

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

SAŠA PEJIĆ, ANTHONY NINČEVIĆ
**UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG
BETONA**

ZAGREB, 2017.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za materijale Građevinskog Fakulteta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u Akademskoj godini 2016./2017.

Sadržaj:

1.	UVOD.....	1
1.1.	Ekološki izazovi novog milenija	1
1.2.	Biomasa	1
1.3.	Drvena biomasa i biopepeo	2
2.	OPĆI CILJEVI RADA.....	6
3.	MATERIJAL, METODE I PLAN RADA.....	7
3.1.	Osnovni sastojci betona.....	7
3.1.1.	Cement.....	7
3.1.2.	Agregat	7
3.1.3.	Voda.....	8
3.1.4.	Superplastifikator.....	8
3.1.5.	Aerant	9
3.2.	Svojstva betona s biopepelom	9
4.	PROJEKTIRANJE EKSPERIMENTA	14
4.1.	Projektirani sastavi betona.....	14
4.2.	Sastavni materijali betona i njihova svojstva	15
4.2.1.	Biopepeo	15
4.2.2.	Cement.....	15
4.2.3.	Superplastifikator.....	16
4.2.4.	Aerant	16
4.2.5.	Agregat	16
4.3.	Ispitivanje svojstva u svježem stanju	18
4.4.	Ispitivanje svojstava betona u očvrslom stanju	20
4.4.1.	Ispitivanje skupljanja betona	20
4.4.2.	Dubina prodora vode pod tlakom	20
4.4.3.	Određivanje koeficijenta difuzije klorida	20
4.4.4.	Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri tlaku	20
5.	REZULTATI ISPITIVANJA OČVRSLOG BEONA	21
5.1.	Skupljanje betona	21
5.2.	Vodopropusnost (VDP).....	23
5.3.	Difuzija kloridnih iona	26
5.4.	Statički modul elastičnosti.....	29

6.	RASPRAVA.....	31
6.1.	Ispitivanje svojstava u svježem stanju.....	31
6.2.	Skupljanje betona	31
6.3.	Vodopropusnost.....	32
6.4.	Difuzija kloridnih iona	33
6.5.	Statički modul elastičnosti.....	35
6.6.	Tlačna čvrstoća.....	35
7.	ZAKLJUČCI.....	36
8.	ZAHVALE.....	38
9.	POPIS LITERATURE	39
10.	SAŽETAK	40
11.	SUMMARY	41

1. UVOD

1.1. Ekološki izazovi novog milenija

Pitanje ekologije u dvadeset prvom stoljeću integriralo se u gotovo sve sfere ljudskog života. U skladu s time, zaštita okoliša kroz promicanje održivog razvoja postaje jedan od ključnih problema suvremene građevine.

Ubrzani razvoj tehnologije rezultira sve većom potrebom za energijom. Neobnovljivi izvori energije dvostruko su manjkavi; kao što im i samo ime kaže njihove zalihe su količinski limitirane, dok su s druge strane različiti procesi u kojima se koriste dokazano štetni za okoliš. Iako u mnogo manjoj mjeri nego što bi jedan ekolog mogao poželjeti, polako se okrećemo alternativnim izvorima energije kao što su energija sunca, vode, vjetra i biomase. U tom svjetlu, u području građevine nastoje se poboljšati metode proizvodnje materijala – bilo to u smislu potrošnje i skladištenja energije ili pak samog sastava. Tako se počinju razvijati novi, „zeleni“ materijali. Osim što moraju zadovoljiti ekološki standard ti materijali i dalje moraju imati određenu kvalitetu i ekonomsku isplativost. Upravo to je izazov koji stoji pred inženjerima današnjice.

1.2. Biomasa

Alternativni izvor energije je i biomasa. Biomasa je biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka u poljoprivredi (uključujući biljne i životinjske sastojke), šumskoj i srodnim industrijama kao i biorazgradivi dio industrijskoga i kućanskoga komunalnog otpada [1].

Dijeli se na:

- drvenu biomasu (ostaci iz šumarstva, otpadno drvo kod prerada)
- ostatke iz poljoprivrede
- uzgojenu drvenu biomasu (tzv. energetske šume)
- uzgojenu nedrvenu biomasu (brzorastuće alge i trave)
- životinjski, komunalni otpad i mulj iz pročistača otpadnih voda

Biomasa svrstavamo pod obnovljive izvore energije jer biljke kao živi organizmi mogu narasti u relativno kratkom vremenu. Prednosti korištenja biomase su primarno povećanje energetske neovisnosti i smanjivanje ispuštanja stakleničkih plinova. Naime, plinovi koji nastaju u procesu mogu se ponovno iskoristiti za proizvodnju energije. Što se tiče električne

energije, izgaranjem biomase nastaje para koja se koristi za pogon motora ili turbina. Glavne tehnologije u primjeni su izgaranje na rešetki i izgaranje u fluidiziranom sloju.

Izgaranje na rešetki je tradicionalna tehnologija. Odvija se u kotlu u kojem je smještena rešetka na kojoj se nalaze biomasa i otpad. Suvremena postrojenja s ovom tehnologijom jeftinija su od postrojenja s izgaranjem u fluidiziranom sloju, ali i manje efikasna. Povećana efikasnost postrojenja s izgaranjem u fluidiziranom sloju uvjetovana je dodatnim pogonom ventilatora zraka. Ipak, to uzrokuje povećanje potrošnje energije samog postrojenja. [1]

1.3. Drvna biomasa i biopepeo

Biomasa kojom smo se bavili u ovom radu jest drvna biomasa. Njena uloga u energetske smislu odnosi se na sunčevu energiju koja se u drvima akumulira u procesu fotosinteze. Izgaranjem iste, oslobađa se energija koja se potom može koristiti za grijanje ili proizvodnju električne energije. Goriva koje se dobivaju iz drvene biomase mogu se podijeliti u nekoliko oblika: ogrjevno drvo u obliku cjepanica, briketi, sječka i peleti [2].

Živimo u zemlji s velikim potencijalom drvene biomase; ukupna površina šuma i šumskih zemljišta u Republici Hrvatskoj iznosi oko 2,7 mil. ha što je 47% kopnene površine države [3]. Ohrabrujuć je i podatak prema kojem godišnji prirast drvene zalihe u Hrvatskoj iznosi 10,5 milijuna m³. Hrvatske šume nastoje osigurati budućnost održivog gospodarenja, pa se tako potrošnja održava ispod razine prirasta. S obzirom na ovako kvalitetnu podlogu, ne čudi da statistički podatci pokazuju sve učestalije korištenje drvene biomase kao izvora obnovljive energije.

Tako je u 2009. godini Hrvatska proizvela 405 tona primarne energije iz biomase i time u odnosu na 2000. godinu ostvarila rast od 8,3% ili prosječno godišnje 0,9%. Veliki skok dogodio se 2012. godine kada je proizvodnja primarne energije iz ogrjevnog drva i biomase iznosila 29,17 PJ, što je povećanje za gotovo 10% u odnosu na godinu prije. U ukupnoj proizvodnji primarne energije udio je iznosio 16,5%.

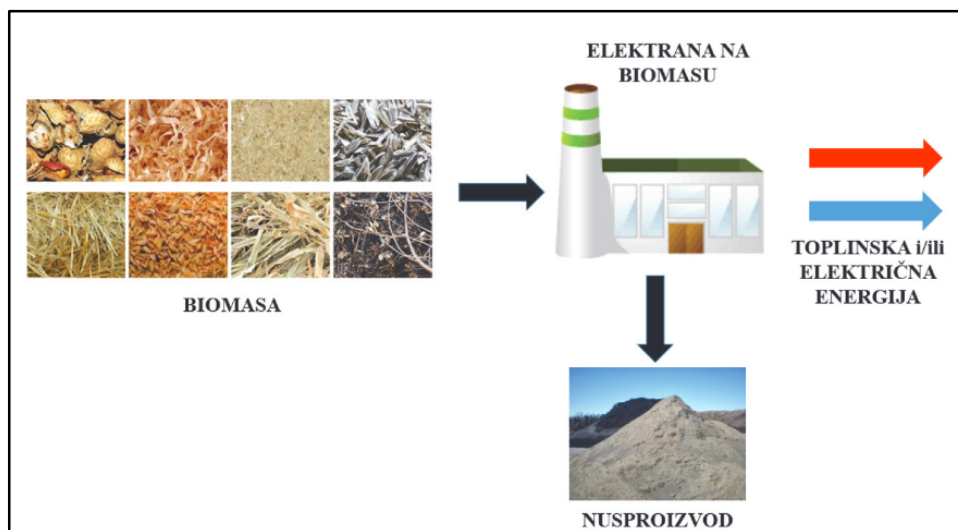
U *tablici 1.* prikazani su podaci o elektranama koje kao gorivo koriste biomasu i bioplin/deponijski plin u Republici Hrvatskoj u 2012. godini.

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 1. Elektrane na biomasu i bioplin u Republici Hrvatskoj, 2012.godine [4]

Elektrana	Vrsta	Instalirana snaga (MW)	Predano u mrežu 2012. godine (GW)	Gorivo
mTEO Jakuševac, Zagreb	plinska turbina	2,036	0	deponijski plin
ZOV (Zagrebačke otpadne vode)	plinski motor	2,5	0,063	bioplin
Osatina Grupa d.o.o. Ivankovo	plinski motor	1,00	7,43	bioplin
Osatina Grupa d.o.o. Tomašanci	plinski motor	1,00	8,18	bioplin
Bovis d.o.o.	plinski motor	1,00	8,07	bioplin
Univerzal d.o.o. Varaždin	plinski motor	2,74	12,2	biomasa
Strizivojna Hrast d.o.o.	parna turbina	3,366	15,78	bioplin
Farma Tomašanci d.o.o.	plinski motor	1,00	7,89	bioplin
Mala Branjevina 1	plinski motor	1,00	3,42	bioplin
Mala Branjevina 2	plinski motor	1,00	5,07	bioplin
Rosulje	plinski motor	0,135	0,075	bioplin
Landia – Gradina	plinski motor	1,00	1,52	bioplin
Lika Energo Eko	plinska turbina	1,00	3,92	bioplin
Ukupno		18,777	73,618	

Dobro je poznato da su alternativni izvori energije neizmjereno manje štetni za okoliš, ali puno se manje važnosti daje činjenici da ni oni u većini slučajeva nisu u potpunosti čista opcija. Problem koji se javlja kod spaljivanja drva je nusprodukt koji nastaje prilikom proizvodnje energije u elektranama na biomasu, a to je biopepeo, kako se vidi iz *slike 1*.



