

Primjena statističkih metoda za analizu cementnih kompozita s pepelom drvene biomase

Curić, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:002181>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ak. god. 2022/2023

Mario Curić

**Primjena statističkih metoda za analizu cementnih
kompozita s pepelom drvne biomase**

Završni rad

Mentor: prof. dr. sc. Nina Štirmer

Komentor: doc. dr. sc. Kristina Ana Škreb

Zagreb, 2023



TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Mario Curić**

JMBAG: **0082059264**

Završni ispit iz predmeta: **Poznavanje materijala**

Naslov teme
završnog ispita:

HR	Primjena statističkih metoda za analizu cementnih kompozita s pepelom drvne biomase
ENG	Application of statistical methods for analysis of cement composites with wood biomass ash

Opis teme završnog ispita:

Zadatak ovog rada je primjena statističkih metoda za analizu cementnih kompozita s pepelom drvne biomase. U teorijskom dijelu potrebno je opisati statističke metode (npr. koeficijent korelacije) te primjenu pepela drvne biomase u cementnim kompozitima. U sklopu eksperimentalnog dijela rada, potrebno je primijeniti opisane metode na rezultate eksperimentalnog istraživanja mješavina cementnih kompozita s pepelom drvne biomase te na osnovi dobivenih rezultata zaključiti koji parametri utječu na pojedina svojstva cementnih kompozita.

Datum: **31.3.2021.**

Komentor: **doc. dr. sc. Kristina Ana Škreb**
(Ime i prezime komentora)

Mentor: **prof. dr. sc. Nina Štirmer**
(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Nini Štirmer na uloženom vremenu i trudu, te stručnim savjetima i kritikama prilikom pisanja završnog rada. Posebno se zahvaljujem i komentorici doc. dr. sc. Kristini Ani Škreb na angažiranosti i strpljenju, te pruženoj pomoći i savjetima tijekom statističke obrade rezultata.

Zahvaljujem svojim roditeljima, djevojci, sestrama i ostalim članovima obitelji na strpljenju, vjeri i podršci.

SAŽETAK

U ovom radu napravljena je statistička analiza cementnih kompozita s pepelom drvene biomase kako bi se utvrdila povezanost određenih parametara i svojstava. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu opisane su energane na drvenu biomasu, njihov način rada, vrste ložišta, trenutna količina i budući planovi u vezi obnovljivih izvora energije. Također, opisan je i pepeo drvene biomase, njegov nastanak, količina, kemijski sastav i daljnja upotreba. U eksperimentalnom dijelu objašnjen je koeficijent korelacije kao metoda korištena prilikom statističke obrade rezultata. Za pet različitih mješavina određena su: svojstva u svježem stanju (gustoća, temperatura, sadržaj pora i konzistencija), mehanička svojstva (vlačna i tlačna čvrstoća) i deformacije (skupljanje uslijed sušenja i autogene deformacije). Koeficijenti korelacije izračunati su za sljedeće parametre: ovisnost ispitanih svojstava o udjelu PDB-a, utjecaj svojstava u svježem stanju na mehaničke karakteristike i deformacije, te povezanost mehaničkih svojstava s deformacijama. Na temelju izračunatih koeficijenata korelacije dan je zaključak o utjecaju PDB-a na karakteristike cementnog morta.

Ključne riječi: pepeo drvene biomase, Spearmanov koeficijent korelacije, cementni kompoziti

ABSTRACT

In this paper, a statistical analysis of cement composites with wood biomass ash was made to define the relationship between certain parameters and properties. The paper consists of a theoretical and an experimental part. The theoretical part describes wood biomass power plants, their mode of operation, types of fuel, current quantity, and plans regarding renewable energy sources. Wood biomass ash, its origin, amount, chemical composition, and further use are also described. In the experimental part, the correlation coefficient is explained as a method used during the statistical processing of the results. For five different mixes, the following properties were determined: properties in the fresh state (density, temperature, pore content, and consistency), mechanical properties (tensile and compressive strength), and deformations (shrinkage due to drying and autogenous deformation). Correlation coefficients were calculated for the following parameters: the dependence of the tested properties on the content of wood biomass ash, the influence of properties in the fresh state on mechanical characteristics and deformations, and the connection of mechanical properties with deformations. Based on the calculated correlation coefficients, a conclusion was made about the influence of wood biomass ash on the characteristics of cement mortar.

Keywords: wood biomass ash, Spearman's correlation coefficient, cement composites

SADRŽAJ

ZAHVALA	I
SAŽETAK	II
ABSTRACT	III
SADRŽAJ	IV
1. UVOD.....	1
2. ENERGANJE NA DRVNU BIOMASU	3
2.1 BIOMASA	3
2.2 ENERGANJE NA DRVNU BIOMASU	4
2.3 DRVNA BIOMASA	7
3. PEPEO DRVNE BIOMASE	9
3.1 KEMIJSKI SASTAV PDB-a	10
3.2 GOSPODARENJE PDB-om	11
3.2.1 Klasifikacija PDB-a prema katalogu otpada	11
3.2.2 Dostupne količine PDB-a.....	12
3.2.3 Oporaba PDB-a.....	13
4. EKSPERIMENTALNI DIO	16
4.1 MJEŠAVINE I METODE.....	17
4.1.1 Metode ispitivanja	17
4.1.2 Statistička analiza rezultata.....	18
5. REZULTATI I STATISTIČKA ANALIZA	21
5.1. Ovisnost ispitanih svojstava o udjelu PDB-a	22
5.1.1. Utjecaj PDB-a na svojstva cementnog morta u svježem stanju.....	22
5.1.2. Utjecaj PDB-a na vlačnu čvrstoću cementnog morta	22
5.1.3. Utjecaj PDB-a na tlačnu čvrstoću cementnog morta	23
5.1.4. Utjecaj PDB-a na skupljanje uslijed sušenja cementnog morta.....	23
5.1.5. Utjecaj PDB-a na autogene deformacije	23
5.2. Utjecaj svojstava u svježem stanju na mehanička svojstva i deformacije	24

5.2.1. Utjecaj svojstava u svježem stanju na vlačnu čvrstoću cementnog morta.....	24
5.2.2. Utjecaj svojstava u svježem stanju na tlačnu čvrstoću cementnog morta	25
5.2.3. Utjecaj svojstava u svježem stanju na skupljanje uslijed sušenja	25
5.2.4. Utjecaj svojstava u svježem stanju na autogene deformacije	26
5.3. Povezanost mehaničkih svojstava s deformacijama.....	27
5.3.1 Povezanost vlačne čvrstoće i skupljanja uslijed sušenja.....	27
5.3.2. Povezanost vlačne čvrstoće i autogenih deformacija	28
5.3.3. Povezanost tlačne čvrstoće i skupljanja uslijed sušenja	28
5.3.4. Povezanost tlačne čvrstoće i autogenih deformacija	28
6. ZAKLJUČAK	29
7. LITERATURA	30
8. POPIS SLIKA	31
9. POPIS TABLICA	32

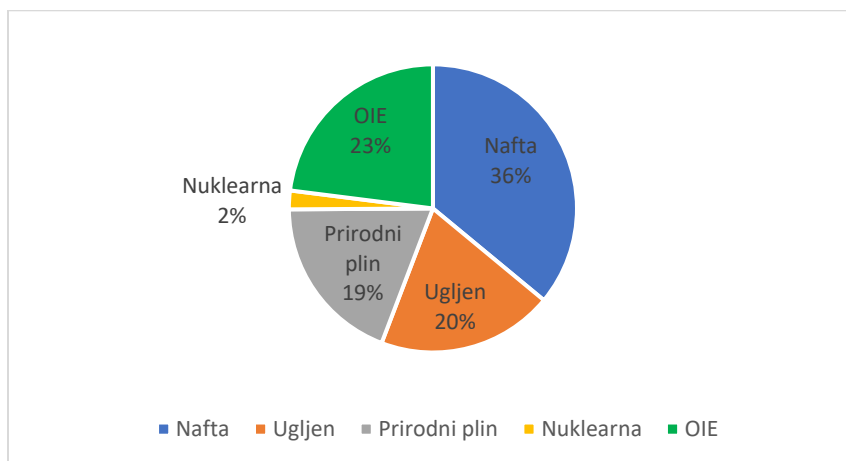
1. UVOD

Glavna komponenta betona je cement koji ima ključnu ulogu u zadovoljavanju građevinskih potreba. Danas, u vremenu ekološke osviještenosti cementna industrija nailazi na određene poteškoće: potreba za energijom i sirovinama te visoka emisija ugljikovog dioksida prilikom proizvodnje. Kako bi se smanjio sadržaj cementa u betonu, a ujedno i emisija ugljikovog dioksida (CO₂), teži se upotrebi sporednih cementnih materijala. Jedan od sporednih materijala je i pepeo drvene biomase (PDB) koji nastaje kao nusproizvod izgaranja biomase [1].

Direktiva 2009/28/EZ Europskog parlamenta i vijeća od 23. travnja 2009. o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora (OI) u svrhu smanjenja emisije stakleničkih plinova te ispunjavanje Kyotskog protokola i Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama stavlja uporabu energije iz obnovljivih izvora kao jednu od glavnih provedbenih mjera[2]. Također, plan Europske unije za smanjenje stakleničkih plinova i ovisnosti o fosilnim gorivima je do 2030. godine ukinuti energane na ugljen te postizanje cilja da udio obnovljive energije iznosi najmanje 55 %. Taj cilj postizanja udjela obnovljive energije od najmanje 55 % do 2030 godine prihvaćen je od strane Europskog parlamenta te je uvršten u europski propis o klimi koji je stupio na snagu u lipnju 2021. godine [3]. Kako bi se to ostvarilo, i kako bi se nadomjestila energija iz energane na ugljen, potrebno je omogućiti energiju dobivenu različitim obnovljivim izvorima energije kao što su energija vjetra, geotermalna i hidrotermalna energija, bioenergija, itd.

Promocija prednosti i mogućnosti proizvodnje energije u Europskoj Uniji (EU), dovela je do značajnog porasta broja energana na biomasu kao obnovljivog izvora energije [4]. Energane na krutu i plinovitu biomasu predstavljaju jedan od najznačajnijih obnovljivih izvora energije (OIE) u Europskoj Uniji (EU) te se očekuje da će dati najveći doprinos u postizanju cilja od 55 % energije iz obnovljivih izvora do 2030. godine.

Prema podacima iz 2018. godine, godišnje se iz obnovljivih izvora energije proizvede 5.469 TWh što čini 23 % svjetske proizvodnje, a biomasa s godišnjom proizvodnjom od 493 TWh treća je na ljestvici OIE u svjetskoj proizvodnji električne energije. Do 2050. godine predviđa se da bi 33 do 50 % od ukupne primarne energije u svijetu trebalo biti proizvedeno od biomase [5,6]. Na slici 1 prikazana je raspodjela OIE u ukupnoj svjetskoj bruto potrošnji primarne energije za električnu energiju, grijanje i transport.



Slika 1 Raspodjela svjetske potrošnje bruto energije [4]

Drveni otpad smatra se ugljično neutralnim gorivom, jer drvo apsorbira istu količinu ugljikovog dioksida dok raste koliko ga ispušta izgaranjem te ima prednost u odnosu na druge vrste biomase zbog manje proizvodnje otpadaka [7].

Porast broja energana na drvnu biomasu za posljedicu ima i porast količina pepela nastaloga sagorijevanjem drvne biomase [4]. Tijekom izgaranja 1 tone drvne biomase se proizvede 5 MWh energije, ali i 20 do 50 kilograma pepela s dna peći i letećeg pepela [5]. Pepeo koji nastaje predstavlja ekonomski i ekološki problem, jer pripada vrsti otpada koji je potrebno deponirati. Trenutno je njegova primjena prisutna u poljoprivrednoj industriji (20 %) i za razne druge namjene (10 %) dok se preostali udio odlaže na odlagališta (70 %). Predviđa se da će do 2050. godine godišnja svjetska proizvodnja PDB-a iznositi i do 476 milijuna tona što ukazuje na to kako bi prekomjerna količina PDB-a mogla izazvati probleme prilikom njegovog zbrinjavanja na siguran i ekonomičan način. Finim česticama PDB-a nošenim vjetrom može vrlo lako doći do onečišćenja zraka, što može uzrokovati respiratorne zdravstvene smetnje stanovnika koji žive blizu odlagališta. Također, veliki problem može predstavljati onečišćenje podzemnih voda zbog izlučivanja teških metala iz PDB-a. Zbog navedenih činjenica koje su rezultat skladištenja PDB-a, gospodarenje pepelom još je uvijek aktualna tema znanstvenih, tehničkih i gospodarskih rasprava [4].

Jedno od alternativnih rješenja tog problema je uporaba PDB-a u betonskoj industriji. Dosadašnjim istraživanjima dokazano je da se u betonskoj mješavini može i do 20 % veziva zamijeniti PDB-om s postizanjem uobičajenih mehaničkih svojstava i trajnosti [4,6]. Tako bi se riješio problem skladištenja PDB-a iz energana i smanjuje se ukupna količina energije potrebna za proizvodnju cementa u betonskoj industriji. To znači da navedenim procesom obje strane imaju ekološku i ekonomsku korist, a ujedno se i smanjuje emisija CO₂.

Iako upotreba PDB-a u betonskoj industriji daje pozitivne rezultate u ekonomskom i ekološkom smislu, on se još uvijek ne koristi u komercijalnoj proizvodnji betona [6]. Prepreka tome jesu sadašnje norme. Kako bi se to promijenilo potrebno je provesti dovoljno opsežnu i jasnu analizu ovog područja.

Cilj ovoga rada je prikazati potencijalnu primjenu PDB-a u betonskoj industriji tako što će se statističkim metodama analizirati i prikazati kako pojedini parametri PDB-a utječu na relevantna svojstva cementnih kompozita.

