeg betona .....	15
4.3.5. Udio pora .....	15
U tablici 8 su prikazani rezultati udjela pora .....	16
4.4. Ispitivanje betona u očvrslulom stanju .....	17
4.5. Metode ispitivanja betona u očvrslulom stanju i analiza rezultata .....	18
4.5.1. Tlačna čvrstoća .....	18
4.5.2. Kapilarno upijanje .....	19
4.5.3. Upijanje vode .....	22
4.5.4. Otpornost na djelovanje mraza i soli .....	23
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	27
<b>LITERATURA</b> .....	28
<b>POPIS SLIKA</b> .....	30
<b>POPIS TABLICA</b> .....	31

## 1. UVOD

Beton predstavlja dominantan materijal u izgradnji infrastrukture, budući da ima neograničene mogućnosti inovativnih dizajnerskih rješenja i tehnologije građenja te je drugi najčešće korišten materijal nakon vode. Primarni materijali pri njegovoj proizvodnji su cement, agregat i voda. Godišnja svjetska potrošnja cementa iznosi između 500 i 2000 kg po stanovniku što ga čini najviše upotrebljavanim materijalom na svijetu. Doprinos industrije cementa iznosi 7 % globalne emisije stakleničkih plinova jer proizvodnja cementa podrazumijeva intenzivnu upotrebu sirovina i energije koji istodobno u atmosferu ispuštaju velike količine ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) [1].

Porastom svijesti o pitanjima zaštite okoliša i očuvanja energije, raste i interes znanstvenika, ali i tvrtki za pronalaženjem prikladnih obnovljivih izvora energije. Zaštita okoliša kroz promicanje održivog razvoja je postala jedna od važnijih interesa suvremene građevine [2].

Alternativan izvor energije je biomasa, gorivo nastalo iz organskih materijala, obnovljivih i održivih izvora energije, a koristi se za stvaranje električne energije, toplinske energije i goriva za transport. Prednosti korištenja biomase uz smanjenje emisije stakleničkih plinova je i povećanje energetske neovisnosti [2].

Trenutno se na području Europske unije oko 70 % pepela drvene biomase odlaže na odlagališta čime se osim financijskih troškova nepovratno zagađuje okoliš [2]. Biopepeo ima veliki potencijal primjene u betonu kao djelomična zamjena za cement ili agregat [2]. Dosadašnjim istraživanjima pokazalo se kako se i do 20 % veziva u betonu može zamijeniti pepelom drvene biomase kako bi se postigla zadovoljavajuća svojstva. Takvom se primjenom rješavaju dva glavna problema: odlaganje otpada i smanjenje potrebe za proizvodnjom cementa što dovodi i do smanjena emisije CO<sub>2</sub> [3].

U ovom radu prikazano je ispitivanje lijevanog betona s dvije vrste pepela drvene biomase kao djelomične zamjene cementa udjela od 20 % te su ispitana svojstva u svježem (konzistencija, gustoća, temperatura te udio pora) i očvrslulom stanju (tlačne čvrstoće, kapilarnog upijanja, upijanja vode te otpornosti na smrzavanje i djelovanje soli) u usporedbi sa svojstvima referentne mješavine bez pepela.

## 2. PEPEO DRVNE BIOMASE

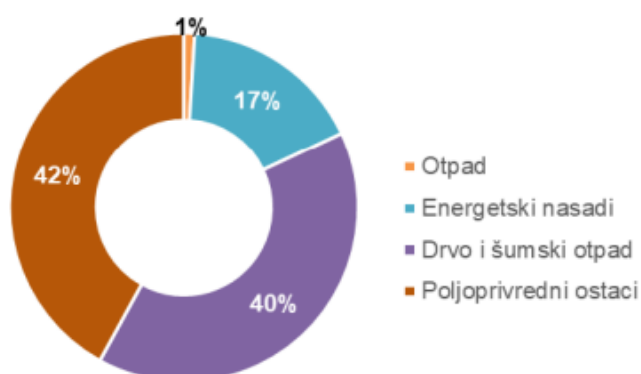
### 2.1. Biomasa

Biomasa je najsloženiji oblik obnovljivih izvora energije jer obuhvaća široku sirovinsku osnovu, a mjesto korištenja energije iz biomase može se odvojiti od mjesta nastanka biomase. Biomasa je ključan čimbenik u ostvarivanju klimatskih ciljeva doprinoseći gospodarskom rastu i zapošljavanju, osobito u ruralnom području. Ona se smatra neutralnim gorivom i čini 60 % u ukupnoj potrošnji obnovljive energije [2].

Podjela biomase prema podrijetlu nastanka [4]:

- šumska biomasa i otpadno drvo – ostaci od gospodarenja šumama i industrijske prerade drveta
- poljoprivredna biomasa i ostaci – uključuje biljke i otpad životinjskog podrijetla
- energetske nasadi – namjenski uzgajana drvena biomasa namijenjena isključivo za dobivanje energije

Na slici 1 prikazan je udio svake vrste biomase u ukupnoj proizvodnji energije.

