

SVOJSTVA BETONA S PEPELIMA NASTALIM TERMIČKOM OBRADOM BIOMASE KAO ZAMJENA ZA DIO AGREGATA

Vićan, Ivo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:237:505265>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-22**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivo Vićan

**SVOJSTVA BETONA S PEPELIMA NASTALIM
TERMIČKOM OBRADOM BIOMASE KAO ZAMJENA
ZA DIO AGREGATA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivo Vićan

**SVOJSTVA BETONA S PEPELIMA NASTALIM
TERMIČKOM OBRADOM BIOMASE KAO ZAMJENA
ZA DIO AGREGATA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur

Komentor: dr. sc. Jelena Šantek Bajto

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivo Vićan

**PROPERTIES OF CONCRETE WITH ASH FROM
THE THERMAL TREATMENT OF BIOMASS AS A
SUBSTITUTE FOR PART OF THE AGGREGATES**

MASTER THESIS

Supervisor(s): prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur

dr. sc. Jelena Šantek Bajto

Zagreb, 2024.

SAŽETAK

Napredak u građevinskoj industriji tijekom posljednja dva desetljeća rezultirao je povećanjem emisije stakleničkih plinova i visokom potrošnjom energije što je značajno doprinijelo generiranju dodatnih količina otpada. Budući da proizvodnja cementa uzrokuje značajno ispuštanje ugljikovog dioksida, postoji sve veća potreba za recikliranjem građevnih materijala i primjenom ekološki prihvatljivih sirovina te sekundarnih materijala, poput otpadnog pepela drvene biomase i pepela dobivenog termičkom obradom mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Kako bi se smanjila uporaba pijeska u betonskim mješavinama, planira se koristiti pepeo krupnije granulacije kao djelomična zamjena za agregat. Ovaj pristup, temeljen na načelima kružne ekonomije, smanjuje zagađenje okoliša, emisije stakleničkih plinova, količinu otpada i eksploataciju prirodnih resursa, te potiče očuvanje ekosustava, otvaranja novih tržišta i stvaranje radnih mjesta. U tu svrhu provedena su ispitivanja betona proizvedenog u industrijskom okruženju, s različitim vrstama nedovoljno iskorištenog otpadnog pepela, kako u svježem tako i u očvrnulom stanju. Istraživanje je usmjereno na analizu utjecaja pepela korištenog kao zamjena za dio agregata na mehanička svojstva i svojstva trajnosti kod proizvoda izrađenih od lijevanog i vibroprešanog betona.

Ključne riječi: pepeo drvene biomase, pepeo od mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, opločnici, mehanička svojstva, svojstva trajnosti

SUMMARY

Advancements in the construction industry over the past two decades have resulted in increased greenhouse gas emissions and high energy consumption, significantly contributing to the generation of additional waste. Since the production of cement causes a significant release of carbon dioxide, there is an increasing need for recycling building materials and the use of environmentally friendly raw materials and secondary materials, such as waste wood biomass, waste ashes, and ashes obtained from the thermal treatment of sewage sludge from water treatment plants. Additionally, to mitigate the consumption of sand in concrete formulations, the incorporation of coarser-grained ash is proposed as a partial replacement for traditional aggregate. This approach, grounded in the principles of the circular economy, aims to reduce environmental pollution, greenhouse gas emissions, and the waste generation while minimizing the exploitation of natural resources. It also promotes ecosystem preservation, the development of new markets, and the creation of employment opportunities. For this purpose, tests within this research were carried out on both fresh and hardened concrete, produced in an industrial environment, with different types of waste ash. The research focused on the analysis of the influence of underutilized waste ash used as a substitute for part of the aggregate on the mechanical and durability properties of products made of cast and precast, semi-dry concrete.

Key words: wood biomass ash, sewage sludge ash, concrete paver, mechanical properties, durability

SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE.....	3
3	BIOMASA.....	5
	3.1 Podjela biomase.....	6
	3.2 Oblici biomase.....	7
	3.3 Kemijska i fizikalna svojstva biomase.....	9
	3.4 Biomasa kao obnovljivi izvor energije.....	10
	3.5 Korištenje energije od biomase.....	12
	3.6 Energane na biomasu.....	13
4	DRVNA BIOMASA.....	17
	4.1 Energane na drvenu biomasu.....	18
5	PEPEO IZ DRVNE BIOMASE (PDB).....	24
	5.1 Podjela PDB-a.....	25
	5.2 Sastav i struktura PDB-a.....	26
	5.3 Primjena i količina PDB-a.....	29
6	MULJ S UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA.....	31
	6.1 Svojstva mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda.....	32
	6.2 Obrada mulja.....	32
	6.2.1 Zgušnjavanje mulja.....	34
	6.2.2 Stabilizacija mulja.....	35
	6.2.3 Dehidracija mulja.....	36
	6.2.4 Dodatne faze obrade mulja.....	36
7	PEPEO MULJA S UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA.....	38
	7.1 Svojstva SSA.....	39
	7.1.1 Veličina čestica.....	39
	7.1.2 Gustoća.....	40
	7.1.3 Poroznost.....	40
	7.2 Kemijski sastav.....	41

7.3	Mogućnost primjene SSA.....	42
7.4	Ekonomske i ekološke prednosti uporabe SSA.....	43
8	PREDGOTOVLJENI BETONSKI OPLOČNICI.....	44
8.1	Vibroprešanje.....	45
9	EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	47
9.1	Lijevani beton.....	47
9.1.1	Materijali.....	48
9.1.2	Projektiranje sastava mješavine lijevanog betona.....	50
9.1.3	Miješanje lijevanog betona i ispitivanja betona u svježem stanju.....	51
9.2	Ispitivanje lijevanog betona u očvrslulom stanju.....	54
9.3	Metode ispitivanja lijevanog betona u očvrslulom stanju.....	56
9.3.1	Tlačna čvrstoća.....	56
9.3.2	Kapilarno upijanje.....	57
9.3.3	Vodonepropusnost.....	58
9.3.4	Upijanje vode.....	60
9.3.5	Otpornost na djelovanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima.....	60
9.3.6	Modul elastičnosti.....	61
9.4	Analiza rezultata ispitivanja lijevanog betona.....	63
9.4.1	Tlačna čvrstoća.....	63
9.4.2	Kapilarno upijanje.....	64
9.4.3	Vodonepropusnost.....	65
9.4.4	Upijanje vode.....	66
9.4.5	Otpornost na djelovanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.....	67
9.4.6	Modul elastičnosti.....	68
9.5	Vibroprešani beton.....	71
9.5.1	Materijali.....	71
9.5.2	Projektiranje sastava mješavina vibroprešanog betona.....	73
9.5.3	Proizvodnja vibroprešanog betona.....	75
9.6	Ispitivanje vibroprešanog betona u očvrslulom stanju.....	76
9.7	Metode ispitivanja vibroprešanih opločnika.....	77

9.7.1 Tlačna čvrstoća.....	77
9.7.2 Čvrstoća na savijanje.....	79
9.7.3 Čvrstoća na cijepanje	81
9.8 Analiza rezultata ispitivanja vibroprešanog betona.....	81
9.8.1 Tlačna čvrstoća.....	81
9.8.2. Čvrstoća na savijanje.....	83
9.8.3 Čvrstoća na cijepanje	84
10 ZAKLJUČAK	1

1 UVOD

U posljednja dva desetljeća razvoj industrije građevnog materijala je rezultirao emisijom stakleničkih plinova i znatnom potrošnjom energije. Beton, najčešće korišteni građevinski materijal, se odlikuje znatnom potrošnjom prirodnih resursa, kao što su voda, pijesak i kamen. Uz znatnu potrošnju prirodnih resursa dolazi do velikih količina građevinskog otpada prilikom rušenja i izgradnje. Glavni sastojak betona je upravo cement pri čijoj proizvodnji dolazi do otpuštanja velikih količina ugljikovog dioksida (CO_2), koji ima značajan negativan utjecaj na globalne klimatske promjene. Do znatno većeg korištenja cementa, a samim time i izgradnje, govori nam podatak o prosječnom porastu CO_2 sa 1,3 % za vrijeme 90-ih do 5-7 % koji se proizvodi danas [1].

Prilikom proizvodnje jedne tone cementa ispušta se od 0,65 do 0,95 tona ugljikovog dioksida, ovisno o učinkovitosti procesa proizvodnje [2].

Industrija građevnog materijala bi u što većoj mjeri trebala reciklirati građevni otpad i koristiti ekološki prihvatljive sirovine i sekundarne materijale. Institucije Europske unije Direktivom 2018/2001 postavile su novi cilj da do 2030. godine udio energije iz obnovljivih izvora mora iznositi najmanje 32 % u ukupnoj bruto potrošnji. Kako bi se ispunio navedeni zahtjev EU ima namjeru zamijeniti elektrane na ugljen s novim energanama na plinovitu i krutu biomasu [3].

Energane na plinovitu i krutu biomasu spadaju među obnovljive izvore energije. Drvo apsorbira gotovo jednaku količinu ugljikovog dioksida koliko ispušta izgaranjem, stoga drveni ugljen smatramo ugljičnim neutralnim gorivom [4]. Velike količine pepela drvene biomase upravo nastaju u energanama gdje se izgaranjem biomase dobiva energija. Biomasa je ključan čimbenik u cilju smanjenja klimatskih promjena te doprinosu zapošljavanja i gospodarskom rastu, najviše u ruralnim područjima.

Otpriblike 49 % ukupne kopnene površine Republike Hrvatske, odnosno oko 2 700 000 ha prekriveno je šumama stoga RH raspolaže znatnom količinom drvene biomase što je rezultiralo otvaranju brojnih energana na biomasu [5]. Kao rezultat otvaranja energana i znatne količine drvene biomase može se očekivati 25000 tona pepela drvene biomase (PDB) godišnje [3].

Pepeo drvne biomase se obično odlaže na odlagalištima, no ta odlagališta trebaju biti dobro pripremljena i osmišljena kako ne bi došlo do onečišćenja zbog čestica u zraku ili zbog podzemne vode što može uzrokovati velike troškove.[6]

Trend porasta primjene biomase kao obnovljivog izvora energije povećava količinu pepela koji se odlaže na odlagalištima, uglavnom bez ikakvog oblika kontrole, što predstavlja opasnost za ljudsko zdravlje [4]. Zbog navedenih razloga pepeo drvne biomase počeo koristiti za izradu miješanih cemenata, betona i drugih materijala na bazi cementa. Prilikom istraživanja zaključilo se da se mogu dobiti rezultati sličnih ili boljih performansi u vidu čvrstoće i trajnosti, ovisno o fizikalno-kemijskim svojstvima pepela. Ukoliko se PDB koristi u betonima kao zamjena cementu dolazi do smanjenja emisije ugljikovog dioksida i troškova zbrinjavanja otpada [7]. Pepeo koji je nastao izgaranjem biomase može se podijeliti s obzirom na mjesto sakupljanja na ložišni pepeo i leteći pepeo. Ložišnog pepela nastaje znatno više od letećeg, pa samim time on stvara veće probleme prilikom zbrinjavanja [4]. Dimenzije čestica ložišnog pepela s dna peći veće su od čestica letećeg pepela, što ga čini prikladnijim za primjenu u betonu kao zamjenu za dio agregata [8]. Time uz smanjenja otpada na odlagalištima dolazi i do manjeg iskorištavanja prirodnih resursa odnosno kamenog agregata [4].

Uz otpuštanje znatne količine CO₂ prilikom proizvodnje cementa i problema sa odlaganjem pepela dobivenog izgaranjem drvne biomase, veliki problem također predstavlja zbrinjavanje i obrada mulja koji se sakuplja u uređajima za pročišćavanje otpadnih voda (SSA). Velika količina mulja nakon obrade odlaže se na odlagalištima ili se koristi u poljoprivredi. U posljednje vrijeme je zakonski ograničena upotreba mulja u poljoprivredi. Stoga se mulj počeo spaljivati kako bi mu se smanjio volumen i samim time troškovi odlaganja. Iz ekoloških aspekata i ograničenog prostora odlaganja u posljednje vrijeme se sve više pronalaze različiti načini ponovne uporabe otpada. Termički obrađeni mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) počeo se koristiti kao zamjena udjela cementa ili agregata budući da ima pucolanska svojstva baš kao portland cement i pepeo drvne biomase [9,10].

Cilj ovoga rada je ispitati utjecaj PDB-a na trajnosna i mehanička svojstva lijevanog i vibroprešanog betona te utjecaj SSA na mehanička svojstva vibroprešanog betona. U oba slučaja pepeli su zamijenili udio sitnog agregata frakcije od 0 – 4 mm.

2 OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

Obnovljivi izvori energije, u usporedbi s neobnovljivim izvorima energije, se ne iscrpljuju uslijed trošenja, već se obnavljaju. Razvoj obnovljivih izvora energije je važan iz više razloga:

- obnovljivi izvori energije imaju ulogu u smanjenju emisije ugljikovog dioksida, te samim time utječu na smanjenje klimatskih promjena
- neobnovljivih izvora energije je sve manje
- smanjuje se ovisnost o uvozu energetske sirovine i električne energije te se povećava energetska održivost sustava

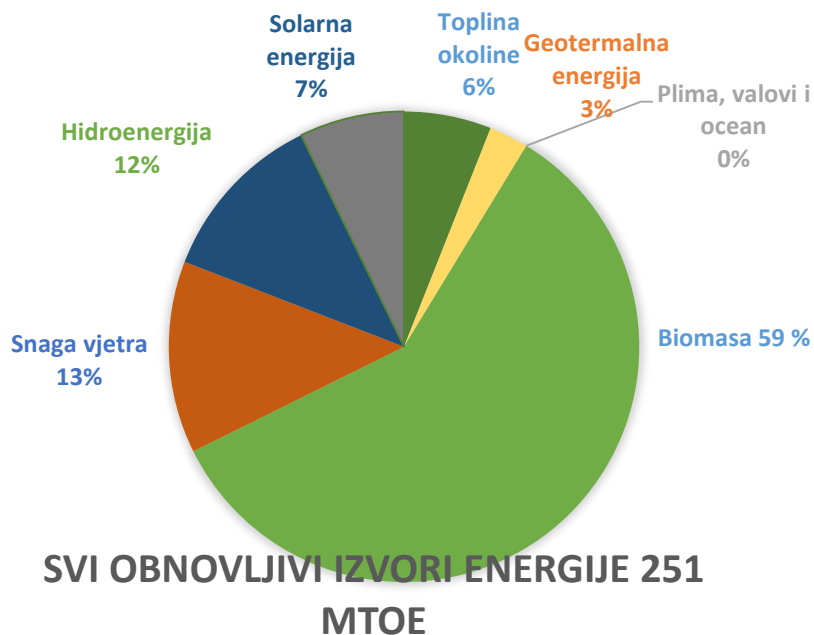
U skoroj budućnosti se predviđa da će obnovljivi izvori energije postati ekonomski konkurentni tradicionalnim izvorima energije [11].

Primjenom obnovljivih izvora energije ostvaruju se ekonomske uštede i otvaraju nova radna mjesta uz ekološku dobrobit i neovisnost o gorivu.

Oblici obnovljivih izvora energije su:

- energija sunca
- energija vjetra
- hidroenergija
- geotermalna energija
- biomasa i dr. [12].

Obnovljivi izvori energije postaju jedan od ključnih čimbenika razvoja budućnosti zemlje. Slika 1. prikazuje distribuciju bruto potrošnje obnovljive energije u 2021. godini.



Slika 1. Distribucija bruto potrošnje energije dobivene iz obnovljivih izvora u 2021. godini [13]

Kako je prikazano na grafikonu, biomasa i obnovljivi otpad čine 58,9 % od ukupne obnovljive energije, odnosno 148 milijuna tona nafte (MTOE). Najveći udio biomase je upravo kruta biomasa koja zauzima 70,3 % biomase, zatim tekuća biomasa sa udjelom od 12,9 % u odnosu na ukupnu biomasu. Tekuća biomasa dijeli se na biodizel (77,1 %), biobenzin (16,6 %) i na ostala biogoriva [13].

3 BIOMASA

Prema članku 3. Zakona o energiji koji je na snazi od 2018. godine, biomasa je opisana kao gorivo dobiveno od dijelova biljaka ili biljaka kao što su ljuske, drvo, ovojnice ili slama stabljike žitarica. Biomasa predstavlja biorazgradive dijelove industrijskog otpada, čije je energetske korištenje dopušteno, kao i biorazgradive dijelove ostataka, proizvoda i poljoprivrednih otpadaka. Tržišni uvjeti i zakonodavni okvir direktno utječu na korištenje biomase u vidu proizvodnje energije. Kruta, plinovita i tekuća goriva dobivaju se kemijskim i biološkim procesima pretvorbe biomase [14,15].

Biomasa je najkompleksniji oblik obnovljive energije zbog toga što obuhvaća široku sirovinsku osnovu. Nastaje iz komunalnog otpada, otpada tijekom pročišćavanja voda i kanalizacijskog mulja ili tijekom proizvodnih procesa u različitim industrijama. Sastoji se od raznovrsnih proizvoda životinjskog i biljnog svijeta, kao što su kora, piljevina, grane i drvo iz šumarstva, ostatci orezivanja maslina i vinove loze, odkoštene trešnje iz poljoprivrede, ostatci sa stočnih farmi te industrijski i komunalni otpad [16].

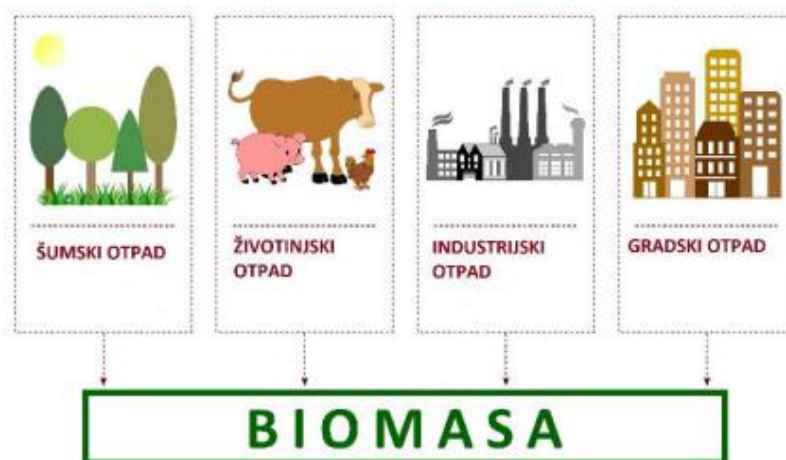
Energija biomase može poslužiti za proizvodnju toplinske energije, električne energije te goriva za transport. Pojam "biogoriva" često se koristi za plinovita ili tekuća goriva za transport dok se pojam "bioenergija" koristi za energane na biomasu koje služe za proizvodnju struje i topline.

Biomasa ima predispozicije za daljnji razvoj koji treba slijediti neka osnovna načela kao održivost, visoka učinkovitost te konkurentnost. Korištenje biomase za proizvodnju topline, kako je iskustvo pokazalo, je najbolji način u vidu zadovoljavanja navedenih načela. Biomasa se sve više koristi za proizvodnju topline, bez obzira da li je to obrađeno drvo ili drvo korišteno za ogrjev [17].

Predviđa se da će u svijetu do sredine stoljeća udio biomase u potrošnji energije iznositi između 30 % i 40 % . Prema EU dokumentaciji predviđa se da će proizvodnja energije iz biomase biti za 73 % veća u odnosu na ostale obnovljive izvore energije [11].

3.1 Podjela biomase

Jedna od podjela biomase je na energetske biljke i otpad odnosno ostatke. Energetske biljke mogu biti alge, višegodišnje trave ili brzorastuće drveće. Otpad uključuje šumske, industrijske ili poljoprivredne ostatke koji se dalje prerađuju u tekuće biogoriva ili bioplin [18]. Na slici 2 prikazana je podjela biomase.



Slika 2. Podjela biomase [16]

Glavna podjela biomase je prema porijeklu, odnosno prema sirovini od koje nastaje biomasa, te prema konačnom proizvodu:

- 1) Podjela prema porijeklu na :
 - a) Otpadno drvo i šumsku biomasu:
 - Ostatci iz šumarstva i drvno – prerađivačke industrije
 - Devastirana šumska masa i oboljela stabla
 - b) Poljoprivredna biomasu i ostatke
 - Uključuje otpad životinjskog porijekla i biljke
 - c) Energetske nasade
 - Drvna biomasa koja je uzgajana za dobivanje energije

- Biljke kratke ophodnje

2) Podjela prema konačnom proizvodu na:

- Bioplinove
- Krutu biomasu
- Kapljevita biogoriva [16]

3.2 Oblici biomase

Struktura biomase može biti u sva tri agregatna stanja:

- 1) Kruta biomasa
 - Odnosno peleti, drvo, kruti dio komunalnog otpada (Slika 3. i Slika 4.)
- 2) Tekuća biomasa
 - Odnosno biogoriva, drveno ili katransko ulje (Slika 5.)
- 3) Plinovita biomasa
 - Odnosno bioplin i sintetični tip[15]



Slika 3. Briketi [19]

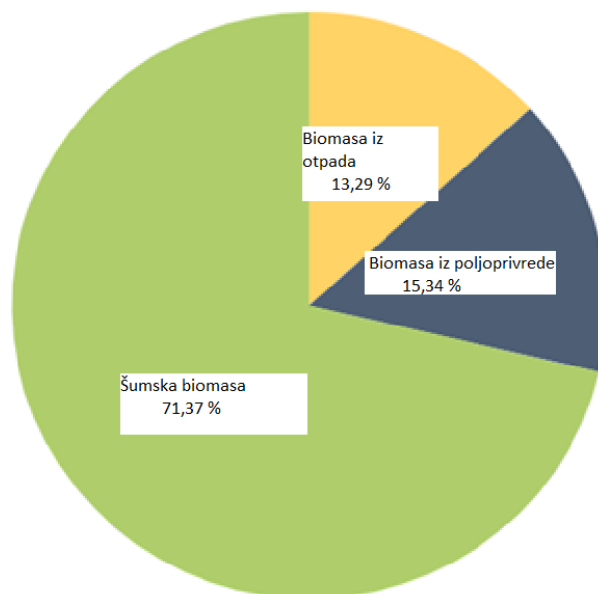


Slika 4. Peleti [20]



Slika 5. Biodizel [21]

Udio otpada i ostataka ovisi o različitim čimbenicima. Slika 5. prikazuje postotak biomase u odnosu na vrstu sirovine.