2. ENERGANJE NA DRVNU BIOMASU

2.1 BIOMASA

Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 138/2021) [8] definira biomasu kao biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog podrijetla iz poljoprivrede (uključujući tvari biljnog i životinjskog podrijetla), šumarstva i srodnih proizvodnih djelatnosti, uključujući ribarstvo i akvakulturu, kao i biorazgradivi dio industrijskog i komunalnog otpada.

Šumska biomasa i otpadno drvo podrazumijevaju ostatke od gospodarenja šumama (drvni isječki, granje, lišće, kora, panjevi) i ostatke industrijske prerade drveta (piljevina, blanjevina, drvena prašina), te oboljela stabla i devastirana šumska masa (slika 2 i 3).

Poljoprivredna biomasa i ostaci uključuju biljke i otpad životinjskog podrijetla (otpad nastao nakon žetve uroda) (slika 4).

Energetski nasadi (slika 5) su namjenski uzgajane drvene biomase namijenjene isključivo za dobivanje energije. U takvim nasadima se uglavnom koriste biljke kratke ophodnje poput topole i vrbe.



Slika 2 Šumska biomasa



Slika 4 Poljoprivredna biomasa



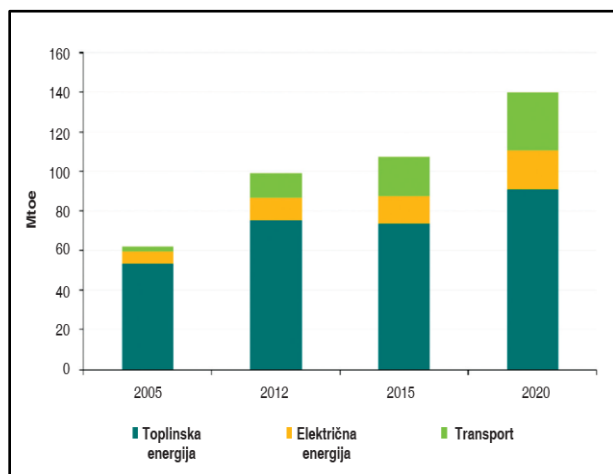
Slika 3 Šumska biomasa



Slika 5 Energetski nasad

2.2 ENERGANJE NA DRVNU BIOMASU

Trenutno su u Europskoj uniji energane na krutu i plinovitu biomasu jedan od najznačajnijih obnovljivih izvora energije te ako se uzme u obzir plan EU da se do 2030. godine koristi oko 55 % energije iz obnovljivih izvora, od njih se očekuje da će biti jedan od glavnih sudionika u dostizanju toga plana.



Biomasa je jedini OIE koji se može koristiti za grijanje i hlađenje, proizvodnju električne energije te transport. Na slici 6 prikazan je porast potrošnje biomase u EU od 2005. godine pri čemu je vidljiv značajan rast potrošnje biomase za proizvodnju toplinske i električne energije.

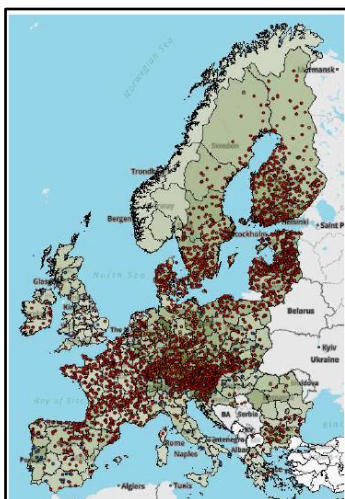
Električna energija se proizvodi pretvorbom mehaničke energije na turbini koja se pokreće zagrijavanjem vodene pare. Najučinkovitije korištenje energije biomase je kroz kogeneracijsko postrojenje, istovremeno proizvodnje električne i korisne toplinske energije [4].

Slika 6 Potrošnja biomase u zemljama EU za proizvodnju električne energije, toplinske energije i transport [9]

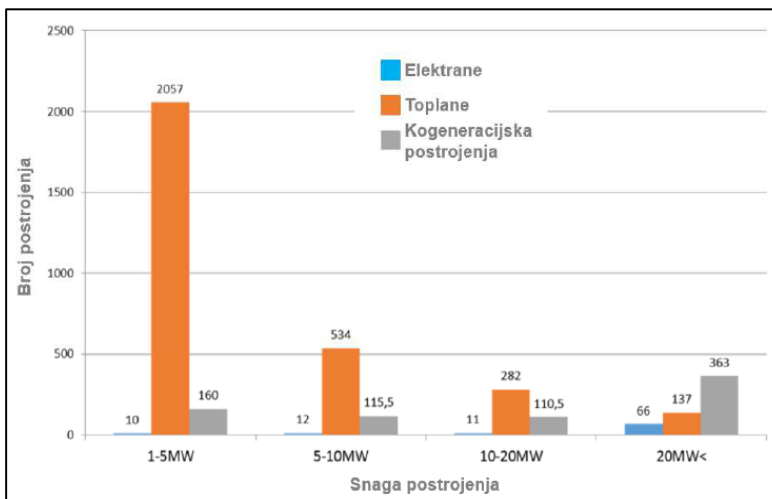
Energane koje za gorivo koriste drvenu biomasu, razlikuju tri vrste ložišta: izgaranje na rešetki, izgaranje u fluidiziranom sloju i izgaranje u letu (raspršujućem sloju) [4, 5]. Karakteristike i obilježja pojedinih vrsta ložišta su sljedeće:

- **Tehnologija izgaranja na rešetki**
 - Koristi se za mala i srednja postrojenja
 - Rešetka se hladi vodom te se provodi vlažno otpeljavanje s dna peći
- **Tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju**
 - Koristi se za srednja i velika postrojenja
 - Razlikuju se ložište s izgaranjem u mjehuričastom fluidiziranom sloju (engl. bubbling fluidised bed – BFB) i ložišta s izgaranjem u cirkulirajućem fluidiziranom sloju (engl. Circulating fluidised bed - CFB).
 - Zrak potreban za izgaranje biomase se ubacuje odozdo, a sama biomasa izgara u mješavini plina i sloju pijeska.
 - Pepeo s dna peći sastoji se od dvije frakcije:
 - **Fina frakcija** – Frakcija pepela koja prolazi kroz sita na postrojenju i sastoji se od velikog udjela kvarcnog pijeska
 - **Krupna frakcija** – Frakcija pepela koja ostaje na situ te se najčešće sastoji od značajnog udjela nečistoća kao što je kamenje.
- **Tehnologija izgaranja u letu (raspršujućem sloju)**
 - Koristi se za velika postrojenja i komunalne namjene te u postrojenjima u kojima se biomasa i ugljen spaljuju zajedno.

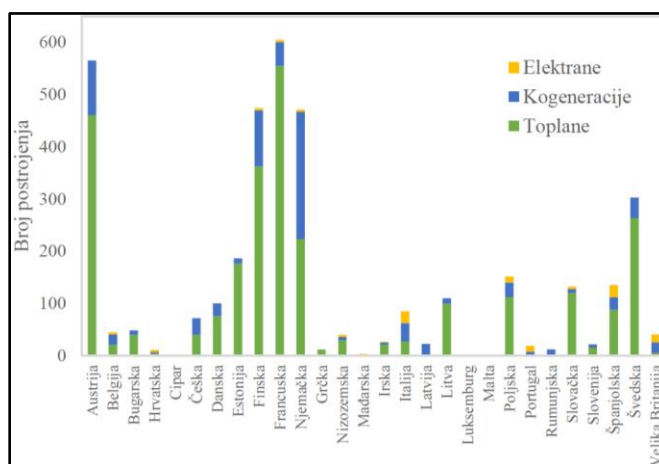
Sredinom ožujka 2016. godine, kada su objavljeni rezultati projekta „Basis BioEnergy“ [5], utvrđeno je kako je u članicama EU u aktivnom pogonu 4079 energana na biomasu. Na slici 8 prikazane su lokacije tih energana, gdje je ujedno i vidljivo kako se najveća koncentracija energana na drvenu biomasu nalazi u Austriji, Njemačkoj, Francuskoj, Švedskoj i Finskoj, a slika 9 to brojčano potvrđuje te daje uvid u točan broj energana na biomasu u svakoj članici EU. Na slici 7 prikazana je podjela tih energana prema snazi postrojenja te njihova primjena odnosno za koji se oblik energije upotrebljavaju.



Slika 8 Lokacije energana na biomasu u EU [9]



Slika 7 Broj energana na drvenu biomasu u EU [9]



Slika 9 Broj energana u državama članicama EU koje koriste drvenu biomasu kao gorivo [9]

Republika Hrvatska ima veliki potencijal iskorištenja drvene biomase nastale prilikom procesa gospodarenja šumama kao i ostataka industrijske prerade drva [6, 7]. Prema Strategiji energetskog razvoja Republike Hrvatske (NN 25/2020) [11], ukupni tehnički potencijal drvene biomase je od 32,2 do 72,21 PJ/god. Hrvatski operater tržišta energije (HROTE) je tvrtka koja obavlja djelatnost organiziranja tržišta električne energije i tržišta plina kao javnu uslugu pod nadzorom Hrvatske energetske regulatorne agencije. Također, temeljne djelatnosti tvrtke su i poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i

kogeneracije. Prema službenim podacima HROTE-a i godišnjem izvještaju za 2021. godinu [12], do sada je u Hrvatskoj instalirano 41 elektrana s ukupnom snagom od 96 069 kW, što je porast od 27 postrojenja snage 67 955 Kw u odnosu na 31.12.2017. Porast broja elektrana u RH prikazan je u tablici 1. Osim instaliranih elektrana, HROTE je sklopio još 13 ugovora o otkupu električne energije (ukupne snage 17 598 kW) koja još nisu puštena u pogon. Navedene brojke se odnose isključivo na postrojenja koja proizvode i prodaju električnu energiju, odnosno postrojenja koja su spojena na elektroenergetsku mrežu. Također, osim takvih postoje i postrojenja koja se nalaze u sklopu industrijskog pogona, a služe za proizvodnju energije koja se koristi za tehnološke potrebe tog pogona. Kao primjeri takvih postrojenja mogu se navesti postrojenja koja se isključivo koriste za proizvodnju toplinske energije za grijanje (postrojenje u Pokupskom), sušare u drvnj industriji, itd.. Ukupan broj energana na drvenu biomasu je stoga veći od 54 energane (koliko ih se nalazi u bazi podataka HROTE-a) te iznosi 120. Broj od 120 energana na drvenu biomasu nalazi se u Registru obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (registar OIEKPP) [13]. Taj registar je jedinstvena evidencija projektima obnovljivih izvora energije i visokoučinkovite kogeneracije, proizvodnim postrojenjima koja koriste obnovljive izvore energije, odnosno visokoučinkovitim kogeneracijskim postrojenjima te povlaštenim proizvođačima na području republike Hrvatske.

Tablica 1 Dostupni podaci HROTE-a o povlaštenim proizvođačima električne energije, a čija su postrojenja u sustavu poticanja (postrojenja koja koriste biomasu kao gorivo) [14]

Datum obnavljanja popisa	Ukupna instalirana snaga postrojenja	Broj postrojenja
31.12.2014	12,06 MWe	8
25.8.2017	28,955 MWe	14
21.9.2018	51,349 MWe	23
29.3.2019	59,329 MWe	29
31.12.2021	96,069 MWe	41

U Hrvatskoj, u sklopu projekta TAREC² (Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću) provedena je anketa s ciljem utvrđivanja tehnologije izgaranja, podrijetla biomase i količina PDB-a te utvrđivanja načina postupanja s njima [5]. U anketi je sudjelovalo 13 ispitanika od kojih je svaki predstavlja po jednu energanu na drvenu biomasu. Ukupne karakteristike energana su sljedeće:

- ukupna instalirana snaga im je 34,435 MWe i 99,31 MWe
- jedanaest energana su kogeneracijskog postrojenja, a preostale dvije su energane za daljinsko grijanje.
- energane su opremljene srednjim uređajima za loženje snage od 1MWe do 9,9 MWe za proizvodnju električne energije te malim i srednjim uređajima za loženje snage od 0,85 MWt do 16 MWt za toplinsku energiju.

2.3 DRVNA BIOMASA

Sa znanstvenog i tehničkog stajališta, prema [15], drvena biomasa iz šuma ili nasada stabala obuhvaća cijela stabla listopadnog i crnogoričnog drveća s korijenjem, drveće šumskih brzorastućih kultura kratkih ophodnji, grmlje, te umjetne i prirodne mješavine. Šumskom drvnom biomasom se smatra sljedeće:

- dijelovi panja iznad i ispod zemlje
- ostaci od sječe (zasjeci, piljevina)
- natruli komadi debla i krošnje
- sitna granjevina

Šumska biomasa zajedno s ostacima iz drvne i građevinske industrije te svim drvnim otpadom kao i sa svim drvećem i grmljem u području voćarstva i vinogradarstva zajedno čini drvenu biomasu. Primjer šumske drvne biomase prikazan je na slici 10.