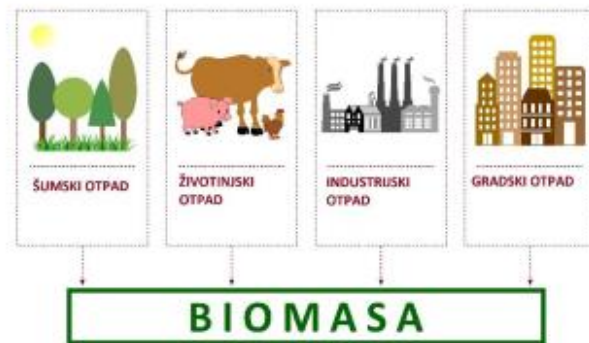


Slika 1: Dijagram ukupne biomase koja se koristi za proizvodnju energije[4]

Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 100/15) definira biomasu kao biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostatka biološkog podrijetla iz poljoprivrede, uključujući tvari biljnog i životinjskog podrijetla, iz šumarstva i s njima povezanih proizvodnih djelatnosti, uključujući ribarstvo i akvakulturu, te biorazgradiv udio otpada, uključujući industrijski i komunalni otpad biološkog podrijetla [5].



Na slici 2 slikovito je opisana podjela biomase.



Slika 2: Biomasa [4]

## 2.2. Energane na drvenu biomasu

Energane na krutu i plinovitu biomasu predstavljaju jedan od značajnijih obnovljivih izvora energije u Europskoj uniji [6].

Promicanje prednosti i mogućnosti obnovljivih izvora energije, u Hrvatskoj i Europskoj uniji pridonijelo je porastu broja energana na biomasu, posebno drvenu biomasu (Slika 3). Danas u svijetu biomasa doprinosi 8 do 15 % u ukupnoj potrošenoj energiji za grijanje i hlađenje, proizvodnju električne energije i transport [7].



Slika 3: Lokacije energana na biomasu u EU [6]

Tri osnovne vrste ložišta na biomasu su [7]:

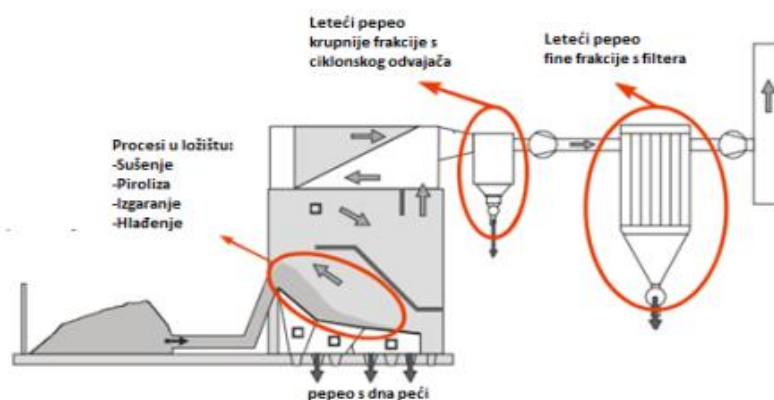
- izgaranje na rešetki
- izgaranje u fluidiziranom sloju
- izgaranje u letu (raspršujućem sloju)

Udio pepela ovisi o vrsti i načinu prikupljanja biomase, temperaturi toplinske obrade te vrsti i hidrodinamici kotla [7].

### 2.3. Pepeo drvene biomase

Uobičajeno se tijekom izgaranja 1 tone drvene biomase proizvede 5MWh energije, ali i 20-50 kg pepela s dna peći i letećeg pepela. Trenutno se 70 % pepela drvene biomase odlaže, a samo 20 % se primjenjuje kao dodatak u tlu u poljoprivredi te 10 % se nastoji iskoristiti za ostale namjene. Pepeo od drvene biomase neizgorivi je ostatak koji sadrži najveći dio mineralnih frakcija iz biomase nakon potpunog izgaranja. To je kompleksna mješavina anorganskog i organskog sastava koja se sastoji od velikog broja spojeva. Uglavnom je heterogenog sastava. U energanama mogu nastati tri vrste PBD-a (slika 4) dobivenog tehnologijom izgaranja u nepokretnom sloju u ložištu s rešetkom, izgaranjem u mjehuričastom fluidiziranom sloju, te izgaranjem u cirkulirajućem fluidiziranom sloju:

- pepeo s dna peći sakupljen s dna komore izgaranja ili ložišta s fluidizirajućim slojem
- krupni leteći pepeo sakupljen u ciklonima ili kotlovima, i
- sitni leteći pepeo sakupljen u elektrostatičkom precipitatoru ili vrećastom filtru



Slika 4: Shematski prikaz mjesta prikupljanja pepela na primjeru postrojenja s izgaranjem na rešetki [4]

Količina dobivenog pepela ovisi o načinu prikupljanja i vrsti biomase, temperaturi toplinske obrade te tehnologiji ložišta [6]. Pepero s dna peći u takvim postrojenjima čini 60 – 90 % ukupne mase pepela, leteći pepeo krupnije frakcije čini 2 – 30 %, a finiji leteći pepeo samo 2 – 15 % ukupne mase nastalog pepela [7].

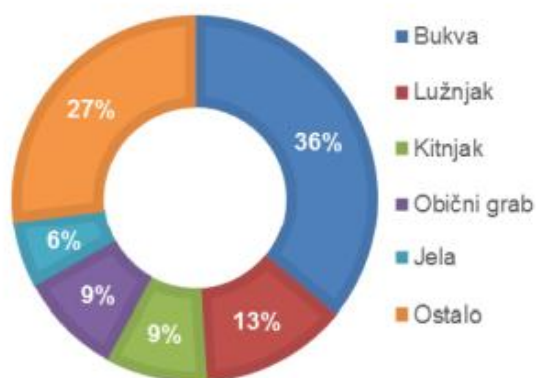
## 2.4. Udio pepela od drvene biomase u Hrvatskoj

Ukupna količina šuma i šumskih zemljišta u RH iznosi 2.688.687 ha što čini 47 % kopnene površine države te iz toga proizlazi zaključak kako RH ima ogroman potencijal iskorištenja drvene biomase, osobito drvene biomase nastale prilikom procesa gospodarenja šumama kao i ostatecima industrijske prerade drva što je vidljivo iz tablice 1 [4].