Slika 1. Shema proizvodnje energije u elektranama na biomasu [5][6]

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Biopepeo se može podijeliti u tri kategorije [7]:

- pepeo iz ložišta – grubi pepeo, nesagorena pepelna troska sakuplja se u dijelu za sagorijevanje postrojenja za loženje pod rešetkom kotla, te se žlijebom skuplja u spremniku
- ciklonski pepeo – fini pepeo, nastaje u cikloni, sakuplja se pomoću elektrostatičkih vrećica u dimnom ispušnom plinu čišćenjem dimnjaka
- leteći pepeo – filtarski pepeo, najfiniji uzvitlani pepeo, nastaje u električnom filtru u kondenzacijskim postrojenjima dimnog ispušnog plina

Biopepeo se danas tretira kao otpad. Osim na odlagalištima otpada, odlaže se i na poljoprivredne površine ili u šumama, najčešće bez ikakvog oblika kontrole. Posljedica toga je onečišćenje okoliša što predstavlja opasnost za ljudsko zdravlje. Biopepeo može prouzročiti onečišćenje zraka sitnim česticama nošenim vjetrom, što lokalnom stanovništvu može uzrokovati zdravstvene probleme dišnih putova [8]. Također, velik problem predstavlja moguće onečišćenje podzemnih voda zbog izlučivanja teških metala iz pepela ili procjeđivanjem kišnice.

Tijekom proizvodnje energije na biomasu u 2005. godini nastalo je $5,6 \times 10^7$ t pepela. Prema europskoj regulativi zahtjeva se povećanje obnovljivih izvora energije (OIE) za 20% do 2020. te se pretpostavlja da će se količina pepela povećati do $15,5 \times 10^7$ t [9].

Iz navedenih razloga očito je da se što prije treba poraditi na traženju rješenja za upotrebu pepela kao sirovine za proizvodnju novih materijala ili na sistemu odlaganja i skladištenja biopepela. Uzevši u obzir koliko je odlaganje otpada općenito problematično, alternativna rješenja koje proizlaze iz dosadašnjih istraživanja biopepela još više dobivaju na važnosti. Naime, pokazalo se kako se nastali pepeo može ponovno upotrijebiti u određenim granama gospodarstva, a posebno u građevinskoj industriji. Moguće uporabe biopepela u građevini kao zamjena ili kao nadopuna materijalu, prikazane su u *tablici 2*.

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 2. Pregled moguće primjene biopepela [10]

Red. Br.	Primjena	Namjena
1	Alternativna veziva kao zamjena za postojeći cement	Komponenta
2	Proizvodnja klinkera (cementa)	Sirovina
3	Betonski proizvodi manje kvalitete	(Reaktivno) punilo
4	Građevinski materijal za gradnju cesta	Vezivo/Sirovina
5	Opeka na bazi pijeska i vapna	Punilo/Vezivo
6	Infrastrukturni radovi (nasipi, nasipavanje)	Ispuna
7	Stabilizator tla	Vezivo
8	Umjetni agregat	Sirovina

2. OPĆI CILJEVI RADA

Cilj istraživanja je utvrditi kako dodavanje biopepela u mješavinu betona umjesto dijela cementa utječe na svojstva betona u odnosu na referentni portland cementni beton. Ukoliko se dokaže da ne dolazi do značajnih promjena mehaničkih, deformacijskih i trajnosnih svojstava, novi ekološki prihvatljiviji beton moći će se koristiti kao zamjena običnih betona u gradnji, koji će osim smanjivanja troškova sastavnih materijala, koristiti nusprodukt elektrana (otpad) koji se trenutno neadekvatno odlaže u okoliš.

U istraživanju, ispitat će se trajnosna, deformacijska i mehanička svojstva betona pri zamjeni različitih udjela cementa biopepelom te analiza dobivenih rezultata.

Mehanička, deformacijska i trajnosna svojstva koja će se ispitati:

- Skupljanje betona
- Vodopropusnost
- Difuzija klorida
- Statički modul elastičnosti
- Tlačna čvrstoća

3. MATERIJAL, METODE I PLAN RADA

3.1. Osnovni sastojci betona

3.1.1. Cement

Cement je hidraulično građevno vezivo koje samostalno očvrstne na zraku i pod vodom. To je praškasti materijal koji pomiješan s vodom, kemijskim reakcijama i pratećim fizikalnim procesima prelazi u očvrstnulu cementnu pastu ili cementni kamen. Cement se prema vrsti dijeli na :

- CEM I – portlandski cement
- CEM II - portlandski cement s miješanim dodatkom (zgura, pucolan, silikatna prašina, leteći pepeo, miješani dodaci...- dodaju se pri mljevenju klinkera)
- CEM III - cement sa zgurom visokih peći (metalurški cement)
- CEM IV - pucolanski cement
- CEM V – miješani cement

Najupotrebljivanija vrsta cementa je portlandski cement koji predstavlja hidraulični cement proizveden mljevenjem klinkera, koji sačinjavaju uglavnom hidraulični kalcij silikati različitih formi uz istovremeno mljevenje i homogenizaciju s dodatkom sadrovca ili anhidrita. Dvije glavne zadaće cementnog kamena u betonu su slijepiti zrna agregata i betonu dati odgovarajuću čvrstoću, te da ispuni prostor među česticama agregata i njime tvori nepropusnu masu. Cement je u betonu također i nosilac dvaju karakterističnih svojstava skupljanja i puzanja [11].

3.1.2. Agregat

Agregat čini u pravilu 60 do 80% volumena betona i stoga ima veliki utjecaj na njegova svojstva, kako u svježem, tako i u očvrstnulom stanju. Bitna svojstva agregata za uporabu u proizvodnji betona su granulometrijski sastav, oblik i tekstura zrna, gustoća, poroznost, apsorpcija i vlažnost. U svježem stanju oblik i tekstura zrna utječu na obradljivost, a najpovoljniji oblik agregata je kugla, jer pruža najmanji otpor pri obrađivanju. Kvaliteta i količina agregata u očvrstnulom stanju ima bitan utjecaj na čvrstoću, modul elastičnosti, te skupljanje betona [12]. Krupna zrna agregata (>4 mm) čine skelet

betona koji daje krutost, a sitna zrna povećavaju kohezivnost svježeg betona. Agregat ujedno daje i dimenzionalnu stabilnost, tj. umanjuje dugotrajne volumne promjene svojstvene za cementni kamen (skupljanje), a relativno je jeftin, pa to osigurava ekonomičnost betonskih konstrukcija [11].

3.1.3. Voda

Voda je jedan od tri osnovna sastojka u proizvodnji betona, te ima vrlo velik utjecaj na njegova svojstva u različitim fazama izrade i primjene. Količina i kvaliteta vode bitna je za svojstva betona u svježem i u očvrslom stanju kao što su obradljivost, udio pora, vrijeme vezivanja, čvrstoća i trajnost. Povećanjem njenog udjela povećava se obradljivost, što olakšava ugradnju, ali istovremeno ima i negativne posljedice kao što su smanjenje čvrstoće, segregacija i izdvajanje vode. Također, mora ispuniti prostor između čestica, a dodatna voda potrebna je za podmazivanje čestica odvajajući ih filmom. Općenito, finije čestice s većom specifičnom ploštinom, povećavaju potrebu za vodom. Prema tome treba je promatrati u sklopu granulometrijskog sastava [12].

3.1.4. Superplastifikator

Superplastifikatori su kemijski dodaci koji omogućavaju smanjenje potrebe za vodom uz zadržavanje iste konzistencije betona. Sastoje se od velikih lanaca, anionskih površinski aktivnih tvari velike molekularne težine s velikim brojem polarnih grupa u lancu ugljikovodika. Kada se adsorbira na čestice cementa, površinski aktivna tvar daje jak negativan naboj čime znatno smanjuje površinsku napetost okolne vode i na taj način povećava fluidnost [12]. Pri izradi betonskih mješavina doziraju se u količinama do 1% na masu cementa, a smanjuju potrebu za vodom 20 do 35%. Čvrstoća betona s dodatkom superplastifikatora raste zbog manjeg udjela vode, ujedno se povećava i ekonomičnost jer se koristi manje cementa koji je najskuplja komponenta betonske mješavine. Najčešću upotrebu superplastifikatora nalazimo pri izradi betona vrlo velikih čvrstoća ili tekućih betona.

3.1.5. Aerant

Aeranti su površinski aktivne tvari, koje smanjuju površinsku napetost vode, da bi omogućili stvaranje mjehurića zraka, a zatim osigurali njihovu stabilnost. Glavna zadaća aeranta u betonu je uvući mjehuriće zraka u strukturu čime se osigurava otpornost betona na cikluse smrzavanja. Kapilarne pore problem su u očvrslom betonu, jer su u saturiranom stanju ispunjene vodom koja pri prelasku u led povećava volumen za 9% što dovodi do nastanka unutarnjih naprezanja. Nastala naprezanja mogu biti veća od vlačne čvrstoće betona i pri tome nastaju pukotine, koje mogu rezultirati i odlamanjem strukture. Mjehurići zraka nastali djelovanjem aeranta su sferični, jednoliko raspoređeni u cementnom kamenu i višestruko većih dimenzija od kapilara koje isprekidaju i onemogućavaju njihovu povezanost, čime se sprječava nastanak unutarnjih naprezanja. Uvučeni zrak zbog djelovanja aeranta treba razlikovati od zraka zahvaćenog miješanjem koji stvara velike i nejednoliko raspoređene mjehuriće zraka zbog čega takvi mjehurići ne djeluju pozitivno na otpornost betona prema smrzavanju. Uvlačenjem zraka u beton povećava se i njegova poroznost, što u očvrslom stanju negativno utječe na čvrstoću.