Slika 10 Drvena biomasa [15]

Tablica 2 Procijenjeni potencijal tržišta drvne biomase u Hrvatskoj [9]

Izvor	tona/god.
Hrvatske šume d.o.o	830.000
Drvna industrija	500.000
Privatne šume	200.000
UKUPNO	1.530.000

Prema procjeni [16], ukupna površina šuma i šumskih zemljišta u Hrvatskoj iznosi 2.688.687 ha što čini udio od 47 % kopnene površine države. Taj udio šumskih površina govori kako u RH postoji veliki potencijal upotrebe drvne biomase koja nastaje tijekom procesa gospodarenja šumama i tijekom industrijske prerade drva. Ukupni godišnji potencijal drvne biomase te njegovi izvori dani su u tablici 2. Kao najveći potencijalni izvor drvne biomase prednjače Hrvatske šume s 830.000 tona drvne biomase na

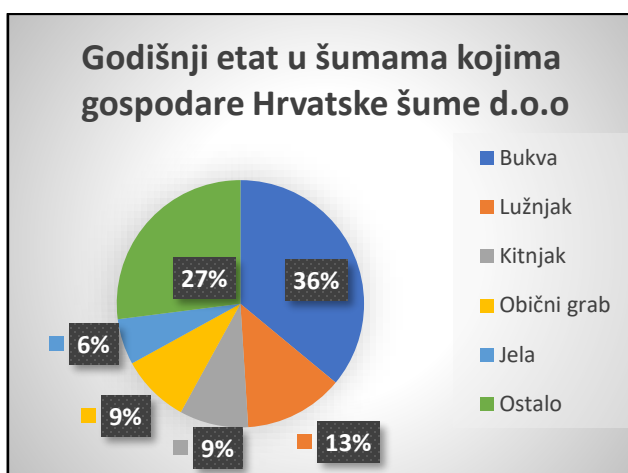
godinu, dok je potencijal drvne industrije 500.000 tona drvne biomase na godinu, a privatnih šuma 200.000 tona na godinu. Ta tri izvora zajedno daju ukupan godišnji potencijal iskoristivosti drvne biomase u Hrvatskoj koji iznosi 1.530.000 tona na godinu. Prema vrstama drvne zalihe, u RH najveći udio imaju bukva i hrast. Ostatak drvne zalihe je prikazan na slici 11.

U energanama koje se nalaze na prostoru RH nalazi se relativno ujednačena drvena biomasa zbog toga što je većina godišnjeg etata koncentrirana na 5 vrsta drveća. Slika 12 predstavlja udio pojedine vrste drva koje Hrvatske šume d.o.o posijeku na godišnjoj razini te je iz toga vidljivo kako bukva i hrast ukupno čine 50 % etata. Iz navedenih podataka može se zaključiti kako ujednačeni etat s obzirom na vrste koje se spaljuju za posljedicu daje i ujednačeni kemijski sastav PDB-a [16].



Slika 11 Drvena zaliha prema vrstama u Hrvatskoj [9]

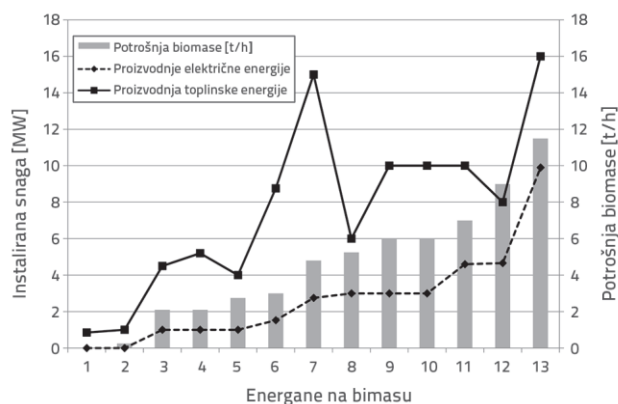
Svi ispitanici u sklopu projekta TAREC² su naveli kako u postrojenjima koriste čistu drvenu sječku kao vrstu biomase, ali uz to 85 % ispitanika koristi i druge vrste drvene biomase kao drvenu sječku s nečistoćama (zemljom i kamenjem), ostatke od pridobivanja drva – zelenu sječku (drvenu sječku od svježe oblovine i ostatke od proreda, uključujući granjevinu i vrhove), sječku iz cijelog drva (npr. drvenu sječku koja sadrži koru, granjevinu, iglice/lišće) te otpad drvene industrije (uključujući koru) [5].



Slika 12 Godišnji etat u šumama kojima gospodare Hrvatske šume d.o.o.[9]

Što se tiče izvora biomase, svi su naveli (100 % ispitanika) kako upotrebljavaju biomasu od kompanije Hrvatske šume d.o.o (izvor iz državnog vlasništva). Iz privatnih šuma i drvene industrije, biomasu koristi 61,5 % ispitanika, a preostali udio naveo je kako za dobivanje biomase koristi sva tri izvora.

Potrošnja biomase u srednjim postrojenjima može varirati između 2 i 11,5 t/h (ovisno o instaliranoj snazi postrojenja) ali se potrošnja od 5 t/h uzima kao prosjek potrošnje. Odgovori ispitanika su vidljivi na slici 13 koja prikazuje potrošnju biomase u pojedinim postrojenjima, a isto tako i ovisnost potrošnje biomase o instaliranoj snazi.



Slika 13. Potrošnja biomase po satu ovisno o instaliranoj snazi [5]

3. PEPEO DRVNE BIOMASE

Pepeo drvne biomase nastaje potpunim izgaranjem drvne biomase te predstavlja heterogenu mješavinu organskog i anorganskog sastava koji varira ovisno o velikom broju faktora. PDB je neizgorivi kruti ostatak koji sadrži najveći dio mineralnih frakcija koje potječu iz biomase. Najveći utjecaj na količinu i sastav pepela iz drvne biomase ima:

- temperature izgaranja drvne biomase
- vrsta biomase
- uvjeti rasta drvene biomase
- način prikupljanja biomase (onečišćenje itd.)
- tehnologija izgaranja, tj. vrsta kotlovskog postrojenja [4].

Više temperature toplinske obrade rezultiraju smanjenim količinama pepela, a izgaranje na temperaturama većim od 1000 °C uzrokuje manji sadržaj karbonata te dominantne faze u pepelu postaju oksidni spojevi. Različiti mineraloški sastavi pojedinih vrsta biomasa te uvjeti rasta uzroci su heterogenosti PDB-a, kao i sadržaj nečistoća i zemlje uslijed načina skupljanja drvne biomase. Vrsta biomase utječe na PDB tako da u PDB-u dolazi do pojave različitih kemijskih kombinacija prilikom izgaranja različitih vrsta biomase. Ako se kao biomasa koriste npr. šećerna trska i rižine ljuske, tada su najviše zastupljeni silicijevi oksidi što znatno utječe i na pucolansku aktivnost PDB-a, dok su kod druge vrste biomase najviše zastupljeni kalcijevi oksidi [2]. Količina pepela nastala u procesu izgaranja također ovisi o vrsti drvne biomase o čemu ćemo više u poglavlju 3.2.2.

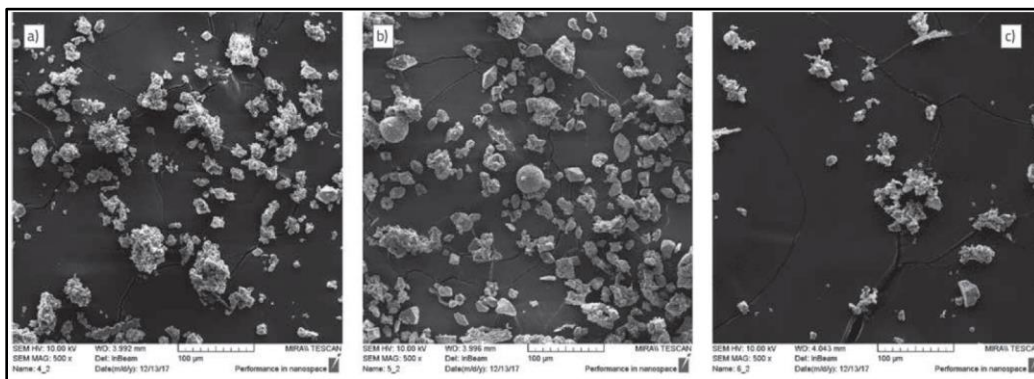
Pepeo koji nastaje nakon što drvena biomasa izgori dijeli se na: pepeo s dna peći i leteći pepeo koji se razlikuje po krupnoj i finoj frakciji. Različiti uzorci pepela koji nastaju prilikom izgaranja prikazani su na slici 14. Kod energana koje se koriste tehnologijom izgaranja u fluidiziranom sloju uglavnom nastaje fini leteći pepeo s malim udjelom krupnog pepela koji zaostane unutra komore za izgaranje. Frakcije letećeg pepela potrebno je različito tretirati zbog toga što imaju različite mehanizme formiranja i zbog toga što imaju različiti kemijski sastav i ponašanje. U energanama koje koriste tehnologiju izgaranja na reški, pepeo koji nastaje uglavnom je krupniji i taloži se unutar komore za izgaranje te zbog toga nosi naziv „pepeo s dna peći“. Takva postrojenja uglavnom sadrže sljedeći maseni udio pojedine vrste pepela: pepeo s dna peći čini od 60 do 90% ukupne mase pepela, leteći pepeo krupnije frakcije čini 2 – 30%, a finiji leteći pepeo samo 2 – 15% ukupne mase nastalog pepela [5].



Slika 14. Uzorci pepela drvne biomase: a) pepeo s dna peći; b) leteći pepeo krupnije frakcije; c) finiji leteći pepeo [5]

3.1 KEMIJSKI SASTAV PDB-a

Pepeo drvene biomase složena je mješavina anorganskog i organskog sastava koja se sastoji od brojnih spojeva, heterogenog je sastava koji može znatno varirati [5]. Krupne i fine frakcije pepela drvene biomase se sastoje od nepravilnih, sferičnih i međusobno povezanih čestica vrlo složene i nepravilne morfologije.



Slika 15 Čestice PDB-a različite veličine i morfologije: a) pepeo s dna peći; b) leteći pepeo krupnije frakcije; c) finiji leteći pepeo [5]

Osim vrste drva, kako je spomenuto, kemijski sastav PDB-a također ovisi i o dijelovima drva koji izgaraju. Npr. granje i korijenje sadrže više kemijskih elemenata od stabla, a kora i lišće sadrže 5 – 10 puta više kalcija, mangana, aluminija i sumpora. Također, kako lišće drva stari tako udio dušika, fosfora i kalija opada. Osim dijelova drva koji izgaraju, na kemijski sastav još utječe i godišnje doba u kojemu je drvo posječeno. Sve navedeno se svrstava u grupu uzročnika različitog kemijskog sastava PDB-a, odnosno uzrok su velikih neujednačenosti udjela pojedinih oksida u kemijskom sastavu PDB-a.

Ako su uvjeti skladištenja i transporta PDB-a vlažni, može se dogoditi da CaO u PDB-u spontano hidratizira i karbonatizira. Ako PDB sadrži do 50% CaO te se skladišti u vlažnim uvjetima, dolazi do kemijske reakcije kojom nastaje $\text{Ca}(\text{OH})_2$ koji kasnije u kontaktu s CO_2 iz zraka formira CaCO_3 . Rezultati tih kemijskih reakcija su promjene u kemijskim i fizikalnim svojstvima PDB-a, kao npr. očvršćivanje i povećanje mase suhog uzorka PDB-a. Povećanje mase se javlja zbog reakcije CaO i H_2O u kojoj nastaje $\text{Ca}(\text{OH})_2$ te zbog različitih komponenti koje su posljedica hidratacije i hidroksilacije manje stabilnih komponenti također pri kontaktu PDB-a s vlagom ili vodom.

Tijekom hidratacije oksida PDB-a istovremeno dolazi do pojave bubrenja čestica što ukazuje da PDB ima hidrofilna svojstva. Istraživanjima je utvrđeno kako dolazi do povećanja volumena od 12,5 % u odnosu na izvorni volumen, a pretpostavlja se da su za to najodgovorniji minerali poput: kalcijeva silikata, portlandita i kalcita [5].

Određene vrste PDB-a predstavljaju ozbiljnu prijetnju zagađenju okoliša (zraka, vode, biljaka). Jedan od uzroka tome je udio teških metala u PDB-u koji varira ovisno o tome promatra li se pepeo s dna peći ili frakcije letećeg pepela. Tako npr. udio teških metala poput cinka, olova, kadmija raste sa smanjenjem veličina čestica, a njihovo potencijalno izluživanje u slučaju skladištenja predstavlja veliki problem onečišćenja podzemnih i površinskih voda.

Leteći PDB sadrži jako sitne čestice pa je zbog toga opasan za zdravlje ljudi. Prilikom njegova transporta i rukovanja može doći do udisanja tih čestica koje se mogu zadržati duboko u plućnim alveolama što kod

ljudi povećá rizik od pojave raka pluća te ostalih kardiopulmunarnih problema. Zastupljenost kadmija u pojedinim vrstama PDB-a također predstavlja opasnost za zdravlje ljudi jer utječe na gustoću kostiju te se skuplja u bubrezima [5].

Navedene potencijalne opasnosti koje mogu nastati prilikom uporabe PDB-a govore kako ga je potrebno prikladno skladištiti te time i spriječiti navedene utjecaje na okoliš. Osim toga, PDB treba skladištiti na način koji neće narušiti njegova svojstva. Prema tome, način odlaganja ovisi o kemijskom i fizikalnom svojstvu te je prije samog odlaganja i upotrebe PDB-a potrebno napraviti kvantifikaciju i karakterizaciju kemijskog sastava.

3.2 GOSPODARENJE PDB-om

Pod pojmom gospodarenje PDB-om podrazumijeva se njegova potencijalna primjena, odlaganje ili skladištenje. Kako se količina pepela koji se skladišti povećava, tako se povećavaju i troškovi gospodarenja otpadom jer dolazi do smanjenja prostora za odlaganje te je potrebno više rukovati i prevoziti sam PDB. Troškovi upravljanja otpadnim pepelom iz biomase iznose između 200 i 500 eura po toni, a u budućnosti se može očekivati povećanje troškova odlaganja u obliku poreza ili naknade na odlaganje, kao i poteškoće u pronalaženju novih odlagališta te strože EU direktive vezano uz odlaganje [1].