Tablica 1: Procjena potencijala tržišta drvene biomase u Hrvatskoj 2013.godine [4]

Izvor	tona/god
Hrvatske šume d.o.o.	830.000
Drvena industrija	500.000
Privatne šume	200.000
<b>UKUPNO:</b>	<b>1.530.000</b>

Većina godišnje drvene zalihe ili površina šume predviđena za sječū koncentrirana je na 5 vrsta drveća kao što je prikazano na slici 5:



Slika 5: Godišnji etat u šumama kojima gospodare Hrvatske šume d.o.o. [4]

### 3. BETONSKI OPLOČNICI

Beton se u opločanju koristi u obliku gotovih betonskih opločnika ili kao *in situ* lijevani beton. Betonski opločnici se izvode lijevanjem određenog tipa betonske mješavine u kalupe različitih formi i dimenzija, najčešće kao kvadratni, pravokutni ili šesterokutni. Pogodni su za opločenje većih površina (Slika 6), terasa i geometrijskih staza, a postavljaju se na pripremljenu i nabijenu šljunčanu i pješčanu podlogu u kojoj debljina sloja varira ovisno o opterećenju na opločenje [8].



*Slika 6: Opločenje trga u Virovitici [9]*

#### 3.1. Svojstva betonskih opločnika

Betonski pločnici su pogodni za opločavanje vanjskih površina te moraju zadovoljiti određene kriterije za otpornost na vanjske utjecaje kao što su otpornost na djelovanje temperature, mraza, kiše, snijega te soli. Spomenuta otpornost provjerava se u vanjskim laboratorijima gdje se simuliraju teški vremenski uvjeti u prirodi.

Zbog svog nastanka miješanjem različitih materijala beton omogućuje brojne varijacije u teksturi (dodavanjem različitih kamenih agregata) i tonu (moguće je producirati sve boje duginog spektra metodom ubrizgavanja boje u mješavinu) te je pogodan za sve vrste površine zbog čega ima najrašireniju upotrebu.

Debljina opločnika ima ulogu u njegovoj čvrstoći, odnosno deblji opločnici su otporniji na opterećenja od tanjih. Opločnici su projektirani da izdrže opterećenja pod težinom vozila, pješaka te drugih opterećenja o kojem ovisi i kvaliteta betona od kojeg je izrađen opločnik.

Jedna od bitnih svojstava opločnika je otpornost na UV zračenje zbog čega nakon određenog vremena tijekom uporabe neće doći do promjene boje površinskog sloja opločnika.

Uz pravilno postavljanje opločnika otporni su na eroziju i habanje koje nastaje najčešće zbog oborinskih voda. Habanje je karakteristična pojava za prometne površine kao što su pješačke staze i ceste. Na površinama gdje se treba postići bolja otpornost na habanje izvodi se površinski betonski sloj s agregatom od kvarca ili eruptivnog kamena.

Za zadovoljavanje sigurnih standarda korisnika, kako na javnim, tako i na privatnim površinama gornje površine izvedene su od materijala koji čine njihovu protukliznost.

Betonski opločnici su ekološki prihvatljivi. Oni imaju dobru drenažu što ima pozitivan utjecaj na klimu i zrak jer nema isparavanja opločnika.

### 3.2. Površinska obrada opločnika

Površinska obrada opločnika ima ključnu ulogu u njegovom izgledu, trajnosti i funkcionalnosti. Neki od uobičajenih procesa površinskih obrada opločnika su [8]:

- glatka obrada – kocka dolazi iz proizvodnje kao gotov proizvod te se ne obrađuje dodatno
- prana obrada – postupak kod kojeg se kratko prije stvrdnjavanja fini dijelovi na površini ispiru pod visokim mlazom vode, gdje do izražaja dolazi struktura i boja zrna
- pjeskarena obrada – postupak površinske obrade betona gdje se u betonsku površinu usmjerava mlaz čelične sačme iz centrifugalnog mehaničkog uređaja brzinom od više stotina kilometara na sat te on u kontaktu sa površinom djeluje abrazivno na mehanički slabije slojeve
- otučena obrada – postupak gdje se gotovi glatki opločnici razbijaju u bubnju koji se okreće, na taj način opločnici dobiju tipični antički izgled sa otučenim (zaobljenim) rubovima (slika 7)



*Slika 7: Otučena obrada opločnika [9]*

- brušena obrada – postupak kod kojeg se nakon sušenja brusilicom pod mlazom vode brusi površinski sloj čime se dobije glatka i jednolična struktura površine
- lomljenje – površina betona u liniji cijepanja podsjeća na prirodno lomljeni kamen, to je postupak kod određene čvrstoće proizvoda
- colormix – miješanjem različitih boja (obično 2-3) na svakom pojedinom opločniku te se postiže šarenilo
- reljefna – obrada koja podsjeća na prirodni kamen, struktura gornje plohe je neravna, valovita, udubljena, čime se postiže starinski izgled kocke

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Cilj istraživanja

U eksperimentalnom dijelu rada proučavat će se utjecaj letećeg pepela finije frakcije iz dimnjaka drvene biomase na svojstva lijevanog betona – mehanička i svojstva trajnosti. Ispitana su svojstva betona u svježem (konzistencija, gustoća, temperatura te udio pora) i očvrslom stanju (tlačna čvrstoća, kapilarno upijanje, upijanje vode te otpornost na djelovanje mraza i soli). Ispitivanja su provedena na tri različite mješavine od kojih je prva mješavina referentna (MO, bez pepela), a ostale dvije mješavine (M1 i M2) su izrađene s dvije različite vrste pepela drvene biomase udjela 20 % – pepeo podrijetlom iz Belišća i iz Gospića. Pepeo (Slika 8) je nastao tehnologijom izgaranja na rešetki pri temperaturi od 900 – 1050 °C od mješovitog drveta.