Slika 6. Udio biomase prema vrsti sirovine [22]

3.3 Kemijska i fizikalna svojstva biomase

Biomasa je vrlo složena i heterogena te se temelji na ugljiku i sastoji se od mješavina organskih molekula koje sadrže vodik, često dušik i malu količinu drugih atoma, uključujući alkalne, zemnoalkalne i teške metale. Svojstva drvene biomase variraju ovisno o vrsti biljke, uvjetima uzgoja, lokaciji na kojoj je rasla, žetvi, uvjetima skladištenja itd. [23]

Postotak ugljika u biomasi nalazi se u rasponu od 37-46 % kada se govori o poljoprivrednim ostacima, te oko 50 % kod drveta. Ugljik se može u biomasi nalaziti u slobodnom ili u veznom stanju. Postotak vodika u biomasi je znatno manji i iznosi 5-6 %, te se u biomasi nalazi samo u veznom stanju. Količina kisika u biomasi iznosi 33-45 %, dok se natrij nalazi u znatnom manjem postotku koji iznosi oko 2 %.

Biomasa je gorivo sastavljeno od skupine organskih polimera koji se sastoje od lanaca ugljikovodika. Fizikalna svojstva biomase su:

- Oblik čestica
- Poroznost čestica
- Veličina i distribucija veličine čestica[15]

Prilikom dobivanja goriva iz biomase najvažnije karakteristike biomase su ogrjevna vrijednost i sadržaj vlage. Ogrjevna vrijednost u jedinici MJ/kg pokazuje ukupnu količinu energije koja je dostupna u gorivu. Uglavnom je opisana kao funkcija kemijskog sastava goriva i može se prikazati na dva načina: niža ogrjevna vrijednost (LHV) ili viša ogrjevna vrijednost (HHV). HHV predstavlja ukupnu količinu toplinske energije koja je dostupna u gorivu, zajedno sa energijom sadržanom u ispušnim plinovima i vodenoj pari, dok je LHV isti kao HHV osim što ne sadrži energiju sadržanu u vodenoj pari. Gotovo sve vrste sirovina za biomasu imaju HHV raspon od 15-19 MJ/kg.

Sadržaj vlage može napraviti razliku između dobrog i lošeg goriva. Goriva s visokim udjelom vlage teže izgaraju i daju manje korisne topline po jedinici mase. Razlog tome je što sadrže veliku količinu vode, koja ne daje nikakvu energetske vrijednosti jer se velik dio energije koristi se za isparavanje i zagrijavanje vode. Svježe drvo otprilike je pola vode, dok suho drvo može uzrokovati probleme s prašinom, što dovodi do potencijalnih opasnosti od eksplozije [23].

3.4 Biomasa kao obnovljivi izvor energije

U nadolazećem periodu očekuje se značajno povećanje interesa za dobivanje energije pomoću biomase zbog sve većih potreba industrije za jeftinom energijom, strožih propisa za zaštitu okoliša, te potrebe za smanjenje količine otpadnih materijala. Postoje brojne prednosti biomase kao obnovljivog izvora energije, kao što su: stalna obnovljivost izvora, očuvanje okoliša i održivosti, značajan izvor energije i drugi, pri čemu najveću prednost predstavlja nepostojanost opterećenja atmosfere ugljikovim dioksidom (CO₂). S obzirom da je količina nastalog CO₂ koja dolazi u atmosferu izgaranjem biomase jednaka količini CO₂ kojeg biljka apsorbira iz atmosfere, biomasu nazivamo CO₂ neutralnim gorivom. Na slici 6. je prikazano kruženje tvari u atmosferi [15,23].

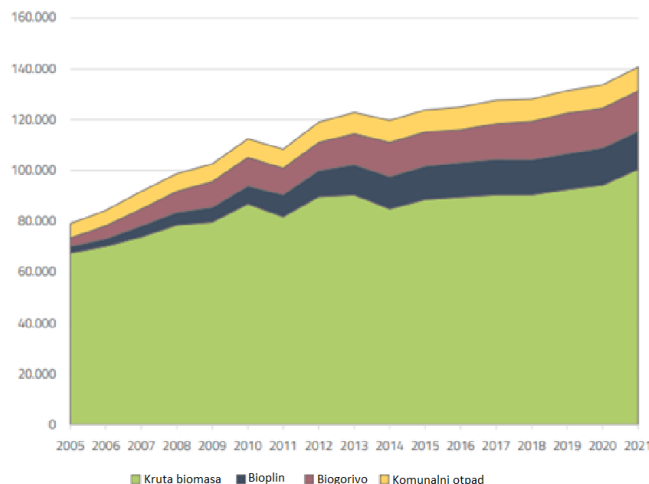


Slika 7. Kružni tok kretanja tvari [24]

Prikazani kružni tok je prirodno zatvoreni tok koji postoji i ukoliko se biomasa ne koristi kao izvor energije. Prilikom korištenja biomase kao obnovljivog izvora energije postoje i nedostaci kao što su: heterogenost sastava, niska gustoća, skupo korištenje se zahtijevaju razni poticaji, troškovi zbog transporta i skladištenja biomase, značajni problemi prilikom nalaženja i sakupljanja i dr.

Većinu materijala biomase lakše je rasplinjavati nego ugljen zbog toga što je biomasa reaktivnija i ima veću stabilnost na paljenje. Zbog navedene karakteristike biomasa je lakša za termokemijsku preradu u goriva veće vrijednosti poput metanola i vodika. Sadržaj pepela biomase obično je niži nego kod ugljena, dok je sadržaj sumpora znatno manji nego kod fosilnih goriva. Pepeo od biomase ne sadrži agresivne metale kao mnoga fosilna goriva pa ih možemo koristiti kao dodatak tlu kako bi se obnovile hranjive tvari uklonjene žetvom.

Biodizel, tekuće gorivo iz biomase, sličan je dizelskom gorivu samo što sadrži manju količinu pepela i sumpora. Isti slučaj je i kod bioetanola, no on još sadrži oko 70 % ogrjevne vrijednosti nafte. Oba tekuća goriva sadrže niži tlak pare i imaju manju zapaljivost što može biti i prednost i nedostatak [15,23]. Slika 8. prikazuje razvoj proizvodnje primarne energije iz biomase prema vrsti.



Slika 8. Razvoj proizvodnje primarne energije iz biomase prema vrsti [13]

3.5 Korištenje energije od biomase

U svijetu se provode brojna istraživanja o korištenju otpadnih materijala kako bi se spriječio njihov toksični utjecaj na okoliš i njihovo nagomilavanje na deponije. Ekonomski isplativo rješenje je da otpadni materijal koristimo za dobivanje novih proizvoda, dok je njihovo odlaganje u zemlju neekonomično [2].

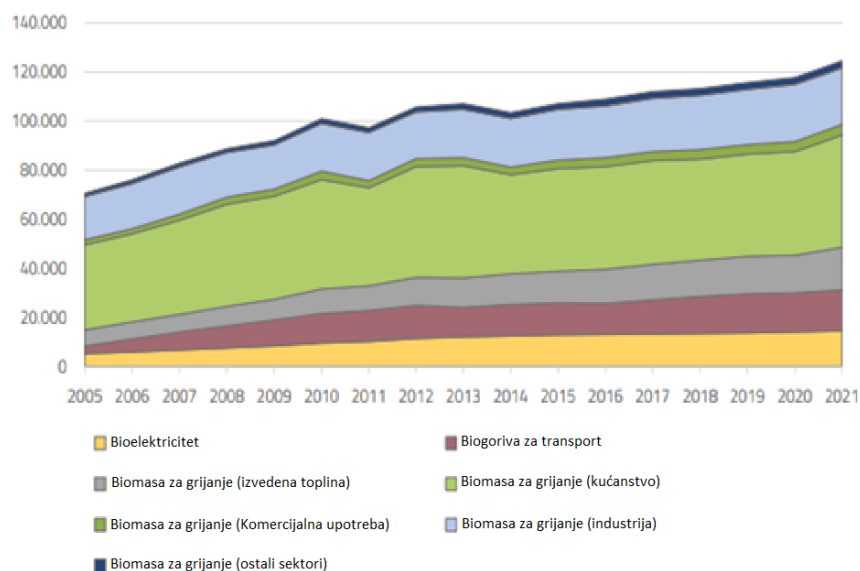
Razlikuje se izravno i posredno iskorištavanje biomase u energetske svrhe. Biomasa se izravno koristi kao gorivo u ložištima raznih izvedbi i veličina, od kotlova i kamina do velikih energetske postrojenja, pri čemu se proizvodi električna i toplinska energija. U odnosu na izravno iskorištavanje biomase, kod posrednog iskorištavanja, biomasa se prerađuje različitim biokemijskim procesima u tekuća i plinovita goriva, pri čemu se nakon prerade se dobiva električna i toplinska energija [14].

U usporedbi sa ostalim obnovljivim izvorima energije, biomasu jedinu možemo koristiti za neograničenu proizvodnju toplinske i električne energije. Postoje različiti načini dobivanja energije iz biomase, a neki od njih su:

1. Izravno pretvaranje biomase u energiju jednostavnim izgaranjem pri čemu se dobije vodena para za grijanje ili za dobivanje električne energije.

2. Najrazvijenija metoda kemijske konverzije biomase jest fermentacija biomase u alkohol. Najviše je razvijena u Brazilu gdje dobivaju više od milijun tona etanola kojeg koriste za pogon vozila.
3. Iz biomase, anaerobnom fermentacijom, se može dobiti metan kojeg možemo koristiti kao gorivo [18].

Slika 9. prikazuje evoluciju bioenergije u bruto konačnoj potrošnji energije po krajnjoj uporabi.



Slika 9. Prikaz evolucije bioenergije u bruto konačnoj potrošnji energije po krajnjoj uporabi (ktOE) [13]

3.6 Energane na biomasu

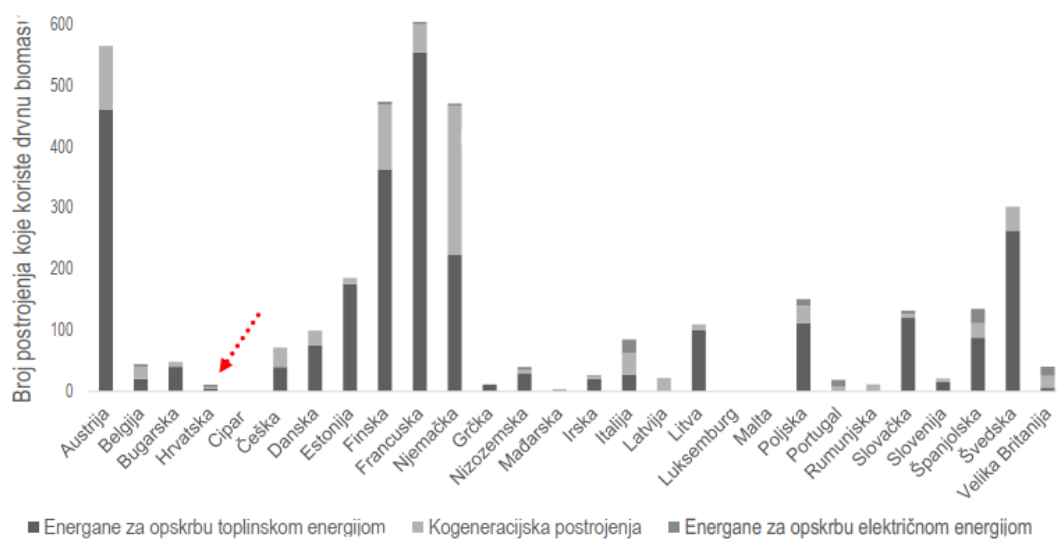
U EU najznačajniji obnovljivi izvori energije su energane na krutu i plinovitu biomasu te se smatra da će biti najvažniji akter za dostizanje europskog plana za primjenu 32 % obnovljive energije do 2030. godine [4].

Broj energana se u zadnjih par desetljeća znatno povećao što prikazuje slika 10. Energane na biomasu koje se nalaze u EU proizvode 148 Mtoe energije. U svrhu dostupnosti novih informacija podaci na karti se konstantno ažuriraju. Karta prikazuje postrojenja na biomasu koja za glavno gorivo koriste drvenu biomasu, celulozu, biomasu s ugljenom ili dr. Karta isključuje energane koje rade na crnu lužinu ili na otpadnom drvu nakon potrošnje.



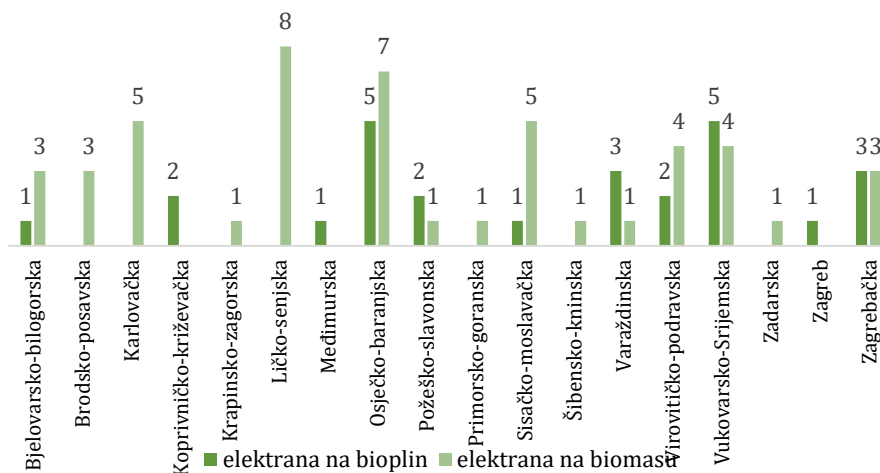
Slika 10. Energane u EU [25]

U Hrvatskoj je izgradnja energana još na začetku što je vidljivo na slici 11.



Slika 11. Broj postrojenja koje koriste biomasu kao gorivo po državama [26]

Slika 12. prikazuje rasprostranjenost postrojenja na bioplin i biomasu po županijama u Republici Hrvatskoj.



Slika 12. Rasprostranjenost postrojenja na bioplin i biomasu po županijama u 2023. godini [27]

Na temelju provedenog istraživanja, u Republici Hrvatskoj u 2021. godini procijenjena je ukupna količina biomase biljnog i životinjskog porijekla na 18,5 milijuna tona, od čega je 77 % biomasa životinjskog porijekla, a 23 % biomasa biljnog porijekla. Većina biomase životinjskog porijekla, odnosno otprilike 98 %, dobiveno je nakon uzgoja stoke. Biomasa biljnog porijekla najviše je došla iz proizvodnje žitarica, uljarica te šećerne repe. Tablica 1. prikazuje procjenu raspoložive biomase dobivene iz brojnih istraživanja [27].

Tablica 1. Pregled procjena raspoložive biomase u RH [27]

	Europska komisija	S2Biom	AgroCycle	Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja	Ministarstvo poljoprivrede	BioECO-R.D.I
Biomasa iz poljoprivrede	6,454 tis. t. suhe tvari					
Ostaci iz ratarske proizvodnje	3.740 tis. t. suhe tvari	1.957 tis. t. suhe tvari	9,4 mil. tona			
Ostaci od rezidbe voćaka i trsova					90 tisuća tona	

Uzgojena biomasa		30 tis. t. suhe tvari				
Ostaci iz prerade poljoprivrednih proizvoda						
Biomasa iz šumarstva	2.778 tis. t. suhe tvari	836 – 3.056 tis. t				
Primarna proizvodnja šumarstva		659 – 2.878 tis. t				
Primarni ostaci iz šumarstva	681 tis. t. suhe tvari	177 – 197 tis. t				
Sekundarni ostaci iz prerade drva		321 – 350 tis. t				
Biomasa iz otpada						
Otpad od hrane	298 tis. t. suhe tvari	493 tis. t		286 tis. t		
Otpad iz vrtova i parkova						
Otpadni drveni materijal	116 tis. t. suhe tvari	70 tis. t				
Biorazgradivi komunalni otpad				1,1 mil. t		
Stajski gnoj			9,5 mil. t			
Klaonički ostaci			190 tis. t			
Mulj od obrade otpadnih voda				67,6 tis. tona		
Otpadni tekstil i odjeća				55,6 tis. tona		
Otpadna ulja				25,4 tis. tona		
Biomasa (otpad) iz ribarstva						14.700

4 DRVNA BIOMASA

Drvena biomasa obuhvaća svu šumsku drvenu masu kao što su stabla, krošnje i grane, drvni ostatci koji su nastali preradom drveta, kao i sve ostale vrste drvenog otpada poput ostataka prilikom čišćenja vodotoka i trasa, ostataka uslijed održavanja zelenih površina i parkova i slično. Jedan od najstarijih izvora energije je upravo biomasa, a ujedno ga možemo nabrojati i među obnovljive izvore. U šumarskoj i drvoprerađivačkoj industriji ostaju znatne količine neželjene drvene biomase koju možemo iskoristiti za dobivanje toplinske i električne energije [28].

Gledajući u aspektu klimatskih promjena i smanjivanja stakleničkih plinova drvena biomasa je, u usporedbi sa fosilnim gorivima i ostalim oblicima obnovljivih izvora energije, povoljnija zbog činjenice da je CO₂ neutralna i zbog male količine unosa fosilnih goriva. U širem kontekstu, energija dobivena drvnom biomasom može učinkovito nadopuniti napore za smanjenje ukupne potrošnje energije. U SAD-u 2006. godine potrošnja energije dobivena iz drvene biomase bila je samo 2 % od ukupne energije te 32 % od ukupne energije dobivene iz obnovljivih izvora energije. Usprkos tome očekuje se da će drvena biomasa u budućnosti davati znatno veće količine energije. Do 2030. u SAD-u drvena biomasa bi mogla zamijeniti 10 % trenutne razine potrošnje nafte ukoliko dio sirovine bude uključivao drvenu biomasu dobivenu žetvom šuma, biomasu koja se ne može prodati, kao što su mala stabla i nekomercijalne vrste, te biomasu dobivenu odlaganjem drvenog otpada [29].

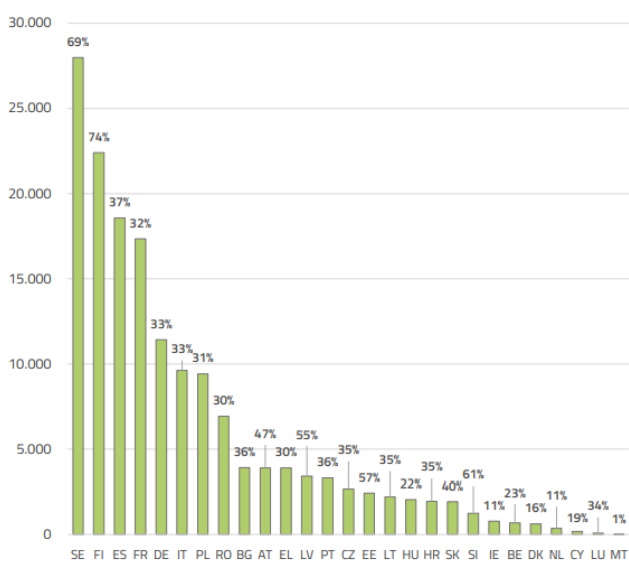
Neke značajne vrste drvene biomase su: drvni peleti, drvena sječka, cjepanice, briketi i dr. [28]
Slika 13 prikazuje drvenu sječku, jednu od vrsta drvene biomase.



Slika 13. Drvna sječka [30]

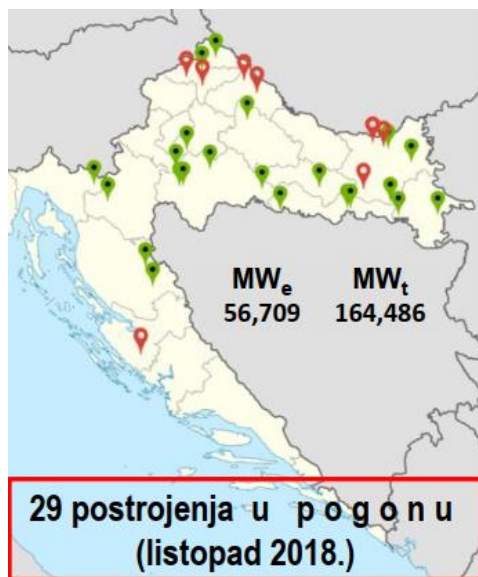
4.1 Energane na drvnu biomasu

Svjetsko šumsko područje u 2020. godini procjenjuje se na 4,06 milijarde ha, što odgovara 31% cjelokupnog svjetskog kopna, dok je EU imala približno 180 milijuna ha što odgovara 45 % njezine kopnene površine. Slika 14. prikazuje ukupnu površinu šuma EU zemalja.