3.2.1 Klasifikacija PDB-a prema katalogu otpada

U Pravilniku o katalogu otpada (NN 90/15) [17] je navedeno kako se PDB svrstava u grupu otpada iz termičkih procesa kao otpad iz termoelektrana i ostalih postrojenja u kojima se odvija sagorijevanje te je svrstan te se može pronaći pod ključnim brojem 10 01. Kao otpad, PDB klasificiramo prema sljedećim ključnim brojevima:

- 10 01 01 „Taložni pepeo, šljaka i prašina iz kotla (osim prašine iz kotla navedene pod 10 01 04*)“; Oznaka zapisa: N
- 10 01 03 „Lebdeći pepeo od izgaranja treseta i neobrađenog drva“; Oznaka zapisa: N
- 10 01 14* „Šljaka s rešetki ložišta, šljaka i prašina iz kotla od suspaljivanja, koja sadrže opasne tvari“; Oznaka zapisa: V42
- 10 01 15 „Pepeo s rešetke ložišta, talog i prašina iz kotla od suspaljivanja, koji nisu navedeni pod 10 01 14*“; Oznaka zapisa: V42
- 10 01 24 „Pijesak nastao pri transportu krutih materijala pomoću tekućine“; Oznaka zapisa: N.

Klasifikacija PDB-a kao otpada u obzir uzima njegov kemijski sastav, tehnologiju izgaranja i vrstu PDB-a. Oznake zapisa Pravilnik definira na sljedeći način [17]:

- N – „zapis neopasnog otpada“ i označava da nije potrebno odrediti opasno svojstvo
- V – „višestruki zapis“ i označava da se radi o otpadu koji u određenim uvjetima može imati opasno svojstvo i za čiju karakterizaciju se mora uzeti u obzir više od jednog ključnog broja, te je potrebno provesti ocjenu o postojanju jednog ili više opasnih svojstava koje može posjedovati takav otpad uzevši u obzir naziv otpada i karakteristična opasna svojstva te vrsta otpada, za koja posjednik otpada mora znati i koja su propisana Popisom otpada, na način propisan posebnim propisom koji uređuje laboratorije za ispitivanje otpada.

Prema Pravilniku o katalogu otpada, oznaka zapisa V42 upućuje na H4, H5, H6, H7, H8, H10, H11, H13, H14 opasna svojstva sukladno Dodatku III. Zakona o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/2013). Redom navedene oznake predstavljaju sljedeća svojstva: nadražujuće, opasno, toksično, kancerogeno, nagrizajuće, reproduktivno toksično, mutageno, senzibilirajuće i ekotoksično [17].

Prema Registru onečišćenja okoliša (ROO), ustanovljeno je da u 2021. godini nisu prijavljeni otpadi pod ključnim brojevima 10 01 14* i 10 01 24. Prema ključnim brojevima kojima se klasificira PDB kao otpad, najveću prijavljenu količinu čini ključni broj 10 01 01 koja je iznosila 7616 t/godišnje, njega slijedi otpad pod ključnim brojem 10 01 03 sa prijavljenih 2090 t/godišnje, a otpad pod ključnim brojem 10 01 15 je iznosio 108 t/godišnje [18].

Navedeni podaci se odnose na prijave u ROO od strane energana, tvrtki koje se bave preradom i obradom drva i drugih tvrtki koje upotrebljavaju drvenu biomasu kao gorivo.

3.2.2 Dostupne količine PDB-a

Količina PDB-a prvenstveno ovisi o drvnj biomasu koja se koristi kao gorivo. Uobičajeno je da 1 tona drvene biomase može proizvesti 5 MWh energije pri čemu nastane 20 – 50kg PDB-a [4]. Mnogi istraživači su se bavili ovom tematikom te objavili podatke o masenom udjelu pepela u drvnj biomasu. U tablici 3 je prikazan jedan od rezultata.

Tablica 3 Maseni udio PDB-a ovisno o vrsti biomase [9]

Vrsta biomase		Udio pepela [maseni %]
Grab	Suha piljevina, sitni drveni ostatak	0,28
Joha	Zračno suha sječka, srednje veliki čip	0,79
	Zračno suha kora, srednje krupne pločice	6,1
	Zračno suha piljevina, fini prah	0,79
Topola	Zračno suha blanjevina, krupni čip	1,51
	Suha sječka, srednje veliki komadi	1,81
	Zračno suha sječka, krupni čip	1,81
Bukva	Suha piljevina od prereza, sitnije pločice	0,80
	Zračno suha kora, sitnije pločice	6,94
Breza	Zračno suha kora, sitnije pločice	4,94
Topola – joha – lipa	Biomasa za kotao, nehomogena	1,85
Hrast	Friška sječka/ suha sječka/ friška piljevina	0,43

Na udio pepela ne utječe samo vrsta drvene biomase nego i uvjeti rasta, način prikupljanja (sadržaj nečistoća) i tehnologija ložišta [4]. Od sveukupnog PDB-a, 60 – 90 % otpada na pepeo s dna peći, na leteći pepeo krupnije frakcije 2 – 20 % a na fini leteći pepeo 2 – 15 % od ukupne mase (tablica 4).

Tablica 4 Prosječna distribucija mase proizvedenog pepela od biomase u postrojenjima s izgaranjem na ložištima s rešetkom – prema vrstama pepela i vrsti biomase

Vrsta pepela	Vrsta biomase		
	Kora (% mase suhe tvari)	Drvena sječka (% mase suhe tvari)	Slama (% mase suhe tvari)
Pepeo s dna peći	65 – 85	60 – 90	80 - 90
Leteći pepeo krupnije frakcije	10 – 25	10 – 30	2 - 5
Leteći pepeo finije frakcije	2 – 10	2 – 10	5 - 15

Prema dostupnim podacima izrađene su procjene o proizvodnji količina PDB-a u zemljama koje u najvećoj mjeri koriste drvenu biomasu [9]. Procjene se odnose na cjelokupni potencijal zemlje, a rezultati su prikazani u tablici 5.

Tablica 5 Procjena proizvedenih količina PDB-a uz pretpostavku korištenja cjelokupnog potencijala drvene biomase u spomenutim zemljama [9]

Zemlja	Pepeo dobiven spaljivanjem drvenog otpada (x 10 ⁵ t/god)	Pepeo dobiven spaljivanjem drveta kao goriva (x 10 ⁵ t/god)
Kina	1,20 - 2,40	9,50 - 19,10
Brazil	1,10 - 2,20	1,40 - 2,70
SAD	1,04 - 2,10	0,99 - 2,00
Rusija	0,63 - 1,30	1,99 - 4,00
Francuska	0,61 - 1,20	0,28 - 0,57

Budući trendovi korištenja biomase za proizvodnju energije nagovještavaju značajno povećanje količine PDB-a, a na razini zemalja članica EU godišnje može nastati i do 15,5 x 10⁶ tona pepela od biomase [5].

Energane u RH u kojima su provedene ankete u sklopu projekta TAREC² navode kako im ukupna količina proizvedenog PDB-a iznosi 15.190 tona godišnje. Iz do sada navedenih podataka mogu se izračunati potrebne godišnje količine drvene biomase u postrojenjima. Prosječan broj radnog vremena iznosi 7580 sati, a prosječna potrošnja biomase je 5 tona na sat. Ako se ta dva broja pomnože, dobit će se prosječna masa drvene biomase koja se troši u jednom postrojenju u godinu dana koja iznosi 37.900 tona što znači da su ukupne potrebe ispitanika 492.700 tona drvene biomase godišnje. Ako se podijeli ukupna količina proizvedenog PDB-a sa ukupnim potrebama, dobit će se podatak da izgaranjem 1 tona drvene biomase nastane 3,1 % PDB-a.

Uzme li se u obzir maksimalni potencijal godišnje potrošnje drvene biomase u RH i ako se zanemari mogući dodatni uvoz biomase, prema realnom scenariju proizvodnje PDB-a (3 %), može se očekivati godišnja proizvodnja od 45.900 t. Uz realni scenarij, procijenjene su godišnje količine PDB-a u optimističnom i pesimističnom scenariju. U optimističnom scenariju pretpostavlja se da de od 1 tona drvene biomase stvara 1 % PDB-a, dok je u pesimističnom scenariju pretpostavljeno da se stvara 5 % PDB-a. Uz takve pretpostavke dobiva se da je u Hrvatskoj moguće očekivati proizvodnju PDB-a u iznosima od 15.300 t/god do 76.500 t/god (tablica 6.) [5].

Tablica 6 Procjena moguće godišnje proizvodnje PDB-a u Hrvatskoj [10]

Procjena godišnje potrošnje drvene biomase	Procijenjena godišnja količina PDB-a		
	Optimistični scenarij 1 % udjela pepela	Realni scenarij 3 % udjela pepela	Pesimistični scenarij 5 % udjela pepela
400.000 t/god	4.000 t/god	12.000 t/god	20.000 t/god
830.000 t/god Ukupni potencijal drvene mase Hrvatskih šuma d.d.	8.300 t/god	24.900 t/god	41.500 t/god
1.530.000 t/god Ukupni potencijal drvene biomase u Hrvatskoj	15.300 t/god	45.900 t/god	76.500 t/god

3.2.3 Oporaba PDB-a

Kemijski sastav PDB-a glavni je čimbenik koji utječe na način gospodarenja i potencijalnu uporabu što znači da je upravo utvrđivanje, kvantifikacija i karakterizacija kemijskog sastava prvi i najvažniji korak u definiranju uvjeta primjene ovog materijala. Dosadašnja istraživanja kao najinteresantnija područja za primjenu PDB-a navode agronomiju i građevinsku industriju [4]. U agronomiji se koristiti za poboljšanje svojstava tla i gnojdbu, dok se u građevinskoj industriji koristi za proizvodnju građevnih, keramičkih i drugih materijala.

Primjena PDB-a u poljoprivredi

U poljoprivredi se preporuča uporaba PDB-a bogatog hranjivim tvarima, a s druge strane siromašnog teškim metalima. Prvi primjeri uporabe u Europi mogu se naći u Austriji, Švedskoj, Finskoj, Danskoj i Njemačkoj[4]. Upotreba PDB-a u poljoprivredi je korisna ali također nailazi na nekoliko problema:

- koncentracije teških metala u letećem PDB-u često znaju biti veće od dopuštenih vrijednosti.
- PDB s dna peći ima mali udio hranjivih tvari.
- pepeli proizvedeni u fluidiziranom sloju zbog silicijevog dioksida koji se nalazi u pijesku, sadrže manje količine hranjivih tvari i teških metala.
- fosfor u PDB-u je teško dostupan biljkama (moguće i do nekoliko desetljeća), jer se nalazi u netopivom obliku

U Austriji je Ministarstvo poljoprivrede i šumarstva izdalo smjernice za primjenu pepela iz kemijski netretiranog goriva iz biomase u poljoprivredi, na pašnjacima i u šumama. Navedenim dokumentima prethodila su opsežna istraživanja i analize, a u njima se mogu naći podaci o vrstama PDB-a koji se smiju koristiti, granične vrijednosti udjela teških metala i količine koje se mogu koristiti u različitim vrstama tla. U tablici 7 prikazane su granične vrijednosti dopuštene koncentracije teških metala i bora (B) izražene u mg po kg PDB-a kako propisuju smjernice nekih europskih zemalja. Vrijednosti u tablicama odstupaju za pojedine metale po smjernicama različitih država (osim Švedske i Litve) što upućuje da nisu samo ulazne karakteristike PDB-a različite po geografskim lokacijama već i tolerancije za krajnju primjenu koje su rezultat provedenih istraživanja na tim područjima.

Tablica 7. Granične koncentracije teških metala i bora (B) za primjenu PDB-a u poljoprivredi i šumarstvu prema smjernicama različitih država u mg/kg [4]

Teški metali	Austrija		Finska	Švedska	Danska	Litva
	A	B				
As	20	20	40	30	-	30
Cd	5	8	25	30	15	30
Cu	200	25	700	400	-	400
Pb	100	200	150	300	120	300
Zn	1200	1500	4500	7000	-	7000
Cr	150	250	3000	100	100	100
Ni	150	200	150	70	30-60	70
V	-	-	-	70	-	70
B	-	-	-	500	-	500
Hg	-	-	1,0	3	0,8	3

U poljoprivredi (za gnojidbu i poboljšanje svojstava tla) dopušteno je isključivo ekološko korištenje PDB-a koji se oslanja na upotrebu PDB-a dobivenog od drva koje nije kemijski tretirano. Prekomjerna upotreba PDB-a u poljoprivredi također nije moguća jer bi se taloženjem velikih količina teških metala koji su sadržani u PDB-u narušio prirodni ciklus minerala. Prirodni ciklus ne bi se trebao narušavati jer tada upotreba PDB-a u poljoprivredi ne bi bila održiva. Također, povećan unos PDB-a u tlo može uzrokovati promjene kemijskog sastava i pH vrijednosti tla.

Primjena PDB-a u građevinskim materijalima

Najzastupljeniji materijal na svijetu kojeg proizvodi čovjek je beton, a glavni sastojak za proizvodnju mu je cement. Ključni ekološki i ekonomski problemi u proizvodnji cementa leže u samoj tehnologiji koja zahtjeva zagrijavanje sirovine na približno 1500 °C pri čemu se troše velike količine energije te se u samom

procesu kalcinacije (dobivanje kalcijevih oksida iz kalcijevog karbonata) oslobađa znatna količina CO₂ [4]. Kako bi se smanjila ta količina CO₂ i kako bi se očuvali prirodni resursi, potrebno je pronaći materijal koji bi u određenoj mjeri uspio zamijeniti cement u betonskoj industriji a da pritom ne naruši svojstva samog betona. Jedan od takvih materijala je pepeo drvene biomase, čija je upotreba u betonskoj industriji motivirana ekološkim i ekonomskim čimbenicima (smanjeni troškovi skladištenja, emisija CO₂ i očuvanje prirodnih resursa)[1].