3.2. Svojstva betona s biopepelom

Biopepeo nastao izgaranjem drvene mase se u betonske mješavine dodaje kao mineralni dodatak, te zamjenjuje dio cementa u određenom postotku. Takav biopepeo ima slična pucolanska svojstva kao i ugljeni leteći pepeo pa se dodaje u beton kao komponenta s pozitivnim utjecajem na njegova svojstva. Svojstva pepela dobivenog kao nusprodukt izgaranja drveta mogu jako puno varirati, što je nepovoljan faktor pri ispitivanju njegovog utjecaja na beton, ali i u primjeni. Sastav biopepela znatno se razlikuje za različite vrste drveta, a na svojstva mu utječe vrsta tla na kojem je drvo raslo, klimatska obilježja područja iz kojeg dolazi drvo, način skladištenja drveta [13]. Svojstva biopepela se mijenjaju također ovisno i o godišnjem dobu u kojem je drvo uzeto iz prirode, a i o dijelu drveta koje je korišteno u elektranama, ovisno o tome je li korišteno cijelo drvo ili ostatak od orezivanja, da li je riječ samo o kori, čipsu, sirovom drvu.

Istraživanja provedena na betonu s dodatkom biopepela pokazuju da se njegovom upotrebom povećava potreba za vodom što rezultira znatnim smanjenjem obradljivosti. Ispitivanjem

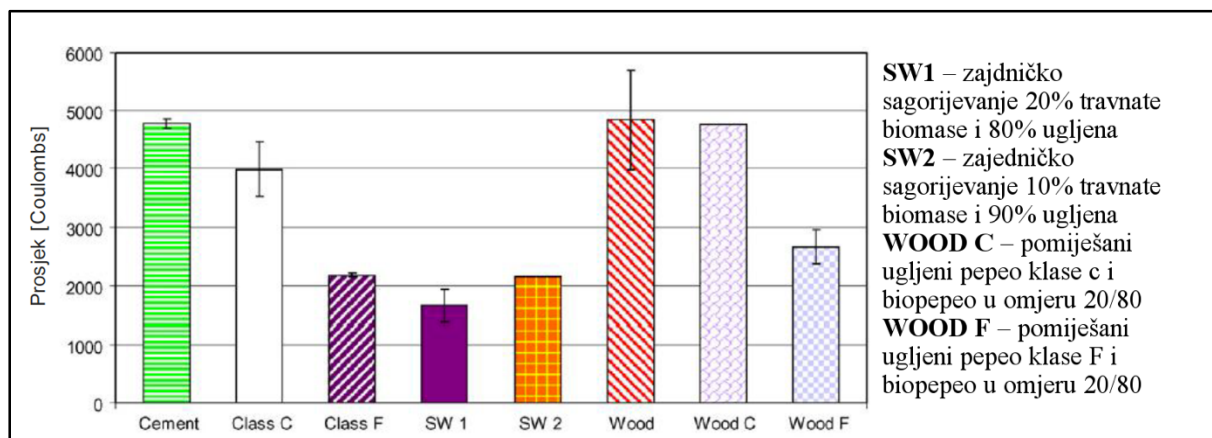
UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

obradljivost betona s udjelom drvenog biopepela od 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%, pokazano je da se uz zadržavanje istog vodocementnog omjera obradljivost jako smanjuje, a za mješavine sa 20%, 25% i 30% i potpuno gubi. Ovakvi rezultati mogu se objasniti morfološkom strukturom pepela koja je poroznija od cementa, te visokim udjelom organske tvari u pepelu [14]. Rezultati tih istraživanja svojstava obradljivosti betona prikazani su u *tablici 3.*:

Tablica 3. Odnos slijeganja betona s povećanjem udjela biopepela [14]

Slijeganje betona s biopepelom							
Udio biopepela (%):	0	5	10	15	20	25	30
Slijeganje (mm):	62	8	5	2,5	0	0	0

Vrlo slične rezultate daju i mnoga druga istraživanja koja su se bavila ovim problemom. U radu „Biomass and Coal Fly Ash in Concrete“ [15], ispitivani su uzorci betona s različitim vrstama biopepela, a među njima postoji i mješavina s dodatkom čistog drvenog biopepela. Mješavina sa čistim letećim pepelom dala je uvjerljivo najbolje rezultate, te se vidi da propusnost betona s letećim pepelom raste proporcionalno s porastom udjela biopepela. Razlike u propusnosti klorida nastaju zbog različite raspodjele veličina pora. S obzirom da biopepeo ima veće čestice i lužnatiji je od letećeg pepela, uzorci iz mješavine koje sadrže biopepeo imaju najveću propusnost. Rezultati su prikazani na *slici 2.*:



Slika 2. Test propusnosti klorida u starosti 56 dana [15]

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

U ovom su radu znanstvenici su provodili još neka istraživanja te su zaključili [15]:

- povećanjem udjela biopepela, smanjuje se obradljivost
- tlačna čvrstoća betona pri starosti od 28 dana do 1 godinu s drvenim biopepelom manja je od tlačne čvrstoće referentne mješavine

Znanstvenici Naik T.R., Kraus R.N. i Siddique R. proveli su ispitivanja skupljanja betona na mješavinama u kojima je 5%, 8% i 12% cementa zamijenjeno biopepelom, te su dobili sljedeće rezultate [16]:

- Skupljanje kontrolne mješavine nakon 7 dana iznosi 0,0092%, te nakon 232 dana 0,052%.
- Rezultati mjerenja skupljanja mješavine s 5% biopepela nakon 7 dana iznose 0,012%, a nakon 232 dana 0,027%.
- Skupljanje mješavine s 8% biopepela nakon 7 dana iznosi 0,014%, te nakon 232 dana 0,013%.
- Rezultati skupljanja mješavine s 12% biopepela nakon 7 dana iznose 0,0051%, a nakon 232 dana 0,044%.

Iz ovih je rezultata vidljivo da mješavina s 8% biopepela nakon 232 dana daje najbolje rezultate, iz čega slijedi zaključak da biopepeo pozitivno utječe na skupljanje. Manja tendencija betona s biopeplom ka skupljanju vjerojatno je rezultat manje količine cementa, koji je glavni nositelj skupljanja.

Smanjena poroznost betona s biopepelom daje naslutiti da je tlačna čvrstoća ovakvih uzoraka veća, ali to ipak nije slučaj, što je i pokazano u radu "Primjena biopepela u cementnom kompozitu" [17]. U *tablici 4.* prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona s udjelom biopepela od 5%, 10% i 15% (dodano na masu betona) nakon 1, 3 i 28 dana. Prvog dana uzorci s 5% biopepela imaju manju čvrstoću, a uzorci s 10% veću čvrstoću za 13% u odnosu na referentnu mješavinu, dok uzorci s 15% biopepela imaju bolju tlačnu čvrstoću za 3% od referentnog betona.

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 4. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće [17]

	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće [MPa]	Volumenska masa [kg/dm ³]	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće [MPa]	Volumenska masa [kg/dm ³]	Srednja vrijednost tlačne čvrstoće [MPa]	Volumenska masa [kg/dm ³]
Starost betona [dani]	1	1	3	3	28	28
M1 (referentni beton)	19,93	2,274	28,75	2,306	35,55	2,311
M2 (5% biopepela)	18,49	2,253	24,39	2,262	31,91	2,276
M3 (10% biopepela)	21,36	2,304	24,60	2,291	33,69	2,319
M4 (15% biopepela)	20,18	2,311	22,61	2,334	31,36	2,354

U starosti 3 dana svi uzorci s udjelom biopepela pokazuju manje vrijednosti tlačne čvrstoće. Najmanju čvrstoću ima mješavina s udjelom od 15% biopepela, čiji su rezultati za 21% lošiji u odnosu na referentni beton. Slično se može zaključiti i za rezultate ispitivanja pri starosti betona od 28 dana gdje je od uzoraka s biopepelom onaj s 10%-tnim udjelom slabiji za 5%, a uzorci s 5 i 15%-tnim udjelom za 10% u odnosu na referentni beton.

U ovom je istraživanju provedeno i ispitivanje savojne čvrstoće, a rezultati su prikazani u *tablici 5.* iz kojih se vidi da savojna čvrstoća malo opada s porastom udjela biopepela [17].

Tablica 5. Rezultati mjerenja savojne čvrstoće [17]

	Srednja vrijednost savojne čvrstoće [MPa]	Volumenska masa [kg/dm ³]
M1 (referentni beton)	5,72	2,322
M2 (5% biopepela)	5,66	2,276
M3 (10% biopepela)	5,44	2,296
M4 (15% biopepela)	5,14	2,360

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Autor ovog rada proveo je još neka istraživanja te iz njih zaključio:

- Iz rezultata ispitivanja plinopropusnosti vidljivo je da mješavine s 10 i 15% udjela biopepela imaju bolje ocjene plinopropusnosti od referentne mješavine i mješavine s 5%-tnim udjelom biopepela pa iz toga zaključujemo da biopepeo ima povoljan učinak na svojstvo plinopropusnosti jer zapunjava strukturu betona.
- Iz rezultata ispitivanja apsorpcije vode može se zaključiti da udio biopepela neznatno utječe na smanjenje apsorpcije vode u betona.
- Uzorci s biopepelom imaju veći koeficijent kapilarne vodoupojnosti od referentnih uzoraka. Međutim, rezultati pokazuju da taj koeficijent neznatno pada s povećanjem udjela biopepela što opet dovodi do zaključka da biopepeo zapunjava strukturu betona.
- Usprkos dodavanju aeranta neki uzorci betona pokazuju manju otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja uz soli. Najbolji rezultat otpornosti nakon 28 ciklusa smrzavanja ima uzorak s 5% biopepela koji je i u svježem stanju imao najveći udio uvučenih pora.

Iz svih navedenih ispitivanja očigledno je da biopepeo utječe na smanjenje obradljivosti, čvrstoće, otpornost prema smrzavanju, ali na neka druga svojstva kao što su plinopropusnost i apsorpcija utječe pozitivno.

Ovakav utjecaj biopepela ne dozvoljava njegovu primjenu u betonima velikih čvrstoća, ali u nekim betonima “uobičajenih čvrstoća” može poslužiti kao zamjena za cement. Trenutno se betoni s drvenim biopepelom skoro uopće ne koriste, jer se trebaju provesti mnoga dodatna istraživanja o njihovom ponašanju.

4. PROJEKTIRANJE EKSPERIMENTA

4.1. Projektirani sastavi betona

Ukupno je izrađeno četiri mješavine betona: referentna (bez bio pepela), te sa zamjenom 5, 10 i 15% mase cementa s biopepelom. U *tablici 6.* prikazane su količine sastavnih materijala za izradu 60 L betona.

