

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Iva Ereš

*Mikrostruktura betona s pepelom drvene biomase pri
djelovanju smrzavanja i odmrzavanja*

Zagreb, 2019.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom prof. dr. sc. Nine Štirmer i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

Rad je nastao u okviru istraživačkog projekta IP-06-2016-7701 „Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću - TAREC²“ koji financira Hrvatska zaklada za znanost.

Sadržaj:

1. UVOD	1
2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA	4
3. USPOREDBA PEPELA DRVNE BIOMASE I CEMENTA.....	5
3.1. Biomasa	5
3.2. Pepeo drvne biomase.....	7
3.2.1. Tehnologije u energanama na drvenu biomasu i vrste PDB-a.....	7
3.3. Cement.....	10
3.3.1. Proces proizvodnje cementa.....	11
3.4. Fizikalna i kemijska svojstva cementa i PDB-a	12
3.4.1. Gustoća	12
3.4.2. Veličina, oblik i poroznost čestica.....	12
3.4.3. Kemijska svojstva.....	14
4. BETON.....	16
4.1. Sastav	16
4.2. Otpornost betona na djelovanje smrzavanja	17
4.3. Tlačna čvrstoća	21
5. EKSPERIMENTALNI DIO	23
5.1. Materijali	23
5.2. Ispitivanja betona u svježem stanju.....	30
5.2.1. Određivanje gustoće	31
5.2.2. Određivanje temperature.....	32
5.2.3. Ispitivanje sadržaja pora.....	33
5.2.4. Određivanje konzistencije betona slijeganjem	35
5.3. Ispitivanja betona u očvrslom stanju	37
5.3.1. Otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje.....	37
5.3.2. Tlačna čvrstoća.....	48
5.3.3. Dubina prodora vode	51
5.3.4. Faktor razmaka pora metodom Rapid Air.....	53
6. ZAKLJUČAK.....	57
7. ZAHVALE	59
8. POPIS LITERATURE	60
9. SAŽETAK.....	65
10. SUMMARY.....	66

1. UVOD

Biomasa je jedan od obnovljivih izvora energije i predstavlja dobru alternativu fosilnim gorivima. Propisi Europske unije koji se odnose na primjenu obnovljivih izvora energije razlog su za traženje racionalnijeg korištenja obnovljivih izvora energije [1]. Općenito biomasa je organska tvar nastala iz živih organizama. Koristi se kao izvor energije direktno (sagorijevanjem za proizvodnju topline) ili posredno (pretvaranjem u različite oblike biogoriva). Najveći izvor biomase je drvo [2]. Jedan od problema povezanih s izgaranjem biomase je nastanak pepela, otpada koji nastaje prilikom izgaranja. Trenutno se većina pepela drvene biomase odlaže na odlagalištima ili se reciklira na poljoprivrednim poljima ili šumama [3]. Veliki problem u svijetu predstavlja otpad nastao ljudskim djelovanjem, a tek zadnjih nekoliko godina adekvatno zbrinjavanje otpada dobiva na značenju. Trenutno se oko 70 % pepela odlaže, oko 20 % pepela se nastoji primijeniti u poljoprivredi, a 10 % se koristi za neku drugu namjenu. Odlaganje uzrokuje velike financijske i materijalne gubitke, ali ujedno i opterećenje za okoliš. [4]

Pepeo od drvene biomase (PDB) je kompleksna mješavina organskog i anorganskog sastava tj. neizgorivi kruti ostatak koji nastaje nakon potpunog izgaranja drvene biomase. Takva vrsta pepela proizvodi se u energanama na drvenu biomasu. Energane predstavljaju jedan od značajnijih obnovljivih izvora energije u Europskoj uniji i pretpostavlja se da će imati važnu ulogu za europske planove za korištenje barem 20 % energije iz obnovljivih izvora do 2020. godine i do 2030. godine najmanje 27 % potrošene energije treba biti generirano iz obnovljivih izvora. Republika Hrvatska ima značajan potencijal iskorištavanja drvene biomase iz procesa gospodarenja šuma i industrije prerade drva. Slika 1. prikazuje lokacije postrojenja u Republici Hrvatskoj koja koriste biomasu kao gorivo, a puštena su u pogon ili će to biti u budućnosti [4, 5].