Cementi dostupni na tržištu danas prosječno sadržavaju 20 % zamjenskih cementnih materijala (fino mljeveni vapnenac, granuliranu zguru visokih peći i leteći pepeo iz termoelektrane na ugljen) što, prema procjenama, rezultira godišnjim smanjenjem emisije CO₂ za oko 400 milijuna tona. I dok leteći pepeo iz energana na ugljen i zgura predstavljaju najviše korištene zamjenske cementne materijale, sve više se istražuju primjene i ostalih otpadnih materijala koji pokazuju hidraulička i pucolanska svojstva, svojstva ključna za formiranje faza koje se zahtijevaju od veziva u betonu.

Treba napomenuti da se pepeo od biomase osim u betonskoj industriji, može koristiti i koristi se za druge namjene u građevinskoj industriji: izradu blokova od silika kserogela kao toplinska izolacija, za sintezu geopolimera, samonivelirajuće mortove, posteljice cesta, kolničke konstrukcije, lagane (ekspandirane) agregate, lagane opeke, blokove, gipskartonske ploče, betonske blokove, ćelijasti beton, opeku, veziva za materijale malih čvrstoća te asfalt i proizvode na bazi bitumena [5]. U tablici 8 navedene su još neke primjene PDB-a u građevinskoj industriji te njegova funkcija u primjeni.

Tablica 8 Funkcija i primjena pepela od biomase u građevinskoj industriji [7]

Primjena	Funkcija
Alternativna veziva kao zamjena za postojeći cement	Komponenta
Proizvodnja klinkera (cementa)	Sirovina
Betonski proizvodi niže kvalitete	(reaktivno) punilo
Građevni materijal za gradnju cesta	Vezivo/sirovina
Opeka na bazi pijeska i vapna	Punilo/vezivo
Infrastrukturni radovi (nasipi, nasipavanje)	Materijal za nasipavanje
Stabilizator tla	Vezivo
Umjetni agregat	Sirovina

Trenutno, bez obzira na široku upotrebu PDB-a u betonskoj industriji, njegova primjena ograničena je postojećim propisima i normama. PDB je materijal varijabilnog sastava kojem nisu dovoljno istražena fizička i kemijska svojstva, kao ni svojstva cementnih kompozita koji ga sadržavaju te su potrebna daljnja istraživanja u tom području dok se ne stvore uvjeti za izradu smjernica i propisa kao što je to učinjeno u nekim europskim zemljama za primjenu PDB-a u poljoprivredi.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada prikazana je statistička obrada podataka cementnih kompozita s pepelom drvene biomase te utjecaj primjene PDB-a na fizikalna i kemijska svojstva morta u svježem i očvrslulom stanju.

Statistička obrada podataka rađena je na podacima dobivenim eksperimentalnim istraživanjem provedenim u okviru projekta „Razvoj inovativnih građevnih proizvoda primjenom biopepela“ KK.01.2.1.01.0049 koji financira Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta temeljem „Ugovora o dodjeli bespovratnih sredstava za projekte koji se financiraju iz europskih strukturnih i investicijskih fondova u financijskom razdoblju 2014. – 2020.

Prije svega, prema [19], korelacija u statistici predstavlja opis ovisnosti između dviju ili više statističkih varijabli, koji često nije potpuno precizan i obuhvaća iznimke, ali daje mogućnost predviđanja vrijednosti jedne varijable na temelju poznavanja druge varijable. U ovom radu se nećemo baviti predviđanjem vrijednosti drugih varijabli već kvantificiranjem ovisnosti između varijabli koja se mjeri određivanjem koeficijenta korelacije. Prilikom određivanja ovisnosti dviju varijabli koristio se Spearmanov koeficijent korelacije koji je detaljnije opisan u poglavlju 4.1.2.

Uzorci cementnog morta na kojima je provedeno ispitivanje proizvedeni su od sljedećih materijala:

- cement CEM 42,5 R
- standardizirani kvarcni pijesak frakcije 0/2 mm
- pitka voda iz gradskog vodovoda, koja zadovoljava zahtjeve propisane normom HRN EN 1008:2002. Prije upotrebe voda je bila skladištena u plastičnim posudama u laboratorijskim uvjetima kako bi se osigurala konstantna temperatura od 20 ± 2 °C.
- leteći pepeo iz biomase prikupljen iz energane u Grubišnom polju.

U tablici 9 je prikazan kemijski sastav cementa i pepela koji su korišteni za proizvodnju morta.

Tablica 9 Kemijski sastav korištenog letećeg pepela iz biomase i cementa

Komponenta	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Gubitak žarenjem 950 °C
CEM I 42,5 R	0,217	0,846	1,25	59,8	2,01	4,94	0,231	3,15	21,88	3,33	3,6
Pepeo drvene biomase	5,28	0,74	7,7	45,18	4,07	4,5	0,24	1,97	22,16	7,7	6

4.1 MJEŠAVINE I METODE

Za potrebe rada, sveukupno je pripravljeno 5 različitih mješavina cementnog morta [20]. Referentna mješavina u kojoj se cement nije zamjenjivao s PDB-om, a čiji je sastav određen u skladu s normom HRN EN 196-1:2016, prema kojoj maseni odnos komponenti CEN standardnog pijeska, cementa i vode iznosi 3:1:0,5, s vodocementnim omjerom 0,5. U preostalim mješavinama, PDB je korišten kao nadomjestak cementa u masi od 10 %, 15 %, 20 %, 30 %, a oznake mješavina su sljedeće:

- CEM I – referentna mješavina
- 10PDB - 10 % cementa je zamijenjeno s letećim PDB-om
- 15PDB - 15 % cementa je zamijenjeno s letećim PDB-om
- 20PDB - 20 % cementa je zamijenjeno s letećim PDB-om
- 30PDB - 30 % cementa je zamijenjeno s letećim PDB-om

Zbog različitih udjela PDB-a i cementa u mješavinama, sve mješavine imaju različiti kemijski sastav, odnosno različiti udio oksida u svom sastavu. Udio pojedinih oksida u određenim mješavinama je prikazan u tablici 10.

Tablica 10 Kemijski sastav pojedinih mješavina

Oznaka mješavine	Kemijski sastav										
	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	LOI 975°C
CEM I	0,217	0,846	1,250	59,800	2,010	4,940	0,231	3,150	21,880	3,330	3,600
10PDB	0,723	0,835	1,895	58,338	2,216	4,896	0,232	3,032	21,908	3,767	3,840
15PDB	0,976	0,830	2,218	57,607	2,319	4,874	0,232	2,973	21,922	3,986	3,960
20PDB	1,230	0,825	2,540	56,876	2,422	4,852	0,233	2,914	21,936	4,204	4,080
30PDB	1,736	0,814	3,185	55,414	2,628	4,808	0,234	2,796	21,964	4,641	4,320

4.1.1 Metode ispitivanja

U tablici 11 prikazan je program ispitivanja miješanih cementa s PDB-om s pripadajućim normama za ispitivanje. Sve metode, osim autogenog skupljanja, provedene su prema pripadajućim normama.

Ispitivanje autogenih deformacija je provedeno na prizmama dimenzija 40 x 40 x 160 mm [21]. Prije same ugradnje morta, u kalupe za ispitivanje autogenog skupljanja ugrađeni su mjerni reperi. U kalupe je prvo ugrađen beton do polovice visine kalupa, zatim je uzorak vibriran na vibrostolu, pa je slijedila ugradnja betona do vrha kalupa te ponovno vibriranje.

Uzorci su nakon toga dobro zabrtvljeni kako bi se eliminirala mogućnost gubitka vlažnosti što je postignuto oblaganjem plastičnom folijom koja se dodatno zabrtvila selotejpom te su uzorci smješteni u plastičnu vrećicu koja se također dobro zabrtvila. Nakon 24 sata uzorci su izvađeni iz kalupa i odmah zamotani u 2 sloja aluminijske folije koja se pokazala vrlo učinkovitom za sprječavanje gubitka vlažnosti [21]. Nakon što su uzorci obloženi aluminijskom folijom napravljeno je početno mjerenje promjene duljine i mase. Uzorci su poslije toga stavljeni u plastičnu vrećicu te čuvani u vlažnoj komori gdje je temperatura bila 20 ± 2 °C i relativna vlažnosti 95 %. Mjerenje promjene duljine i mase se provodilo nakon 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56 te 90 dana. Pripremljena su po 3 uzorka za svaku mješavinu.

Tablica 11 Program ispitivanja [20]

Ispitivanje	Norma
Svojstva u svježem stanju	
Gustoća	HRN EN 1015-6:2000/A1:2008
Temperatura	HRN U.M1.032:1981
Udio pora	HRN EN 1015-7:2000
Konzistencija	HRN EN 1015-3:2000/A1:2005/A2:2008
Mehanička svojstva	
Čvrstoća na savijanje i tlačna čvrstoća	HRN EN 196-1:2016
Deformacije	
Skupljanje uslijed sušenja	HRN EN 12617 – 4:2003
Autogeno skupljanje	-

4.1.2 Statistička analiza rezultata

Koeficijent korelacije može se definirati kao pokazatelj koliko su promjene vrijednosti jedne statističke varijable povezane s promjenama vrijednosti druge statističke varijable. Postoji više koeficijenata korelacije koji se koriste u različitim slučajevima, a najčešće se koristi Pearsonov i Spearmanov koeficijent korelacije. Radi lakšeg razumijevanja i sličnosti koeficijenata korelacije, objašnjeni su i Pearsonov i Spearmanov koeficijent korelacije [22].

Pearsonov koeficijent korelacije koristi se kada želimo ispisati linearnu povezanost među varijablama, a definira se kao:

$$r_{XY} = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX} \cdot S_{YY}}}$$

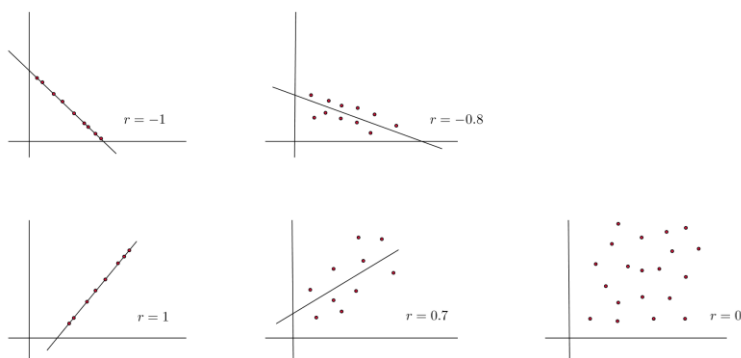
pri čemu je:

- $\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ - prosječna vrijednost varijable X
- $S_{XX} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2$ - suma kvadrata odstupanja vrijednosti varijable X od njezine prosječne vrijednosti
- $\bar{y}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ - prosječna vrijednost varijable Y
- $S_{YY} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_n)^2$ - suma kvadrata odstupanja vrijednosti varijable Y od njezine prosječne vrijednosti
- $S_{XY} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n) \cdot (y_i - \bar{y}_n)$ - suma umnožaka odstupanja vrijednosti varijabli X i Y od njihovih presjeka
- x_i i y_i - opažene vrijednosti (podaci dobiveni mjerenjima)
- n – veličina uzorka, odnosno broj opaženih vrijednosti jedne i druge varijable.

Vrijednost Pearsonovog koeficijenta korelacije kreće se u rasponu od -1 do 1. Odnosno vrijedi sljedeće:

$$-1 \leq r_{xy} \leq 1$$

- Ako je $r_{xy} < 0$, opažene vrijednosti x_1, \dots, x_n i y_1, \dots, y_n su **negativno korelirane**. Odnosno, opažene vrijednosti imaju sklonost odstupanja od svojih aritmetičkih sredina u različitu stranu (ako jedna vrijednost raste, druga pada).
- Ako je $r_{xy} > 0$, opažene vrijednosti x_1, \dots, x_n i y_1, \dots, y_n su **pozitivno korelirane**. Odnosno, opažene vrijednosti imaju sklonost odstupanja od svojih aritmetičkih sredina u istu stranu (ako jedna vrijednost raste, druga također raste).
- Ako je $r_{xy} = 0$, opažene vrijednosti x_1, \dots, x_n i y_1, \dots, y_n **nisu korelirane**.



Slika 16 Dijagram raspršenja podataka za različite vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije [22]

Prema slici 16 vidi se da je za Pearsonov koeficijent korelacije koji je po apsolutnoj vrijednosti bliže broju jedan, stupanj linearne zavisnosti između opaženih vrijednosti x_1, \dots, x_n i y_1, \dots, y_n pa samim time i varijabli X i Y veći.

Spearmanov koeficijent korelacije se koristi kada nije moguće primijeniti Pearsonov koeficijent korelacije. Uglavnom je to kada među varijablama ne postoji linearna ovisnost te kada se raspolože uzorkom relativno male veličine. Za razliku od Pearsonovog koeficijenta korelacije koji mjeri stupanj linearne povezanosti među varijablama, Spearmanov koeficijent korelacije mjeri stupanj monotone povezanosti među sortiranim varijablama.