Slika 14. Ukupna površina šuma u EU [31]

Na slici možemo vidjeti da je većina europskih zemalja bogata šumama i samim time ima odličnu podlogu za dobivanje energije iz drvene biomase, dok slika 15. prikazuje broj energana na drvnu biomasu u Republici Hrvatskoj.



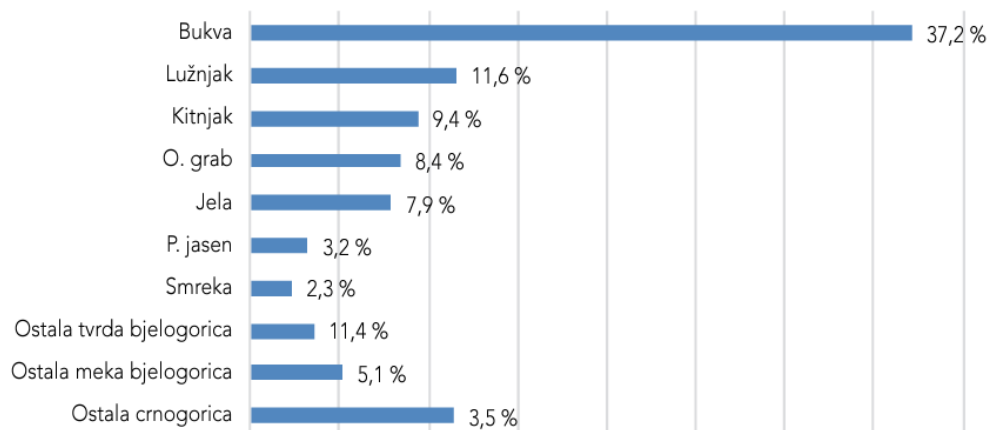
Slika 15. Broj postrojenja na drvnu biomasu u Republici Hrvatskoj [26]

Europska komisija je 2019. godine objavila procjenu proizvodnje biomase u Republici Hrvatskoj koja iznosi 9,3 milijuna tona, od čega 70 % otpada na poljoprivredu, a 30 % na šumarstvo. Proizvodnja šumske biomase 2019. godine iznosila je oko 2785 tisuća tona suhe tvari, te se procjenjuje da još 819 tisuća tona nije bilo prijavljeno. Od ukupne raspoložive šumske biomase, 1594 tisuća tona otišlo je u preradu, 478 tisuća tona se izvezlo u obliku trupaca, a ostatak je iskorišten za dobivanje energije. Iz RH bile su izvezene velike količine piljene građe oko 704 tisuća tona, peleta oko 325 tisuća tona te nusproizvoda obrade drva oko 353 tisuća tona.

Ministarstvo poljoprivrede izrađuje procjene količine biomase dobivene iz rezidbe maslina, trsova i voćaka. Količina orezane mase u 2021. godini iznosila je 122 823 tone, od čega 34,5 % dolazi iz vinograda, 40,6 % iz maslinika i 25 % iz voćnjaka. Prema procjeni spaljuje se oko 27 % ostataka iz rezidbe maslina [27].

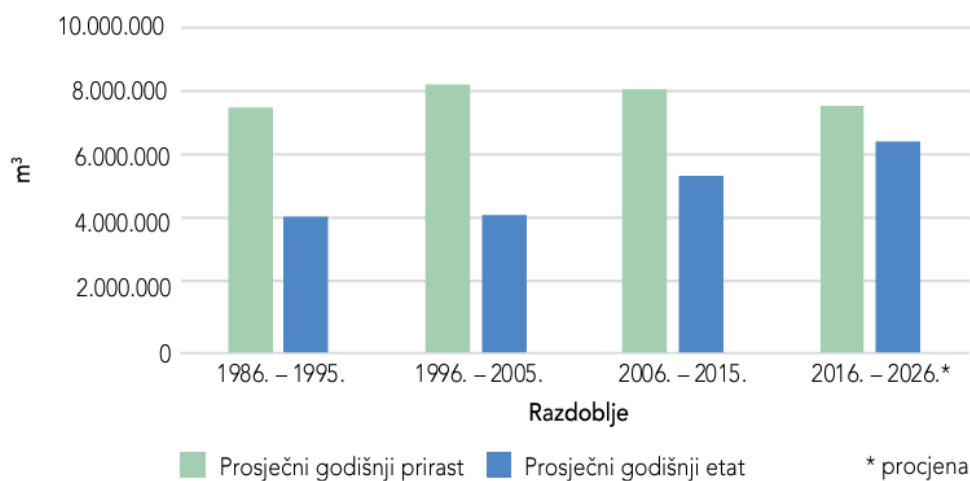
Kao što je već rečeno, Republika Hrvatska je bogata šumama, stoga možemo očekivati da će u budućnosti drvena biomasa biti značajan proizvođač energije. Hrvatske šume d.o.o. provode

održivo gospodarenje šumama. Većina šumskog zemljišta je pod vlasništvom Hrvatskih šuma, a manji dio je pod privatnim vlasništvom. Drvna zaliha za sječu koncentrirana je na pet različitih vrsta drveća što prikazuje slika 16.



Slika 16. Drvna zaliha prema vrsti drveća u Republici Hrvatskoj [32]

Etat je sječiva drvna masa koja predstavlja količinu drvne mase koja se smije koristiti u gospodarske svrhe [32]. Slika 17 prikazuje usporedbu etata i godišnjeg prirasta šuma kroz godine.

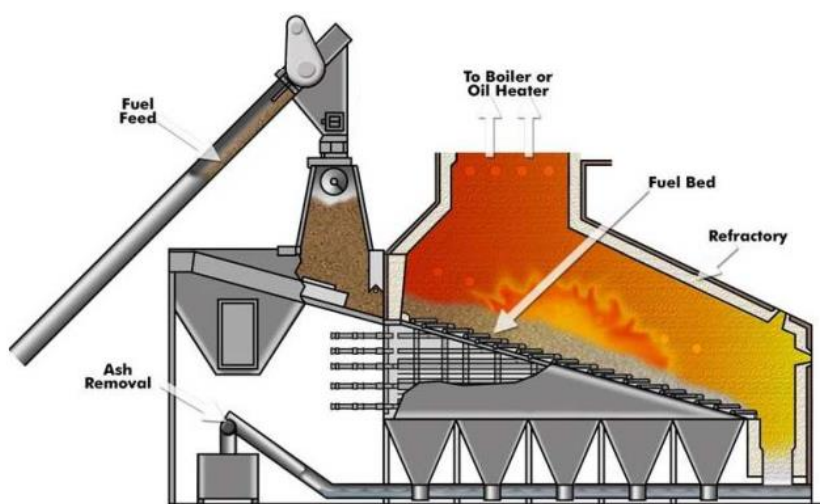


Slika 17. Usporedba godišnjeg prirasta i etata za šume kroz godine [32]

Osnovne vrste ložišta na biomasu su:

- Izgaranje na rešetki
- Izgaranje u fluidiziranom sloju
- Izgaranje u letu

Tehnologija izgaranja na rešetki se u velikoj mjeri koristi za spaljivanje biomase iako je dizajnirana za loženje ugljena. Ova tehnologija izgaranja je pogodnija za kruta goriva kao što su poljoprivredni i šumarski ostatci. Rešetke su mehaničke površine na kojima se izgara gorivo. Rupe između šipki rešetke služe za dovod zraka u procesu izgaranja. U prvi dio rešetke, gdje stavljamo gorivo, vrši se postupak sušenja i zagrijavanja goriva, te je na kraju rešetke jedina preostala stvar pepeo. Gorivo se mora ravnomjerno raspodijeliti na rešetku i treba ga biti u dovoljnoj količini. Rešetke mogu biti fiksne i pokretne, te ravne i kose. Korištenjem pokretnih rešetki može se izgarati gorivo lošije kvalitete i vlažno gorivo. Glavni nedostatak ove tehnologije je nepotpunost izgaranja i značajan gubitak topline. Razlikuju se rešetke s gornjim i donjim dovodom goriva. Za postrojenja malih snaga i goriva kao što su piljevina i drvena sječka pogodnije su rešetke s donjim dovodom goriva[33,34]. Slika 18. prikazuje sustav izgaranja s fiksnom rešetkom.

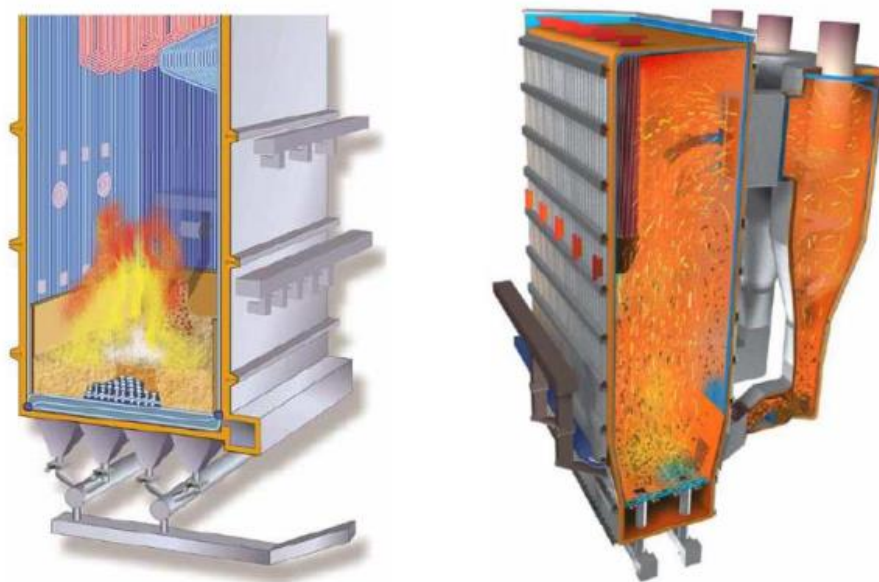


Slika 18. Ložište s fiksnom rešetkom [16]

Tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju je prikladnija za toplinska postrojenja veća od 10 MW, iako postoje i manja postrojenja snage 2 MW. Na temelju radnih značajki mogu se podijeliti u dvije skupine: ložišta s izgaranjem u mjehuričastom fluidiziranom sloju (Slika 19. lijevo) i ložišta s izgaranjem u cirkulirajućem fluidiziranom sloju (Slika 19. desno). Ložišta s izgaranjem u cirkulirajućem fluidiziranom sloju koriste se za postrojenja veća od 100 MW.

Biomasa se miješa s pijeskom i dovodi u kotao gdje se pregrijani zrak upuhuje pod nekim tlakom. Pošto ima dosta pijeska u biomasi, prilikom dolaska zraka dolazi do raspršivanja istog. Na taj način se pospješuje kontakt goriva s kisikom i dolazi do potpunijeg izgaranja. Krevet na koju se stavlja biomasa je najčešće od pijeska ili minerala, ali može biti i od pepela.

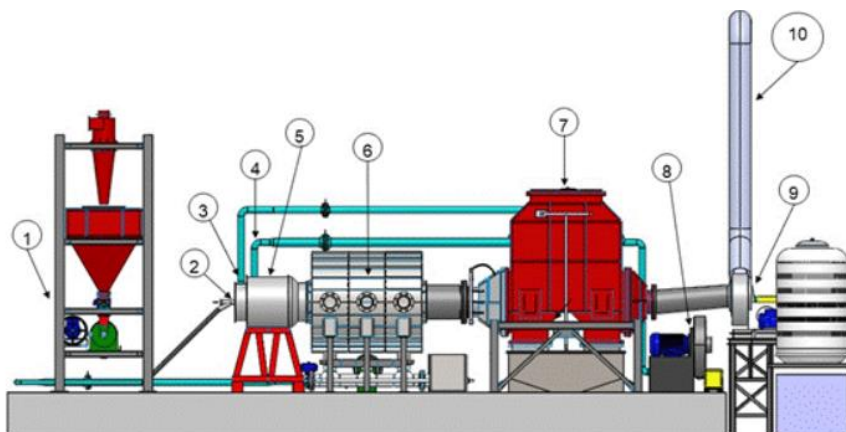
Proces izgaranja je stabilan i odvija se na relativno niskoj temperaturi od 750 – 900 °C. Biomasa koja se izgara može biti različite kvalitete i sadržaja vlage. Uobičajena goriva od biomase su šumska sječka, piljevina i kora. [33,34]



Slika 19. presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju: mjehuričasti (lijevo) i cirkulirajući (desno) [16]

Tehnologija izgaranja u letu koristi se u komunalne namjene i velika postrojenja. Ovaj sustav se napravio i koristio za ugljen pri čemu se napravljene neke preinake kako bi se mogao koristiti za biomasu poput: povećanog vremena zadržavanja, recirkulacije plina, miješanja goriva i zraka.

Sve navedeno se moglo postići uvođenjem pretkomore za izgaranje koja se nalazi prije glavne peći. [16,34] Slika 20. prikazuje sustav izgaranja u letu.

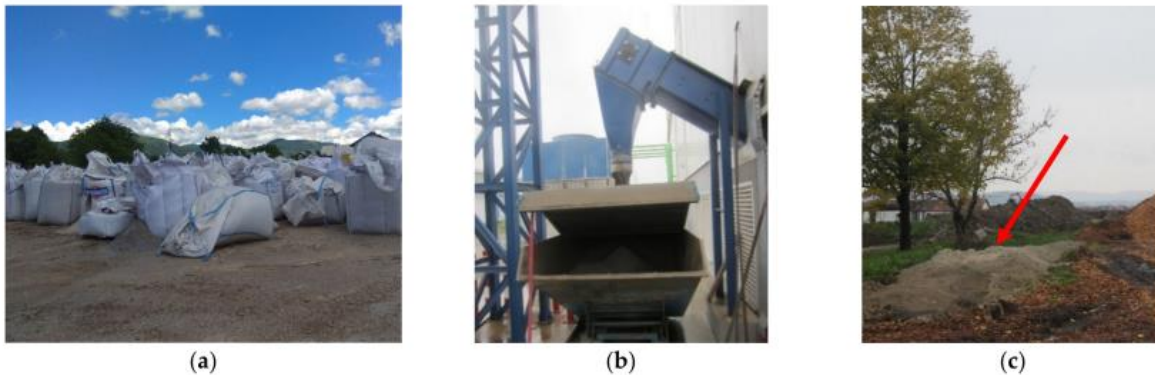


Slika 20. Sustav izgaranja u letu [34]

5 PEPEO IZ DRVNE BIOMASE (PDB)

Prilikom dobivanja energije izgaranjem drvene biomase u elektranama ostaje neizgorivi kruti ostatak, koji sadrži najveći dio mineralnih frakcija koje potječu i ovise o biomasi, te ga nazivamo pepelom drvene biomase (PDB). PDB možemo objasniti kao kompleksnu mješavinu organskih i anorganskih spojeva koja je heterogenog sastava. Tijekom procesa izgaranja biomase nastaje otprilike 3 % pepela, što rezultira značajnom količinom otpadnog materijala [36,37].

Postojeća i najčešća praksa postupanja s pepelom jest njegovo odlaganje na odlagalištima otpada (Slika 21) ili njegovo korištenje kao dodatak tlu [37].



Slika 21. Različiti pristupi skladištenja PDB-a : (a) u plastičnim vrećama, (b) u spremniku, (c) na neuređenom odlagalištu [38]

Pepeo iz drvene biomase posjeduje hidraulička i pucolanska svojstva, što mu daje velik potencijal za djelomičnu zamjenu cementa, ali i agregata. [38] Korištenjem PDB-a u građevinskoj industriji uštedjet će se na odlaganju pepela, očuvanja prirodnih resursa te smanjenja emisija stakleničkih plinova [39].

5.1 Podjela PDB-a

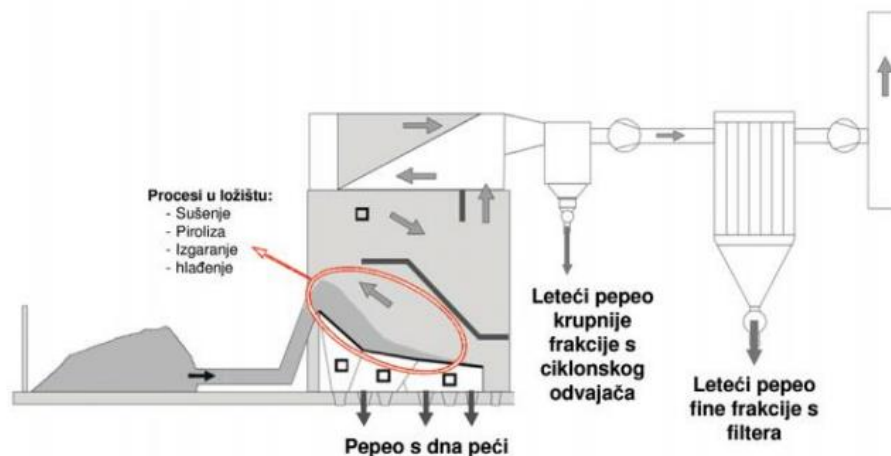
Pepeo drvne biomase se može podijeliti s obzirom na način skupljanja u energanama na tri vrste:

1. Pepeo s dna peći
 - Proizveden je na rešetki s dna komore i u primarnoj komori za sagorijevanje.
 - Sadrži nečistoće kao što su pijesak, glina i kamen, koje mogu uzrokovati stvaranje troske.

2. Krupni leteći pepeo
 - Čestice se prenose dimnim plinovima i skupljaju u ciklonima.
 - Veličine su do nekoliko μm .

3. Sitni leteći pepeo
 - Taloži se u vlaknastim ili elektrostatskim filterima.
 - Veličina im je manja od $1 \mu\text{m}$ [40,41].

Slika 22. prikazuje mjesta prikupljanja pepela.



Slika 22. Shematski prikaz mjesta skupljanja pepela [16]

U energanama s izgaranjem u fluidiziranom sloju najčešće nastaje sitni leteći pepeo s malim udjelom krupnog pepela, dok u izgaranju na rešetki obično nastaje krupniji pepeo i taloži se na

dnu peći. U takvim postrojenjima najviše nastaje pepela s dna peći oko 60 – 90 % ukupne mase pepela, zatim krupnog letećeg pepela koji čini 2 – 30 % , te najmanje nastaje finog letećeg pepela kojega je oko 2 – 15 % od ukupne mase nastalog pepela. Zbog različitih načina na koji se formiraju i različitog kemijskog sastava, dvije frakcije letećeg pepela potrebno je tretirati na različite načine.

Količina nastalog pepela također ovisi o načinu i lokaciji prikupljanja te vrsti biomase, hidrodinamici i vrsti kotla, te o temperaturi toplinske obrade. Količina pepela je obrnuto proporcionalna s temperaturom toplinske obrade [37].

5.2 Sastav i struktura PDB-a

Na sastav i svojstva pepela iz drvene biomase najviše utječe:

1. Vrsta osnovne sirovine biomase
2. Tehnologija izgaranja
3. Geografski položaj [39]

Sastav PDB-a ovisi o različitim čimbenicima, ali najviše je povezan s biomasom jer su izvorni sastojci u biomasi formirane komponente u PDB-u. Biomasa ima vrlo promjenjiv sastav i svojstva, posebno s obzirom na vlagu, strukturne komponente i anorganske sastojke. PDB ima izrazito kristalni karakter s ograničenom pojavom anorganskog materijala. Razne vrste karbonata, sulfata i fosfata se nalaze u ovom pepelu, te je većina njih nastala upravo procesom izgaranja biomase.

Strukturne komponente u biomasi pripadaju šest različitih redova, a najčešći su: celuloza, hemiceluloza, te lignin. Hemiceluloza ima tendenciju da bude u izobilju kod jednogodišnjih i brzorastućim biljkama [42].

Kemijska svojstva letećeg pepela biomase i pepela s dna peći najviše ovise o biomasi od koje su dobiveni, te tehnologiji izgaranja. Tablica 2. prikazuje maseni udio oksida kod letećeg pepela od biomase. Najvažnije komponente pepela su kalcijev oksid, silicijev oksid i aluminijev oksid. Zbroj udjela navedenih komponenata treba biti veći od 60 % kako bi se postigla odgovarajuća svojstva potrebna za korištenje pepela u mortovima i betonima. Visok sadržaj kalcijevog oksida i silicijevog oksida omogućava upotrebu pepela u betonima i mortovima zbog toga što oni sudjeluju u hidrataciji cementa. Navedeni oksidi su između ostalog i glavni sastojci portland

cementnog klinkera. Također, bitno je da udio magnezijevog oksida i kalijevog oksida bude što manji [43].