*Slika 8: Leteći pepeo finije frakcije iz dimnjaka (elektrostatski ili vrećasti filter)*

## 4.2. Ispitivanja betona u svježem stanju

U tablici 2 prikazane su metode ispitivanja mješavina betona. Sva ispitivanja su provedena prema navedenim normama.

Tablica 2: Metode ispitivanja svojstava

<b>Plan ispitivanja SVJEŽEG lijevanog betona</b>	
<b>Svojstva lijevanog betona u svježem stanju</b>	<b>Norma</b>
Konzistencija slijeganjem - Slump test	<b>HRN EN 12350 - 2:2019</b>
Gustoća	<b>HRN EN 12350 - 6:2019</b>
Temperatura	<b>HRN EN 12350-1:2019</b>
Udio pora	<b>HRN EN 12350 - 7:2019</b>

## 4.3. Metode ispitivanja betona u svježem stanju i analiza rezultata

### 4.3.1. Miješanje

Miješanje betona izvedeno u je u pogonu Beton Lučko d.o.o. te su nakon miješanja očitavanje vrijednosti temperature betona i temperature zraka za svaku pojedinu mješavinu. Vrijednosti su prikazane u tablici 3.

Tablica 3: Temperature svježeg betona

Oznaka mješavine	$t_{\text{betona}} (^{\circ}\text{C})$	$t_{\text{zraka}} (^{\circ}\text{C})$
M0	28,5	25,2
M1	31	23,5
M2	31,2	23,5



#### 4.3.2. Konzistencije slijeganjem – Slump test

Konzistencija slijeganjem ispitivala se prema normi HRN EN 12350 – 2:2019 u kalupu oblika krnjeg stošca. Kalup se puni betonom u 3 nivoa te pri svakom nivou beton se zbija čeličnom šipkom 25 puta do dubine prethodnog sloja te se nakon zbijanja zadnjeg sloja kalup odize ravno prema gore. Nakon odizanja mjeri se i zapisuje slijeganje određeno razlikom visine kalupa i najviše točke slegnutog uzorka kao što je prikazano na slikama 9 i 10 za svaku pojedinu mješavinu.



*Slika 9: Prikaz slijeganja referentne mješavine M0*



*Slika 10: Prikaz slijeganja mješavine M1 i M2*

U tablici 4 prikazani su rezultati ispitivanja konzistencije slijeganjem za sve tri mješavine.

*Tablica 4: Konzistencija slijeganjem*

Oznaka mješavine	M0	M1	M2
Konzistencija (cm)	23	14	17

Prilikom ispitivanja konzistencije slijeganjem koje su prikazane na slici 9 za referentnu mješavinu M0 i slici 10 za mješavine M1 i M2 vidljivo je da mješavina M0 ima najveću konzistenciju slijeganja izmjerenu od 23 cm.

U tablici 5 prikazani su razredi slijeganja.

*Tablica 5: Slijeganje*

Razred	Slijeganje u mm
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5 <sup>a</sup>	≥ 220

U usporedbi rezultata slijeganja iz tablice 4 sa tablicom 5 u kojoj su prikazani razredi slijeganja vidljivo je da su sve tri mješavine iz različitih razreda slijeganja. Mješavina M0 ima konzistenciju razreda slijeganja S5, mješavina M1 ima konzistenciju razreda slijeganja S3, a mješavina M2 ima konzistenciju razreda slijeganja S4. Prilikom ispitivanja konzistencije slijeganjem koje su prikazane na slici 9 za referentnu mješavinu M0 i slici 10 za mješavine M1 i M2 vidljivo je da mješavina M0 ima najvišu razinu slijeganja izmjereni 23 cm što dovodi do zaključka da količina pepela koja je dodana u betonsku mješavinu utječe na smanjenje slijeganja (konzistencije) svježeg betona.

### 4.3.3. Gustoća svježeg betona

Gustoća svježeg betona određena je prema normi HRN EN 12350 – 6:2019 preko vrijednosti mase i volumena kada je ugrađen kao što je prikazano u tablici 6.

Tablica 6: Gustoća

Gustoća svježih betonskih mješavina [kg/dm <sup>3</sup> ]			
Oznaka mješavine	m [kg]	V [dm <sup>3</sup> ]	ρ [kg/dm <sup>3</sup> ]
<b>M0</b>	18,692	8	2,34
<b>M1</b>	18,496	8	2,31
<b>M2</b>	16,861	8	2,11

Na slici 11 prikazano je mjerenje mase betona za određivanje gustoće.



Slika 11: Masa svježeg betona

Vrijednosti gustoće mješavine M1 prema rezultatima iz tablice 6 prikazuje sličnija svojstva referentnoj mješavini od gustoće mješavine M2.

#### 4.3.4. Temperatura svježeg betona

Temperatura svježeg betona je ispitana digitalnim ubodnim termometrom kao što je prikazano na slici 12 te su očitane vrijednosti prikazane u tablici 5 u °C.