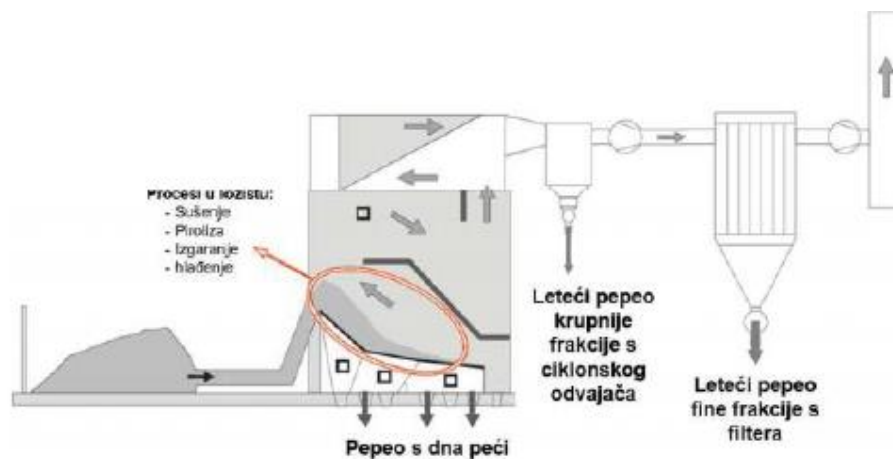
Slika 1. Postrojenja na drvnu biomasu [6]

Ideja korištenja PDB-a u betonu potaknuta je uporabom raznih mineralnih dodataka poput letećeg pepela, granulirane zgure visokih peći, silicijske prašine, metakaolina i sl. u betonu i cementu. Mineralni dodaci mogu djelovati na tri načina: učinkom punila, učinkom nukleusa i pucolanskom reakcijom. Mineralni dodaci koji djeluju kao punilo imaju veličine čestica manje nego čestice cementa i dodaju se betonu radi poboljšanja određenih svojstava poput poboljšanja mikrostrukture, povećanja čvrstoće betona i smanjenja količine cementa bez gubitka čvrstoće betona. Mineralni dodatak leteći pepeo koristi se kao dodatak cementu još od 1930. godine zbog doprinosa svojstvima betona svojim hidrauličnim i/ili pucolanskim djelovanjima. Pucolan se definira kao silikatni i aluminijski materijal koji će uz prisutnost vlage kemijski reagirati s kalcijevim hidroksidom pri normalnim temperaturama i oblikovati spojeve koji imaju cementna svojstva. Kod letećih pepela ističu se dvije karakteristike: veličina čestica i sadržaj SiO_2 i Al_2O_3 . Prema američkoj normi ASTM C 618 leteći pepeli su podijeljeni na klasu C s visokim sadržajem CaO između 15 i 40 mas. %, i klase F s niskim sadržajem CaO obično manjim od 5 mas. %. Pepeo drvene biomase ima visok udio CaO i značajan sadržaj SiO_2 i Al_2O_3 , što upućuje na mogućnost primjene ovog materijala kao pucolanskog i/ili hidrauličnog [7,8,9].

Prema normi HRN EN 450-1:2013 koja se odnosi na leteći pepeo iz termoelektrana na ugljen kemijska svojstva letećeg pepela su

- gubitak žarenjem - kod kojeg je svrha ograničiti ostatak neizgorenog ugljika u letećem pepelu. Postoje tri klase: klasa A kod koje gubitak žarenjem ne smije biti veći od 5 % mase, klasa B gubitak žarenjem ne veći od 7 % i klasa C ne veći od 9%.
- sumporov oksid SO_3 - najviše 3 % mase.
- silicijev dioksid SiO_2 - najmanje 25 % mase
- suma SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 najmanje 70 %.
- MgO najviše 4 % mase
- P_2O_5 najviše 5 % mase [10].