Tablica 2. Maseni udio oksida kod letećeg pepela dobivenog izgaranjem biomase [44]

Oksidi	Piljevina bukve	Klipovi kukuruza	Koštice šljive	Rižine ljuske	Suncokretove ljuske
SiO ₂	12,33	27,65	3,59	94,38	23,46
CaO	67,80	13,19	14,65	0,97	15,18
Al ₂ O ₃	0,12	2,49	0,11	0,21	8,67
Fe ₂ O ₃	1,09	1,55	0,68	0,22	7,27
K ₂ O	2,59	35,49	44,88	2,29	28,29
MgO	11,43	2,05	11,62	0,19	7,27
P ₂ O ₅	2,29	2,49	20,12	0,54	7,07
SO ₃	0,80	7,14	2,47	0,92	4,03

Što se tiče pepela s dna peći, maseni udio oksida dan je u Tablici 3. U odnosu na leteći pepeo, pepeo s dna peći ne treba biti reaktivan. Ukoliko se pepeo s dna peći koristi kao zamjena agregatu zbroj kalcijevog oksida, silicijevog oksida i aluminijskog oksida mora biti manji od 60 % [43].

Tablica 3. Udio oksida kod pepela s dna peći dobivenog izgaranjem biomase [45,46,47]

Oksidi	SiO ₂ [%]	CaO [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	K ₂ O [%]	MgO [%]	LOI [%]
Pepeo od spaljenog otpada maslina	51,5	20,02	1,44	2,42	16,2	4,5	13,26
Pepeo iz spaljenih ostataka nakon rezidbe maslina	6,84	31,41	2,73	1,39	12,31	2,45	41,49
Pepeo iz šumarske biomase	72,20	17,16	2,32	0,78	0,75	1,97	2,18

Kemijski sastav drva, a samim time i pepela drvne biomase, ovisi i o dijelovima drva koja izgaraju. Korijenje i granje sadrži više kemijskih elementima od samog stabla, dok lišće i kora imaju pet do deset posto veću koncentraciju kemijskih elemenata od stabla. Također, na kemijski sastav utječu i starost lišća, te godišnje doba kada je drvo posječeno. Sa većom starosti lišća koncentracije željeza, kalcija i mangana se povećavaju, dok se koncentracije kalija, dušika i fosfora smanjuju. Uz starost lišća i godišnje doba sječe drva kemijski sastav ovisi i o uvjetima skladištenja i transporta. Ukoliko je PDB čiji je sastav do 50 % od CaO u kontaktu s vodom ili vlagom, doći će do formiranja Ca(OH)₂ i kasnije u kontaktu sa CO₂ iz zraka do formiranja CaCO₃. Također prilikom skladištenja u vlažnoj okolini dolazi do smanjivanja pH vrijednosti [40].

Postoje značajne razlike između kemijskog sastava letećeg pepela i pepela s dna peći ponajviše u udjelu teških metala što je vidljivo u tablici 4.

Tablica 4. Udio teških metala u letećem pepelu i pepelu s dna peći [40]

Element	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	V	Zn
Pepeo s dna peći	0,2 - 3	0,4- 0,7	0 - 7	>60	15 - 300	<0,4	2500 - 5500	40 - 250	15 - 60	10 - 120	15 - 1000
Leteći pepeo	1 - 60	6 - 40	3 - 200	40 - 250	-200	0 - 1	6000 - 9000	20 - 100	40 - 100	20 - 30	40 - 700

Tablica 4. prikazuje da su najveće oscilacije kod teških metala kao što su olovo, kadmij i cink, čiji je udio obrnuto proporcionalan veličini čestica. Sukladno tome, veću količinu navedenih teških metala ima leteći pepeo koji je lakši i sitniji od pepela s dna peći [40].

5.3 Primjena i količina PDB-a

Kao što je već rečeno, Republika Hrvatska je u velikoj mjeri prekrivena šumama, stoga raspolaže velikim potencijalom drvene biomase. Postoje i druga postrojenja uz energane na biomasu kojima je nusprodukt pepeo drvene biomase kao što su tvornice namještaja, tvornice papira i dr. Zbog porasta broja energana na drvnu biomasu te zbog velike količine šuma u Republici Hrvatskoj očekivana proizvodnja PDB-a iznosi 25000 tona godišnje, dok je u EU očekivana proizvodnja od približno 600000 tona godišnje.

PDB se tradicionalno koristio kao poboljšivač tla, te u poljoprivredi i šumarstvu kao gorivo. Međutim, primjena PDB-a u poljoprivredi je ograničena. Primjerice, Danska dozvoljava korištenje maksimalno 3 mg/ha PDB-a na šumskom tlu u periodu od deset godina

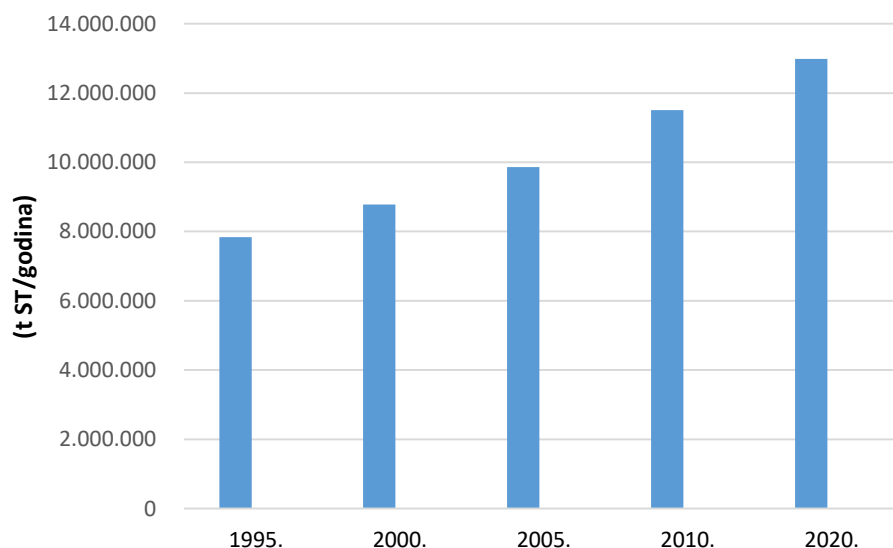
Osim u poljoprivredi, brojna su ispitivanja provedena kako bi se uspostavilo održivo gospodarenje otpadnim pepelom te pronašla mogućnost za njegovu oporabu. Utvrđeno je da se korištenjem PDB-a, kao zamjena cementu, može očekivati sporiji prirast tlačne čvrstoće, minimalni porast kapilarnog upijanja, odgođeno vrijeme vezivanja, povećana potreba za vodom te smanjenje vrijednosti difuzije klorida. Također su provedena ispitivanja ekološkog utjecaja PDB-a prilikom primjene u betonu ili mortu, te su rezultati bili prihvatljivi [32,43,44].

Prema [3], gdje je fokus bio na korištenju otpadnog pepela kao zamjena agregata, upotrebom PDB-a kao zamjene za dio pijeska može se očekivati smanjenje tlačne čvrstoće, povećanje

upijanja vode te povećana visina prodora vode. Na dobivene vrijednosti najviše utječe vrsta pepela kojom je zamijenjena frakcija sitnog agregata. Unatoč djelomičnom smanjenju određenih svojstava betona pri korištenju PDB-a kao zamjene za sitni pijesak, ta svojstva ostaju unutar prihvatljivih granica. Ovi rezultati sugeriraju da PDB ima značajan potencijal za primjenu u betonskoj industriji [3].

6 MULJ S UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

Sve aktualniji problem današnjice je upravo zbrinjavanje i obrada viška mulja koji se sakuplja u uređajima za pročišćavanje otpadnih voda [10]. Dostupni podaci govore da svaka osoba proizvodi od 35 do 85 g suhe tvari na dan. Mulj koji nastaje predstavlja mješavinu anorganskih i organskih tvari koje su raspršene u vodi. Također u mulju se mogu nalaziti razni paraziti, virusi, patogeni organizmi te mnogi toksični spojevi i elementi. Troškovi zbrinjavanja i obrade mulja nisu beznačajni i oni iznose oko 50 % svih troškova poslovanja uređaja za pročišćavanja otpadnih voda. Slika 23. prikazuje godišnju proizvodnju mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) na razini EU [9].



Slika 23. Procjena proizvodnje mulja po godinama u UPOV-a na razini EU [9]

Kod nerazvijenih zemalja kao i u Europi proizvodnja mulja se povećava, dok se njegova kakvoća smanjuje. U 2019. godini proizvelo se približno 8,5 milijuna tona suhe tvari mulja u samo tridesetak europskih država. Glavi način njegovog zbrinjavanja, oko 38 %, je upravo u poljoprivredi, dok se u manjoj mjeri spaljuje (oko 29 %) i odlaže na nepoljoprivrednim površinama i odlagalištima. Zbrinjavanje mulja u poljoprivredi najraširenije je u Irskoj, Danskoj,

Francuskoj, Portugalu, Španjolskoj, Slovačkoj, Norveškoj i na Cipru, dok je u Belgiji, Nizozemskoj i Švicarskoj praktički jedina opcija termička obrada.

U Republici Hrvatskoj u 2020. godini količina sakupljenog mulja s UPOV-a je iznosila oko 22500 tona suhe tvari. U odnosu na 2015. godinu količina sakupljenog mulja povećala se za 10 %. Samo 2 % od ukupne količine mulja zbrinuto je na poljoprivrednim površinama i kao sredstvo za poboljšanje tla na zelenim površinama, dok se ostatak privremeno skladišti na lokacijama uređaja za pročišćavanje voda ili kod tvrtki koje su ovlaštene za gospodarenje otpadom [10].

6.1 Svojstva mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

U uređajima za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) svakodnevno se tretiraju velike količine vode kako bi se uklonili virusi, zagađivači i bakterije. Mulj čini oko 1 % otpade vode u UPOV-u. Sastojci mulja su organski i anorganski spojevi, uključujući tragove teških metala kao što su cink, krom, nikal, cink, živa, olovo, kadmij i bakar. Nabrojani teški metali ograničavaju korištenje mulja u poljoprivredi jer je njihovo nakupljanje štetno za okoliš, posebice na prehrambeni lanac. Olovo, cink i bakar prisutni su u mulju u velikim količinama [48].

Svojstva mulja ovise o stupnju pročišćavanja i obrade. Sirovi ili primarni mulj izdvaja se nakon pročišćavanja kroz primarne taložnike, mikrositima ili flotacijom. On nastaje nakon 1. stupnja pročišćavanja, dok biološki mulj nastaje nakon 2. i 3. stupnja pročišćavanja. Određeni UPOV-i koriste kemijska sredstva koja se dodaju u otpadnu vodu i muljeve te im mijenjaju sastav, povećavaju volumen i ukupnu masu.

Obrada mulja podrazumijeva smanjenje volumena mulja u svakoj fazi obrade, kako bi se smanjili troškovi naknadne obrade, transporta, te da bi se spriječili neželjeni utjecaji na okoliš. Prema nekim istraživanjima vrijednost suhe tvari u mulju predstavljaju stupanj obrade. Po njima primarni i biološki mulj sadrži od 1 do 4 % suhe tvari, dok daljnji stupanj ima koncentraciju suhe tvari od 3 do 8 %, a posljednji stupanj se odnosi na dehidraciju i on ima koncentraciju od 18 do 35 % suhe tvari [9].

6.2 Obrada mulja

Troškovi zbrinjavanja i obrade mulja nisu beznačajni. Cijena po toni suhe tvari može doseći i do 800 eura, a u budućnosti će biti i veća. Čimbenici koji u najvećoj mjeri utječu na cijenu

zbrinjavanja i obrade mulja su: njegova količina i fizikalne i kemijske karakteristike, pravni okviri EU, mogućnosti ponovne uporabe mulja, cijena zemlje na kojoj će se mulj odlagati, te troškovi povezani sa transportom mulja. Naravno, troškovi su različiti ovisno o državi, čak variraju u različitim gradovima iste države [10].

Postoji nekoliko vrsta sekundarnih tretmana od kojih je najčešća anaerobna ili aerobna biološka stabilizacija. Tercijarni tretmani pokušavaju eliminirati neke spojeve ili skupine specifičnih spojeva, poput onih povezanih s dušikom i onih povezanih s fosforom. Također postoje i postupci za uklanjanje nekih topljivih organskih spojeva [49].

Ovisno o daljnjoj upotrebi ili zbrinjavanju mulja postoje različiti načini njegove obrade. Mulj se smatra kvalitetnim proizvodom zbog toga što sadrži značajan udio organske tvari, oko 70 %. Obrada mulja ima 3 glavne faze:

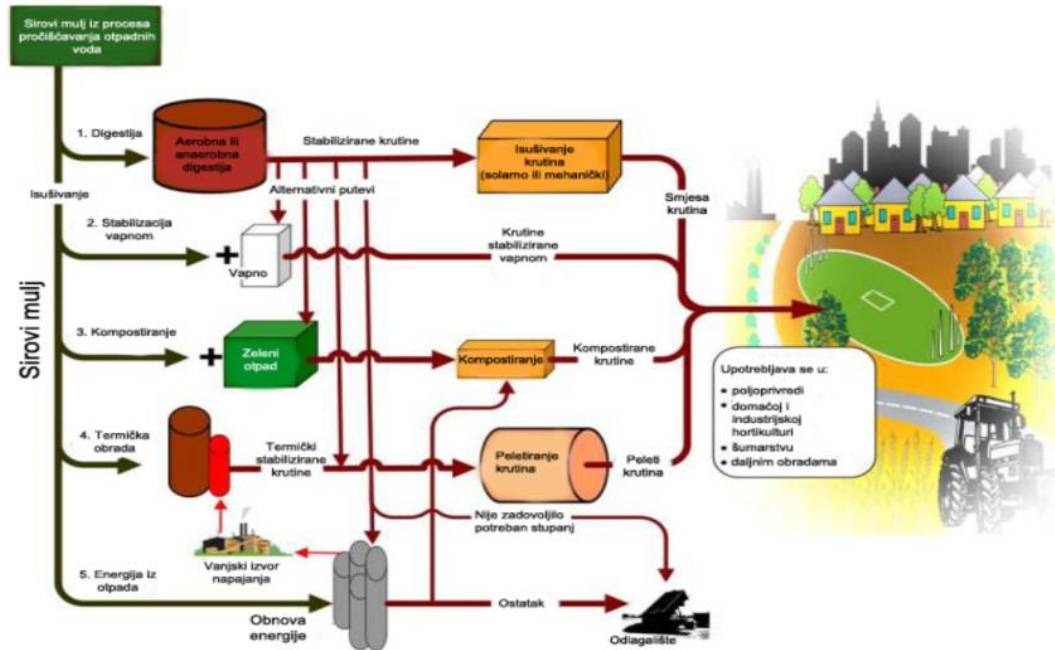
- Stabilizacija
- Zgušnjavanje
- Dehidracija

Količina suhe tvari, odnosno vlažnost mulja, je značajan pokazatelj prilikom odabira tretmana obrade te se na temelju toga mulj može podijeliti na:

- Tekući (sadržaj suhe tvari od 1 do 10 %)
- Vlažni (sadržaj suhe tvari od 10 do 30 %)
- Kruti (sadržaj suhe tvari od 30 do 90 %)
- Osušeni (sadržaj suhe tvari veći od 90 %)

[9,50]

Slika 24. prikazuje različite procese obrade mulja



Slika 24. Procesi obrade mulja [51]

6.2.1 Zgušnjavanje mulja

Zgušnjavanje mulja je fizikalni proces pomoću kojeg se smanjuje volumen mulja, te povećava koncentracija suhe tvari pri čemu dolazi do smanjenja troškova kasnije obrade mulja. Rezultat zgušnjavanja mulja jest mulj s 2 do 12 % suhe tvari. Usprkos smanjenju volumena i povećanju koncentracije suhe tvari mulj se i dalje ponaša kao tekućina umjesto kao krutina. Mulj se počinje ponašati kao krutina kad ima koncentraciju suhe tvari oko 15 – 20 % [9,52].

Razlikuju se 3 glavna postupka zgušnjavanja:

- Zgušnjavanje isplivavanjem
- Gravitacijsko zgušnjavanje
- Mehaničko zgušnjavanje (gravitacijska traka, centrifuga)

Gravitacijsko zgušnjavanje je proces prilikom kojeg se sirovi mulj gravitacijom unosi u zgušnjivač gdje se zadržava 1 do 1,5 dana. Razlikuju se dinamički i statički zgušnjivači. Zgušnjavanje isplivavanjem koristi se za mulj male gustoće [9,50].

6.2.2 Stabilizacija mulja

Stabilizacija mulja je proces prilikom kojeg se smanjuje sadržaj organskih tvari u mulju čime se sprječava njegovo daljnje truljenje. Mulj se treba stabilizirati prije ponovne upotrebe ili konačnog odlaganja u svim slučajevima osim u slučaju spaljivanja mulja. Razlikujemo tri procesa stabilizacije mulja: biološka stabilizacija, toplinska stabilizacija i kemijska stabilizacija. Tablica 5. prikazuje tipičan raspon sastava za neobrađeni i stabilizirani mulj.

Tablica 5. Uobičajeni rasponi sustava neobrađenog i stabiliziranog mulja [49]

Parametar [%]	Neobrađeni mulj	Stabilizirani mulj
Ukupna suha tvar	2 – 8	6 – 12
Isparljive krutine	60 – 80	30 – 60
Masti	6 – 30	5 – 20
Proteini	20 – 30	15 – 20
Dušik	1,5 – 4,0	1,6 – 6,0
Fosfor (P_2O_5)	0,8 – 2,8	1,5 – 4,0
Potaša (K_2O)	0 – 1	0 – 3
Celuloza	8 – 15	8,15
Željezo (ne kao sulfid)	2 – 4	3 – 8
Silicij (SiO_2)	15 – 20	10 – 20

Biološka stabilizacija mulja dijeli se na anaerobnu (bez prisutnosti kisika) i aerobnu (uz prisutnost kisika) biološku razgradnju organskih tvari. Anaerobni postupak biološke stabilizacije je jedini postupak pomoću kojeg se može iskoristiti energijska razina mulja. Kod ovog procesa dolazi do razgradnje organske tvari mulja u spremnicima koji nemaju pristup zraka, uz istodobno metansko i kiselo vrenje. Aerobna stabilizacija mulja je proces kod kojeg se organske tvari u mulju razgrađuju pomoću aerobnih mikroorganizama koji se raspršuju u spremniku te im se uz miješanje donosi kisik ili zrak. Slika 25. prikazuje tornjeve anaerobne stabilizacije mulja u Zagrebu.



Slika 25. Tornjevi za anaerobnu obradu mulja na UPOV-u u Zagrebu [53]

Kod kemijske stabilizacije koristi se vapno pomoću kojeg raste pH vrijednost. Porastom pH vrijednosti dolazi do ugibanja mikroorganizama i samim time prestaje biološka razgradnja. Sama provedba kemijske stabilizacije nema dugotrajan učinak. Naime, može doći do smanjenja pH vrijednosti što uzrokuje ponovan razvoj mikroorganizama u mulju [9,50].

6.2.3 Dehidracija mulja

Nakon postupaka stabilizacije i zgušnjavanja u mulju se i dalje nalazi znatna količina vode. Postupkom dehidracije dolazi do otklanjanja sadržaja vode. Ovisno o svojstvima mulja nakon zgušnjavanja, dehidracijom se smanjuje količina vode u mulju te se postiže koncentracija suhe tvari u mulju od 25 do 35 %.

Postupak dehidracije može se podijeliti na dva osnovna tehnološka procesa dehidracije, fizikalno uklanjanje vode i mehaničko uklanjanje vode [9,50].

6.2.4 Dodatne faze obrade mulja

Uz već nabrojena 3 osnovna procesa obrade mulja, postoje i dodatne faze obrade mulja među kojima se izdvajaju: sušenje, dezinfekcija, homogenizacija, kondicioniranje i spaljivanje. [9]

Kondicioniranje mulja je proces pomoću kojeg dolazi do poboljšanja njegovih karakteristika. Najčešće se koristi toplinsko i kemijsko kondicioniranje. Kemijskim kondicioniranjem dolazi do smanjenje sadržaja vode u mulju korištenjem kemikalija kao što su vapno, organski polimer ili željezni klorid. Toplinskim kondicioniranjem, zagrijavanjem na 200 °C pod tlakom oko 15 bara u trajanju od 30 do 40 minuta, dobiva se sterilan i dehidriran mulj [50,54].

Sušenjem mulja dolazi do smanjenja njegovog volumena. On predstavlja zadnji postupak obrade mulja koji se vrši prije njegovog ispuštanja. Postoje brojne kombinacije toplinske obrade mulja tj. sušenja, a neke od njih su termalno sušenje, solarno sušenje, piroliza i druge [50].

Dezinfekcija mulja je proces kod kojeg najčešće primjenom klora dolazi do uništavanja patogenih mikroorganizama.

U posljednje vrijeme sve češće je završna obrada mulja spaljivanje. Prilikom spaljivanja koriste se dvije vrste peći, od kojih se češće koristi peć s izgaranjem u vrtložnom sloju. Proces spaljivanja izvodi se nakon procesa sušenja, odnosno kad mulj sadrži oko 75 do 99 % koncentracije suhe tvari [9].