Spearmanov koeficijent korelacije definiramo kao Pearsonov koeficijent korelacije, ali nad sortiranim podacima (rangovima). To znači da je opažene vrijednosti varijabli (podatke) potrebno rangirati i na takav način svesti na zajedničku mjeru. Opažene vrijednosti rangiraju se na način da se najvećoj opaženoj vrijednosti u određenom skupu podataka doda vrijednost ranga n (gdje je n broj podataka), a najmanjoj opaženoj vrijednosti se doda vrijednost ranga 1. Formula prema kojoj se računa Spearmanov koeficijent korelacije je:

$$r_s = 1 - 6 \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

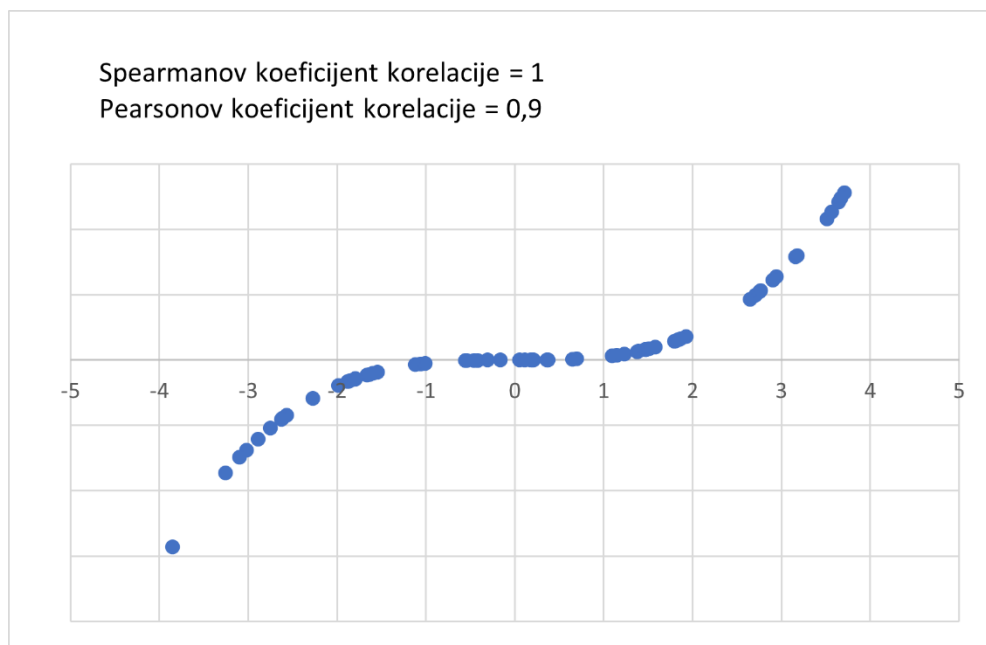
pri čemu je:

- $[d_i = \text{rang } x_i - \text{rang } y_i]$ – razlika između vrijednosti rangova dvije promatrane varijable
- n – veličina uzorka, tj. broj podataka

Pravila prilikom tumačenja vrijednosti koeficijenta su ista kao i kod Pearsonovog koeficijenta, stoga je dana tablica 12 u kojoj su dani opisi korelacije s obzirom na vrijednost koeficijenta. Na slici 17 prikazan je dijagram raspršenja podataka Spearmanovog koeficijenta korelacije.

Tablica 12 Tumačenje vrijednosti Spearmanovog koeficijenta korelacije

Vrijednost koeficijenta korelacije	Opis korelacije
$r_s = -1$	Potpuna i negativna
$-1 < r_s \leq -0,90$	Jaka i negativna
$-0,90 < r_s \leq -0,70$	Visoka i negativna
$-0,70 < r_s \leq -0,50$	Umjerena i negativna
$-0,50 < r_s < 0$	Slaba i negativna
0	Nema korelacije
$0 < r_s < 0,50$	Slaba i pozitivna
$0,50 \leq r_s < 0,70$	Umjerena i pozitivna
$0,70 \leq r_s < 0,90$	Visoka i pozitivna
$0,90 \leq r_s < 1$	Jaka i pozitivna
$r_s = 1$	Potpuna i pozitivna



Slika 17 Dijagram raspršenja podataka za jednu vrijednost Spearmanovog koeficijenta korelacije

5. REZULTATI I STATISTIČKA ANALIZA

Prema programu ispitivanja danom u tablici 11, dobiveni su rezultati koji su se koristili prilikom statističke analize, odnosno prilikom izračunavanja Spearmanovog koeficijenta korelacije. Koristio se Spearmanov koeficijent korelacije umjesto Pearsonovog jer je uzorak mali (veličine 5). Tablica 13 prikazuje vrijednosti svojstava u svježem stanju različitih mješavina cementnog morta.

Tablica 13 Rezultati ispitivanja cementnog morta u svježem stanju

Oznaka mješavine	Gustoća [g/cm ³]	Temperatura [°C]	Sadržaj pora [%]	Konzistencija [mm]
CEM I	2,18	21,5	5,1	166,5
10PDB	2,2	21,5	4,9	163,5
15PDB	2,18	20,7	5,0	147,5
20PDB	2,22	22,0	5,0	134,0
30PDB	2,16	21,2	5,2	115,0

Tablica 14 prikazuje vrijednosti vlačnih čvrstoća savijanjem različitih mješavina u ovisnosti o vremenu.

Tablica 14 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cementnog morta

Oznaka mješavine	2 dana [MPa]	3 dana [MPa]	7 dana [MPa]	28 dana [MPa]	90 dana [MPa]
CEM I	5,19	5,39	6,31	6,97	7,31
10PDB	4,93	5,00	5,65	5,84	5,96
15PDB	4,19	4,72	4,78	6,56	6,78
20PDB	4,43	4,99	5,60	5,30	6,23
30PDB	0,00	3,97	3,99	5,42	6,30

Tablica 15 prikazuje vrijednosti tlačnih čvrstoća različitih mješavina u ovisnosti o vremenu.

Tablica 15 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće cementnog morta

Oznaka mješavine	2 dana [MPa]	3 dana [MPa]	7 dana [MPa]	28 dana [MPa]	90 dana [MPa]
CEM I	29,48	36,95	48,47	56,08	62,29
10PDB	29,16	34,02	41,78	52,32	57,24
15PDB	24,36	31,19	40,33	46,94	55,25
20PDB	27,01	31,75	39,91	45,17	52,10
30PDB	19,22	23,99	45,17	35,97	47,35

Tablica 16 prikazuje vrijednosti skupljanja uslijed sušenja različitih mješavina u ovisnosti o vremenu.

Tablica 16 Rezultati ispitivanja skupljanja uslijed sušenja cementnog morta

Oznaka mješavine	2 dana [mm/m]	3 dana [mm/m]	7 dana [mm/m]	14 dana [mm/m]	28 dana [mm/m]	42 dana [mm/m]	56 dana [mm/m]	90 dana [mm/m]
CEM I	0,04732	0,14299	0,26489	0,57714	0,73810	0,84969	1,09018	0,95168
10PDB	0,07523	0,15016	0,30888	0,49775	0,42982	0,44475	0,44538	0,59205
15PDB	0,05425	0,12520	0,38650	0,48859	0,45807	0,46931	0,47412	0,56624
20PDB	0,05180	0,14442	0,33761	0,53277	0,46216	0,46918	0,46981	0,63468
30PDB	0,04395	0,10622	0,38329	0,46942	0,42032	0,42982	0,42919	0,51938

Tablica 17 prikazuje vrijednosti autogenih deformacija različitih mješavina u ovisnosti o vremenu.

Tablica 17 Rezultati ispitivanja autogenih deformacija cementnog morta

Oznaka mješavine	2 dana [mm/m]	3 dana [mm/m]	7 dana [mm/m]	14 dana [mm/m]	28 dana [mm/m]	42 dana [mm/m]	56 dana [mm/m]	90 dana [mm/m]
CEM I	0,00000	-0,01659	-0,06435	-0,25736	-0,29049	-0,29879	-0,33686	-0,35460
10PDB	-0,00477	-0,01657	-0,02711	-0,07276	0,04534	0,02108	0,02715	0,00313
15PDB	0,01041	0,01108	0,00141	0,03812	0,03590	0,01611	0,03475	-0,02190
20PDB	0,03280	0,03152	-0,03180	-0,06810	0,04334	0,02297	0,02933	-0,02480
30PDB	0,12472	0,12524	0,06900	0,04057	0,15910	0,13635	0,15895	0,13306

5.1. Ovisnost ispitanih svojstava o udjelu PDB-a

Izračunom Spearmanovog koeficijenta korelacije između prve varijable (udio PDB-a u mješavini) te druge varijable (pojedinih svojstava morta u svježem stanju) iskazana je jačina korelacije iz koje se može zaključiti ovisnost svojstava u svježem stanju o udjelu PDB-a u mješavini cementnog morta. Rezultati su prikazani u tablicama 18 do 22.

5.1.1. Utjecaj PDB-a na svojstva cementnog morta u svježem stanju

Rezultati Spearmanovog koeficijenta korelacije između udjela PDB-a i svojstava u svježem stanju dani su u tablici 18. Iz tablice je vidljivo kako promjena udjela PDB-a značajno ne utječe na svojstva morta u svježem stanju, osim u slučaju konzistencije s kojom pokazuje potpunu i negativnu korelaciju (to nam potvrđuje i p-vrijednost koja je manja od 0,05).

Potpuna i negativna korelacija ukazuje da će povećanje udjela PDB-a dovesti do smanjene konzistencije. Ostala svojstva (gustoća, temperatura i sadržaj pora) ne ovise i nemaju skoro pa nikakvu povezanost s promjenom udjela PDB-a.

Tablica 18 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i svojstava cementnog morta u svježem stanju

	Svojstva u svježem stanju			
	Gustoća, g/cm ³	Temperatura, °C	Sadržaj pora, %	Konzistencija, mm
Spearmanov koeficijent korelacije	-0,205	-0,154	0,359	-1,000
p-vrijednost	0,752	0,881	0,514	0,009

5.1.2. Utjecaj PDB-a na vlačnu čvrstoću cementnog morta

Rezultati Spearmanovog koeficijenta korelacije između udjela PDB-a i vlačne čvrstoće dani su u tablici 19. Iz tablice je vidljivo kako promjena udjela PDB-a ima značajan utjecaj na vlačnu čvrstoću.

Promjena udjela PDB-a pokazuje s vlačnom čvrstoćom cementnog morta do starosti od 28 dana, negativnu te jaku do visoku korelaciju. Iz toga se može zaključiti da će vrijednost vlačne čvrstoće s povećanjem udjela PDB-a biti manja.

Tablica 19 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i vlačne čvrstoće cementnog morta određene starosti

	Vlačna čvrstoća savijanjem, MPa				
	2 dana	3 dana	7 dana	28 dana	90 dana
Spearmanov koeficijent korelacije	-0,900	-0,900	-0,900	-0,800	-0,300
p-vrijednost	0,037	0,037	0,037	0,104	0,62

5.1.3. Utjecaj PDB-a na tlačnu čvrstoću cementnog morta

Rezultati Spearmanovog koeficijenta korelacije između udjela PDB-a i tlačne čvrstoće dani su u tablici 20. Iz tablice je vidljivo kako promjena udjela PDB-a ima značajan utjecaj na tlačnu čvrstoću cementnog morta.

Promjena udjela PDB-a pokazuje negativnu te visoku do potpunu korelaciju s tlačnom čvrstoćom morta starosti 2, 3, 28, 90 dana (to potvrđuju i p-vrijednosti manje od 0,05). Može se zaključiti kako tlačna čvrstoća u potpunosti ovisi o udjelu PDB-a te joj vrijednost opada s porastom njegova udjela.

Tablica 20 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i tlačne čvrstoće cementnog morta određene starosti

	Tlačna čvrstoća, MPa				
	2 dana	3 dana	7 dana	28 dana	90 dana
Spearmanov koeficijent korelacije	-0,900	-0,900	-0,400	-1,000	-1,000
p-vrijednost	0,055	0,011	0,549	0,003	0,000

5.1.4. Utjecaj PDB-a na skupljanje uslijed sušenja cementnog morta

Rezultati Spearmanovog koeficijenta korelacije između udjela PDB-a i skupljanja uslijed sušenja dani su u tablici 21. Iz tablice je vidljivo kako promjena udjela PDB-a ima utjecaj na skupljanje uslijed sušenja cementnog morta.

Promjena udjela PDB-a pokazuje negativnu te umjerenu do visoku korelaciju s izmjerenim vrijednostima skupljanja uslijed sušenja cementnog morta starosti 3, 14, 28, 42, 56, 90 dana. Može se zaključiti kako povećanje udjela PDB-a pozitivno utječe na skupljanja uslijed sušenja cementnog morta, odnosno vrijednosti skupljanja uslijed sušenja će biti manje.

Tablica 21 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i skupljanja uslijed sušenja cementnog morta određene starosti

	Skupljanje uslijed sušenja, mm/m							
	2 dana	3 dana	7 dana	14 dana	28 dana	42 dana	56 dana	90 dana
Spearmanov koeficijent korelacije	-0,400	-0,500	0,700	-0,700	-0,600	-0,700	-0,700	-0,700
p-vrijednost	0,616	0,170	0,079	0,138	0,126	0,123	0,129	0,093

5.1.5. Utjecaj PDB-a na autogene deformacije

Rezultati Spearmanovog koeficijenta korelacije između udjela PDB-a i autogenih deformacija dani su u tablici 22. Iz tablice je vidljivo kako PDB ima značajan utjecaj na autogene deformacije cementnog morta.

Promjena udjela PDB-a pokazuje pozitivnu te umjerenu do jaku korelaciju s izmjerenim vrijednostima autogenih deformacija cementnog morta svakog dana mjerenja (to potvrđuju i p-vrijednosti manje od 0,05). Autogene deformacije obuhvaćaju skupljanje i bubrenje, stoga pozitivni koeficijenti korelacije govore kako će s povećanjem udjela PDB-a doći do smanjenja autogenih skupljanja, odnosno povećanja autogenog bubrenja cementnog morta.