Pepeo drvne biomase (PDB) dobiva se izgaranjem drva u energanama na drvnu biomasu prikazanoj na slici 2. i to se može povezati sa proizvodnjom letećeg pepela iz ugljena, koji je fosilizirano drvo [11]. Leteći pepeo nastaje kao nusprodukt u termoelektrani na ugljen. Ugljen ulazi u peć visoke temperature oko 1000 °C – 1600 °C i hlapljive supstance i organski sastojci sagore, a mineralna onečišćenja poput kvarca, gline i sl. zaostaju kao nesagoreni ostatak. Veći dio nesagorenog ostatka transportira se u zonu niže temperature i solidificira u sferične čestice i zatim je povučen sagorjelim plinovima [8].



Slika 2. Energana na drvnu biomasu [4]

Industrija cementa jedna je od zamjetnijih zagađivača zraka i okoliša, jer stvara oko 5% ukupne emisije CO_2 . Cilj Europske unije do 2030. godine je smanjenje emisije CO_2 za 40 % [5]. Inovativni sastav betonskih mješavina može doprinijeti smanjenju štetnih plinova, ali i održivoj proizvodnji cementa. Dodavanjem PDB-a umjesto dijela cementa mogla bi se smanjiti godišnja proizvodnja cementa i tako štititi okoliš smanjujući efekt staklenika. PDB ima veliki potencijal korištenja u građevinskoj industriji.

Na osnovi dostupnih istraživanja [11 - 15] vidljivo je da neke vrste PDB-a [12, 14] zadovoljavaju sumu elemenata SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 prema normi HRN EN 450-1:2013 i ta vrsta PDB-a smatra se pucolanom, a ostali [11, 13, 15] to ne zadovoljavaju i ne mogu se smatrati pucolanima.

Ovim istraživanjem će se ispitati utjecaj PDB-a na promjenu mikrostrukture betona pri djelovanju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja kao bitnog svojstva za sve vrste betona namijenjene za primjenu u vanjskom okolišu.

1. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

Beton je materijal koji se najviše koristi u građevinarstvu, te se za proizvodnju njegovih komponenti koriste velike količine prirodnih resursa. Posebice se to odnosi na cement. Industrija cementa ima veliki utrošak sirovine, veliki utrošak energije po jedinici sirovine i uslijed kemijskih reakcija tijekom procesa proizvodnje proizvodi se velika količina ugljičnog dioksida i stvara se efekt staklenika. Smatra se da je cementna industrija odgovorna za 5 – 7% globalne emisije CO_2 [7, 16].

Cilj istraživanja je ispitati mogućnosti korištenja PDB-a u betonu kao zamjene za dio cementa. Korištenjem PDB-a pridonosi se ekologiji i ekonomiji industrije betona, radi smanjenja emisije stakleničkih plinova i smanjenja utroška sirovina.

U ovom radu će se prikazati utjecaj PDB-a na svojstva betona u svježem stanju i to: konzistenciju, udio pora, gustoću i temperaturu, a u očvrnulom stanju: otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, tlačnu čvrstoću, vodopropusnost i faktor razmaka pora.

Specifični ciljevi rada su:

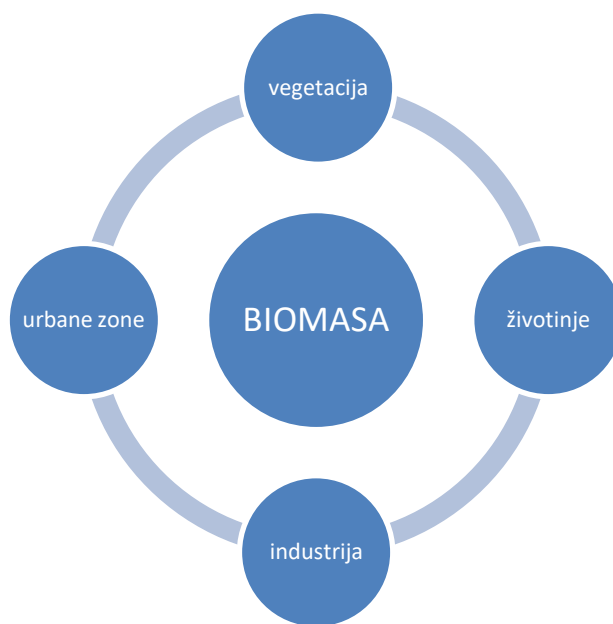
- proračunati sastav betona
- izraditi laboratorijske mješavine i napraviti ispitne uzorke
- odrediti tlačnu čvrstoću betona nakon 28 dana
- odrediti vodopropusnost uzoraka betona starih minimalno 28 dana