7 PEPEO MULJA S UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

Širenje postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda dovelo je do proizvodnje velikih količina organskog mulja. Tradicionalno, mulj se koristio u poljoprivredi kao sredstvo za poboljšanje tla, no u posljednje vrijeme je to ograničeno zakonom što je dovelo do spaljivanja organskog mulja. Do povećanja procesa spaljivanja organskog mulja došlo je najviše iz razloga što produkt nakon spaljivanja ima 95 % manji volumen od onoga prije procesa spaljivanja. Otprilike 22 % mulja se spaljuje.

Pepeo mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (SSA) je nusprodukt izgaranja odvodnjelog mulja u spalionicama. To je polifazni materijal izgrađen od nekoliko kristalnih minerala (oko 60 %) i staklaste faze. Svojstva pepela i njegova veličina u velikoj mjeri ovise o sustavu spaljivanja i kemijskim dodacima korištenim u procesu pročišćavanja voda. Po brojnim istraživanjima glavne komponente SSA su SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 i MgO .

Uobičajeno postrojenje za spaljivanje najprije će dehidrirati organski mulj na 25 % do 30 % suhe tvari prije samog spaljivanja koje se najčešće radi u peći s vrtložnim slojem na temperaturama od 800 do 900 °C [55]. Globalna proizvodnja letećeg SSA prikazana je u tablici 6.

Tablica 6. Globalna proizvodnja letećeg pepela mulja s UPOV-a [55]

Država / regija	Količina / godina
Sjeverna Amerika	$1,2 \times 10^6$ tona
Japan	$0,5 \times 10^6$ tona
SAD	7×10^6 tona
EU	10×10^6 tona

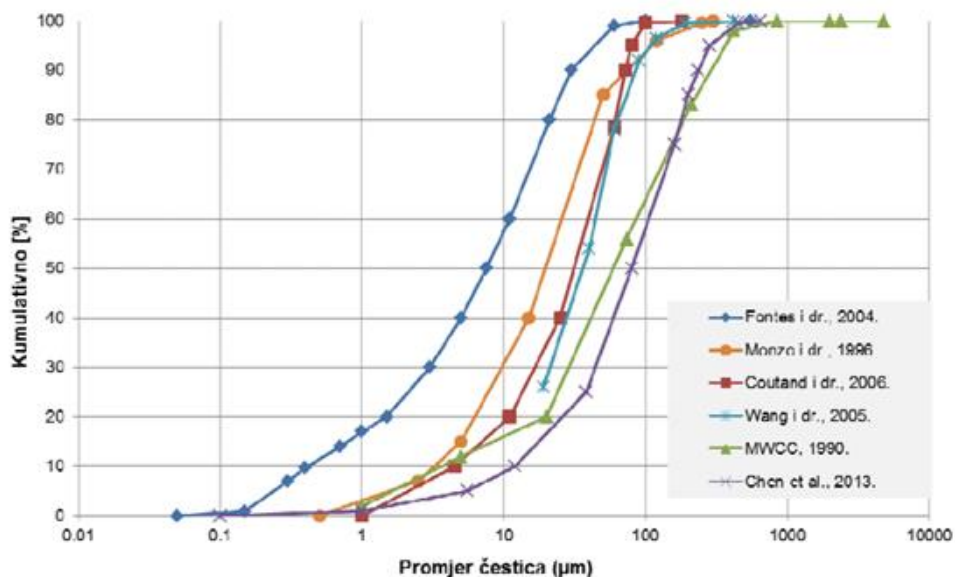
7.1 Svojstva SSA

SSA ima relativno nizak sadržaj vlage i organske tvari, te mu pH vrijednost varira između 6 i 12 [48,55].

Temperatura spaljivanja ima velik utjecaj na svojstva SSA. Naime, ukoliko se temperatura spaljivanja poveća s 800 na 900 °C dolazi do smanjenja apsorpcije vode i mase SSA. Do smanjenja mase dolazi zbog dodatne oksidacije organske tvari, te samim time dolazi do povećanja gustoće, čija je maksimalna vrijednost na temperaturama oko 1000 °C. Čvrstoća materijala koji je djelomično napravljen od SSA također ovise o promjenama temperature spaljivanja. Povećanjem temperature dolazi do povećanja njihove čvrstoće, no pri temperaturama između 900 i 950 °C dolazi do smanjenja pucolanskih svojstava pepela. Prema istraživanjima zaključilo se da je optimalna temperatura u pogledu očuvanja pucolanskih svojstava pepela upravo oko 800 °C [9].

7.1.1 Veličina čestica

SSA formira se od 30 % anorganskih tvari koje su prisutne u mulju. Slika 26. prikazuje uobičajene veličine čestica SSA. Promjeri čestica kreću se od 1 do 100 µm, dok srednja vrijednost promjera čestica iznosi 26 µm [55,56].



Slika 26. Promjeri čestica SSA [9]

Prema podacima iz drugih provedenih istraživanja, srednja veličina promjera čestica SSA nalazi se u rasponu od 8 do 263 μm . Raspon promjera čestica je uvelike promjenjiv jer ovisi o više faktora poput vrste sustava odvodnje, količine industrijskih voda u otpadnim vodama i o postupcima obrade mulja [9,48].

7.1.2 Gustoća

Specifična gustoća SSA kreće se u rasponu od 1,8 do 2,9 g/cm^3 . Prema ispitivanjima prosječna vrijednost specifične gustoće iznosi 2,5 g/cm^3 sa standardnom devijacijom od 0.3. Vrijednost specifične gustoće pepela slična je pijesku, a manja od gustoće portland cementa. Kao što je već rečeno, gustoća raste s povećanjem temperature spaljivanja [57]. Stvarna gustoća SSA varira između 2300 i 3200 kg/m^3 [9].

7.1.3 Poroznost

Čestice SSA su nepravilne, grube površine i imaju poroznu mikrostrukturu što može dovesti do povećanja potrebe za vodom ukoliko se pepeo koristi u betonu. Vrijednosti upijanja vode su u rasponu od 8 do 20 %, što je znatno veće od prirodnog pijeska, čije upijanje iznosi od 1 do 3 %.

Prilikom korištenja SSA u betonu, zbog velikog upijanja vode, potrebno je koristiti superplastifikator kao dodatak jer je to jedna od opcija za suzbijanje potražnje za vodom [57].

7.2 Kemijski sastav

Glavni elementi prisutni u SSA su silicij (Si), kalcij (Ca), aluminij (Al), željezo (Fe), fosfor (P) i kisik (O), a glavne prisutne kristalne faze su kvarc (SiO_2), kalcijev fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) i hematit (Fe_2O_3). Pepeo sadrži velike količine fosfata, obično između 10 i 20 % po masi, što može dovesti do odgađanja vezivanja cementa i samim time smanjenja početne čvrstoće betona. Mogu postojati i značajne količine SO_3 koje nastaju zbog kemikalija koje se koriste u nekim procesima pročišćavanja otpadnih voda. Vrsta otpadne vode i aditivi koji se koriste u UPOV-u i obrade mulja utječu na sastav SSA. Ukoliko se vrši tercijarna obrada mulja koriste se soli željeza i aluminija stoga pepeo sadrži veću koncentraciju tih metala. Teški metali kao živa, kadmij, antimon, olovo i arsen imaju tendenciju isparavanja tijekom izgaranja, ali se kondenziraju na čestice pepela prilikom hlađenja. Tablica 7. prikazuje sastav SSA koji nastaje izgaranjem mulja u UPOV-a u Karlovcu, Zagrebu, Varaždinu i Koprivnici, kao i sastav pepela iz nekih drugih istraživanja. Postoje varijacije u sastavu pepela zbog toga što se obrađuju različite otpadne vode pri različitim temperaturama izgaranja [56].

Ukoliko je potrebno za daljnju sigurnu upotrebu i zbrinjavanje, moguća je dodatna obrada mulja kako bi se regulirao sastav SSA [9,57].

Tablica 7. Usporedba raspona vrijednosti kemijskih spojeva u SSA za različita podrijetla i metode obrade mulja [56]

Sastav SSA [%]						
Oksidi	Raspon prema prethodnim istraživanjima	Srednja vrijednost prema prethodnim istraživanjima	UPOV Karlovac – treći stupanj obrade mulja	UPOV Koprivnica – Treći stupanj obrade mulja	UPOV Zagreb – drugi stupanj obrade mulja	UPOV Varaždin – drugi stupanj obrade mulja
Fe ₂ O ₃	4,7 – 20,0	11,4	8,2 – 9,5	0,3 – 0,4	4,3 – 6,0	0,9 – 1,0
SiO ₂	17,3 – 50,6	34,0	2,9 – 7,9	0,4 – 0,5	16,2 – 22,1	7,0 – 8,3
CaO	1,9 – 31,3	15,8	37,6 – 42,1	92,8 – 93,8	39,2 – 52,2	54,9 – 62,4
MgO	1,4 – 3,2	2,1	4,2 – 4,5	0,7 – 0,8	30, – 3,5	1,4 – 1,7
Al ₂ O ₃	6,3 – 19,1	12,8	11,7 – 16,5	0,9 – 1,2	8,0 – 10,8	1,4 – 1,7
P ₂ O ₅	1,7 – 18,2	10,8	16,0 – 17,2	0,8	5,2 – 7,5	10,3 – 12,0
TiO ₂	0,3 – 1,0	0,7	0,8 – 1,0	0,0 – 1,0	0,8 – 1,0	0,0 – 0,1
Na ₂ O	0,3 – 1,3	0,7	0,3	0,0	0,1 – 0,2	0,2
K ₂ O	0,6 – 2,3	1,4	1,2 – 1,3	0,1	0,4 – 0,8	0,6

7.3 Mogućnost primjene SSA

Kao što je već rečeno, pepeo dobiven spaljivanjem mulja s UPOV-a je nusprodukt, pa je samim time i on otpad koji zahtijeva daljnje gospodarenje. Upotreba pepela je poželjna kako bi se smanjilo njegovo odlaganje na odlagalištima otpada, a samim time i troškova od strane komunalnih tvrtki. Povećanjem svijesti o efektu stakleničkih plinova sve više se koriste cementu zamjenski materijali, ali njihovi udjeli su obično mali, uglavnom do oko 20 %. SSA se može koristiti kao zamjena cementu zbog svojih pucolanskih aktivnosti, također postoji

mogućnost njegovog korištenja umjesto pijeska ili finog agregata, te kao sirovine prilikom proizvodnje laganog agregata [58].

Postoji mogućnost primjene SSA kao stabilizatora tla zagađenim teškim metalima, poput cinka, kadmija i olova. SSA se može koristiti i u proizvodnji keramičkih pločica i crijepa [9].

Također SSA se može koristiti kao aditiv bitumenu, prilikom proizvodnje opeke, kao materijal za kolnike, za proizvodnju laganog toplinskog izolatora, te kao zamjena lončarske i porculanske gline [55].

7.4 Ekonomske i ekološke prednosti uporabe SSA

Neke od prednosti ponovne uporabe SSA su:

- Smanjenje troškova zbrinjavanja otpada
- Očuvanje okoliša uštedom velike količine primarnih elemenata
- Smanjenje korištenja zemljišta za odlaganje SSA i samim time očuvanje krajolika
- Očuvanje okoliša uštedom značajne količine energije
- Podizanje svijesti javnosti o problemu otpada i prednostima recikliranja
- Mogućnost poboljšanje kvalitete betonskih proizvoda [55].

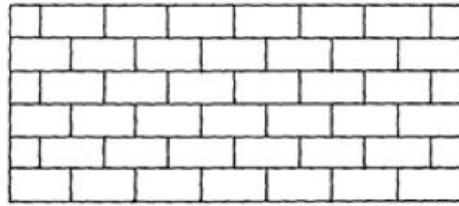
8 PREGOTOVljeni BETONSKI OPLOČNICI

Kolnici od betonskih opločnika predstavljaju moderno rješenje koje se može koristiti na raznim mjestima kao što su ulične ceste, parkovi, parkinzi i neka druga građevinska mjesta. Opločnici se sastoje od cementa, sitnog agregata, krupnog agregata (do 10 mm), vode i kemijskih sredstava, te se proizvode postupkom vibroprešanja. Sastoje se od dva sloja: gornji ili habajući i donji ili nosivi sloj. Gornji sloj je visine oko 10 mm. Opločnici trebaju zadovoljiti otpornost na klizanje, otpornost na habanje, otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, te odgovarajuće upijanje vode. Mogu biti različitih dimenzija i oblika [59,60].

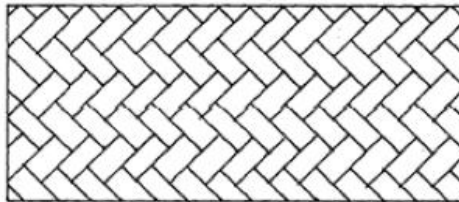
Na temelju oblika možemo ih podijeliti u 4 grupe:

- 1) Pravokutni elementi
 - Debljina im je uglavnom između 4 i 8 cm, dok širina i duljina variraju
 - Imaju zaobljene ili oštre rubove
- 2) Elementi različitih dimenzija
 - Koriste se prilikom izrade pješačkih staza, dvorišta, trgova
- 3) Posebno oblikovani elementi
 - Zbog precizno izrađenih rubova povezanost između opločnika je dobra i samim time mogu preuzeti velika opterećenja
 - Koriste se kod javnih parkirališta, trgovačkih centara, brodskih pristaništa
- 4) Elementi sa šupljinama
 - Koriste se na površinama od trave i imaju malu nosivost
 - Mogu imati veće i manje šupljine [59]

Najčešći oblici su pravokutni (nazubljeni i nenazubljeni) i "L" oblik. Nazubljeni opločnik ima udubljenja sa svih strana i one se spajaju jedne s drugom, dok nenazubljeni opločnici imaju glatke strane koje se mehanički ne spajaju. Opločnici se obično polažu na jedan od dva načina koja su prikazana na slici 27.



a) rastezljiva veza

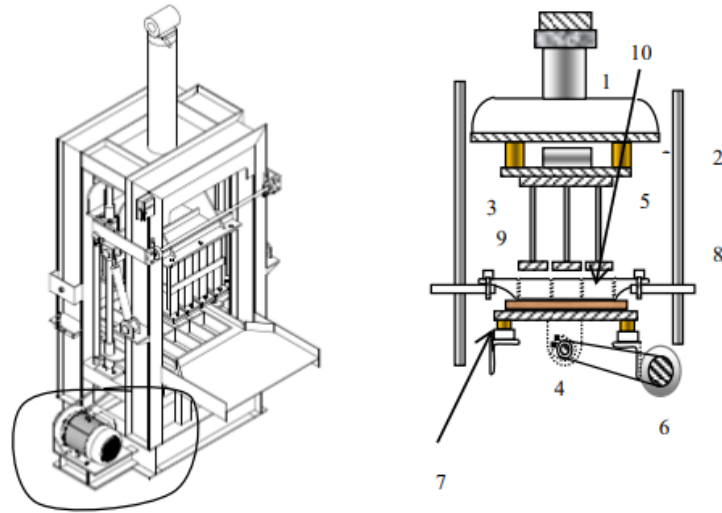


b) riblja kost

Slika 27. Načini polaganja opločnika [61]

8.1 Vibroprešanje

Beton s niskim vodocementnim odnosno vodovezivnim omjerom, zbog svoje specifične konzistencije zahtijeva primjenu naprednih tehnologija ugradnje i zbijanja. Pod pojmom tehnologija misli se na miješanje, rukovanje, postavljanje i zbijanje betona. Vibroprešanje je tehnologija koja kombinira vibraciju i prešanje, te se oba postupka vrše istovremeno [62]. Slika 28. prikazuje skicu stroja za vibroprešanje.



Slika 28. Skica za vibroprešenje [62]

Koraci proizvodnje opločnika :

1. Miješanje cementa i agregata u miješalici
2. Nakon što se cement ravnomjerno rasporedi u mješavini dodaje se voda
3. Stavljanje smjese u kalup za vibroprešanje
4. Vibriranje i prešanje
5. Stavljanje primjeraka u sušaru dok se postigne određeni volumen i snaga proizvoda [62]

9 EKSPERIMENTALNI DIO RADA

Eksperimentalni dio rada podijeljen je na 2 segmenta:

- I. Izrada lijevanog betona s PDB-om
- II. Izrada vibroprešanog betona odnosno betonskih opločnika s PDB-om i sa SSA

Za provođenje ispitivanja odabrana su dva različita proizvoda odnosno vrste betona, a to su lijevani i vibroprešani beton, u kojima je PDB i SSA korišten kao punilo zamjenjujući dio sitnog agregata (pijeska). Cilj eksperimentalnog dijela istraživanja bio je utvrditi mogućnosti primjene otpadnih pepela u proizvodnji betonske galanterije te kvantificirati udio agregata koji se može zamijeniti takvim alternativnim materijalom.

Provedenim ispitivanjima želi se prikazati utjecaj dodatka pepela na relevantna svojstva odabranih betonskih proizvoda. Kako bi se to utvrdilo, izvršena su potrebna ispitivanja svojstava betonskih mješavina u svježem i očvrnulom stanju, sukladno hrvatskim i europskim normama, što je prikazano u tablicama 11 do 27.

9.1 Lijevani beton

U ovom dijelu analiziran je utjecaj pepela dobivenog spaljivanjem drvene biomase na mehanička svojstva i svojstva trajnosti lijevanog betona. Ispitivanja su provedena na betonu kod kojeg je 15 % prirodnog agregata veličine od 0 do 4 mm zamijenjeno pepelom drvene biomase (PDB) koji je podrijetlom iz energane na drvenu biomasu smještenoj u naselju Žakanje u Karlovačkoj županiji (Slika 29).



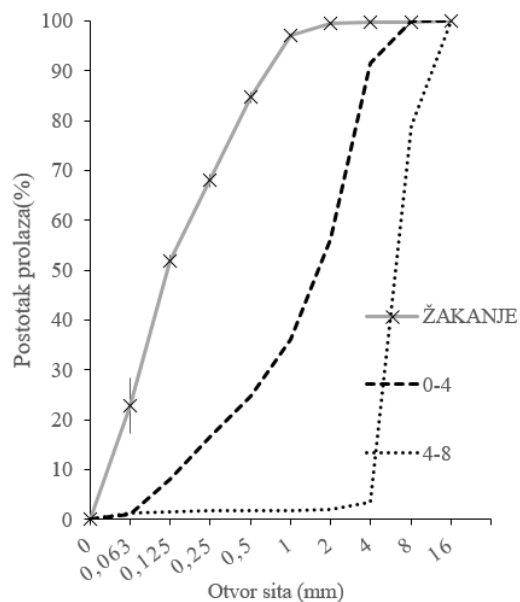
Slika 29. PDB

9.1.1 Materijali

Prilikom izrade mješavine lijevanog betona korišten je cement CEM II/A-LL 42,5R, drobljeni agregat, voda, pepeo drvene biomase (PDB), te dodaci aerant i superplastifikator. Korišteni pepeo nusproizvod je u energani koja koristi tehnologiju izgaranja na rešetki, pri prosječnim temperaturama od 700 °C do maksimalnih 1000 °C. Kemijski sastav pepela i njegova granulometrija prikazani su u tablici 8 i na slici 30. Najveći maseni udio u korištenom PDB-u ima kalcijev oksid, zatim silicijev oksid, a nakon njega aluminijev oksid. Prema postotku prolaza čestica PDB-a vidljivo je da je sadržaj sitnih čestica manji od sadržaja sitnih čestica korištenog drobljenog agregata.

Tablica 8. Kemijski sastav PDB-a

KOMPONENTA	UDIO [%]
SiO ₂	23,21
CaO	44,14
Al ₂ O ₃	6,47
Fe ₂ O ₃	3,31
Na ₂ O	0,69
K ₂ O	9,47
SO ₃	2,99
Cl	0,144
P ₂ O ₅	3,98
MgO	3,55
ZnO	0,070
CuO	0,014
TiO ₂	0,495
MnO	1,20
Cr ₂ O ₃	0,041
BaO	0,137
NiO	-
SrO	0,101



Slika 30. Granulometrijska krivulja PDB-a

9.1.2 Projektiranje sastava mješavine lijevanog betona

U tablici 9. prikazan je proračun sastava lijevanog betona s PDB-om. Simulacija sastava s PDB-om izrađena je u skladu s originalnim sastavom iz proizvodnje betonske galanterije Beton Lučko d.o.o. Detalji o sastavu su prezentirani u skladu s praksom očuvanja poslovne tajne tvrtke Beton Lučko. Približno 15 % mase drobljenog agregata frakcije 0 – 4 mm, odnosno 7 % ukupne mase agregata zamijenjeno je pepelom.

Tablica 9. Sastav mješavine lijevanog betona s PDB-om (1 m³)

SASTAVNE KOMPONENTE	OPIS PARAMETRA
Vrsta cementa	CEM II/A-LL 42,5R
Vodocementni omjer	0,483
Superplastifikator	0,6 % m _{cementa}
Aerant	0,1 % m _{cementa}
Drobljeni agregat 0-4 mm	39 %
Drobljeni agregat 4-8 mm	25 %
Drobljeni agregat 8-16 mm	29 %
PDB	7 %

9.1.3 Miješanje lijevanog betona i ispitivanja betona u svježem stanju

Miješanje betona odrađeno je u pogonu Beton Lučko d.o.o. Ispitivanja koja su provedena na svježoj betonskoj mješavini prikazana su u tablici 10. Svojstva lijevanog betona nisu bila uspoređivana s referentnim vrijednostima betona bez PDB-a; cilj je bio razvoj betona koji ispunjava standarde propisane od strane hrvatskih i europskih normi te zahtjeve postavljene od strane proizvođača.