Tablica 22 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i autogenih deformacija cementnog morta određene starosti

	Autogene deformacije, mm/m							
	2 dana	3 dana	7 dana	14 dana	28 dana	42 dana	56 dana	90 dana
Spearmanov koeficijent korelacije	0,900	1,000	0,700	0,900	0,700	0,900	0,900	0,600
p-vrijednost	0,061	0,035	0,049	0,083	0,044	0,041	0,043	0,044

5.2. Utjecaj svojstava u svježem stanju na mehanička svojstva i deformacije

Izračunom Spearmanovog koeficijenta korelacije između prve varijable (pojedino svojstvo u svježem stanju) te druge varijable (pojedinih mehaničkih svojstava ili deformacija), iskazana je jačina korelacije iz koje se može zaključiti ovisnost pojedinih mehaničkih svojstava ili deformacija o pojedinom svojstvu cementnog morta u svježem stanju. Rezultati su prikazani u tablicama 23 do 26.

5.2.1. Utjecaj svojstava u svježem stanju na vlačnu čvrstoću cementnog morta

Gustoća

Koeficijenti korelacije gustoće cementnog morta u svježem stanju i vlačne čvrstoće su relativno mali. Takvi koeficijenti korelacije upućuju na to kako kod analiziranih rezultata gustoća morta ne utječe na promjenu vlačne čvrstoće.

Temperatura

Temperatura cementnog morta u svježem stanju s vlačnom čvrstoćom pokazuje pozitivnu i umjerenu korelaciju s rezultatima koji su mjereni pri starosti cementnog morta 2, 3, i 7 dana, dok pri starosti cementnog morta 28 i 90 dana, korelacija je negativna i slaba što govori kako kod analiziranih rezultata temperatura nema značajan utjecaj na vlačnu čvrstoću.

Sadržaj pora

Sadržaj pora cementnog morta u svježem stanju s vlačnom čvrstoćom pokazuje slabu korelaciju te je utjecaj pora neznatan.

Konzistencija

Konzistencija cementnog morta u svježem stanju s vlačnom čvrstoćom pokazuje pozitivnu i jaku korelaciju s rezultatima koji su mjereni pri starosti cementnog morta 2, 3, 7 i 28 dana, dok pri starosti cementnog morta 90 dana, korelacija je slaba. Takvi rezultati govore kako kod analiziranih rezultata u ranijim danima postoji ovisnost vlačne čvrstoće i konzistencije, dok pri starenju ta ovisnost opada te je neznatna pri starosti cementnog morta od 90 dana.

Tablica 23 Spearmanovi koeficijenti varijabli svojstava u svježem stanju i vlačne čvrstoće savijanjem cementnog morta određene starosti

			Vlačna čvrstoća savijanjem, MPa				
			2 dana	3 dana	7 dana	28 dana	90 dana
Svojstva u svježem stanju	Gustoća, g/cm ³	Spearmanov koeficijent korelacije	0,462	0,462	0,462	-0,359	-0,564
		p-vrijednost	0,238	0,313	0,316	0,615	0,534
	Temperatura, °C	Spearmanov koeficijent korelacije	0,564	0,564	0,564	-0,410	-0,410
		p-vrijednost	0,656	0,489	0,337	0,454	0,642
	Sadržaj pora, %	Spearmanov koeficijent korelacije	-0,359	-0,359	-0,359	0,051	0,616
		p-vrijednost	0,149	0,349	0,432	0,975	0,531
	Konzistencija, mm	Spearmanov koeficijent korelacije	0,900	0,900	0,900	0,800	0,300
		p-vrijednost	0,055	0,061	0,089	0,175	0,535

5.2.2. Utjecaj svojstava u svježem stanju na tlačnu čvrstoću cementnog morta

Gustoća

Gustoća cementnog morta u svježem stanju s vlačnom čvrstoćom pokazuje izrazito slabu korelaciju s rezultatima koji su mjereni pri starosti cementnog morta 2, 3, 28 i 90 dana, dok pri starosti cementnog morta 7 dana, koeficijent korelacije je umjeren i negativan. Takvi rezultati upućuju na to kako kod analiziranih rezultata tlačna čvrstoća ne ovisi o gustoći cementnog morta u svježem stanju.

Temperatura

Temperatura cementnog morta u svježem stanju s tlačnom čvrstoćom pokazuje pozitivnu i umjerenu korelaciju s rezultatima koji su mjereni pri starosti cementnog morta 2, i 3 dana, dok pri starosti cementnog morta od 7, 28 i 90 dana, koeficijent korelacije je izrazito slab što govori kako kod analiziranih rezultata temperatura cementnog morta u svježem stanju nije imala značajan utjecaj na tlačnu čvrstoću.

Sadržaj pora

Sadržaj pora cementnog morta u svježem stanju s tlačnom čvrstoćom pokazuje slabu korelaciju pri starosti cementnog morta 2, 3, 7, 28 dana, ali s rezultatima mjerenja pri starosti od 90 dana, sadržaj pora daje koeficijent korelacije pozitivan i umjeren. Takvi koeficijenti upućuju na to kako kod analiziranih rezultata sadržaj pora cementnog morta u svježem stanju utječe na tlačnu čvrstoću tek u kasnim fazama. Sadržaj pora inače ima veliki utjecaj na tlačnu čvrstoću, međutim kod analiziranih rezultata PDB nije utjecao na promjenu udjela pora, pa stoga nije vidljiv ni utjecaj na tlačnu čvrstoću.

Konzistencija

Konzistencija cementnog morta u svježem stanju s tlačnom čvrstoćom pokazuje pozitivnu i izrazito jaku korelaciju. Korelacija između te dvije varijable je jaka u prvim danima starosti dok rezultati upućuju na to da je pri starosti cementnog morta od 28 i 90 dana, korelacija potpuna (to potvrđuju i p-vrijednosti koje su manje od 0,05).

Tablica 24 Spearmanovi koeficijenti varijabli svojstava u svježem stanju i tlačne čvrstoće cementnog morta određene starosti

			Tlačna čvrstoća, MPa				
			2 dana	3 dana	7 dana	28 dana	90 dana
Svojstva u svježem stanju	Gustoća, g/cm ³	Spearmanov koeficijent korelacije	0,462	0,462	-0,667	0,205	0,205
		p-vrijednost	0,249	0,421	0,291	0,569	0,781
	Temperatura, °C	Spearmanov koeficijent korelacije	0,564	0,564	-0,205	0,154	0,154
		p-vrijednost	0,429	0,634	0,996	0,773	0,934
	Sadržaj pora, %	Spearmanov koeficijent korelacije	-0,359	-0,205	-0,359	0,051	0,616
		p-vrijednost	0,216	0,349	0,243	0,972	0,426
	Konzistencija, mm	Spearmanov koeficijent korelacije	0,900	0,900	0,400	1,000	1,000
		p-vrijednost	0,044	0,019	0,768	0,003	0,009

5.2.3. Utjecaj svojstava u svježem stanju na skupljanje uslijed sušenja

Gustoća

Gustoća cementnog morta u svježem stanju sa skupljanjem uslijed sušenja pokazuje uglavnom umjerenu i pozitivnu korelaciju. Prema rezultatima dobivenim u 56 i 90 danu starosti cementnog morta, može se

zaključiti kako gustoća utječe na skupljanje uslijed sušenja i to na način da ako je gustoća mješavine veća, skupljanje uslijed sušenja će također biti veće i obratno.

Temperatura

Temperatura cementnog morta u svježem stanju sa skupljanjem uslijed sušenja pokazuje pozitivnu i visoku korelaciju s rezultatima koji su mjereni pri starosti cementnog morta 3, 14 i 90 dana. Zbog velike razlike u koeficijentima korelacije i rasapa koeficijenata, ovisnost skupljanja uslijed sušenja o temperaturi cementnog morta u svježem stanju nije moguće definirati.

Sadržaj pora

Sadržaj pora cementnog morta u svježem stanju sa skupljanjem uslijed sušenja u ranijim fazama pokazuje jaču korelaciju koja sa starenjem cementnog morta opada te u konačnici gotovo da nema nikakav utjecaj. Pri starosti cementnog morta od 2 i 3 dana, korelacija je negativna te jaka i visoka, a to govori kako će skupljanje cementnog morta u ranijim fazama biti veće ako je udio pora u svježem stanju veći.

Konzistencija

Konzistencija cementnog morta u svježem stanju sa skupljanjem uslijed sušenja pokazuje pozitivnu i visoku korelaciju koja je konstantna. Prema rezultatima danim u tablici 25, može se zaključiti da što je konzistencija veća, bit će veće i skupljanje uslijed sušenja i obratno.

Tablica 25 Spearmanovi koeficijenti varijabli svojstava u svježem stanju i skupljanja uslijed sušenja cementnog morta određene starosti

			Skupljanje uslijed sušenja, mm/m							
			2 dana	3 dana	7 dana	14 dana	28 dana	42 dana	56 dana	90 dana
Svojstva u svježem stanju	Gustoća, g/cm ³	Spearmanov koeficijent korelacije	0,616	0,872	-0,308	0,564	0,410	0,154	0,564	0,564
		p-vrijednost	0,432	0,110	0,617	0,565	0,855	0,825	0,941	0,941
	Temperatura, °C	Spearmanov koeficijent korelacije	0,051	0,718	-0,667	0,718	0,462	0,051	0,051	0,718
		p-vrijednost	0,890	0,289	0,340	0,363	0,803	0,814	0,823	0,617
	Sadržaj pora, %	Spearmanov koeficijent korelacije	-0,975	-0,821	0,564	-0,205	-0,051	-0,051	-0,051	-0,205
		p-vrijednost	0,050	0,137	0,235	0,947	0,698	0,690	0,671	0,850
	Konzistencija, mm	Spearmanov koeficijent korelacije	0,400	0,500	-0,700	0,700	0,600	0,700	0,700	0,700
		p-vrijednost	0,339	0,127	0,137	0,301	0,314	0,307	0,313	0,255

5.2.4. Utjecaj svojstava u svježem stanju na autogene deformacije

Gustoća

Gustoća cementnog morta u svježem stanju s autogenim deformacijama pokazuje uglavnom slabu i negativnu korelaciju te ovisnost autogenih deformacija o gustoći nije moguće definirati.

Temperatura

Temperatura cementnog morta u svježem stanju s autogenim deformacijama pokazuje negativnu te umjerenu i visoku korelaciju s rezultatima koji su mjereni pri starosti cementnog morta 7, 14 i 56 dana. U preostalim starostima koeficijenti korelacije su slabi te ne pokazuju ovisnost autogenih deformacija o temperaturu.

Sadržaj pora

Sadržaj pora cementnog morta u svježem stanju s autogenim deformacijama ne pokazuje značajnu korelaciju osim u prvim danima starosti cementnog morta. Iz rezultata je vidljivo kako će povećanjem udjela pora u svježem stanju cementnog morta doći do pojave autogenog bubrenja ili do smanjenja autogenog skupljanja i obratno.

Konzistencija

Konzistencija cementnog morta u svježem stanju s autogenim deformacijama pokazuje negativnu i visoku korelaciju (to potvrđuju i p-vrijednosti manje od 0,05). Takvi rezultati upućuju da sa smanjenjem konzistencije dolazi do pojave autogenog bubrenja ili do smanjenja autogenog skupljanja i obratno.

Tablica 26 Spearmanovi koeficijenti varijabli svojstava u svježem stanju i autogenih deformacija cementnog morta određene starosti

			Autogene deformacije, mm/m							
			2 dana	3 dana	7 dana	14 dana	28 dana	42 dana	56 dana	90 dana
Svojstva u svježem stanju	Gustoća, g/cm ³	Spearmanov koeficijent korelacije	-0,359	-0,205	-0,564	-0,462	-0,154	-0,051	-0,462	-0,410
		p-vrijednost	0,359	0,395	0,280	0,722	0,960	0,951	0,943	0,887
	Temperatura, °C	Spearmanov koeficijent korelacije	-0,154	-0,154	-0,718	-0,564	-0,051	0,103	-0,564	-0,462
		p-vrijednost	0,878	0,835	0,435	0,393	0,782	0,778	0,747	0,755
	Sadržaj pora, %	Spearmanov koeficijent korelacije	0,667	0,359	0,205	0,359	0,051	0,205	0,359	0,051
		p-vrijednost	0,124	0,156	0,356	0,944	0,975	0,989	0,983	0,978
	Konzistencija, mm	Spearmanov koeficijent korelacije	-0,900	-1,000	-0,700	-0,900	-0,700	-0,900	-0,900	-0,600
		p-vrijednost	0,027	0,012	0,079	0,198	0,163	0,156	0,160	0,163

5.3. Povezanost mehaničkih svojstava s deformacijama

Izračunom Spearmanovog koeficijenta korelacije između prve varijable (pojedino mehaničko svojstvo cementnog morta) te druge varijable (pojedine deformacije cementnog morta), iskazana je jačina korelacije iz koje se može zaključiti povezanost različitih mehaničkih svojstava s deformacijama.

5.3.1 Povezanost vlačne čvrstoće i skupljanja uslijed sušenja

Rezultati Spearmanovog koeficijenta korelacije dani su u tablici 27 iz koje je vidljiv rasap rezultata korelacije što ukazuje na nepovezanost ove dvije varijable.

Tablica 27 Spearmanovi koeficijenti varijabli vlačne čvrstoće savijanjem i skupljanje uslijed sušenja cementnog morta određene starosti

			Skupljanje uslijed sušenja, mm/m				
			2 dana	3 dana	7 dana	28 dana	90 dana
Vlačna čvrstoća savijanjem, MPa	2 dana	Spearmanov koeficijent korelacije	0,3				
		p-vrijednost	0,396258				
	3 dana	Spearmanov koeficijent korelacije		0,7			
		p-vrijednost		0,037689			
	7 dana	Spearmanov koeficijent korelacije			-0,9		
		p-vrijednost			0,028586		
	28 dana	Spearmanov koeficijent korelacije				0,4	
		p-vrijednost				0,142059	
	90 dana	Spearmanov koeficijent korelacije					0,2
		p-vrijednost					0,129205

5.3.2. Povezanost vlačne čvrstoće i autogenih deformacija

Rezultati Spearmanovog koeficijenta korelacije dani su u tablici 28 iz koje je vidljiva povezanost ove dvije varijable. Koeficijenti su negativni u svim danima starosti, dok su u ranijim fazama koeficijenti jaki te sa starošću cementnog morta opadaju. Takvi rezultati ukazuju da će sa smanjenjem vlačne čvrstoće biti prisutno i smanjenje autogenih skupljanja, odnosno povećanje autogenog bubrenja.