- odrediti utjecaj PDB-a na otpornost na smrzavanje-odmrzavanje nakon 28 ciklusa
- odrediti faktor razmaka pora metodom Rapid Air

3. USPOREDBA PEPELA DRVNE BIOMASE I CEMENTA

3.1. Biomasa

Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (NN 100/15) i Direktiva o obnovljivim izvorima energije (OIE) definiraju biomasu kao biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog podrijetla iz poljoprivrede (uključujući tvari biljnoga i životinjskoga podrijetla), šumarstva i srodnih proizvodnih djelatnosti, uključujući ribarstvo i akvakulturu, kao i biorazgradivi dio industrijskoga i komunalnoga otpada [17]. Na slici 3. prikazani su različiti izvori biomase.



Slika 3. Izvor biomase

Biomasa se odnosi na sve tvari biljnog ili životinjskog porijekla koje se mogu koristiti kao gorivo za proizvodnju energije. Energija iz biomase dolazi u čvrstom, tekućem i plinovitom stanju. Primjer čvrste biomase je ogrjevno drvo, peleti, drvna sječka, drvni otpad, slama i sl. Biomasa u tekućem obliku je biodizel, bioetanol, biometanol i plinovitom stanju : bioplin, plin iz rasplinjavanja biomase i deponijski plin. Biomasa je obnovljivi izvor energije [18].

Biomasa se dijeli na:

1. prirodnu biomasu-proizvodi se u prirodnim ekosustavima bez ljudske intervencije, uključuje otpad koji nastaje tijekom čišćenja šuma poput drva za ogrjev i grana.
2. ostatke biomase-dobivene iz otpada ili kao nusproizvod poljoprivrednih, šumarskih i stočarskih djelatnosti i sl. (ova vrsta industrije proizvodi kruti otpad poput piljevine, slame itd.)
3. energetske usjeve-to su šumarski ili poljoprivredni usjevi, koji imaju veliku otpornost na vanjska djelovanja [19].

Drvna biomasa predstavlja šumsku drvenu masu poput stabala, krošnja, grana i grančica. Drvna biomasa je jedan od najstarijih izvora energije, a ujedno i obnovljivi izvor. Sagorijevanjem drvne biomase emisija stakleničkih plinova je minimalna i zbog toga je korištenje drvne biomase dobro rješenje za smanjenje efekta staklenika [18].

Najčešći oblici drvne biomase kao energenta, koji nastaju od drvnih ostataka su:

- drvna sječa koja ima veliku primjenu u odnosu na bilo koji drugi oblik drvne biomase. Kod proizvodnje ne postoje ograničenja u smislu stanja, oblika i kvalitete drvnog ostatka iz kojeg se proizvodi. Drvna sječa je učinkovito gorivo, vrlo dostupno i jako povoljno, jer je proces proizvodnje jeftiniji u odnosu na ostala suvremena biogoriva. Koristi se u većim postrojenjima za proizvodnju toplinske i električne energije u kogeneraciji (istovremena proizvodnja električne i toplinske energije) [18]. Na slici 4. prikazana je drvna sječa.



Slika 4. Drvna sječa [20]

- peleti koji se dobivaju prešanjem i/ili sabijanjem piljevine i strugotina raznih vrsta drveta pod visokim tlakom. Njegova najvažnija svojstva su mala vlažnost (<10%) i visoka energetska moć. Koriste se u automatiziranim postrojenjima i vrlo su

jednostavni za rukovanje i upotrebu. Peleti se najviše koriste za grijanje, tj. za proizvodnju toplinske energije [18]. Na slici 5. prikazani su peleti.



Slika 5. Peleti [21]

- briketi koji nastaju prešanjem i/ili sabijanjem usitnjenih drvnih ostataka, oblika su cilindra i mogu biti različitih veličina. Briketi su lako dostupno gorivo, jer već postoji razvijen lanac proizvodnje [18]. Briketi su prikazani na slici 6.