Tablica 10. Plan ispitivanja lijevanog betona u svježem stanju

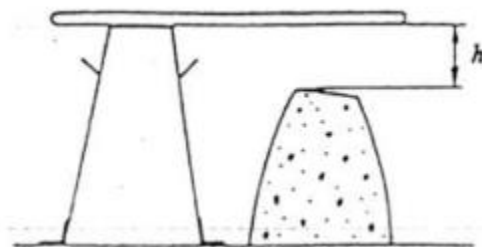
PLAN ISPITIVANJA LIJEVANOG BETONA U SVJEŽEM STANJU	
SVOJSTVO	METODA ISPITIVANJA
Konzistencija slijeganjem	HRN EN 12350-2:2019
Gustoća	HRN EN 12350-6:2013
Temperatura	HRN U.M1.032:1981
Udio pora	HRN EN 12350-7:2019

Temperatura svježe betonske mješavine, ispitana pomoću digitalnog, ubodnog termometra prema normi HRN U.M1.032:1981, iznosila je 12,1 °C (slika 31), dok je temperatura zraka iznosila 7,1 °C.



Slika 31. Mjerenje temperature svježeg betona

Konzistencija slijeganjem odredila se prema normi HRN EN 12350 – 2:2019. Svježi beton se zbio u limenom kalupu oblika šupljeg stošca visine 300mm. Beton se puni u tri sloja, pri čemu je svaki sloj otprilike iste visine. Nakon punjenja jednog sloja, beton se zbija pomoću čelične šipke promjera 16mm 25 puta. Drugi i treći sloj se zbijaju na način da šipka prodre u sloj koji je neposredno ispod. Kalup se polako i pažljivo ukloni. Odmah nakon uklanjanja kalupa, mjeri se slijeganje betona na način da se izmjeri razlika između visine kalupa i maksimalne visine slegnutog ispitnog uzorka što prikazuje slika 32.



Slika 32. Mjerenje slijeganja [63]

Konzistencija betona iznosila je 245 mm, pri čemu beton spada u razred S5.

Udio pora u svježoj betonskoj mješavini određen je prema normi HRN EN 12350 – 7:2019. Za ispitivanje korišten je porometar koji mjeri udio pora na principu Boyle – Marriottovog zakona. Poznati volumen zraka pri poznatom tlaku u zabrtvljenom spremniku graniči s nepoznatim volumenom zraka u ispitnom uzorku betona. Spremnik se puni u tri sloja svježim betonom, te se odmah nakon toga izvibrira. Brojčanik na porometru je baždaren na način da rezultirajući tlak se pokazuje kao udio pora. Udio pora u ispitnom uzorku betona iznosio je 3 %, što prikazuje slika 33., dok je gustoća svježeg betona iznosila 1,9 kg/dm³.



Slika 33. Prikaz ispitivanja sadržaja pora u svježem betonu

9.2 Ispitivanje lijevanog betona u očvrslom stanju

Tablica 11. prikazuje ispitivanja lijevanog betona s PDB-om u očvrslom stanju koja su provedena u ovom radu.

Tablica 11. Ispitivanja očvrtnulog lijevanoga betona s PDB-om

PLAN ISPITIVANJA OČVRSNULOG LIJEVANOG BETONA				
SVOJSTVO	METODA ISPITIVANJA	DIMENZIJE UZORKA (mm)	STAROST (DANI)	BROJ UZORAKA (KOMAD)
Tlačna čvrstoća	HRN EN 12390-3:2019	kocka 150x150x150	2	3
			28	3
Kapilarno upijanje	HRN EN 13057:2003	ispiljeni uzorak 100x100x50	28	4
Vodonepropusnost	HRN EN 12390-8:2019	kocka 150x150x150	28	3
Upijanje vode	HRN EN 13198:2004	ispiljeni uzorak (prizme $m > 1,5$ kg)	28	3
Modul elastičnosti	EN 12390-13:2021	Valjak 150/300	2	3
			28	3
Otpornost na djelovanje zamrzavanja i soli (28 ciklusa)	HRN EN 13198:2004 HRS CEN/TS 12390-9	150x150x50	28	4

9.3 Metode ispitivanja lijevanog betona u očvrslulom stanju

9.3.1 Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća lijevanog betona s PDB-om ispitana je prema normi HRN EN 12390- 3:2019 na uzorcima kocke dimenzija 150 x 150 x 150 mm pri starosti od 2 i 28 dana. Provedena su ispitivanja na 3 uzorka koja su prikazana na slici 34., dok je krajnji rezultat srednja vrijednost dobivenih čvrstoća. Uzorci koje se ispituju pri starosti od 28 dana nakon vađenja iz kalupa čuvani su u vlažnoj komori. Prije ispitivanja uzorci se pripreme i izmjere im se dimenzije, te se onda stave u prešu za ispitivanja uzoraka betona na tlak što prikazuje slika 35.



Slika 34. Uzorci lijevanoga betona s PDB-om prije ispitivanja tlačne čvrstoće



Slika 35. Ispitivanje tlačne čvrstoće lijevanoga betona s PDB-om nakon 28 dana

9.3.2 Kapilarno upijanje

Kapilarno upijanje uzoraka lijevanog betona s PDB-om određeno je prema normi HRN EN 13057:2003. Ispitano je na 4 uzorka koja su ispiljena na dimenzije 100 x 100 x 50 mm što prikazuje slika 36.



Slika 36. Uzorci lijevanoga betona s PDB-om za ispitivanje kapilarnog upijanja

Nakon piljenja uzorci su osušeni u sušioniku do konstantne mase. Nakon sušenja izvagane su mase uzoraka i uzorci su potopljeni u vodu do razine 3 mm što je prikazano na slici 37.



Slika 37. Ispitivanje kapilarnog upijanja uzoraka lijevanoga betona s PDB-om

9.3.3 Vodonepropusnost

Ispitivanje vodonepropusnosti uzoraka od lijevanog betona s PDB-om odrađuje se prema normi HRN EN 12390-8:2019. Ispitivanje se vrši na 3 uzorka kocke dimenzija 150 x 150 x 150

mm ili valjka 150/150. U ovom radu ispitivanje se vršilo na kockama. Nakon vađenja uzoraka iz kalupa oni se njeguju pod vodom do starosti od 28 dana. Zatim se mjere dimenzije uzoraka i skida se završni cementni sloj kako bi voda što više prodirala u uzorak. U uređaju (slika 38.) se uzorci drže 72 sata pod pritiskom vode od 5 bara te se nakon toga cijepaju i mjeri se visina prodora vode što prikazuje slika 39.



Slika 38. Ispitivanje vodonepropusnosti uzoraka lijevanog betona s PDB-om



Slika 39. Mjerenje visine prodora bode uzoraka lijevanog betona s PDB-om

9.3.4 Upijanje vode

Upijanje vode uzoraka lijevanog betona s PDB-om određeno je prema normi HRN EN 13198:2004. Ispitivanje je provedeno na 4 uzorka oblika prizme koji su se nakon sušenja do konstantne mase potopili u vodu. Upijanje vode određeno je prema formuli:

$$W_a = \frac{m_{vlažno} - m_{suho}}{m_{suho}} \times 100 [\%]$$

9.3.5 Otpornost na djelovanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima

Otpornost na djelovanje smrzavanja i odmrzavanja sa soli uzoraka lijevanog betona s PDB-om određena je prema normi HRN EN 13198:2004. Ispitivanje se provelo na 4 uzorka kocke brida 150 mm. Uzorci, nakon vađenja iz kalupa, čuvali su se u vlažnoj komori 28 dana. Zatim su se izmjerili te zabrtvili silikonskim gelom u kalupu kako bi se agresivni medij zadržao na ispitnoj površini. Slika 40. prikazuje pripremu uzoraka na ispitivanje.



Slika 40. Prikaz pripreme uzoraka lijevanog betona s PDB-om na ispitivanje otpornosti na smrzavanja i odmrzavanja sa soli

Na površine uzoraka nalije se 3 % otopina NaCl- a i uzorci se zatim stave u komoru za ispitivanje u kontroliranim uvjetima.

Ispitivanje je trajalo 28 ciklusa, pri čemu jedan ciklus traje 24 sata i sastoji se od smrzavanja na temperaturi od $-20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ i odmrzavanja na temperaturi od $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

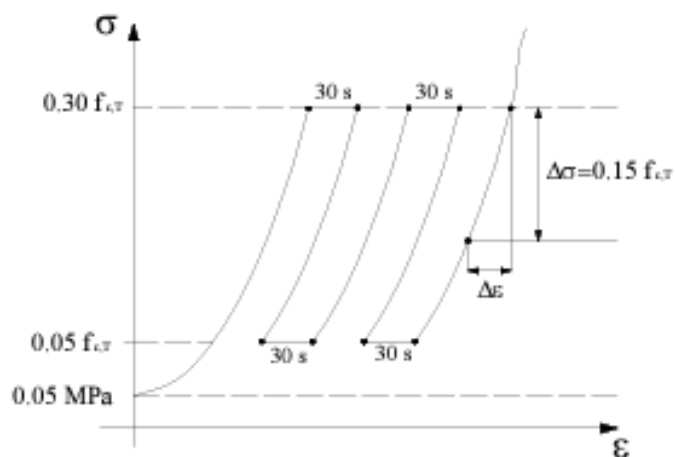
9.3.6 Modul elastičnosti

Modul elastičnosti lijevanog betona sa PDB-om određen je prema normi EN 12390-13:2021 na 3 uzorka oblika valjka visine 300mm i promjera 150 mm. Ispitivanje je provedeno pri starosti betona od 2 i 28 dana. Nakon vađenja iz kalupa uzorci betona se njeguju pod vodom. Prikaz ispitivanja modula elastičnosti lijevanog betona s PDB-om prikazan je na slici 41.



Slika 41. Ispitivanje modula elastičnosti lijevanog betona s PDB-pm

Za razliku od ispitivanja tlačne čvrstoće, uzorci se ne opterećuju do razaranja već se opterećuju do naprezanja koje odgovara 1/3 tlačne čvrstoće te rasterećivanjem do naprezanja od MPa što prikazuje slika 42.



Slika 42. Krivulja histereze

Rezultat ispitivanja je dijagram sila i pomaka, pri čemu se odrede naprezanja i deformacije te se sekantni modul elastičnosti računa prema formuli:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

gdje je:

$\Delta\sigma$ – razlika naprezanja

$\Delta\varepsilon$ – razlika deformacija

9.4 Analiza rezultata ispitivanja lijevanog betona

9.4.1 Tlačna čvrstoća

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na uzorcima lijevanog betona prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka lijevanog betona s PDB-om

OZNAKA UZORKA	VRIJEDNOST TLAČNE ČVRSTOĆE NAKON 2 DANA (MPa)	VRIJEDNOST TLAČNE ČVRSTOĆE NAKON 28 DANA (MPa)
L-PDB-1	39,0	53,0
L-PDB-2	37,70	58,0
L-PDB-3	38,55	56,70
SREDNJA VRIJEDNOST	38,42	55,90

Iz tablice se može vidjeti rast tlačne čvrstoće prilikom ispitivanja nakon 28 dana u odnosu na ispitivanja nakon 2 dana starosti. Već pri ranoj starosti vrijednosti tlačne čvrstoće su relativno

visoke te je vidljiv rast tlačne čvrstoće tijekom njegovanja betona zbog dodatne hidratacije i popunjavanja cementne matrice, što doprinosi povećanju tlačne čvrstoće betona. Prema normi HRN EN 13198:2004 zahtijevana tlačna čvrstoća za proizvode vanjske upotrebe koji su podvrgnuti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja u kombinaciji sa solima za odmrzavanje je C35/45. U tablici srednja vrijednost triju ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 28 dana je 55,9 MPa što zadovoljava zadani uvjet.

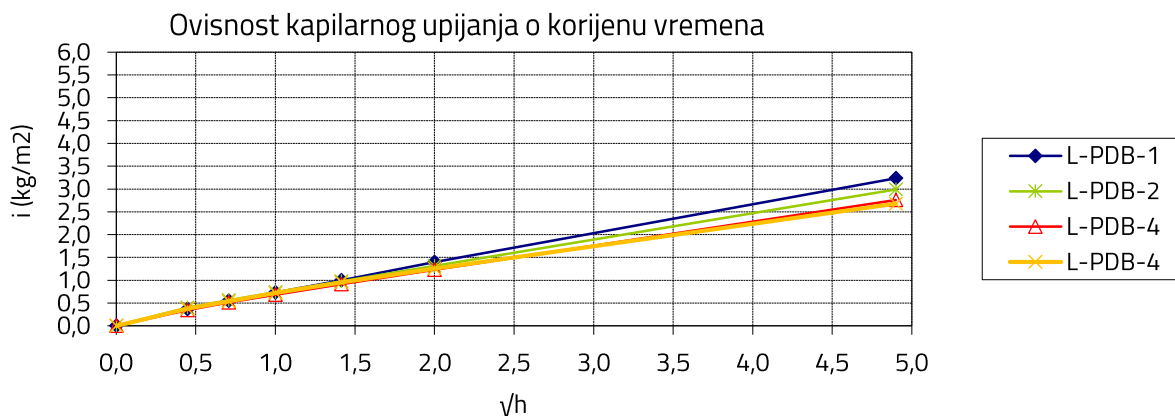
9.4.2 Kapilarno upijanje

Rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja prikazani su u tablici 13, dok je ovisnost kapilarnog upijanja o korijenu vremena prikazana na slici 43.

Tablica 13. Rezultati upijanja lijevanog betona s PDB-om

	Oznaka uzorka		L-PDB-1	L-PDB-2	L-PDB-3	L-PDB-4
Vrijeme ispitivanja	dimenzije $a \times b$	a (mm)	101,43	100,62	100,89	100,03
		b (mm)	99,8	99,1	100,1	100,4
	minuta	0	1.164,75	1.127,91	1.196,80	1.147,41
		12	1.168,49	1.131,93	1.200,27	1.151,17
		30	1.170,32	1.133,55	1.201,98	1.152,82
		60	1.172,17	1.135,28	1.203,68	1.154,65
	sati	2	1.174,86	1.137,67	1.206,05	1.156,97
		4	1.178,88	1.141,04	1.209,21	1.160,04
		24	1.197,48	1.157,73	1.224,63	1.174,30

Obradom podataka kapilarnog upijanja lijevanog betona s PDB-om, u vremenskom periodu od 24 sata, dobiven je raspon upijanja od 2,3 % do 2,8 %.



Slika 43. Prikaz ovisnosti kapilarnog upijanja o korijenu vremena

Kapilarno upijanje gotovo je jednako kod sva četiri uzorka, što se može uočiti iz nagiba pravaca. Također, mali nagibi pravaca sugeriraju da dodatak pepela ne utječe negativno na kapilarno upijanje.

9.4.3 Vodonepropusnost

Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti prikazani su u tablici 14.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti lijevanog betona u PDB-u

OZNAKA UZORKA	L-PDB-1	L-PDB-2	L-PDB-3
masa prije ispitivanja (g)	8157,1	8020,7	7952,8
a (mm)	150,35	150,2	150,6
b (mm)	150,03	150	150,62
h (mm)	151,73	149,77	149,65
najveća visina prodora vode (mm)	13	14	14

Iz rezultata u tablici vidljivo je da je najveća visina prodora vode 14 mm. U tablici 15 prikazani se razredi vodonepropusnosti u ovisnosti o dopuštenom prodoru vode prema normi HRN 1128:2007.

Tablica 15. Rezultati vodonepropusnosti betona prema normi HRN 1128:2007

Razred vodonepropusnosti	Dopušteni prodor vode (mm)
V1	50
V2	30
V3	15

Prema tablici 15. vidljivo je da uzorci lijevanog betona s PDB-om spadaju u razred vodonepropusnosti V3.

9.4.4 Upijanje vode

U tablici 16. prikazani su rezultati ispitivanja upijanja vode uzoraka lijevanog betona s PDB-om.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja upijanja vode na uzorcima lijevanog betona s PDB-om

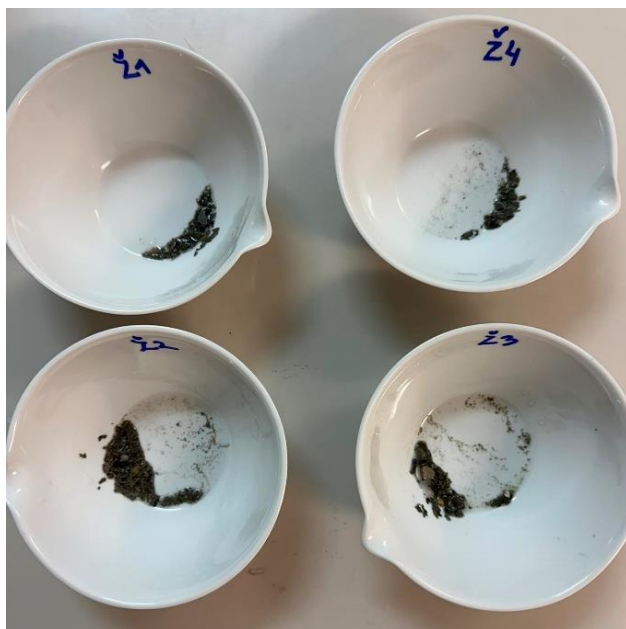
OZNAKA UZORKA	$m_{\text{vlažno}}$	m_{suho}	Upijanje vode W_a [%]	Uvjet prema normi HRN EN 13198:2004
L-PDB-1	4814,7	4593,6	4,81	$W_a \leq 6,5\%$
L-PDB-2	4751,7	4546,3	4,52	
L-PDB-3	3819,6	3656,4	4,46	

Norma HRN EN 13198:2004 nalaže da uzorci betona koji su napravljeni za vanjsko korištenje i izloženi ciklusima smrzavanja i odmrzavanja sa soli trebaju imati manje upijanje od 6,5 %. Iz

rezultata u tablici vidljivo je da svi uzorci zadovoljavaju navedeni zahtjev i samim time da PDB ne utječe negativno na svojstvo upijanja vode.

9.4.5 Otpornost na djelovanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablicama 17 i 18, dok slika 44. prikazuje masu oljuštenog materijala nakon 28 ciklusa.



Slika 44. Masa oljuštenog materijala nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

Tablica 17. Prikaz količine oljuštenog materijala dobivene ispitivanjem otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje sa soli uzoraka lijevanog betona

	Uzorak	L-PDB-1	L-PDB-2	L-PDB-3	L-PDB-4
Masa oljuštenog materijala (g)	7±1 ciklus	0,35	0,66	0,43	0,28
	14±1 ciklus	0,56	1,24	0,78	0,71
	28±1 ciklus	0,91	1,95	2,07	0,59

Tablica 18. Prikaz pojedinačne mase oljuštenog materijala pojedinog uzorka lijevanog betona s PDB-om

	Uzorak	L-PDB-1	L-PDB-2	L-PDB-3	L-PDB-4	Srednja vrijednost oljuštenog materijala svih uzoraka zajedno po ciklusu/površini [kg/m ²]
Δ m, individualna [kg/m²]	7±1 ciklus	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02
	14±1 ciklus	0,04	0,08	0,05	0,04	0,05
	28±1 ciklus	0,08	0,17	0,14	0,07	0,12

Norma HRN EN 13198:2004 nalaže da maksimalna vrijednost pojedinačne mase oljuštenog materijala bude manja od 1,5 kg/m², dok norma HRS CEN/TS 12390-9 nalaže da njihova srednja vrijednost ne prelazi 0,5 kg/m² nakon 28 dana. Iz tablice 18. je vidljivo da su oba navedena zahtjeva ispunjena i samim time uzorci lijevanog betona s PDB-om zadovoljavaju ispitivanje otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje sa soli u trajanju od 28 ciklusa. Navedena norma HRN EN 13198:2004 koristi se pri ispitivanju predgotovljenog betonskog namještaja za ulice i vrtove koji su podvrgnuti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja u kombinaciji sa solima za odmrzavanje, dok se norma HRS CEN/TS 12390-9 koristi pri ispitivanju smrzavanja i odmrzavanja lijevanog betona za razredbu otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

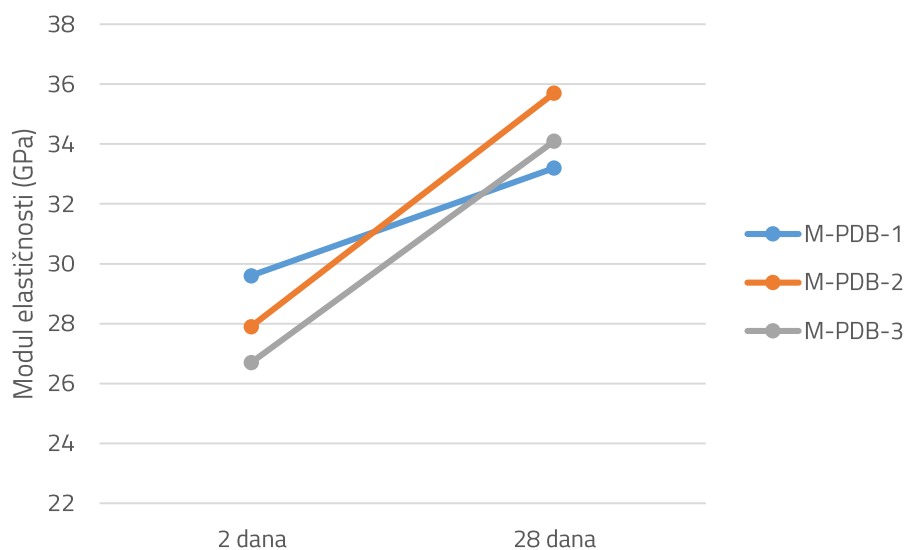
9.4.6 Modul elastičnosti

Rezultati provedenog ispitivanja modula elastičnosti (ME) lijevanog betona s PDB-om prikazani su u tablici 19.