Slika 12: Termometar

Tablica 7: Temperatura betonskih mješavina u svježem stanju

Oznaka mješavine	M0	M1	M2
Temperatura betona [°C]	28,5	31	31,2

Temperatura mješavine se povećala sa udjelom pepela te možemo zaključiti da udio pepela drvene biomase utječe na temperaturu mješavine.

#### 4.3.5. Udio pora

Udio pora je ispitan prema normi HRN EN 12350 – 7:2019 za što je korišten porometar koji udio pora mjeri na principu Boyle – Marriottovog zakona. Poznati volumen zraka pri poznatom tlaku graniči u spremniku s nepoznatim volumenom zraka u uzorku betona. Brojčanik porometra je baždaren tako da se rezultirajući tlak pokazuje kao postotak pora kao što je prikazano na slici 13.



Slika 13: Porometar

U tablici 8 su prikazani rezultati udjela pora u svježem betonu.

Tablica 8: Rezultati udjela pora

Oznaka mješavine	M0	M1	M2
Udio pora [%]	4,9	4,4	9,7

Iz prikazanih rezultata vidljiv je značajan porast pora u betonu mješavine M2 u odnosu na ostale dvije mješavine M0 i M1. Povećana količina pora u mješavini M2 je utjecala na manju gustoću te mješavine.

#### 4.4. Ispitivanje betona u očvrnulom stanju

U ovom radu izvedena su ispitivanja betona u očvrnulom stanju na uzorcima različite starosti kao što je prikazano u tablici 9.

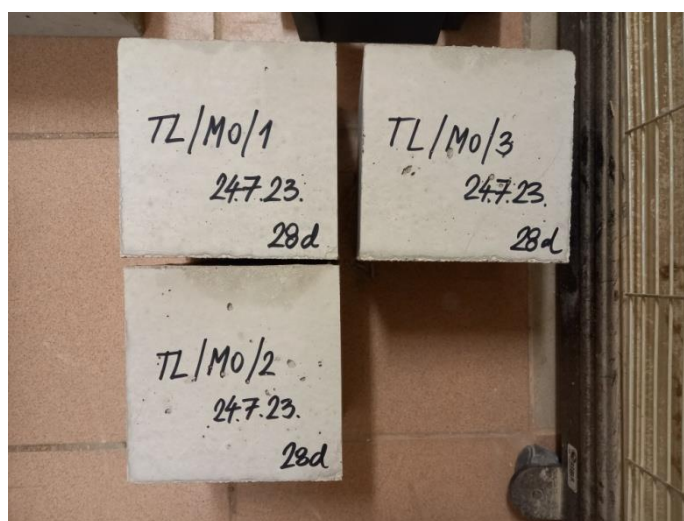
Tablica 9: Plan ispitivanja očvrnulog lijevanog betona

Plan ispitivanja OČVRSNULOG lijevanog betona					
Svojstvo	Metoda ispitivanja	Dimenzije uzorka (cm)	Starost (dani)	Broj uzoraka (kom)	Volumen uzoraka [dm <sup>3</sup> ]
Tlačna čvrstoća	HRN EN 12390-3:2019; HRN EN 12930-3:2009/Ispr.1:2012	15×15×15	1	3	10,125
			28	3	10,125
Kapilarno upijanje	HRN EN 13057:2003	ispiljeni uzorak 10×10×5	28	4	8
Upijanje vode	HRN EN 1340:2004; HRN EN 1340:2004/AC:2007	ispiljeni uzorak (2,5 kg < mIU < 5 kg)	28	3	
Otpornost na djelovanje zamrzavanja i soli (28 ciklusa ili 56 ciklusa)	HRS CEN/TS 12390-9:2016	15×15×5	28	4	10,125

## 4.5. Metode ispitivanja betona u očvrnulom stanju i analiza rezultata

### 4.5.1. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća betona ispitana je prema normama HRN EN 12390-3:219 i HRN EN 12930-3:2009/ISPR.1:2012 na uzorcima oblika kocke dimenzija  $15 \times 15 \times 15$  cm nakon jednog dana te nakon 28 dana. Za svaku mješavinu ispitivanje je provedeno na 3 uzorka određene starosti (Slika 14). Uzorci ispitivani na tlačnu čvrstoću nakon 28 dana su bili spremljeni u vlažnu komoru nakon vađenja iz kalupa. Uzorci su ispitivani u preši za ispitivanje uzoraka betona na tlak.



Slika 14: Pripremljeni uzorci mješavine M0 za ispitivanje na tlak

Rezultati ispitivanja nalaze se u tablici 10.

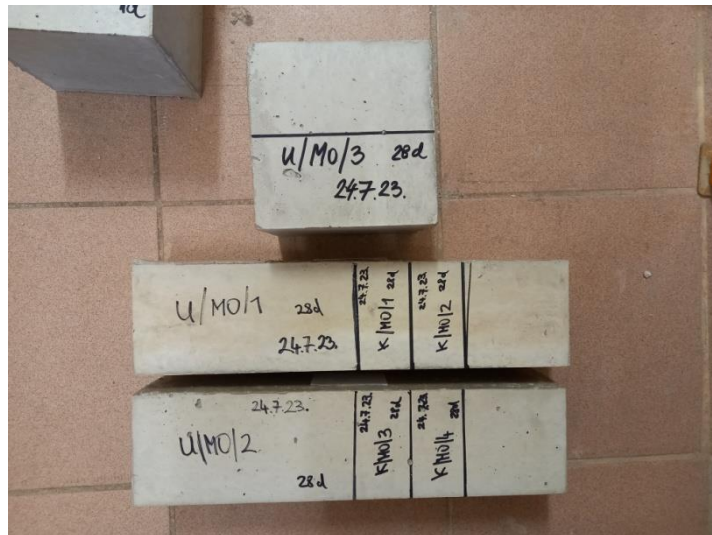
Tablica 10: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Oznaka mješavine	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće nakon 1 dana (N/mm <sup>2</sup> )	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće nakon 28 dana (N/mm <sup>2</sup> )
M0	37,77	51,3
M1	29,14	34,2
M2	20,54	33,1

Iz rezultata ispitivanja vidljivo je kako količina i vrsta biopepela u uzorcima utječu na vrijednost tlačne čvrstoće.