Slika 6. Briketi [22]

3.2. Pepeo drvne biomase

Pepeo drvne biomase (PDB) je neizgorivi kruti ostatak koji nastaje izgaranjem drvne biomase i sadrži najveći dio mineralnih frakcija koje potječu iz biomase. PDB je složena mješavina organskog i anorganskog sastava i sastoji se od velikog broja spojeva. Pepeo je heterogenog sastava koji može znatno varirati [4].

3.2.1. Tehnologije u energanama na drvenu biomasu i vrste PDB-a

Najčešće korištene tehnologije za pretvorbu biomase u električnu energiju mogu se podijeliti u tri kategorije:

- izravno izgaranje
- termokemijski proces

- biokemijski proces

Izravno izgaranje je proces spaljivanja biomase uz prisutnost kisika i koristi se za pretvaranje energije biomase u toplinu pomoću peći, kotlova, elektrana. Termokemijski proces uključuje primjenu toplinskih i kemijskih procesa u proizvodnju energije iz biomase i dijeli se na pirolizu i rasplinjavanje. Piroliza je razgradnja tvari bez prisutnosti kisika. Rasplinjavanje je termokemijski proces u kojem se biomasa transformira u sintetski plin. Biokemijski proces je proces pretvorbe biomase u plinovito ili tekuće gorivo poput bioplina, bioetanol i sl.

Prilikom procesa proizvodnje energije sagorijevanjem biomase generira se velika količina pepela koja utječe na proces pretvorbe tako da smanjuje učinkovitost sustava izgaranja [19].

U sagorijevanju biomase nastaju dvije vrste otpada: pepeo dna peći i leteći pepeo [23].

Pepeo dna peći uključuje grube frakcije potpuno ili djelomično izgorjelog materijala, koji je nastao u komorama za izgaranje i sastavljen je od čestica pijeska uglavnom kvarca s mineralnim nečistoćama. Leteći pepeo predstavlja najfinije čestice odvojene od struje plinova izvan komore za izgaranje [19].

Postoje tri vrste tehnologije izgaranja: izgaranje u nepokretnom sloju u ložištima s rešetkom, izgaranje u mjehuričastom fluidiziranom sloju i izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju. Ovisno o tehnologiji izgaranja postoje tri vrste PDB-a:

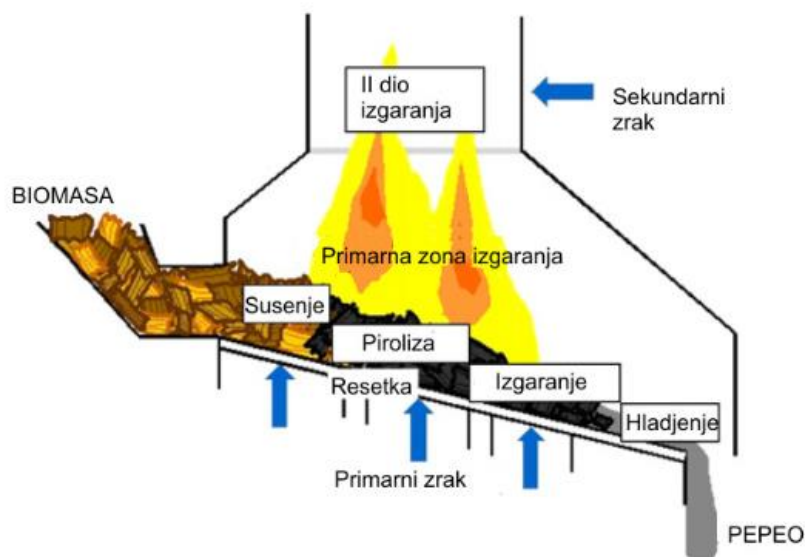
1. pepeo s dna peći sakupljen s dna komore izgaranja ili ložišta s fluidiziranim slojem
2. relativno krupni pepeo sakupljen u ciklonima i kotlovima
3. sitni pepeo sakupljen u elektrostatičkom precipitatoru ili vrećastom filtru.

Najveći utjecaj na svojstva pepela drvene biomase (pod pretpostavkom da u postrojenjima dolazi do potpunog izgaranja) ima: vrsta drvene biomase, tehnologija ložišta, način prikupljanja biomase i uvjeti rasta drvene biomase [4].