Tablica 6. Udio komponenti sastava betonskih mješavina

MJEŠAVINE (Volumen mješavine: 60L)				
SASTAV	M1 (referenta)	M2 (5% biopepela)	M3 (10% biopepela)	M4 (15% biopepela)
cement (kg)	21,00	19,95	18,90	17,73
biopepeo (kg)	0,00	1,05	2,10	3,27
voda (kg)	10,50	10,50	10,50	10,50
v/c	0,50	0,53	0,56	0,59
superplastifikator (%)	0,40%	0,75%	0,80%	2,00%
aerant 0,04%	0,0084	0,0084	0,0084	0,0084
Agregat (kg)	105,96	105,21	104,77	104,36



Slika 3. Komponente sastava betona prije početka miješanja

Na *slici 3.* prikazane su komponente betona u mješalici prije miješanja i dodavanja vode.

4.2. Sastavni materijali betona i njihova svojstva

4.2.1. Biopepeo

U ispitivanju će se koristiti biopepeo MULTI CIKLOM (leteći pepeo s elektrostatskog filtera), tvrtke Hrast d.o.o. Strizivojna, dobiven sagorijevanjem biomase. U betonskim mješavinama je 5%, 10% i 15% mase cementa zamijenjeno biopepelom.

Biopepeo je prosijan na finim sitima otvora veličine 0,005 mm; 0,01 mm; 0,02 mm; 0,048 mm; 0,063 mm; 0,09 mm i 0,125 mm radi određivanja granulometrijskog sastava bio pepela. Ukupna masa suhog uzorka je 50,4 g. U *tablici 7.* prikazani su dobiveni rezultati prosijavanja.

Tablica 7. Rezultati prosijavanje biopepela

veličina otvora sita [mm]	0,005	0,01	0,02	0,048	0,063	0,09	0,125
ostatak preostalog pepela na situ [g]	50,38	50,30	46,06	25,34	1,16	0,50	0,27
postotak prolaza kroz sito, kumulativno [%]	0	0	9	50	98	99	99,46

4.2.2. Cement

Pri izradi betona korišten je cement vrste CEM I 42,5N (čisti portland cement),; proizvođača Cemex. Gustoća cementa je $\rho = 3,01 \text{ kg/m}^3$. Udio cementa u betonskim mješavinama za m^3 betona je:

- 350,0 kg (za referentnu mješavinu)
- 332,5 kg (+5% biopepela – 17,5 kg)
- 315,0 kg (+10% biopepela – 35,0 kg)
- 297,5 kg (+15% biopepela – 52,5 kg)

4.2.3. Superplastifikator

Za postizanje zadovoljavajuće konzistencije betona je korišten superplastifikator Glenium 51 proizvođača BASF. To je aditiv nove generacije koji omogućava veliko smanjenje udjela vode kod izrade betona i doprinosi razvoju rane čvrstoće betona.

Dodavao se u količini od 0,4% na masu cementa pa na više, kako bi se postiglo slijeganje u mjeri od 12-15 cm (razred slijeganja S3).

4.2.4. Aerant

U mješavine betona dodavan je aerant META AIR proizvođača BASF u udjelu 0,04% na masu cementa odnosno u svim mješavinama je dodana količina od 0,14 kg po m³ betona.

4.2.5. Agregat

Za izradu betonskih mješavina korišten je agregat s nalazišta ARKADA, drobljeni vapnenac frakcija 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm. Prosijavanjem je određen granulometrijski sastav i udio pojedinih frakcija agregata u ukupnom sastavu betona. Agregatu je ispitana i vlažnost kako bi se mogla napraviti korekcija vode pri izradi betona.

U *tablici 8. i tablici 9.* dani su numerički i kumulativni granulometrijski sastav agregata (prilagođen krivulji B), a na *slici 4.* su prikazane granulometrijske krivulje pojedinih frakcija, sumarna i granična krivulja. *Slika 5.* prikazuje agregat prije miješanja betona.

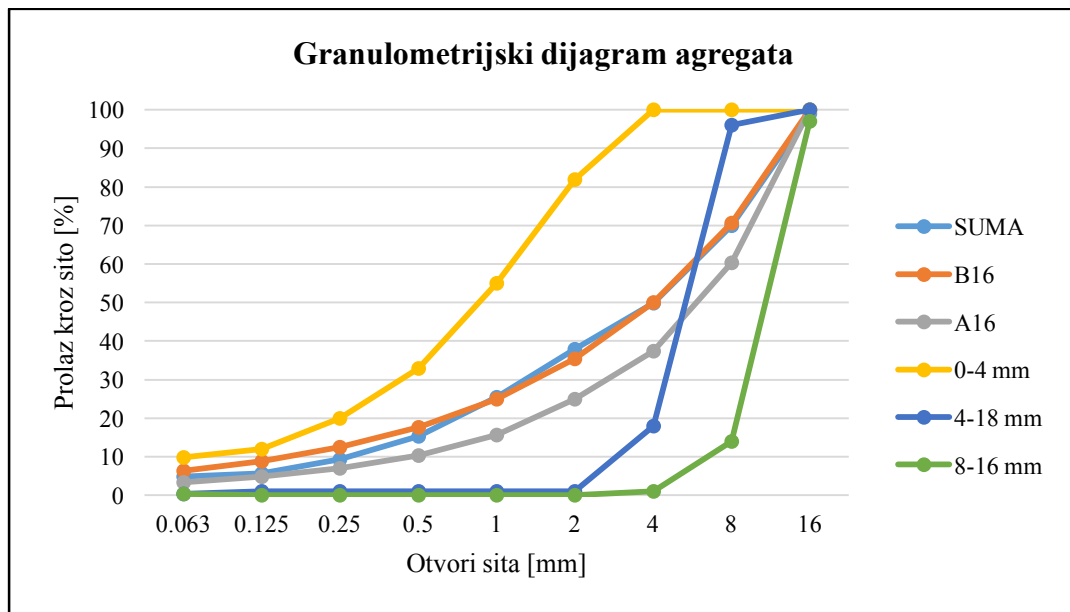
Tablica 8. Granulometrijski sastav agregata

NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV ARKADA										
frakcija	sito	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0-4 mm	%	9,92	12	20	33	55	82	100	100	100
4-18 mm	%	0,43	1	1	1	1	1	18	96	100
8-16 mm	%	0,43	0	0	0	0	0	1	14	97
krivulja B16 (%)		6,3	8,8	12,5	17,7	25	35,4	50	70,7	100
krivulja A16 (%)		3,3	4,8	7	10,4	15,6	24,9	37,5	60,4	100

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 9. Kumulativni granulometrijski sastav agregata

KUMULATIVNI GRANULOMETRIJSKI SASTAV ARKADA										
frakcija	%	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0-4 mm	46	4,563	5,52	9,2	15,18	25,3	37,72	46	46	46
4-18 mm	20	0,086	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	3,6	19,2	20
8-16 mm	34	0,146	0	0	0	0	0	0,34	4,76	32,98
SUMA	100	4,795	5,72	9,4	15,38	25,5	37,92	9,9	69,96	98,98



Slika 4. Granulometrijski dijagram korištenog agregata



Slika 5. Agregat

4.3. Ispitivanje svojstva u svježem stanju

Neposredno nakon miješanja betona provedena su ispitivanja sljedećih svojstava:

- Konzistencija
- Temperatura
- Gustoća
- Poroznost

Konzistencija je svojstvo koje definira obradljivost betona u svježem stanju. Određuje se metodom slijeganja tj. slump testom, prema normi HRN EN 12350-2. Kalup oblika krnjeg stošca i normiranih dimenzija napuni se betonom, zatim se oprezno digne te se mjeri koliko se beton slegnuo, kao što je prikazano na *slici 6*. Ovisno o namjeni betona propisani su razredi slijeganja prikazani u *tablici 10*.



Slika 6. Ispitivanje konzistencije betona metodom slijeganja

Tablica 10. Razredi konzistencije svježeg betona [11]

RAZREDI KONZISTENCIJE							
Razredi slijeganjem		Vebe razredi		Razredi zbijanjem		Razredi rasprostiranjem	
Razred	Slijeganje (mm)	Razred	Vebe vrijeme (s)	Razred	Stupanj zbijenosti	Razred	Promjer rasprostiranja (mm)
S1	10 do 40	V0	≥ 31	C0	≥ 1,46	F1	≤ 340
S2	50 do 90	V1	30 do 21	C1	1,45 do 1,26	F2	350 do 410
S3	100 do 150	V2	20 do 11	C2	1,25 do 1,11	F3	420 do 480
S4	160 do 210	V3	10 do 6	C3	1,10 do 1,04	F4	490 do 550
S5 ¹⁾	≥ 220	V4	5 do 3	C4	< 1,04	F5	560 do 620
-	-	-	-	-	-	F6	≥ 630

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Temperatura svježeg betona mjeri se digitalnim termometrom, a preporučena temperature kreće se između 5 i 30 °C. [12]

Ispitivanje gustoće i poroznosti svježeg betona određuje se pomoću porometra, koji je prikazan na *slici 7*. U posudu poznatog volumena stavi se uzorak i zatim poklopi, te prostor između uzorka i poklopca popuni vodom. U poklopcu je tlačna komora poznatog volumena u kojoj se pomoću pumpe može postići određeni pritisak. Otvaranjem ventila pritisak se raspodijeli na zrak u porama uzorka, pa se na manometru očita prosječni pritisak zraka u porama uzorka i tlačnoj komori, a također postoji i skala s koje se očita udio pora u uzorku [18].



Slika 7. Porometar

Gustoća betona jedan je od osnovnih parametara određivanja vrste betona, u *tablici 11*. dane su vrste betona prema gustoći.

Tablica 11. Vrste betona prema gustoći

GUSTOĆA [kg/m ³]	800-2000	2000-2600	>2600
vrsta	lagani	obični	teški

4.4. Ispitivanje svojstava betona u očvrnulom stanju

4.4.1. Ispitivanje skupljanja betona

Ispitivanje skupljanja betona (vremenska, volumenska deformacija) provodi se prema normi HRN U.M1.029 na uzorcima prizmatičnog oblika i dimenzija 100×100×400 mm. Rezultati skupljanja bilježe se svakih 7 dana do najmanje 90 dana starosti betona.

4.4.2. Dubina prodora vode pod tlakom

Dubina prodora vode ispituje se prema normi HRN EN 12390-8:2009 na uzorcima u obliku kocke dimenzija 150×150×150 mm. Ispitivanje se vrši pri najmanjoj starosti betona od 28 dana. Prizme se izlažu djelovanju tlaka od 5 bar-a, te se nakon 72 h uzorci cijepaju i mjeri se najveća dubina prodora vode.