#### 4.5.2. Kapilarno upijanje

Kapilarno upijanje vode ispitano je prema normi HRN EN 13057:2003 na uzorcima koji su piljeni na dimenzije  $100 \times 100 \times 50$  mm te osušeni u sušioniku do konstantne mase (Slika 15 i 16). Ispitivanje je provedeno na 4 uzorka svake mješavine.



Slika 15: Označeni uzorci za piljenje za kapilarno upijanje



Slika 16: Uzorci za kapilarno upijanje nakon sušenja u sušioniku

Mase uzoraka izvagane su nakon sušenja te nakon stavljanja uzoraka u vodu. Uzorci su potopljeni u vodu donjom stranom lica do razine 3 mm kao što je prikazano na slici 17.





Slika 17: Uzorci za kapilarno upijanje

Rezultati ispitivanja prikazani su masama uzoraka pri različitom vremenu mjerenja u tablici 11, 12 i 13 za svaku mješavinu.

Tablica 11: Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja mješavine M0

LIJEVANI BETON - referentna M0						
	Oznaka uzorka		M0/K1	M0/K2	M0/K3	M0/K4
	<b>Vrijeme ispitivanja</b>	dimenzije <i>a x b</i>	a (mm)	101,45	101,54	101,81
b (mm)			100,6	100,0	99,6	99,6
h (mm)			50,1	50,6	49,7	50,3
minuta		0	1.148,73	1.139,66	1.123,87	1.128,52
		12	1.155,46	1.146,47	1.130,51	1.135,21
		30	1.158,59	1.149,67	1.133,60	1.138,01
		60	1.161,71	1.152,55	1.136,87	1.141,04
sati		2	1.162,62	1.156,22	1.141,01	1.144,91
		4	1.170,30	1.160,60	1.146,08	1.149,83
		24	1.188,73	1.175,39	1.164,65	1.168,89

Iz rezultata ispitivanja na mješavini M0 voda je nakon 24 h upijena u rasponu od 3,1 do 3,6 %.

Tablica 12: Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja mješavine M1

LJEVANI BETON - M1						
Oznaka uzorka		M1	M1	M1	M1	
Vrijeme ispitivanja	dimenzije <i>a x b</i>	a (mm)	101,56	101,33	101,22	101,31
		b (mm)	100,6	100,4	101,0	100,9
		h (mm)	49,7	49,8	49,9	50,8
	minuta	0	1.111,53	1.111,15	1.103,51	1.131,67
		12	1.121,01	1.120,32	1.113,11	1.141,53
		30	1.125,07	1.124,19	1.117,52	1.146,05
		60	1.129,26	1.128,45	1.122,29	1.150,97
	sati	2	1.134,64	1.134,99	1.127,86	1.157,32
		4	1.141,18	1.140,82	1.134,55	1.165,11
		24	1.166,02	1.167,64	1.158,24	1.193,16

Iz rezultata ispitivanja na mješavini M1 voda je nakon 24 h upijena u rasponu od 4,9 do 5,4 %.

Tablica 13: Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja mješavine M2

LJEVANI BETON - M2						
Oznaka uzorka		M2	M2	M2	M2	
Vrijeme ispitivanja	dimenzije <i>a x b</i>	a (mm)	101,95	100,68	100,71	101,83
		b (mm)	102,0	102,0	101,2	101,0
		h (mm)	49,9	49,5	50,6	50,1
	minuta	0	1.059,11	1.043,19	1.044,11	1.061,67
		12	1.065,82	1.049,92	1.050,57	1.068,17
		30	1.069,05	1.053,16	1.053,71	1.071,11
		60	1.072,65	1.056,78	1.057,23	1.074,47
	sati	2	1.077,40	1.061,60	1.061,92	1.078,96
		4	1.083,47	1.068,09	1.067,82	1.084,86
		24	1.107,51	1.092,81	1.091,03	1.107,03

Iz rezultata ispitivanja na mješavini M2 voda je nakon 24 h upijena u rasponu od 4,3 do 4,8 %.

### 4.5.3. Upijanje vode

Upijanje vode ispitano je prema normi HRN EN 1340:2004; HRN EN 1340:2004/AC:2007 na uzorcima koju su piljeni na dimenzijama  $100 \times 100 \times 50$  mm koji su nakon sušenja do konstantne mase potopljeni u vodi. Ispitivanje je provedeno na 3 uzorka svake mješavine.

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 14.

Tablica 14: Rezultati ispitivanja upijanja vode za mješavine M0, M1 i M2

Oznaka mješavine	Srednja vrijednost $W_a$ (%)
M0	4,17
M1	5,01
M2	5,75

Na slici 18 prikazani su potopljeni uzorci za upijanje vode.



Slika 18: Uzorci za upijanje vode

Iz rezultata je vidljiva da je mješavina M2 upila veći postotak vode u odnosu na mješavinu M1.