Tablica 28 Spearmanovi koeficijenti varijabli vlačne čvrstoće savijanjem i autogene deformacije cementnog morta određene starosti

			Autogene deformacije, mm/m				
			2 dana	3 dana	7 dana	28 dana	90 dana
Vlačna čvrstoća savijanjem, MPa	2 dana	Spearmanov koeficijent korelacije	-0,8				
		p-vrijednost	0,003849				
	3 dana	Spearmanov koeficijent korelacije		-0,9			
		p-vrijednost		0,027444			
	7 dana	Spearmanov koeficijent korelacije			-0,9		
		p-vrijednost			0,002749		
	28 dana	Spearmanov koeficijent korelacije				-0,7	
		p-vrijednost				0,107245	
	90 dana	Spearmanov koeficijent korelacije					-0,5
		p-vrijednost					0,099223

5.3.3. Povezanost tlačne čvrstoće i skupljanja uslijed sušenja

Rezultati Spearmanovog koeficijenta korelacije dani su u tablici 29 iz koje je vidljiva umjerena povezanost tlačne čvrstoće cementnog morta sa skupljanjem uslijed sušenja uzorka određene starosti. Također koeficijenti korelacije su pozitivni što ukazuje na to da su ove dvije varijable povezane na način da će sa smanjenjem tlačne čvrstoće skupljanje uslijed sušenja biti manje i obratno.

Tablica 29 Spearmanovi koeficijenti varijabli tlačne čvrstoće i skupljanje uslijed sušenja cementnog morta određene starosti

			Skupljanje uslijed sušenja, mm/m				
			2 dana	3 dana	7 dana	28 dana	90 dana
Tlačna čvrstoća, MPa	2 dana	Spearmanov koeficijent korelacije	0,3				
		p-vrijednost	0,359119				
	3 dana	Spearmanov koeficijent korelacije		0,7			
		p-vrijednost		0,051565			
	7 dana	Spearmanov koeficijent korelacije			-0,5		
		p-vrijednost			0,361988		
	28 dana	Spearmanov koeficijent korelacije				0,6	
		p-vrijednost				0,217027	
	90 dana	Spearmanov koeficijent korelacije					0,7
		p-vrijednost					0,101367

5.3.4. Povezanost tlačne čvrstoće i autogenih deformacija

Rezultati Spearmanovog koeficijenta korelacije dani su u tablici 30 iz koje je vidljiva povezanost ove dvije varijable. Koeficijenti su negativni u svim danima starosti uzorka. Također koeficijenti korelacije su visoki u svim danima starosti uzorka osim u 7 danu gdje je korelacija slaba. U konačnici može se zaključiti kako će sa smanjenjem tlačne čvrstoće biti prisutno i smanjenje autogenih skupljanja, odnosno povećanje autogenog bubrenja.

Tablica 30 Spearmanovi koeficijenti varijabli tlačne čvrstoće i skupljanje uslijed sušenja cementnog morta određene starosti

		Autogene deformacije, mm/m					
		2 dana	3 dana	7 dana	28 dana	90 dana	
Tlačna čvrstoća, MPa	2 dana	Spearmanov koeficijent korelacije	-0,8				
		p-vrijednost	0,034521				
	3 dana	Spearmanov koeficijent korelacije		-0,9			
		p-vrijednost		0,010524			
	7 dana	Spearmanov koeficijent korelacije			-0,1		
		p-vrijednost			0,881975		
	28 dana	Spearmanov koeficijent korelacije				-0,7	
		p-vrijednost				0,093863	
	90 dana	Spearmanov koeficijent korelacije					-0,6
		p-vrijednost					0,04658

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je kvantificirati utjecaj primjene PDB-a na pojedina svojstva cementnog morta u svježem i očvrslulom stanju. Svako kemijsko i fizikalno svojstvo koje bi moglo utjecati na svojstvo cementnog morta analizirano je pojedinačno.

Na osnovi provedene statističke analize zaključeno je sljedeće:

- Od svojstava u svježem stanju, promjena udjela PDB-a korelira samo s konzistencijom.
- Povećanje udjela PDB-a u mješavini utječe na smanjenje tlačne i vlačne čvrstoće
- Povećanje udjela PDB-a u mješavini smanjuje skupljanje uslijed sušenja i autogeno skupljanje cementnog morta.
- Od svojstava u svježem stanju ispitanih mješavina, konzistencija znatno utječe na mehanička svojstva i na deformacije.
- Povezanost između mehaničkih svojstava i deformacija je takva da ako vrijednosti mehaničkih svojstava (vlačna i tlačna čvrstoća) opadaju, deformacije izazvane skupljanjem (uslijed sušenja i autogeno) su manje.

7. LITERATURA

- [1] Carević, I., Baričević, A., Štirmer, N., Šantek Bajto, J.: Correlation between physical and chemical properties of wood biomass ash and cement composites performances, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2020.
- [2] Europski parlament i vijeće Europske unije, Direktiva 2009/28/EZ Europskoga parlamenta i Vijeća od 23. travnja 2009. o poticanju uporabe energije iz obnovljivih izvora te o izmjenama i dopunama i budućem ukidanju Direktiva 2001/77/EZ i 2003/30/EZ, 2009.
- [3] Europski propis o klimi, dostupno na: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-27-2021-INIT/hr/pdf>
- [4] Štirmer, N., Carević, I., Kostanić Jurić, K., Milovanović, B.: Održivo gospodarenje pepelom od drvene biomase, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2010.
- [5] Milovanović, B., Štirmer, N., Carević, I., Baričević, A.: Pepee drvene biomase kao sirovina u betonskoj industriji, Građevinar 6/2019.
- [6] Kostanić Jurić, K., Štirmer, N.: Primjena pepela drvene biomase u cementnim kompozitima, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2018.
- [7] Carević, I., Štirmer, N., Banjad Pečur, I.: Primjena pepela iz drvene biomase kao zamjena cementa u betonu, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017.
- [8] Hrvatski sabor, Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji NN 138/2021
- [9] Milovanović, B., TAREC2 - Vrste i količine dostupnog pepela iz drvene biomase.
- [10] Štirmer, N. et al., TAREC2 – Stanje područja o primjeni PDB-a u građevinskoj industriji.
- [11] Hrvatski sabor, Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu NN 25/2020-602, vol. (2020)
- [12] HROTE: Sustav poticanja OIEIK u RH - GODIŠNJI IZVJEŠTAJ 2021, dostupno na: <https://files.hrote.hr/files/PDF/OIEIK/GI %202021 HROTE OIEIK 14032022 final.pdf>
- [13] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja „Registar obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača“ dostupno na: <https://registri.nipp.hr/izvori/view.php?id=13>
- [14] Hrvatski operater tržišta energije d.o.o. (HROTE), „Povlašteni proizvođači s kojima je HROTE sklopio ugovor o otkupu električne energije, a čija su postrojenja u sustavu poticanja (stanje na dan 31.12.2021)
- [15] Hrvatska tehnička enciklopedija „Drvna biomasa“ dostupno na: <https://tehnika.lzmk.hr/drvna-biomasa/>
- [16] Tomić, I.: Obnovljiva toplinska energija je ključ za energetski zaokret, HRVATSKE ŠUME 202 – 160/2013. str. 5-8.
- [17] Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, Pravilnik o katalogu otpada NN 90/2015
- [18] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja „Izješće o podacima iz registra onečišćavanja okoliša za 2021. godinu“.

- [19] Hrvatska enciklopedija, dostupno na: <https://enciklopedija.hr/>
- [20] Bogić M., „Volumenske deformacije mortova s pepelom drvne biomase“, završni rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- [21] P.J.P. Gleize, M. Cyr, and G. Escadeillas, „Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes,“ Cem. Concr. Compos., vol. 29, no. 2, pp. 80-87, 2007
- [22] Adžaga N., Martinčić Špoljarić A., Sandrić N., „Vjerojatnost i statistika“, nastavni materijal, Građevinski fakultet Sveučilišta u zagrebu.
- [23] Krakan M., „Uspostavljanje i validacija metode za određivanje difuzije klorida na razini cementne paste“, Rektorova nagrada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.

8. POPIS SLIKA

Slika 1 Raspodjela svjetske potrošnje bruto energije [4].....	1
Slika 2 Šumska biomasa	3
Slika 3 Šumska biomasa	3
Slika 4 Poljoprivredna biomasa.....	3
Slika 5 Energetski nasad.....	3
Slika 6 Potrošnja biomase u zemljama EU za proizvodnju električne energije, toplinske energije i transport [9]	4
Slika 7 Broj energana na drvenu biomasu u EU [9].....	5
Slika 8 Lokacije energana na biomasu u EU [9]	5
Slika 9 Broj energana u državama članicama EU koje koriste drvenu biomasu kao gorivo [9]	5
Slika 10 Drvena biomasa [15]	7
Slika 11 Drvena zaliha prema vrstama u Hrvatskoj [9]	8
Slika 12 Godišnji etat u šumama Kojima gospodare Hrvatske šume d.o.o.[9]	8
Slika 13. Potrošnja biomase po satu ovisno o instaliranoj snazi [5]	8
Slika 14. Uzorci pepela drvne biomase: a) pepeo s dna peći; b) leteći pepeo krupnije frakcije; c) finiji leteći pepeo [5].....	9
Slika 15 Čestice PDB-a različite veličine i morfologije: a) pepeo s dna peći; b)leteći pepeo krupnije frakcije; c) finiji leteći pepeo [5].....	10
Slika 16 Dijagram raspršenja podataka za različite vrijednosti Pearsonovog koeficijenta korelacije [22]	19
Slika 17 Dijagram raspršenja podataka za jednu vrijednost Spearmanovog koeficijenta korelacije	20

9. POPIS TABLICA

Tablica 1 Dostupni podaci HROTE-a o povlaštenim proizvođačima električne energije, a čija su postrojenja u sustavu poticanja (postrojenja koja koriste biomasu kao gorivo) [14]	6
Tablica 2 Procijenjeni potencijal tržišta drvene biomase u Hrvatskoj [9]	7
Tablica 3 Maseni udio PDB-a ovisno o vrsti biomase [9]	12
Tablica 4 Prosječna distribucija mase proizvedenog pepela od biomase u postrojenjima s izgaranjem na ložištima s rešetkom – prema vrstama pepela i vrsti biomase	12
Tablica 5 Procjena proizvedenih količina PDB-a uz pretpostavku korištenja cjelokupnog potencijala drvene biomase u spomenutim zemljama [9]	13
Tablica 6 Procjena moguće godišnje proizvodnje PDB-a u Hrvatskoj [10]	13
Tablica 7. Granične koncentracije teških metala i bora (B) za primjenu PDB-a u poljoprivredi i šumarstvu prema smjernicama različitih država u mg/kg [4]	14
Tablica 8 Funkcija i primjena pepela od biomase u građevinskoj industriji [7]	15
Tablica 9 Kemijski sastav korištenog letećeg pepela iz biomase i cementa	16
Tablica 10 Kemijski sastav pojedinih mješavina	17
Tablica 11 Program ispitivanja [20]	18
Tablica 12 Tumačenje vrijednosti Spearmanovog koeficijenta korelacije	20
Tablica 13 Rezultati ispitivanja cementnog morta u svježem stanju	21
Tablica 14 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cementnog morta	21
Tablica 15 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće cementnog morta	21
Tablica 16 Rezultati ispitivanja skupljanja uslijed sušenja cementnog morta	21
Tablica 17 Rezultati ispitivanja autogenih deformacija cementnog morta	22
Tablica 18 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i svojstava cementnog morta u svježem stanju	22
Tablica 19 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i vlačne čvrstoće cementnog morta određene starosti ..	22
Tablica 20 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i tlačne čvrstoće cementnog morta određene starosti ..	23
Tablica 21 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i skupljanja uslijed sušenja cementnog morta određene starosti	23
Tablica 22 Spearmanovi koeficijenti varijabli udjela PDB-a i autogenih deformacija cementnog morta određene starosti	23
Tablica 23 Spearmanovi koeficijenti varijabli svojstava u svježem stanju i vlačne čvrstoće savijanjem cementnog morta određene starosti	24
Tablica 24 Spearmanovi koeficijenti varijabli svojstava u svježem stanju i tlačne čvrstoće cementnog morta određene starosti	25
Tablica 25 Spearmanovi koeficijenti varijabli svojstava u svježem stanju i skupljanja uslijed sušenja cementnog morta određene starosti	26
Tablica 26 Spearmanovi koeficijenti varijabli svojstava u svježem stanju i autogenih deformacija cementnog morta određene starosti	27
Tablica 27 Spearmanovi koeficijenti varijabli vlačne čvrstoće savijanjem i skupljanje uslijed sušenja cementnog morta određene starosti	27
Tablica 28 Spearmanovi koeficijenti varijabli vlačne čvrstoće savijanjem i autogene deformacije cementnog morta određene starosti	28
Tablica 29 Spearmanovi koeficijenti varijabli tlačne čvrstoće i skupljanje uslijed sušenja cementnog morta određene starosti	28
Tablica 30 Spearmanovi koeficijenti varijabli tlačne čvrstoće i skupljanje uslijed sušenja cementnog morta određene starosti	29