Ovim se ispitivanjem zapravo definira razred vodopropusnost betona VDP 1 (najveća visina prodora vode 30 mm), VDP 2 (najveća visina prodora vode 15 mm) i VDP 3 (najveća visina prodora vode 10 mm)

4.4.3. Određivanje koeficijenta difuzije klorida

Određivanje koeficijenta difuzije klorida ispituje se prema normi NT BUILD 492 na tri cilindrična uzorka promjera 100 mm i visine 50 mm. Ispitivanja su provedena pri starosti betona od 28 i 90 dana.

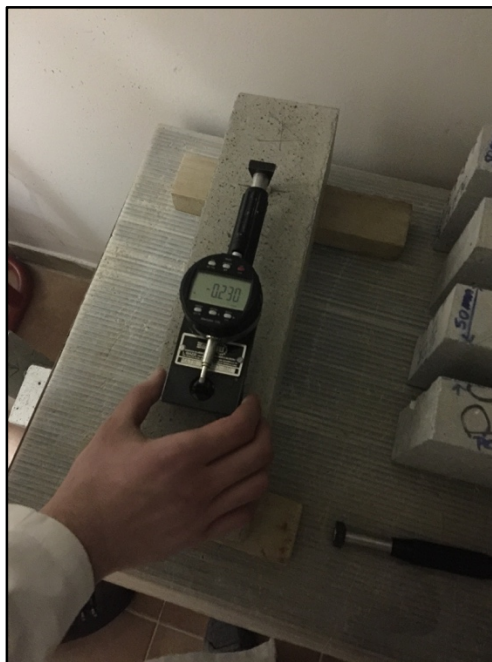
4.4.4. Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri tlaku

Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri tlaku ispituje se prema normi HRN EN 12390-13:2013 na uzorcima u obliku valjka dimenzija $\varnothing=150\text{mm}$ i $h=300\text{ mm}$. Ispitivanje se vrši pri starosti betona od 28 dana. Uzorci se izlažu djelovanju tlačne sile u iznosu $\frac{f_c}{3}$, te se pomoću ekstenziometra mjeri deformacija uzoraka na dvije nasuprotne izvodnice valjka.

5. REZULTATI ISPITIVANJA OČVRSLOG BEONA

5.1. Skupljanje betona

Mjerenja skupljanja je provedeno kao što je prikazano na *slici 8*. Dobiveni rezultati ispitivanja skupljanja betona prikazani su u *tablici 12. i na slici 9.*, koji prikazuju promjene deformacije betona u vremenu. Relativna vlažnost zraka prilikom mjerenja skupljanja betona bila je 50%.

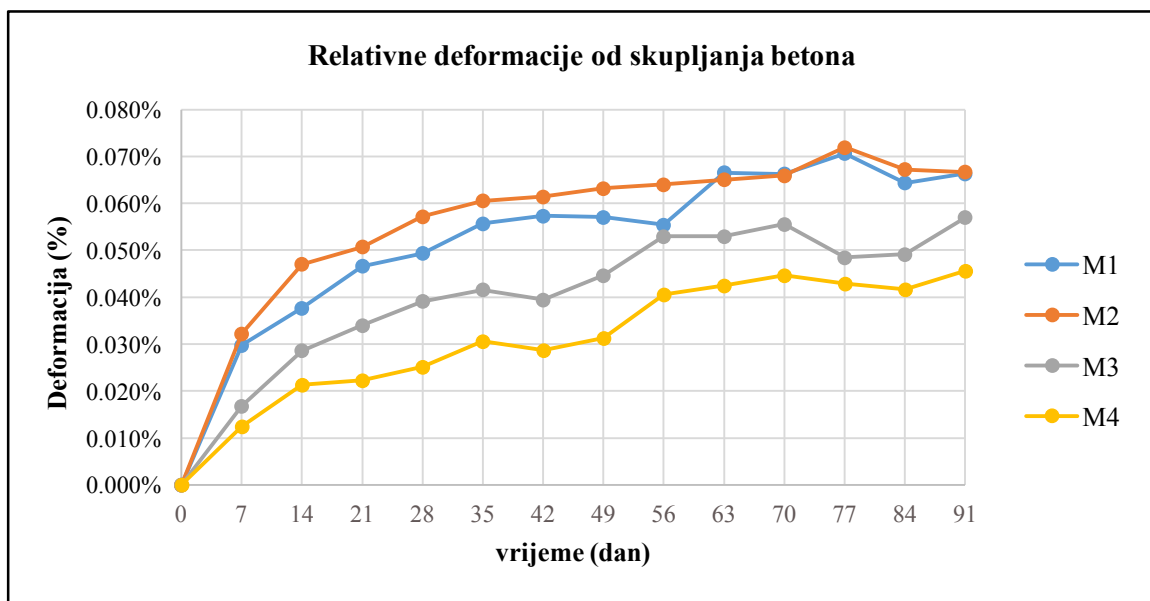


Slika 8. Mjerenje deformacije od skupljanja betona

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 12. Rezultati mjerenja deformacija betonskih uzoraka deformacije

M1		M2		M3		M4	
dan	Promjena deformacije	dan	Promjena deformacije	dan	Promjena deformacije	dan	Promjena deformacije
0	0,000%	0	0,000%	0	0,000%	0	0,000%
7	0,030%	7	0,032%	7	0,017%	7	0,013%
14	0,038%	14	0,047%	14	0,029%	14	0,021%
21	0,047%	21	0,051%	21	0,034%	21	0,022%
28	0,049%	28	0,057%	28	0,039%	28	0,025%
35	0,056%	35	0,061%	35	0,042%	35	0,031%
42	0,057%	42	0,061%	42	0,039%	42	0,029%
49	0,057%	49	0,063%	49	0,045%	49	0,031%
56	0,055%	56	0,064%	56	0,053%	56	0,041%
63	0,067%	63	0,065%	63	0,053%	63	0,043%
70	0,066%	70	0,066%	70	0,056%	70	0,045%
77	0,071%	77	0,072%	77	0,048%	77	0,043%
84	0,064%	84	0,067%	84	0,049%	84	0,042%
91	0,066%	91	0,067%	91	0,057%	91	0,046%



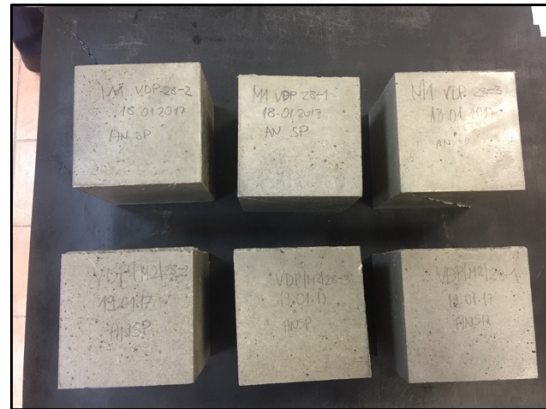
Slika 9. Grafički prikaz skupljanja betona

5.2. Vodopropusnost (VDP)

Na *slici 10.* i *slici 11.* prikazani su uzorci. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti nakon 28 i 90 dana prikazani su u *tablicama 13. do 20.* i na *slici 12.*



Slika 10. Čuvanje uzoraka



Slika 11. Uzorci M1 i M2



Slika 12. Rezultati ispitivanja vodopropunosti mješavine M3 nakon 28 dana

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 13. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti za mješavinu M1 nakon 28 dana

M1					
Datum početka ispitivanja:		18.02.17.			
Datum završetka ispitivanja:		21.02.17.			
Oznaka uzorka	masa prije ispitivanja (g)	Dimenzije			Najveća visina prodora vode (mm)
		a	b	h	
M1-1	7854,80	150,08	150,76	150,51	19
M1-2	7789,20	151,73	150,30	150,75	19
M1-3	7862,70	150,30	150,85	151,22	17

Tablica 14. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti za mješavinu M2 nakon 28 dana

M2					
Datum početka ispitivanja:		21.02.17.			
Datum završetka ispitivanja:		24.02.17.			
Oznaka uzorka	masa prije ispitivanja (g)	Dimenzije			Najveća visina prodora vode (mm)
		a	b	h	
M2-1	7768,00	150,20	151,26	151,35	12
M2-2	7876,20	149,89	150,14	152,55	12
M2-3	7832,50	150,55	149,98	151,65	14

Tablica 15. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti za mješavinu M3 nakon 28 dana

M3					
Datum početka ispitivanja:		24.02.17.			
Datum završetka ispitivanja:		27.02.17.			
Oznaka uzorka	masa prije ispitivanja (g)	Dimenzije			Najveća visina prodora vode (mm)
		a	b	h	
M3-1	8087,90	150,15	150,70	152,50	16
M3-2	8060,00	150,35	150,65	151,53	11
M3-3	8108,40	150,31	150,44	150,86	11

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 16. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti za mješavinu M4 nakon 28 dana

M4					
Datum početka ispitivanja:		27.02.17.			
Datum završetka ispitivanja:		02.03.17.			
Oznaka uzorka	masa prije ispitivanja (g)	Dimenzije			Najveća visina prodora vode (mm)
		a	b	h	
M4-1	8085,80	150,17	150,59	151,50	13
M4-2	8109,00	150,80	150,80	150,40	12
M4-3	8035,40	149,92	149,92	150,91	13

Tablica 17. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti za mješavinu M1 nakon 90 dana

M1					
Datum početka ispitivanja:		12.04.17.			
Datum završetka ispitivanja:		15.04.17.			
Oznaka uzorka	masa prije ispitivanja (g)	Dimenzije			Najveća visina prodora vode (mm)
		a	b	h	
M1-1	7854,00	150,94	150,14	151,47	19
M1-2	7946,10	150,03	150,90	152,60	14
M1-3	7817,70	150,01	150,45	150,19	19

Tablica 18. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti za mješavinu M2 nakon 90 dana

M2					
Datum početka ispitivanja:		15.04.17.			
Datum završetka ispitivanja:		18.04.17.			
Oznaka uzorka	masa prije ispitivanja (g)	Dimenzije			Najveća visina prodora vode (mm)
		a	b	h	
M2-1	7848,20	150,12	150,01	150,29	16
M2-2	7899,00	150,44	150,11	150,96	16
M2-3	7896,00	150,00	150,96	150,84	17