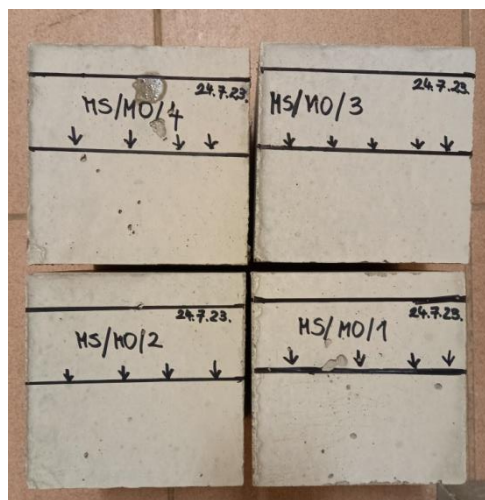
#### 4.5.4. Otpornost na djelovanje zamrzavanja i soli

Otpornost na djelovanje zamrzavanja i soli ispitano je prema normi HRS CEN/TS 12390-9:2016 na uzorcima oblika kocke dimenzija  $150 \times 150 \times 150$  mm nakon 45 dana. Za svaku mješavinu ispitivanje je provedeno na 4 uzorka.

Uzorci su nakon vađenja iz kalupa spremljeni u vlažnu komoru na 28 dana.

Priprema te početak ispitivanja uzoraka proveden je nakon 45 dana.

Za ispitivanje uzorci su izrađeni piljenjem pri čemu je piljena površina okrenuta prema gore dimenzija  $150 \times 150$  mm (Slika 19).



Slika 19: Uzorci prije piljena za ispitivanje otpornosti na mraz i sol

Nakon piljenja provedeno je mjerenje uzoraka te lijepljenje gumenih traka koje su brtvljenje silikonskim gelom kako bi se zadržao agresivni medij na ispitnoj površini (Slika 20).



Slika 20: Silikonirani uzorci za ispitivanje otpornosti na mraz i sol

Na površine uzorka nalivena je 3 % otopina NaCl te su uzorci spremljeni u komoru za ispitivanje u kontroliranim uvjetima (Slike 21 i 22).



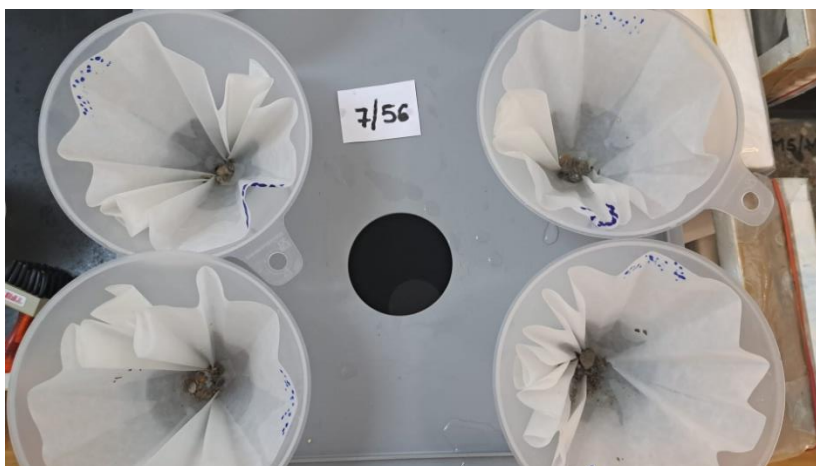
*Slika 21: Uzorci prije spremanja u škrinju za ispitivanje otpornosti na mraz i sol*

*Slika 22: Uzorci u komori za ispitivanje otpornosti na zamrzavanje i sol*

Jedan ciklus traje 24 h, a za potrebe projekta izvodit će se ispitivanje na 56 ciklusa. U okviru ovog završnog rada ispitani su uzorci na 7 ciklusa nakon čega su izmjerene mase oljuštenog materijala koje su prikazane u tablici 15 i na slici 23.

Tablica 15: Mase oljuštenog materijala nakon 7 ciklusa

Oznaka mješavine	M0	M1	M2
Masa oljuštenog materijala (g)	0,049	1,62	0,095



Slika 23: Mase oljuštenog materijala

Iz rezultata je vidljivo značajnije ljuštenje mase kod mješavine M1 koje je prikazano na slici 24.



*Slika 24: Ljuštenje mase kod mješavine M1 nakon 7. ciklusa*

## 5. ZAKLJUČAK

Prema načelima kružne ekonomije upotreba otpada pepela drvene biomase u građevnim proizvodima pokazuje veliki potencijal budući da se time smanjuje nastajanje otpada. Odlaganje pepela nepoželjna je opcija prilikom gospodarenja otpadom, a time se utječe i na onečišćenje okoliša i ugrožavanje eko-sustava.

Ovisno o svojstvima betona pepeo se može koristiti kao djelomična zamjena cementa ili agregata u betonu ili kao mineralni dodatak, samim time je moguće značajno smanjiti količinu otpada i postići ciljeve održivog razvoja. Zbog složenog fizičkog i kemijskog sastava pepela potrebna su dodatna istraživanja njegovog potencijala za primjenu u građevinskoj industriji.

Cilj ovog rada bio je prikazati kakao pepeo drvene biomase utječe na svojstva betona u svježem i očvrslom stanju. Ispitane su 3 mješavine od kojih je mješavina M0 referentna mješavina bez pepela. Mješavina M1 je napravljena sa pepelom drvene biomase iz Belišća, a mješavina M2 sa pepelom drvene biomase iz Gospića sa udjelom od 20 %.