Tablica 19. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti lijevanog betona s PDB-om

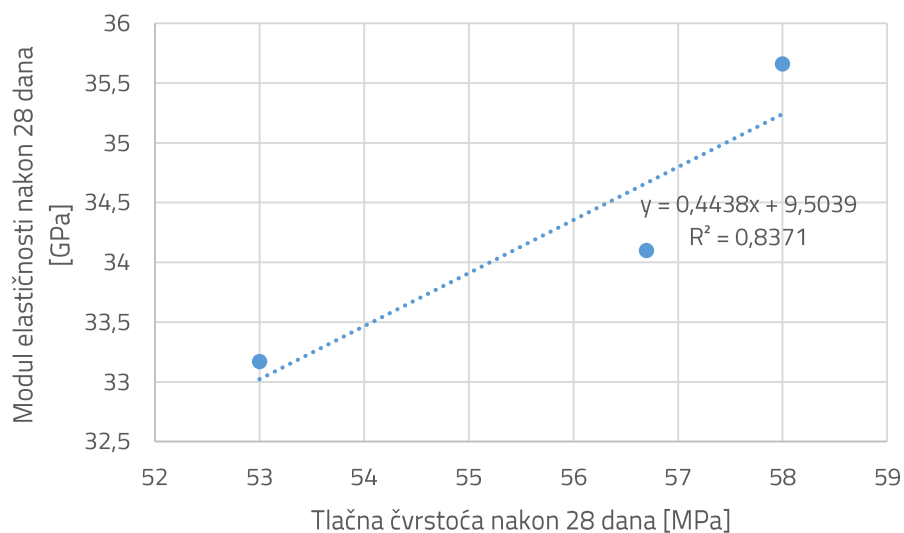
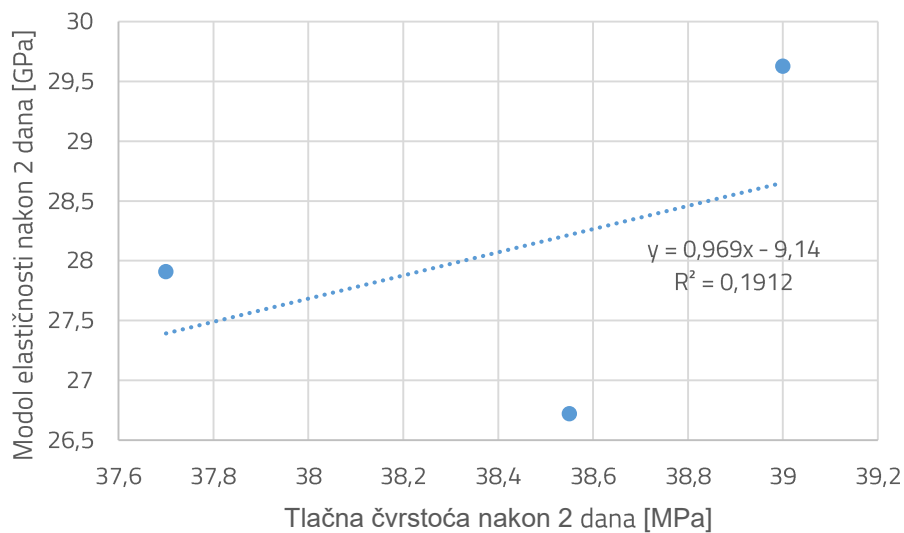
Oznaka uzorka	L-PDB-1	L-PDB-2	L-PDB-3	Srednja vrijednost
ME nakon 2 dana (GPa)	29,63	27,91	26,72	28,09
ME nakon 28 dana (GPa)	33,17	35,66	34,10	34,31

Modul elastičnosti povećava se sa starošću betona baš kao i tlačna čvrstoća što je prikazano na slici 45. Iz tablice je vidljivo da srednja vrijednost modula elastičnosti iznosi 34,13 GPa. Prema [64] približna vrijednost modula elastičnosti za razred tlačne čvrstoće C35/45 iznosi 34 GPa, što dobivena srednja vrijednost zadovoljava. Važno je naglasiti da na modul elastičnosti najviše utječu svojstva agregata, što omogućuje zaključak da je PDB prikladna zamjena za agregat.



Slika 45. Porast modula elastičnosti u vremenu

Na slikama 46a i 46b prikazana je ovisnost modula elastičnosti o tlačnoj čvrstoći uzoraka.



Slika 46. Korelacija modula elastičnosti i tlačne čvrstoće: a) nakon 2 dana, b) nakon 28 dana

Korelacija modula elastičnosti i tlačne čvrstoće je uočena tek pri starosti od 28 dana.

9.5 Vibroprešani beton

U ovom dijelu istraživani su utjecaji PDB-a i SSA na mehanička svojstva vibroprešanog betona odnosno predgotovljenih betonskih opločnika. Ispitivanja su provedena na gotovim proizvodima kod kojih je 15 % ukupne frakcije agregata 0 do 4 mm zamijenjeno pepelom drvene biomase, odnosno 7 % ukupnog agregata, te na opločnicima kod kojih je 15 % iste frakcije agregata zamijenjeno pepelom mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Rezultati ispitivanja uspoređivat će se sa vibroprešanim betonom bez pepela koji predstavlja referentnu mješavinu(V0).

9.5.1 Materijali

Prilikom izrade mješavina vibroprešanih betona korišten je cement CEM II/A-LL 42,5R, drobljeni agregat, prirodni agregat, voda, pepeo drvene biomase (PDB) ili pepeo mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (SSA). Konzistencija je korigirana primjenom hidrofobnog dodatka, koji se primjenjuje u standardnoj proizvodnji navedenih proizvoda. Korišteni PDB jednak je onom korištenom u prethodnom poglavlju i pripremi lijevanog betona, dok je korišteni SSA dobiven termičkom obradom mulja koji je prikupljen na pročistaču otpadnih voda u Karlovcu (slika 47).



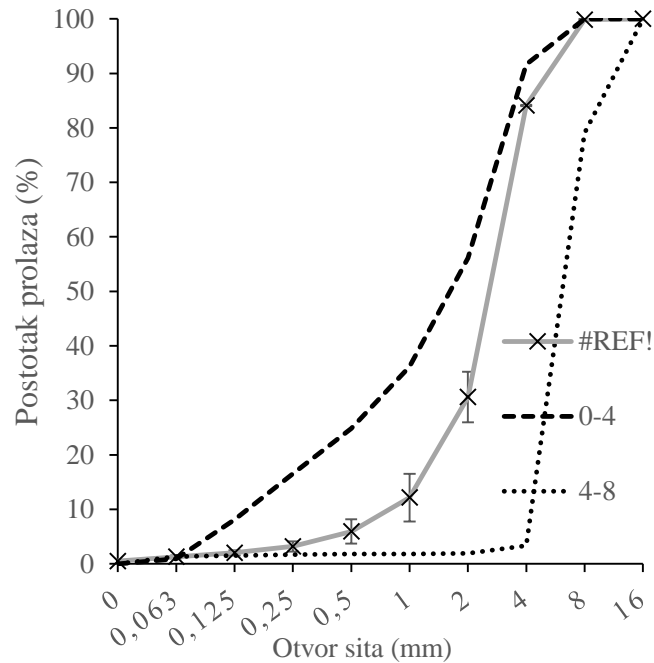
Slika 47. SSA

Korišteni SSA najprije je osušen na temperaturi od 105 °C, zatim spaljen na temperaturi od 900 °C. Kemijski sastav SSA i njegova granulometrija prikazani su u tablici 20. i na slici 48.

Potrebno je naglasiti da se zamjena agregata otpadnim pepelom provodi samo u temeljnom sloju opločnika, dok je habajući sloj opločnika sa pepelima jednak onom kod referentne mješavine. Najveći maseni udio u korištenom SSA ima silicijev oksid, a zatim kalcijev oksid, obrnuto nego što je uočeno kod korištenog PDB-a.

Tablica 20. Kemijski sastav SSA

KOMPONENTA	UDIO [%]
CaO	18,10
K ₂ O	1,09
SO ₃	2,70
MgO	3,18
P ₂ O ₅	11,22
Na ₂ O	0,72
SiO ₂	32,87
Cl	0,08
Fe ₂ O ₃	6,30
Al ₂ O ₃	13,52
MnO	0,07
BaO	0,08
SrO	0,02
ZnO	0,02
TiO ₂	0,63
CuO	0,03
Cr ₂ O ₃	0,26
LOI 550	9,14



Slika 48. Granulometrijska krivulja SSA

9.5.2 Projektiranje sastava mješavina vibroprešanog betona

Tablice 21 i 22 prikazuju sastav mješavina vibroprešanog betona koje uključuju otpadni pepeo. Detalji o sastavu su prezentirani u skladu s praksom očuvanja poslovne tajne tvrtke Beton Lučko.

Svi sastavi su odabrani kako bi se osigurala optimalna svojstva betona u skladu s industrijskim standardima i specifičnostima korištenih materijala. Tablice uključuju ključne parametre kao što su omjeri komponenti, vrste korištenih materijala, te tehnički podaci relevantni za izvedbu betona.

Tablica 21. Sastav mješavine vibroprešanog betona sa PDB-om za 0,5m³

SASTAVNE KOMPONENTE	OPIS PARAMETRA
Vrsta cementa	CEM II/A-LL 42,5R
Vodocementni omjer	0,220
Drobljeni agregat 0-4 mm	19 %
Prirodni agregat 0-4 mm	26 %
Drobljeni agregat 4-8 mm	24 %
Prirodni agregat 4-8 mm	24 %
PDB	7 %
HIDROFOBNI DODATAK (Wetophobe)	0,5 % m _{cementa}

Tablica 22. Sastav mješavine vibroprešanog betona sa SSA za 0,5m³

SASTAVNE KOMPONENTE	OPIS PARAMETRA
Vrsta cementa	CEM II/A-LL 42,5R
Vodocementni omjer	0,392
Drobljeni agregat 0-4 mm	19 %
Prirodni agregat 0-4 mm	24 %
Drobljeni agregat 4-8 mm	23 %
Prirodni agregat 4-8 mm	27 %
PDB	7 %
HIDROFOBNI DODATAK (Wetophobe)	0,5 % m _{cementa}

Tablice prikazuju postotke pepela u odnosu na ukupnu frakciju, dok u pogledu frakcije agregata od 0 do 4 mm pepela zauzimaju 15 %.

9.5.3 Proizvodnja vibroprešanog betona

Vibroprešani beton napravljen je u pogonu Beton Lučko d.o.o. Iz postrojenja prikazanog na slici 49. izlazili su gotovi betonski proizvodi prikazani na slikama 50 i 51, te su se kasnije sušili u sušari prikazanoj na slici 52.



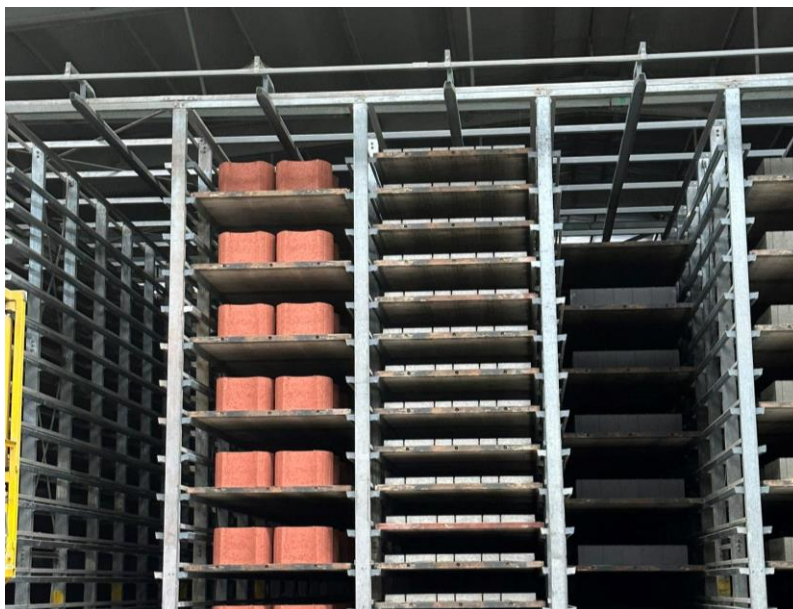
Slika 49. Postrojenje za proizvodnju vibroprešanog betona pogona Beton Lučko d.o.o.



Slika 50. Opločnici s PDB-om



Slika 51. Opločnici s SSA



Slika 52. Sušenje gotovih betonskih proizvoda

9.6 Ispitivanje vibroprešanog betona u očvrslulom stanju

Tablica 23. prikazuje ispitivanja vibroprešanih opločnika s PDB-om, vibroprešanih opločnika sa SSA i vibroprešanih opločnika bez pepela, nakon 28 dana njegovanja u sušari, koja su provedena u ovom radu.

Tablica 23. Ispitivanja gotovih proizvoda od vibroprešanog betona

PLAN ISPITIVANJA OČVRSNULOG VIBROPREŠANOG BETONA				
SVOJSTVO	METODA ISPITIVANJA	DIMENZIJE UZORKA (mm)	STAROST (DANI)	BROJ UZORAKA (KOMAD)
Tlačna čvrstoća	HRN EN 12390-3:2009	ispiljeni uzorak 50x50x50	28	15
Čvrstoća na savijanje	EN 1339:2004/AC:2007	gotovi proizvod	28	8
Čvrstoća na cijepanje	EN 1338:2004/AC:2007	gotovi proizvod	28	2

9.7 Metode ispitivanja vibroprešanih opločnika

9.7.1 Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća betonskih opločnika ispitivala se na 15 ispiljenih uzoraka kocke brida 50 mm. Uzorci su se ispitivali u istoj preši kao i lijevani beton što je prikazano na slici 53.



Slika 53. Ispitivanje tlačne čvrstoće betonskih opločnika

Ispiljeni uzorci vibroprešanog betona opterećuju se do loma kao što je prikazano na slici 54.



Slika 54. Uzorci vibroprešanog betona nakon ispitivanja tlačne čvrstoće

9.7.2 Čvrstoća na savijanje

Čvrstoća na savijanje vibroprešanih betonskih opločnika (ploča) ispitana je prema normi EN 1339:2004 na 8 uzoraka različitih dimenzija. Ispitivanje, prikazano na slici 55., provedeno je u laboratoriju pogona Beton Lučko d.o.o.



Slika 55. Ispitivanje čvrstoće na savijanje betonskih opločnika

Uzorak se postavi na dva simetrična valjka na način da od kraja uzorka do valjka bude 25 mm. Prilikom početka ispitivanja spušta se treći valjak koji nanosi opterećenje na sredinu uzorka. Uzorak se opterećuje do loma što je prikazano na slici 56. Na toj slici vidljiva je jednolika raspodjela pepela u habajućem sloju opločnika.



Slika 56. Uzorak nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje

Zatim se očitava sila sa uređaja i mjeri debljina habajućeg sloja što je prikazano na slici 57.



Slika 57. Mjerenje debljina habajućeg sloja nakon sloma

9.7.3 Čvrstoća na cijepanje

Čvrstoća na cijepanje vibroprešanih betonskih opločnika (blokova) ispitivana je prema normi EN 1338:2004/AC:2007 u laboratoriju pogona Beton Lučko d.o.o. na 2 uzorka od svake mješavine dimenzija 190 x 60 mm. Prikaz ispitivanja čvrstoće na cijepanje prikazan je na slici 58.



Slika 58. Ispitivanje čvrstoće na cijepanje uzoraka vibroprešanog betona

Kao i kod savijanja uzorci su se opterećivali do loma nakon čega se mjerila duljina habajućeg sloja.

9.8 Analiza rezultata ispitivanja vibroprešanog betona

9.8.1 Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća uzoraka vibroprešanog betona sa PDB-om nalazi se u rasponu od 19,11 MPa do 28,8 MPa, s prosječnom čvrstoćom od 23,3 MPa. Tlačna čvrstoća uzoraka vibroprešanog

betona sa SSA nalazi se u rasponu od 12,38 MPa do 20,9 MPa s prosječnom čvrstoćom od 16,42 MPa. Referentni uzorci bez pepela imaju tlačnu čvrstoću u rasponu od 11,39 MPa do 25,2 MPa s prosječnom čvrstoćom od 18,34 MPa. U usporedbi s referentnom mješavinom uzorci vibroprešanog betona s PDB-om imaju veću tlačnu čvrstoću, dok uzorci vibroprešanog betona s SSA imaju manju tlačnu čvrstoću. Tablica 24. prikazuje vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 28 dana za sve uzorke.

Tablica 24. Vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka vibroprešanog betona

UZORCI VIBROPREŠANOG BETONA S PDB- om	TLAČNA ČVRSTOĆA [MPa]	UZORCI VIBROPREŠANOG BETONA SA SSA	TLAČNA ČVRSTOĆA [MPa]	UZORCI REFERENTNOG BETONA BEZ PEPELA	TLAČNA ČVRSTOĆA [MPa]
V-PDB-1	24,42	V-SSA-1	14,96	V1	13,0
V-PDB-2	25,16	V-SSA-2	14,86	V2	18,67
V-PDB-3	22,15	V-SSA-3	14,46	V3	25,2
V-PDB-4	24,82	V-SSA-4	13,51	V4	20,58
V-PDB-5	25,29	V-SSA-5	17,31	V5	18,47
V-PDB-6	21,92	V-SSA-6	12,38	V6	23,44
V-PDB-7	20,34	V-SSA-7	17,6	V7	17,82
V-PDB-8	24,33	V-SSA-8	17,8	V8	20,3
V-PDB-9	19,11	V-SSA-9	16,21	V9	17,85
V-PDB-10	21,28	V-SSA-10	19,23	V10	13,54
V-PDB-11	23,78	V-SSA-11	16,71	V11	11,39
V-PDB-12	25,9	V-SSA-12	16,9	V12	18,962
V-PDB-13	23,38	V-SSA-13	15,53	V13	17,22
V-PDB-14	22,6	V-SSA-14	18,04	V14	18,76
V-PDB-15	28,8	V-SSA-15	20,9	V15	19,9
PROSJEČNA VRIJEDNOST [MPa]	23,55	PROSJEČNA VRIJEDNOST [MPa]	16,42	PROSJEČNA VRIJEDNOST [MPa]	18,34

9.8.2. Čvrstoća na savijanje

Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje prikazani su u tablici 25.

Tablica 25. Rezultati čvrstoće na savijanje uzoraka vibroprešanog betona

UZORCI VIBROPREŠANOG BETONA S PDB- om	ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE [MPa]	UZORCI VIBROPREŠANOG BETONA SA SSA	ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE [MPa]	UZORCI REFERENTNOG BETONA BEZ PEPELA	ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE [MPa]
V-PDB-1	4,22	V-SSA-1	4,09	V1	3,95
V-PDB-2	4,87	V-SSA-2	4,95	V2	4,54
V-PDB-3	4,29	V-SSA-3	4,25	V3	3,94
V-PDB-4	4,43	V-SSA-4	5,05	V4	4,73
V-PDB-5	4,13	V-SSA-5	4,92	V5	4,86
V-PDB-6	4,39	V-SSA-6	4,02	V6	4,05
V-PDB-7	4,26	V-SSA-7	3,94	V7	4,28
V-PDB-8	4,43	V-SSA-8	4,1	V8	4,36
PROSJEČNA VRIJEDNOST [MPa]	4,37	PROSJEČNA VRIJEDNOST [MPa]	4,42	PROSJEČNA VRIJEDNOST [MPa]	4,34

Čvrstoća na savijanje uzoraka vibroprešanog betona sa PDB-om nalazi se u rasponu od 4,13 MPa do 4,87 MPa, s prosječnom čvrstoćom od 4,37 MPa. Čvrstoća na savijanje uzoraka vibroprešanog betona sa SSA nalazi se u rasponu od 4,02 MPa do 5,05 MPa s prosječnom čvrstoćom od 4,42 MPa. Referentni uzorci bez pepela imaju tlačnu čvrstoću u rasponu od 3,95 MPa do 4,86 MPa s prosječnom čvrstoćom od 4,34 MPa. Ovi rezultati pokazuju da uzorci sa SSA imaju najveću čvrstoću na savijanje u najvećem rasponu, dok najmanju čvrstoću na savijanje imaju referentni uzorci bez pepela. Također je bitno napomenuti da svaki pojedinačni rezultat čvrstoće na savijanje prelazi minimalnu vrijednost od 2,8 MPa koja je dana normom EN 1339, te prelazi karakterističnu vrijednost od 3,5 MPa zadanu istom normom. Prema dobivenim vrijednostima čvrstoće na savijanje vrši se kategorizacija betonskih ploča

9.8.3 Čvrstoća na cijepanje

Rezultati ispitivanja čvrstoće na cijepanje prikazani su u tablici 26.