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 19. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti za mješavinu M3 nakon 90 dana

M3					
Datum početka ispitivanja:		18.04.17.			
Datum završetka ispitivanja:		21.04.17.			
Oznaka uzorka	masa prije ispitivanja (g)	Dimenzije			Najveća visina prodora vode (mm)
		a	b	h	
M3-1	8056,80	149,92	150,57	151,22	14
M3-2	8073,60	150,14	151,02	151,38	15
M3-3	8042,80	150,75	150,31	151,12	12

Tablica 20. rezultati ispitivanja vodopropusnosti za mješavinu M4 nakon 90 dana

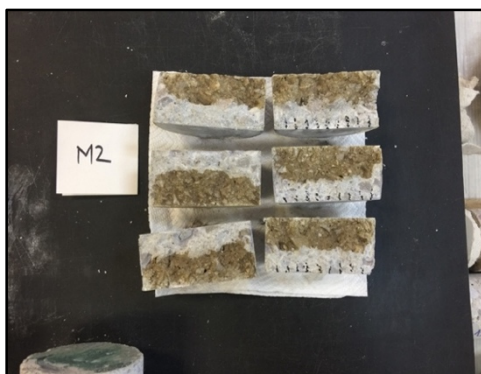
M4					
Datum početka ispitivanja:		21.04.17.			
Datum završetka ispitivanja:		24.04.17.			
Oznaka uzorka	masa prije ispitivanja (g)	Dimenzije			Najveća visina prodora vode (mm)
		a	b	h	
M4-1	8094,60	150,12	150,18	151,13	16
M4-2	8053,70	150,28	150,81	150,91	16
M4-3	8105,50	150,90	150,68	151,13	17

5.3. Difuzija kloridnih iona

Nakon izrade i kondicioniranja uzoraka kao što je prikazano na slici 13., izvršena su ispitivanja difuzije kloridnih iona čiji su rezultati prikazani u tablicama 21 do 24 i na slici 14.



Slika 13. Kondicioniranje uzoraka



Slika 14. Očitanje uzoraka

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 21. Rezultati ispitivanja difuzije kloridnih iona za mješavine M1 i M2 nakon 28 dana

	M1			M2		
Datum miješanja:	18.01.2017.			19.01.2017.		
Datum ispitivanja:	16.02.2017.			22.02.2017.		
oznaka uzorka:	M1-1	M1-2	M1-3	M2-1	M2-2	M2-3
L(mm):	49,70	50,64	49,60	50,30	50,25	50,70
T srednje (°C):	21,32	23,53	23,31	20,86	22,92	22,48
U(V):	20	20	20	20	20	20
trajanje (h):	24	24	24	24	24	24
D Srednja Vrijednost (mm):	17,07	27,98	30,26	26,63	21,95	21,21
Dnssm (10-12 m²/s):	11,55	20,22	21,56	18,90	15,42	14,96
Dnssm srednja (10-12 m²/s):	17,78			16,43		

Tablica 22. Rezultati ispitivanja difuzije kloridnih iona za mješavine M3 i M4 nakon 28 dana

	M3			M4		
Datum miješanja:	26.01.2017.			26.01.2017.		
Datum ispitivanja:	27.02.2017.			28.02.2017.		
oznaka uzorka:	M3-1	M3-2	M3-3	M4-1	M4-2	M4-3
L(mm):	50,40	49,51	50,44	49,80	49,60	50,50
T srednje (°C):	21,73	23,63	23,22	20,86	22,80	22,19
U(V):	20	20	20	20	20	20
trajanje (h):	24	24	24	24	24	24
D Srednja Vrijednost (mm):	21,93	26,48	27,32	16,57	18,74	16,43
Dnssm (10-12 m²/s):	15,39	18,67	19,62	11,18	12,82	11,26
Dnssm srednja (10-12 m²/s):	17,89			11,75		

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 23. Rezultati ispitivanja difuzije kloridnih iona za mješavine M1 i M2 nakon 90 dana

	M1			M2		
Datum miješanja:	18.01.2017.			19.01.2017.		
Datum ispitivanja:	14.04.2017.			18.04.2017.		
oznaka uzorka:	M1-1	M1-2	M1-3	M2-1	M2-2	M2-3
L(mm):	51,15	50,9	51,1	51,08	51,38	51,17
T srednje (°C):	25,02	24,82	24,72	24,42	24,73	24,93
U(V):	30	30	30	30	30	20
trajanje (h):	24	24	24	24	24	24
D Srednja Vrijednost (mm):	21,3	25,43	30,18	25,48	29,29	28,61
Dnssm (10-12 m²/s):	10,16	12,20	14,68	12,26	14,30	21,01
Dnssm srednja (10-12 m²/s):	12,35			15,85		

Tablica 24. Rezultati ispitivanja difuzije kloridnih iona za mješavine M3 i M4 nakon 90 dana

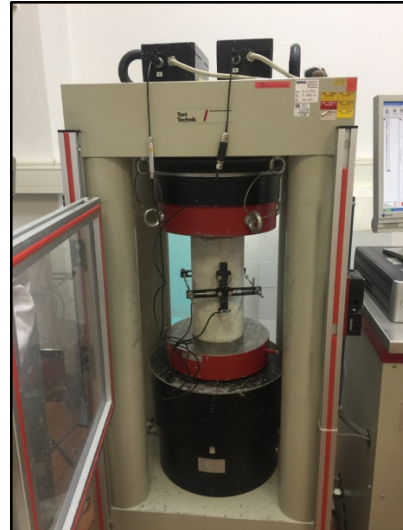
	M3			M4		
Datum miješanja:	26.01.2017.			26.01.2017.		
Datum ispitivanja:	19.04.2017.			20.04.2017.		
oznaka uzorka:	M3-1	M3-2	M3-3	M4-1	M4-2	M4-3
L(mm):	50,6	51,05	50,85	50,45	50,65	51,25
T srednje (°C):	24,23	23,42	24,31	24,08	23,89	23,44
U(V):	30	30	30	30	30	30
trajanje (h):	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
D Srednja Vrijednost (mm):	30,05	26,99	28,92	23,34	24,69	23,52
Dnssm (10-12 m²/s):	14,46	12,98	13,95	11,02	11,74	11,26
Dnssm srednja (10-12 m²/s):	13,80			11,34		

5.4. Statički modul elastičnosti

Ispitivanjem statičkog modula elastičnosti provedeno je na uzorcima sa *slike 15*. pomoću uređaja prikazanim na *slici 16*. Rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti prikazani su u *tablici 25*.



Slika 15. Uzorak za E_{st}



Slika 16. Ispitivanje E_{st}

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 25. Rezultati ispitivanja statičkog modul elastičnosti za mješavine u starosti 28 dana

Oznaka uzorka	Dimenzije		1/3 $\sigma(\max)$ [N/mm]	ε srednja
	d (mm)	h (mm)		
M1	149,42	298,40	9,50	30625,29
	149,42	297,77		30168,64
	149,56	298,22		28401,10
E₁ [MPa]				29731,67
M2	149,40	297,80	8,39	30715,66
	149,40	297,50		31380,53
	149,30	297,30		30930,77
E₂ [MPa]				31008,98
M3	149,30	298,10	8,87	27582,47
	149,41	297,83		30587,36
	149,43	297,67		27102,24
E₃ [MPa]:				28424,02
M4	149,35	297,13	8,27	31166,63
	149,31	296,60		31495,92
	149,44	297,47		28712,10
E₄ [MPa]				30458,22

6. RASPRAVA

6.1. Ispitivanje svojstava u svježem stanju

U *tablici 26.* dani su rezultati ispitivanja svojstava betona u svježem stanju, koji obuhvaćaju konzistenciju, pore, gustoću i temperaturu. Iz rezultata se može zaključiti da se povećanjem udjela biopepela drastično smanjuje obradljivost, jer je za istu obradljivost bilo potrebno dodati puno više superplastifikatora, što za M4 dovodi do 5 puta veće količine aditiva nego u referentnoj mješavini. Uzrok ovakvih rezultata vjerojatno je grublja struktura čestica biopepela. Poroznost uzoraka s biopepelom padala je proporcionalno s povećanjem udjela, te je u mješavini M4 iznosila skoro duplo manje nego u M1. Temperature u mješavinama M3 i M4 su povećane za 5-6°C što ukazuje da vjerojatno dolazi do ubrzanja vezanja (kemijskih reakcija), što može biti i razlog smanjenju obradivosti.

Tablica 26. Rezultati ispitivanja svojstva betona u svježem stanju

	M1	M2	M3	M4
SLIJEGANJE (mm):	170,00	200,00	120,00	100,00
PORE (%):	6,50%	5,80%	4,60%	3,60%
ρ (kg/m³):	2300,00	2316,60	2358,00	2369,00
TEMPERATURA (°C):	20,10	19,90	25,70	26,30

6.2. Skupljanje betona

Rezultati prikazani u *tablici 12.* i *na slici 9.* pokazuju da je skupljanje uzoraka s udjelom biopepela od 5% malo veće od mješavine M1, ali za mješavine M3 i M4 znatno opada. Za M4 deformacije 28. dana ispitivanja manje su u prosjeku za 50% od referentnih, što govori da su rezultati za M4 najbolji u našem ispitivanju. U kasnijem razdoblju ispitivanja proces skupljanja se usporio, ali odnosi između razlika rezultata za određene mješavine nisu se previše mijenjali. Mješavina M4 i dalje je imala rezultate deformacije skupljanja za 37% manje od referentne, a slijedi je M3 koja ima deformacije skupljanja za 27% manje od M1. Uzorak M2 nakon 90 dana imao je iste rezultate deformacije skupljanja kao i referentna

mješavina. Iz ovoga se može zaključiti da povećanjem udjela biopepela u betonu od 10 i više posto, dolazi do značajnog smanjenja deformacije skupljanja.