## LITERATURA

- [1] Štirmer, N., Carević, I., Cerковиć, S., Grubor, M., Bjegović, D.: *Inovativni građevni proizvodi s pepelom drvene biomase*, Godišnjak 2020. Akademije tehničke znanosti Hrvatske, 2020.
- [2] *Razvoj inovativnih građevinskih kompozita primjenom biopepela*  
<https://www.betonlucko.hr/files/razvoj-inovativnih-gradjevnih-kompozita-primjenom-biopepela-2023.pdf>
- [3] Carević, I., Štirmer, N., Pečur, I.B.: *Primjena pepela iz drvene biomase kao zamjena cementa u betonu*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.17>.
- [4] Milovanović, B.: *Vrste i količine dostupnog pepela iz drvene biomase*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017, <https://www.hgk.hr/documents/2-milovanovic-.vrste-i-kolicine-pepela59f733a2222ef.pdf>
- [5] [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021\\_12\\_138\\_2272.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_12_138_2272.html)
- [6] Hrvatska zaklada za znanost: *Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću - TAREC<sup>2</sup>*, IP-06-2016, Štirmer N., voditeljica projekta, <https://bib.irb.hr/datoteka/929289.Tarec-brosura.pdf>
- [7] Štirmer, N., Šantek, J.: *Pepeo drvene biomase : od otpada do sirovine*,  
<https://www.bib.irb.hr/1028700>
- [8]  
[https://www.agr.unizg.hr/multimedia/1614758102\\_\\_Strucni%20projekt\\_2016\\_Izbor%20oplo-cenja.pdf](https://www.agr.unizg.hr/multimedia/1614758102__Strucni%20projekt_2016_Izbor%20oplo-cenja.pdf)
- [9] <https://www.betonlucko.hr/files/download/betonska-galanterija-reference-2022.pdf>
- [10] HRN EN 12350 – 2:2019 Ispitivanje svježeg betona – 2. Dio: Ispitivanje slijeganjem
- [11] HRN EN 12350 – 6:2019 Ispitivanje svježeg betona – 6. Dio: Gustoća
- [12] HRN EN 12350 – 1:2019 Ispitivanje svježeg betona – 1. Dio: Uzorkovanje i uobičajena oprema

[13] HRN EN 12350 – 7:2019 Ispitivanje svježeg betona – 7. Dio: Sadržaj pora – Tlačne metode

[14] HRN EN 13057:2003 Određivanje otpornosti na kapilarno upijanje

## POPIS SLIKA

Slika 1: Dijagram ukupne biomase koja se koristi za proizvodnju energije[4] .....	3
Slika 2: Biomasa [4] .....	4
Slika 3: Lokacije energana na biomasu u EU [6].....	4
Slika 4: Shematski prikaz mjesta prikupljanja pepela na primjeru postrojenja s izgaranjem na rešetki [4].....	5
Slika 5: Godišnji etat u šumama kojima gospodare Hrvatske šume d.o.o. [4] .....	6
Slika 6: Opločenje trga u Virovitici [9] .....	7
Slika 7: Otučena obrada opločnika [9] .....	9
Slika 8: Leteći pepeo finije frakcije iz dimnjaka (elektrostatski ili vrećasti filter) .....	10
Slika 9: Prikaz slijeganja referentne mješavine M0 .....	12
Slika 10: Prikaz slijeganja mješavine M1 i M2 .....	12
Slika 11: Masa svježeg betona .....	14
Slika 12: Termometar .....	15
Slika 13: Porometar .....	16
Slika 14: Pripremljeni uzorci mješavine M0 za ispitivanje na tlak .....	18
Slika 15: Označeni uzorci za piljenje za kapilarno upijanje .....	19
Slika 16: Uzorci za kapilarno upijanje nakon sušenja u sušioniku .....	19
Slika 17: Uzorci za kapilarno upijanje .....	20
Slika 18: Uzorci za upijanje vode .....	22
Slika 19: Uzorci prije piljena za ispitivanje otpornosti na mraz i sol.....	23
Slika 20: Silikonirani uzorci za ispitivanje otpornosti na mraz i sol.....	23
Slika 21: Uzorci prije spremanja u škrinju za ispitivanje otpornosti na mraz i sol.....	24
Slika 22: Uzorci u komori za ispitivanje otpornosti na zamrzavanje i sol .....	24
Slika 23: Mase oljuštenog materijala .....	25
Slika 24: Ljuštenje mase kod mješavine M1 nakon 7. ciklusa .....	26

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Procjena potencijala tržišta drvene biomase u Hrvatskoj 2013.godine [4].....	6
Tablica 2: Metode ispitivanja svojstava .....	11
Tablica 3: Temperature svježeg betona .....	11
Tablica 4: Konzistencija slijeganjem.....	13
Tablica 5: Slijeganje .....	13
Tablica 6: Gustoća.....	14
Tablica 7: Temperatura betonskih mješavina u svježem stanju.....	15
Tablica 8: Rezultati udjela pora .....	16
Tablica 9: Plan ispitivanja očvrstnalog lijevanog betona .....	17
Tablica 10: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće.....	18
Tablica 11: Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja mješavine M0 .....	20
Tablica 12: Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja mješavine M1 .....	21
Tablica 13: Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja mješavine M2 .....	21
Tablica 14: Rezultati ispitivanja upijanja vode za mješavine M0, M1 i M2 .....	22
Tablica 15: Mase oljuštenog materijala nakon 7 ciklusa.....	25