Tablica 26. Rezultati ispitivanja čvrstoće na cijepanje uzoraka vibroprešanog betona

UZORCI VIBROPREŠANOG BETONA S PDB- om	ČVRSTOĆA NA CIJEPANJE [MPa]	UZORCI VIBROPREŠANOG BETONA SA SSA	ČVRSTOĆA NA CIJEPANJE [MPa]	UZORCI REFERENTNOG BETONA BEZ PEPELA	ČVRSTOĆA NA CIJEPANJE [MPa]
V-PDB-1	3,87	V-SSA-1	2,93	V1	3,3
V-PDB-2	2,95	V-SSA-2	2,68	V2	3
PROSJEČNA VRIJEDNOST [MPa]	3,41	PROSJEČNA VRIJEDNOST [MPa]	2,81	PROSJEČNA VRIJEDNOST [MPa]	3,15

Ovi rezultati pokazuju da uzorci sa SSA imaju najmanju čvrstoću na cijepanje i njezina prosječna vrijednost iznosi 2,81 MPa, dok najveću čvrstoću na cijepanje imaju uzorci sa PDB-om čija prosječna vrijednost iznosi 3,41 MPa. Također je bitno napomenuti da svaki pojedinačni rezultat čvrstoće na cijepanje prelazi minimalnu vrijednost od 2,9 MPa koja je dana normom EN 1338, osim jednog uzorka sa SSA. Karakteristična vrijednost od 3,6 MPa zadana istom normom nije zadovoljena. Zbog malog broja ispitanih uzoraka nije moguće utvrditi trend. Iako je normom EN 1338 za ispitivanje čvrstoće na cijepanje potrebno 8 betonskih blokova, ispitivanje je provedeno na 2 bloka jer je procijenjena dominantna primjena ploča s otpadnim pepelima.

10 ZAKLJUČAK

Danas postojeće norme dopuštaju samo uporabu pepela dobivenog sagorijevanjem ugljena u cementnim kompozitima, međutim ponovna uporaba pepela drvene biomase i pepela mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda kao djelomična zamjena cementa ili agregata u betonu može doprinijeti postizanju ciljeva održivog razvoja i samim time smanjiti količinu otpada na odlagalištima.

U eksperimentalnom dijelu rada pripremali se su uzorci lijevanog betona i uzorci vibroprešanog betona kod kojih je 15 % agregata zamijenjeno pepelom dobivenim spaljivanjem drvene biomase i termičkom obradom mulja s pročištača voda.

Uzorci lijevanog betona podvrgnuti su ispitivanjima mehaničkih, trajnosnih i deformacijskih svojstava. Temeljem rezultata ispitivanja zaključeno je da se pepeo drvene biomase prikazanog kemijskog sastava i granulometrije može koristiti kao djelomična zamjena agregata u betonu jer ne dovodi do značajnog smanjenja bitnih svojstava istog.

Prilikom ispitivanja uzoraka lijevanog betona s PDB-om došlo se do zaključka da:

- Dobivena prosječna vrijednost tlačne čvrstoće nakon 28 dana 55,9 MPa zadovoljava zahtijevanu tlačnu čvrstoću od 45 MPa danu normom HRN EN 13198:2004 za proizvode vanjske upotrebe koji su podvrgnuti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja u kombinaciji sa solima za odmrzavanje
- Dobivena prosječna vrijednost modula elastičnosti nakon 28 dana 34,31 GPa je veća u odnosu na približnu vrijednost modula elastičnosti od 34 GPa prema [63]
- Dobivena najveća vrijednost vodonepropusnosti od 14 mm zadovoljava razred vodonepropusnosti V1 prema normi HRN 1128:2007
- Dobivene vrijednosti upijanja vode su manje od maksimalne vrijednosti od 6,5 % dane normom HRN EN 13198:2004 za proizvode vanjske upotrebe koji su podvrgnuti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja u kombinaciji sa solima za odmrzavanje
- Dobivena vrijednost individualne pojedinačne mase oljuštenog materijala je manja od maksimalne vrijednosti 1,5 kg/m² zadane normom HRN EN 13198:2004. Također, dobivena prosječna vrijednost ne prelazi maksimalnu vrijednost od 0,5 kg/m² nakon 28 dana zadanu normom HRS CEN/TS 12390-9

Gotovi proizvodi od vibroprešanog betona podvrgnuti su ispitivanjima mehaničkih svojstava jer je otpadni pepeo korišten samo u temeljnom sloju proizvoda koji nije direktno izložen utjecajima iz okoliša. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje i čvrstoće na cijepanje vibroprešanog betona sa otpadnim pepelom zadovoljavaju minimalnu vrijednost od 2,8 MPa zahtijevanu normom EN 1339 i veći su od vrijednosti čvrstoća ispitanih na referentnoj mješavini.

Temeljem dobivenih rezultata može se zaključiti da je pri korištenju otpadnih pepela kao djelomične zamjene za agregat u betonu ključno razmotriti namjenu i specifične zahtjeve krajnjeg proizvoda.

S obzirom na to da se količina otpadnih pepela kontinuirano povećava, nužno je pronaći održivije rješenje njihovog odlaganja. Njihova primjena u građevinarstvu predstavlja veliki potencijal za daljnja istraživanja i mijenjanje trenutno važećih normi. Pozornost treba usmjeriti na precizno podešavanje dizajna betonske mješavine, što uključuje određivanje odgovarajuće količine i tipa aditiva, kako bi se osigurala optimalna učinkovitost i postigla željena svojstva.

POPIS LITERATURE

- [1] Štirmer, N.: Utjecaj građevinskog materijala na okoliš, Radovi Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Požegi (2012)
- [2] Rajamma, R.: Biomass fly ash incorporation in cement based materials, University of Aveiro (2011)
- [3] Štirmer, N., Carević, I., Cerковиć, S., Grubor, M., Bjegović, D.: Inovativni građevni proizvodi s pepelom drvene biomase, Projekti suradnje članova Akademije s gospodarstvom (2020)
- [4] Carević, I., Štirmer, N., Banjad-Pečur, I. Primjena pepela iz drvene biomase kao zamjena cementa u betonu. U: Gilja, G., Haladin, I., Lukačević, I., ur. Zajednički temelji '17 – Peti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti. Zagreb: Građevinski fakultet u Zagrebu, (2017), str. 155-161
- [5] Šume u Hrvatskoj < <https://www.hrsume.hr/sume/sume-u-hrvatskoj/>>
- [6] Yang, Z., Huddleston, J., Brown, H.: Effects of wood ash on properties of concrete and flowable fill (2016) < <https://www.scirp.org/journal/Paperabs?paperid=69808>>
- [7] da Luz Garcia, M. i Sousa-Coutinho, J. Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. Construction and Building materials, 41 (2013)
- [8] Kostanić Jurić, Karmen Razvoj metodologije za primjenu pepela drvene biomase u betonu / Štirmer, Nina (mentor). Zagreb, Građevinski fakultet, Zagreb, 2021
- [9] Vouk, D., Nakić, D., Štirmer, N., Serdar, M.: Korištenje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u betonskoj industriji
- [10] Zrnčević, S.: Smanjenje proizvodnje mulja na liniji vode uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, Hrvatske vode (2022)
- [11] Jakubec, Ž., Faivre, S. i drugi: Obnovljivi izvori energije, Geografski horizont, 1-2(2007)
- [12] Pavlovicova, S.: Renewable Energy Sources, Eastern Slovakia
- [13] European Commission < https://commission.europa.eu/index_en>
- [14] Labudović B.: Osnove primjene biomase, Energetika marketing, Zagreb, veljača 2012.

- [15] Basu, P.: Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction, Elsevier International, USA, 2013
- [16] Milovanović, B. Vrste i količine dostupnog pepela iz drvne biomase, kolovoz 2018.
- [17] Šegon, V., Šimek, T., Oradini, A., Marchetti, M., Paladinić, E. Priručnik za učinkovito korištenje biomase. Jastrebarsko: Hrvatski šumarski institut (2014)
- [18] Jukić, A.: Biomasa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
- [19] Grijanje Rijeka <<http://www.grijanje-rijeka.hr/cd/1286/grijanje-drvenim-briketima>>
- [19] Regionalni Tjednik <<https://regionalni.com/sezona-grijanja-cijena-drvenih-peleta-dosegla-je-vrhunac-pojeftinjenje-mozemo-ocekivati-tek-u-veljaci/>>
- [21] Wikipedia <<https://hr.wikipedia.org/wiki/Biodizel>>
- [22] Bioenergy Europe <<https://bioenergyeurope.org/bioenergy/>>
- [23] College of engineering, Iowa State University: Biomass Properties and handling (2010/2011)
- [24] Cindrić, I.: Rasplinjavanje biomase, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu(2016)
- [25] Enviromental papernet work
<<https://environmentalpaper.org/biomass/mapping-bioenergy/>>
- [26] Štirmer, N., Šantek Bajto, J.: Pepeo drvne biomase: od otpada do sirovine, Zagrebački energetska tjedan, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu(2019)
- [27] Ministarstvo poljoprivrede: Nacrt strategije biogospodarstva do 2035
- [28] UNDP Organization: Drvna biomasa gorivo budućnosti (2017)
- [29] Janowiak, M. K., Webster, C.R.: Promoting ecological sustainability in woody biomass harvesting
- [30] Hamar promet <<https://hamar-promet.hr/biomasa-i-sjecka/>>
- [31] Eurostat <<https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2024>>
- [32] Hrvatske šume <<https://www.hrsume.hr/>>
- [33] Loncar, D., Krajacic, G., Vujanovic, M.: Podrška developerima – Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvnu biomasu', Zagreb, (2009)

- [34] Laphirattanakul, P., Charoensuk, J., i drugi: Development of pulverized biomass combustor with a precombustion chamber
- [35] Suksam, N., Charoensuk, J.: Development of pulverized biomass combustor for industrial boiler: A study on bluff body effect
- [36] Štirmer, N.: Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću, Tarec (2016)
- [37] Baričević, A., Carević, I. i drugi: Potencial of using wood biomass ash in low strength composites (2021), < <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7961552/> >
- [38] Carević, I., Štirmer, N. i drugi :Effect of wood biomass ash storage on the properties of cement composites (2021)
- [39] Ukrainczyk, N., Koenders, E.A.B., Štirmer, N. Transformation of wood ash waste into construction materials. In Proceedings of the 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future, (2017)
- [40] Milovanović, B., Štirmer, N., Carević, I., Baričević, A. .: Pepee drvene biomase kao sirovina u betonskoj industriji, GRAĐEVINAR, 71 (2019)
- [41] Ristić, N., Grdić, Z. i drugi: Properties of Self-compacting Concrete Produced with Biomass Wood Ash, Tehnički vjesnik(2021)
- [42] Vassilev, S.V., Baxtar, D. i drugi: An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification (2012)
- [43] Agrela, F., Cambra, M. i drugi: Biomass fly ash and biomass bottom ash
- [44] Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., Vassileva, C.G., 2013b. An overview of the composition and application of biomass ash: part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. Fuel 105, 1939.
- [45] Hinojosa, M.J.R., Galvín, A.P., Agrela, F., Perianes, M., Barbudo, A., 2014. Potential use of biomass bottom ash as alternative construction material: conflictive chemical parameters according to technical regulations. Fuel 128, 248259.
- [46] Sklivaniti, V., Tsakiridis, P.E., Katsiotis, N.S., Velissariou, D., Pistofidis, N., Papageorgiou, D., et al., 2017. Valorisation of woody biomass bottom ash in Portland cement: a characterization and hydration study. J. Environ. Chem. Eng. 5 (1), 205213.

- [47] Modolo, R.C.E., Ferreira, V.M., Tarelho, L.A., Labrincha, J.A., Senff, L., Silva, L., 2013. Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. *Constr. Build. Mater.* 45, 275281.
- [48] Bonfiglioli, I., Bianchini, A., Saccani, C.: *Sewage sludge: Characteristics and recovery options*
- [49] Paya, J., Monzo, J., i drugi: *Sewage sludge ash*
- [50] Tušar, B: *Pročišćavanje otpadnih voda*, Kigen d.o.o. i Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [51] Analiza tržišta < http://www.grad.hr/rescue/materijali/Izvjestaji_1/Izvjestaj_br_6_Analiza_trzista.pdf >
- [52] Peirce, J.J., Vesilind, P.A., i drugi: *Environmental pollution and control* (Fourth edition), 1998
- [53] <<http://www.energetika-net.com/specijali/projekt-prica/recikliranjem-od-komunaln-og-mulja-do-inovativnih-gradevnih-proizvoda-21326> >
- [54] Tušar, B: *Ispuštanje i pročišćavanje otpadne vode*, Croatiaknjiga, Zagreb, 2004
- [55] Yusuf, R.O., Noor, Z.Z., i ostali: *Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete – a review* (2012)
- [56] Vouk, D., Nakic, D., Stirmer, N., Cheeseman, C.R.: *Use of sewage sludge ash in cementitious materials*
- [57] Lynn, C.J., Dhir, R.K., Ghataora, G.S., West, R.P.: *Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete* Ciarán
- [58] Nakić, D., Vouk, D., Štirmer, N., Sedlar, M.: *Gospodarenje muljem s UPOV-a - novi uvid u mogućnosti njegove uporabe kao zamjenskog cementnog materijala*
- [59] Skazlić, M.: *Primjena predgotovljenih sustava u drugim područjima graditeljstva*
- [60] Pradesh, M.V., Singh, V.: *A review on precast cement concrete paver blocks using fly ash*, Vikas kumar patel research
- [61] Abate, L.M.K.: *Concrete paving blocks: an overview* (1993)
- [62] Widayanto, E., Soehardjono, A., Zacoeb, A. i drugi: *The effect of vibration energy changes on compressive strength of concrete paving block (CPB) in concreting process with vibropressing system*

[63] Bjegović, D.; Štirmer, N.: Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015.

[64] Le, T. T., Lim, S i drugi: Hardened properties of high performance printing concrete, Cement and Concrete Research

POPIS SLIKA

Slika 1. Distribucija bruto potrošnje energije dobivene iz obnovljivih izvora u 2021. godini [13]	4
Slika 2. Podjela biomase [16].....	6
Slika 3. Briketi [19]	7
Slika 4. Peleti [20].....	8
Slika 5. Biodizel [21]	8
Slika 6. Udio biomase prema vrsti sirovine [22]	9
Slika 7. Kružni tok kretanja tvari [24]	11
Slika 8. Razvoj proizvodnje primarne energije iz biomase prema vrsti [13].....	12
Slika 9. Prikaz evolucije bioenergije u bruto konačnoj potrošnji energije po krajnjoj uporabi (ktoe) [13]	13
Slika 10. Energane u EU [25]	14
Slika 11. Broj postrojenja koje koriste biomasu kao gorivo po državama [26]	14
Slika 12. Rasprostranjenost postrojenja na bioplin i biomasu po županijama u 2023. godini [27]	15
Slika 13. Drvna sječka [30].....	18
Slika 14. Ukupna površina šuma u EU [31]	18
Slika 15. Broj postrojenja na drvenu biomasu u Republici Hrvatskoj [26].....	19
Slika 16. Drvna zaliha prema vrsti drveća u Republici Hrvatskoj [32]	20
Slika 17. Usporedba godišnjeg prirasta i etata za šume kroz godine [32]	20
Slika 18. Ložište s fiksnom rešetkom [16].....	21
Slika 19. presjek ložišta s izgaranjem u fluidiziranom sloju: mjehuričasti (lijevo) i cirkulirajući (desno) [16].....	22
Slika 20. Sustav izgaranja u letu [34]	23
Slika 21. Različiti pristupi skladištenja PDP-a : (a) u plastičnim vrećama, (b) u spremniku, (c) na neuređenom odlagalištu [38]	24
Slika 22. Shematski prikaz mjesta skupljanja pepela [16]	25
Slika 23. Procjena proizvodnje mulja po godinama u UPOV-a na razini EU [9].....	31

Slika 24. Procesi obrade mulja [51].....	34
Slika 25. Tornjevi za anaerobnu obradu mulja na UPOV-u u Zagrebu [53].....	36
Slika 26. Promjeri čestica SSA [9].....	40
Slika 27. Načini polaganja opločnika [61].....	45
Slika 28. Skica za vibroprešenje [62].....	46
Slika 29. PDB.....	48
Slika 30. Granulometrijska krivulja PDB-a	50
Slika 31. Mjerenje temperature svježeg betona	52
Slika 32. Mjerenje slijeganja [63].....	53
Slika 33. Prikaz ispitivanja sadržaja pora u svježem betonu	54
Slika 34. Uzorci lijevanoga betona s PDB-om prije ispitivanja tlačne čvrstoće.....	56
Slika 35. Ispitivanje tlačne čvrstoće lijevanoga betona s PDB-om nakon 28 dana.....	57
Slika 36. Uzorci lijevanoga betona s PDB-om za ispitivanje kapilarnog upijanja	58
Slika 37. Ispitivanje kapilarnog upijanja uzoraka lijevanoga betona s PDB-om.....	58
Slika 38. Ispitivanje vodonepropusnosti uzoraka lijevanog betona s PDB-om.....	59
Slika 39. Mjerenje visine prodora bode uzoraka lijevanog betona s PDB-om.....	60
Slika 40. Prikaz pripreme uzoraka lijevanog betona s PDB-om na ispitivanje otpornosti na smrzavanja i odmrzavanja sa soli.....	61
Slika 41. Ispitivanje modula elastičnosti lijevanog betona s PDB-pm.....	62
Slika 42. Krivulja histereze	62
Slika 43. Prikaz ovisnosti kapilarnog upijanja o korijenu vremena	65
Slika 44. Masa oljuštenog materijala nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja	67
Slika 45. Porast modula elastičnosti u vremenu.....	69
Slika 46. Korelacija modula elastičnosti i tlačne čvrstoće: a) nakon 2 dana, b) nakon 28 dana.....	70
Slika 47. SSA	71
Slika 48. Granulometrijska krivulja SSA.....	73
Slika 49. Postrojenje za proizvodnju vibroprešanog betona pogona Beton Lučko d.o.o.	75
Slika 50. Opločnici s PDB-om.....	75

Slika 51. Opločnici s SSA.....	76
Slika 52. Sušenje gotovih betonskih proizvoda.....	76
Slika 53. Ispitivanje tlačne čvrstoće betonskih opločnika.....	78
Slika 54. Uzorci vibroprešanog betona nakon ispitivanja tlačne čvrstoće	78
Slika 55. Ispitivanje čvrstoće na savijanje betonskih opločnika	79
Slika 56. Uzorak nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje.....	80
Slika 57. Mjerenje debljina habajućeg sloja nakon sloma.....	80
Slika 58. Ispitivanje čvrstoće na cijepanje uzoraka vibroprešanog betona.....	81

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled procjena raspoložive biomase u RH [27]	15
Tablica 2. Maseni udio oksida kod letećeg pepela dobivenog izgaranjem biomase [44].....	27
Tablica 3. Udio oksida kod pepela s dna peći dobivenog izgaranjem biomase [45,46,47].....	28
Tablica 4. Udio teških metala u letećem pepelu i pepelu s dna peći [40].....	29
Tablica 5. Uobičajeni rasponi sustava neobrađenog i stabiliziranog mulja [49].....	35
Tablica 6. Globalna proizvodnja letećeg pepela mulja s UPOV-a [55]	38
Tablica 7. Usporedba raspona vrijednosti kemijskih spojeva u SSA za različita podrijetla i metode obrade mulja [56].....	42
Tablica 8. Kemijski sastav PDB-a	49
Tablica 9. Sastav mješavine lijevanog betona s PDB-om (1 m ³).....	51
Tablica 10. Plan ispitivanja lijevanog betona u svježem stanju.....	52
Tablica 11. Ispitivanja očvrslulog lijevanoga betona s PDB-om	55
Tablica 12. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka lijevanog betona s PDB-om	63
Tablica 13. Rezultati upijanja lijevanog betona s PDB-om.....	64
Tablica 14. Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti lijevanog betona u PDB-u.....	65
Tablica 15. Rezultati vodonepropusnosti betona prema normi HRN 1128:2007	66
Tablica 16. Rezultati ispitivanja upijanja vode na uzorcima lijevanog betona s PDB-om.....	66
Tablica 17. Prikaz količine oljuštenog materijala dobivene ispitivanjem otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje sa soli uzoraka lijevanog betona	67
Tablica 18. Prikaz pojedinačne mase oljuštenog materijala pojedinog uzorka lijevanog betona s PDB-om	68
Tablica 19. Rezultati ispitivanja elastičnosti lijevanog betona s PDB-om.....	69
Tablica 20. Kemijski sastav SSA.....	72
Tablica 21. Sastav mješavine vibroprešanog betona sa PDB-om za 0,5m ³	74
Tablica 22. Sastav mješavine vibroprešanog betona sa SSA za 0,5m ³	74
Tablica 23. Ispitivanja gotovih proizvoda od vibroprešanog betona.....	77

Tablica 24. Vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka vibroprešanog betona	82
Tablica 25. Rezultati čvrstoće na savijanje uzoraka vibroprešanog betona.....	83
Tablica 26. Rezultati ispitivanja čvrstoće na cijepanje uzoraka vibroprešanog betona	84