6.3. Vodopropusnost

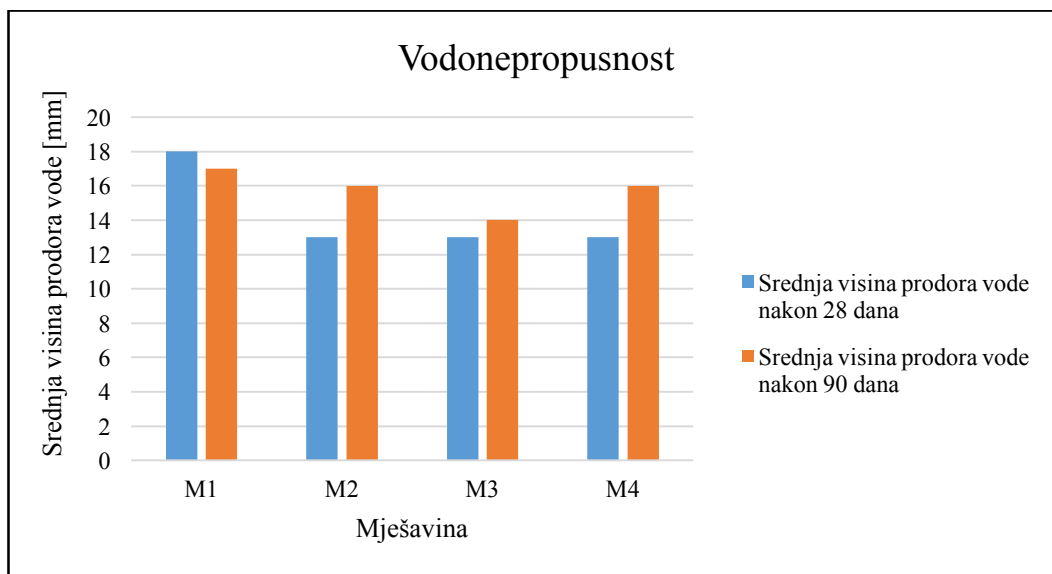
Rezultati ispitivanja vodopropusnosti pri starosti betona od 28 dana prikazani su u *tablici 27*. Nakon 28 dana mješavina M1 pokazala se najlošijem s najvećom dubinom prodora 18 mm što je svrstava u razred VDP2. Sve mješavine s biopepelom dale su bolji rezultat nego referentna, koji iznosi 13mm i stavlja ih u viši razred VDP3. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti pri starosti betona od 90 dana prikazani su u *tablici 28.*, a usporedba rezultata VDPa za 28. i 90. dan starosti prikazana je na dijagramu na *slici 17*. Kao i nakon 28 dana referentna mješavina dala je najlošije rezultate, s dubinom prodiranja od 18 mm čime je svrstavamo u razred VDP2. Promjena vodopropusnosti kod M1 na 90 dana je zanemariva u odnosu na ispitivanja provedena pri starosti od 28 dana, ali sve mješavine s biopepelom su dale lošije rezultate. Zbog toga mješavine M2 i M4 nakon 90 dana padaju u razred VDP2 s dubinom prodiranja 16mm, a M3 ostaje kao najbolja u razredu VDP3. Velik utjecaj na vodopropusnost betona ima poroznost, čijim se smanjenjem i vodopropusnost smanjuje, što je jedan od glavnih razloga boljih rezultata za mješavine M3 i M4 jer imaju znatno manju poroznost od referentne. Pogoršanje na uzorcima M2, M3 i M4 s vremenom varira između 8 i 23%, pa iako i tada daju bolje rezultate od referentne mješavine, ovakvi rezultati govore da su nužna dodatna i opširnija istraživanja ovog svojstva. Smanjenje dubine prodora vode ekvivalentno je povećanju vodonepropusnosti.

Tablica 27. Rezultati mjerenja visine prodora vode u uzorke nakon 28 dana

Mješavina	M1	M2	M3	M4
Najveća visina prodora vode (mm)	18	13	13	13

Tablica 28. Rezultati mjerenja visine prodora vode u uzorke nakon 90 dana

Mješavina	M1	M2	M3	M4
Najveća visina prodora vode (mm)	17	16	14	16



Slika 17. Dijagram usporedbe VDPu starosti betona 28 i 90 dana

6.4. Difuzija kloridnih iona

U tablicama 29. i 30. i na slici 18. prikazane su srednje vrijednosti koeficijenta difuzije kloridnih iona s ocjenama otpornosti uzoraka za sve mješavine. Nakon 28 dana rezultati pokazuju da mješavine M1, M2 i M3 imaju sličan D_{nssm} što ih svrstava u razred betona loše otpornosti prodora klorida, jer im je koeficijent veći od $16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Najbolji rezultat daje M4 s 15%-tnim udjelom biopepela, čiji D_{nssm} u iznosu od $11,75 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ upada u razred srednje otpornosti betona prodoru klorida koji obuhvaća vrijednosti između $8\text{-}16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. U drugom ispitivanju difuzije klorida nakon 90 dana, svi su se uzorci pokazali boljima nego nakon 28 dana. Ovaj put su sve mješavine u razredu srednje otpornosti prema difuziji klorida, a najlošiji rezultate daje uzorak M2. Referentna mješavina imala je za 30% bolji rezultat pri 90 dana nego pri 28 dana što je najveći zabilježeni napredak u ispitivanju. Mješavine M1, M3 i M4 imaju otprilike sličan koeficijent difuzije kloridnih iona, iako M4 i dalje ima najbolji rezultat, dok M2 iskače s nešto lošijim rezultatom. Prateći trend poboljšanja otpornosti mješavina rezultati pokazuju da se većom količinom biopepela brže postiže veća otpornost prema difuziji klorida. Referentna mješavina ostvarila je između 28. i 90. dana napredak od 30%, dok je za mješavine s biopepelom taj napredak bio puno manji, a kod M4 koja i nakon 90 dana ima bolji rezultat, taj je napredak neznatan. Iz ovoga slijedi da bi se biopepeo mogao vrlo efikasno upotrijebiti u betonima koji su u ranoj fazi izloženi opterećenju kloridima, te tako poboljšati njihovu otpornost i trajnost.

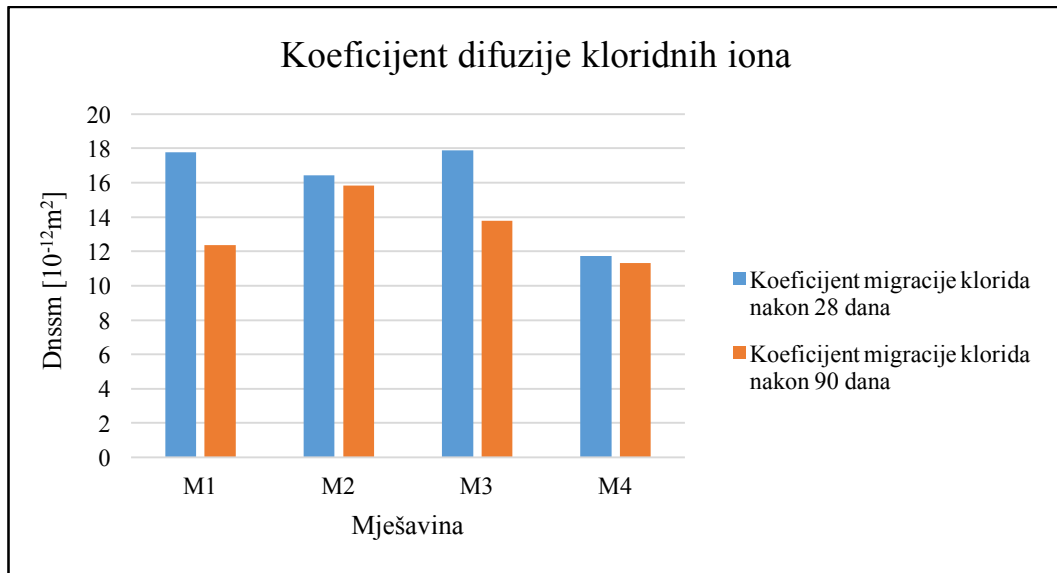
UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Tablica 29. Rezultati mjerenja difuzije kloridnih iona nakon 28 dana

Mješavina	M1	M2	M3	M4
Koeficijent migracije klorida, D_{nssm} [$10^{-12}m^2$]	17,78	16,43	17,89	11,75
Ocjena otpornosti prodoru klorida	Loša	Loša	Loša	Srednja

Tablica 30. Rezultati mjerenja difuzije kloridnih iona nakon 90 dana

Mješavina	M1	M2	M3	M4
Koeficijent migracije klorida, D_{nssm} [$10^{-12}m^2$]	12,35	15,85	13,8	11,34
Ocjena otpornosti prodoru klorida	Srednja	Srednja	Srednja	Srednja



Slika 18. Dijagram usporedbe difuzije kloridnih iona u 28 i 90 dana

6.5. Statički modul elastičnosti

U *tablici 31.* prikazane su vrijednosti statičkog modula elastičnosti za sve mješavine. Nakon 28 dana rezultati ispitivanja pokazuju da se statički modul elastičnosti vrlo malo razlikuje na uzorcima s biopepelom u odnosu na referentnu mješavinu. Najlošiji modul elastičnosti dobiven je na uzorku M3 i iznosi 28424,02 MPa, dok je najviša vrijednost izmjerena na mješavini M2 i iznosi 31008,98 MPa. Najveći utjecaj na promjenu modula elastičnosti u betonu ima agregat, a znajući da je u svim mješavinama korišten isti, to je ujedno i glavni razlog sličnih rezultata. Iz rezultata ispitivanja zaključujemo da udio biopepela u betonu ne utječe na promjenu dinamičkog modula elastičnosti betona.

Tablica 31. Rezultati mjerenja statičkog modula elastičnosti nakon 28 dana

Mješavina	M1	M2	M3	M4
Modul elastičnosti [N/mm ²]	29731,67	31008,98	28424,02	30458,22

6.6. Tlačna čvrstoća

Paralelno s mjerenjem statičkog modula elastičnosti izmjerena je tlačna čvrstoća. Iz *tablice 32.* vidi se da se dodavanjem biopepela betonu smanjuje tlačna čvrstoća. Referentna je mješavina očekivano dala najbolje rezultate, a mješavina M4 s najvećim udiom biopepela, čija je tlačna čvrstoća za 20% manja od referentne, najlošije. Iz ovih se rezultata zaključuje da količina biopepela u betonu od 10% i više negativno utječe na tlačnu čvrstoću betona.

Tablica 32. Rezultati mjerenja tlačne čvrstoće nakon 28 dana

Mješavina	M1	M2	M3	M4
Tlačna čvrstoća, σ [N/mm ²]	34,44	34,18	28,77	27,68

7. ZAKLJUČCI

U teorijskom dijelu ovoga rada opisana su dosadašnja saznanja o svojstvima biopepela i njegovom utjecaju na beton. U eksperimentalnom dijelu ispitana su trajnosna i mehanička svojstva u svježem i očvrslom stanju cementnog kompozita s dodatkom biopepela. Izrađene su ukupno četiri mješavine; jedna referentna i tri s različitim udjelom biopepela od 5, 10 i 15%.

Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti sljedeće:

- Porastom udjela biopepela u betonu, obradljivost se značajno smanjuje te se povećava potreba za superplastifikatorom, što može biti uzrokovano i povećanjem temperature betona kad je dodana veća količina biopepela .
- Poroznost betona s biopepelom smanjuje se u odnosu na referentnu mješavinu
- Biopepeo pozitivno utječe na skupljanje betona, što u mješavinama s 10% i 15% biopepela rezultira 27% i 37% boljim rezultatima u odnosu na M1.
- Vodonepropusnost betona s biopepelom bolja je od komparativne mješavine bez dodataka, ali se s vremenom pogoršava, te zahtijeva dodatna istraživanja na ovom polju.
- Otpornost mješavina M2, M3 i M4 prema difuziji kloridnih iona vrlo brzo postiže svoj maksimum, te je na 28 dana starosti znatno bolja od mješavine M1. Između 28. i 90. dana mješavine s biopepelom pokazuju daljni rast otpornosti, ali u manjoj mjeri nego beton s čistim cementom. Time se može postići prednost primjene biopepela kod betona koji su u ranoj starosti opterećeni kloridima iz okoliša.
- Statički modul elastičnosti ne mijenja se s obzirom na porast udjela biopepela u betonu.
- Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće obrnuto su proporcionalni porastu udjela biopepela, te su za M4 čak 20% lošiji nego za M1. Što znači da biopepeo u količini većoj od 10% u betonu ima negativan utjecaj na tlačnu čvrstoću betona.

Nakon svih provedenih istraživanja zaključak je da se biopepeo može koristiti kao zamjena za dio cementa u betonu. Valja naglasiti da se pritom u projektiranju sastava betona treba paziti na razrede tlačne čvrstoće koji se mogu postići koristeći biopepeo.

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

Trajnosna svojstva ovog betona slična su kao i kod običnog betona s portland cementom, pa čak i malo bolja. Značajna prednost je u tome što se brže postižu veće vrijednosti što mu daje dodatni plus i otvara druge mogućnosti uporabe, osobito što se tiče područja sa specifičnim uvjetima. Ovakav beton je i ekološki prihvatljiviji jer zbrinjava štetan nusprodukt iz elektrana na biomasu. Uz to smanjuje se upotreba cementa. Naime, emisija CO₂ kao rezultat proizvodnje cementa iznosi 10% ukupne svjetske emisije. Zbog toga se javlja i potreba za zamjenskim materijalima.

Kao što je istaknuto na samom početku ovoga rada izazovi dvadeset prvog stoljeća usko su vezani uz ekologiju. Sve se više koristimo obnovljivim izvorima energije. Ipak, takva nastojanja su paradoksalna ukoliko nusprodukti procesa nanose štetu i poništavaju prvotni efekt. Idealan primjer toga je upravo iskorištavanje biomase koje ima jak potencijal u Republici Hrvatskoj. Ipak, nusprodukt, biopepeo, tretira se kao otpad i najčešće nekontrolirano odlaže u prirodi. Uporabom betona s biopepelom riješio bi se taj problem, a istovremeno bi se smanjila upotreba cementa kao ekološki diskutabilnog materijala. Ipak, prije šire upotrebe betona s biopepelom nužno je provesti dodatna istraživanja s naglaskom na kemijske procese u takvim betonima.

8. ZAHVALE

Zahvaljujemo našoj mentorici, prof.dr.sc. Ivani Banjad Pečur koja nas je od samog početka ideje stručno i savjesno vodila kroz cijeli ovaj projekt te svojim ogromnim iskustvom i znanjem usmjeravala kroz sve segmente projekta.

Velikodušno se zahvaljujemo laborantima Zvezdani Matuzić i Miri Matuziću koji su nam nesebično pomagali i bili nam podrška u svakom trenutku projekta.

9. POPIS LITERATURE

- [1] <http://marjan.fesb.hr/~fbarbir/PDFs%20Obnovljivi%20izvori/Dodatni%20materijali%20i%20predavanja/Biomasa%20Loncar%20CTT.pdf>, Pristupljeno: 26.02.17.
- [2] <https://dr.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A1028/datastream/PDF/view>, Pristupljeno: 26.02.17.
- [3] <http://portal.hrsume.hr/index.php/hr/ume/opcenito/sumeuhrv> (preuzeto: 26.02.17)
- [4] Hrboka, L.: Elektrane na biomasu (DIPLOMSKI RAD)
- [5] Biomass Industrial Innovative Projects, biomassproject.blogspot.com; Pristupljeno: 26.02.17.
- [6] Biomass on emaze, www.emaze.com; Pristupljeno: 26.02.17.
- [7] Merkblatt: Verwertung und Beseitigung von Holzaschen
- [8] Garcia, M.L., Sousa-Coutinhob, J.: Strength and durability of cement with forest waste bottom ash, *Construction and Building Materials*, 41 (2013) 4, pp. 897–910.
- [9] Raguzin, I.: Model analize troškova i dobiti uporabe biomase u proizvodnji električne energije (MAGISTARSKI RAD)
- [10] Eijk van, R. J.: Options for Increased Utilization of Ash from Biomass Combustion and co-firing, KEMA, 2012.
- [11] Separati s predavanja iz kolegija Građiva, Građevinski fakultet, Zagreb, 2017
- [12] Bjegović D., Štirmer N.: Teorija i tehnologija betona
- [13] Wang, S., Miller, A., Llamazos, E., Fonseca, F., Baxter, L.: *Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties*
- [14] F.F. Udoeyo, H. Inyang, D.T. Young, E.E. Oparadu: Potential of wood ash waste as an additive in concrete
- [15] Shuangzhen Wang: Biomass and Coal Fly Ash in Concrete: Strength, Durability, Microstructure, Quantitative Kinetics of Pozzolanic Reaction and Alkali Silica Reaction Investigations
- [16] Naik TR, Kraus RN, Siddique R.: Demonstration of manufacturing technology for concrete and CLSM utilizing wood ash from Wisconsin, 2002
- [17] Matijaščić D.: Primjena biopepela u cementnom kompozitu (DIPLOMSKI RAD)
- [18] Alagušić, M., Lavriv, F.: Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućih betona (rad za rektorovu nagradu 2009/10)

10. SAŽETAK

Saša Pejić, Anthony Ninčević

Utjecaj biopepela na svojstva ekološkog betona

Sve veća potreba za očuvanjem okoliša i uporabom obnovljivih izvora energije kao primarni cilj današnjih istraživanja postavlja potragu za novim ekološki prihvatljivijim materijalima. Biomasa je obnovljivi izvor energije s velikim potencijalom na području Republike Hrvatske. No, tijekom procesa kojim se dobiva energija iz biomase pojavljuje se nusprodukt - biopepeo. Neadekvatno zbrinjavanje biopepela jest kontraefektivno, odnosno nije u skladu s očuvanjem prirode. S druge strane, emisija CO₂ tijekom proizvodnje cementa čini desetinu ukupne svjetske emisije. Ovo istraživanje stoga se bavi istovremenim rješavanjem ova dva problema; upotreba biopepela kao djelomične zamjene cementa u betonu. U teorijskom dijelu ovoga rada opisana su dosadašnja saznanja o svojstvima biopepela i njegovom utjecaju na beton. U eksperimentalnom dijelu su ispitana trajnosna, deformacijska i mehanička svojstva svježeg i očvrsnulog betona u kojem je 5, 10 i 15% cementa zamijenjeno biopepelom.

Rad se bazira na ispitivanju trajnosnih, deformacijskih i mehaničkih svojstava betona koja uključuju skupljanje, vodonepropusnost, otpornost prema difuziji klorida, određivanje dinamičkog modula elastičnosti, te tlačnu čvrstoću. Utvrđeno je da biopepeo na tlačnu čvrstoću utječe negativno, a na ostale ispitivane parametre ima pozitivan ili neutralan učinak. Na temelju rezultata dane su preporuke za primjenu biopepela i daljnja istraživanja.

Ključne riječi:

biopepeo, beton, trajnosna svojstva, obnovljivi izvori energije, biomasa

11. SUMMARY

Saša Pejić, Anthony Ninčević

The impact of bioash on the properties of eco concrete

The growing global movement directed towards preserving the environment and converting from the traditional ways of creating and storing energy to renewable, more environmentally friendly is at its peak. The primary goal of our research is to dig into the great potential of biomass power plants Croatia has to offer, as an alternative way of producing energy. Even though Biomass power plants are a clean way of producing energy, the process is not perfect. The process is creating a byproduct called bioash, a fine powder which is creating problems as there are no means of proper disposal of it. Without proper disposal of the material, it can cause a lot of damages to the population surrounding the power plants. Another problem we encounter today is the high amounts of CO₂ cement manufacturing creates. The cement industry is accountable for 10% of the world's total CO₂ emission. The goal of our research is to lower the impact of both the problems mentioned simultaneously. By testing concrete which uses bioash as a partial replacement for cement our plan is to dispose of the bioash in a proper way, both suitable for the people affected by the pollution and the investors looking for ways to lower costs of concrete. By partially replacing cement, we lower the demand for cement thus driving the production levels of CO₂ levels lower and create a market for new alternative materials, mostly waste to be implemented into construction. In the theoretical part of this paper, we presented the current knowledge of the properties of bioash and its impact on concrete. In the experimental part, we tested and presented the results of the durability and mechanical properties of fresh and hardened concrete. The tests were run on concrete with a partial bioash replacement of 5%, 10% and 15% of the overall mass of cement. All the results were compared to a referent mixture of concrete cement with no bioash addition.

UTJECAJ BIOPEPELA NA SVOJSTVA EKOLOŠKOG BETONA

The paper is based on testing the durability and mechanical properties of concrete, which includes testing the shrinkage, waterproofness, chloride diffusion resistance, static modulus of elasticity, and the compressive strength of concrete. The test results show that the bioash has a minor negative impact only on the compressive strength of concrete. All the other results showed a positive or neutral impact on the properties tested. Based on the results, we recommend further research to be conducted in order to see how big of an impact bioash can make as a partial replacement to cement in construction concrete.

Key words: Bioash, concrete, durability, renewable energy sources, biomass