Kad biomasa ulazi u ložište, prvi proces koji se događa je proces sušenja, zatim primarno i sekundarno isplinjavanje ili devolatilizacija i na samom kraju izgaranje krutog ostatka. Kod procesa sušenja oslobađa se voda tj. vlaga u biomasi. Oslobađanje vlage ovisi o temperaturi, a sušenje ovisi o samoj biomasi, načinu izgaranja i temperaturi u ložištu. Devolatilizacija ili oslobađanje plinova je drugi korak kod kojeg dolazi do porasta temperature i do razgradnje čestica uz oslobađanje plinova. Produkt druge faze su plinovi i oni oksidiraju i tvore plamen

oko ovojnice čestica. Plamen zagrijava česticu i time se pospješuje oslobađanje plinova. Posljednji korak procesa je izgaranje krutog ostatka, a brzina izgaranja ovisi o brzini difuzije kisika i kemijskim reakcijama ugljika koje se odvijaju na površini čestice [24].

Na slici 7. prikazan je shematski proces u ložištu.



Slika 7. Shematski proces u ložištu [24]

Pepeo biomase proizvodi se u energanama, u Hrvatskoj je trenutno u pogonu oko 29 postrojenja. U tablici 1. prikazane su vrste pepela s obzirom na njihovu lokaciju i vrstu postrojenja [6, 25].

Tablica 1. Lokacije energana u Republici Hrvatskoj i vrste postrojenja [6, 25]

Lokacije energana	Vrsta postrojenja
Strizivojna	Kogeneracijsko postrojenje na bazi izgaranja drvene biomase
Varaždin	Energana Varaždin
Udbina	Kogeneracijsko postrojenje na biomasu LIKA ENERGO EKO
Novska	Proizvodnja električne energije i kućnog peleta iz biomase
Babina Greda	VIRIDAS BIOMASS
Vrbovsko	Kogeneracijsko postrojenje na biomasu
Glina	Bioelektrana-toplana Glina
Turopolje	Kogeneracijsko postrojenje PANA I

Slavonski Brod	Kogeneracijsko postrojenje na bazi izgaranja drvene biomase SLAVONIJA OIE
Požega	Projekt SPIN VALIS 1525 kW _e
Bjelovar	Kogeneracijsko postrojenje 60 kW i sušare-ZRK
Nijemci	Izgradnja elektrane na biomasu-MARINA
Belišće	Plinifikacijsko kogeneracijsko postrojenje na biomasu Belišće 1
Slavonski Brod	ĐĐ-Eniteh-500
Sisak	Kogeneracijska elektrana na biomasu BE-TO Sisak
Osijek	Kogeneracijska elektrana na biomasu BE-TO Osijek
Ogulin	Kogeneracija Ogulin
Čakovec	Sušara
Pokupsko	Područno grijanje na biomasu-Općina Pokupsko
Stara Gradiška	Izgradnja kogeneracijskog postrojenja na bazi izgaranja drvene biomase
Bjelopolje (Korenica)	Kogeneracijsko energetska postrojenje na biomasu Bjelopolje
Glina	BE-TO Drvni Centar
Darda	Kogeneracija na drvenu biomasu
Nard	Kogeneracija Nard - Valpovo
Đakovo	Izgradnja kogeneracijskog postrojenja na bazi izgaranja drvene biomase
Benkovac	Kogeneracijsko postrojenje Benkovac
Ljubešćica	ORC kogeneracija na drvenu biomasu
Koprivnica	Kotlovnica na biomasu sa spremištem biomase, kolnom vagom, platoom i prilaznim cestama
Lepoglava	Ugradnja toplovodnog kotla na biomasu snage 3MW u sklopu projekta „Energetska obnova objekata Kaznionice u Lepoglavi

3.3. Cement

Cement je hidraulično mineralno vezivo, u građevinarstvu se primjenjuje za proizvodnju betona i morta i ujedno je materijal koji se najviše upotrebljava u svijetu. Hidraulično svojstvo cementa znači da se veže i stvrdnjava u dodiru s vodom. Cement je praškasti materijal, koji se pretvori u očvrslu cementnu pastu kad mu se doda voda [7].

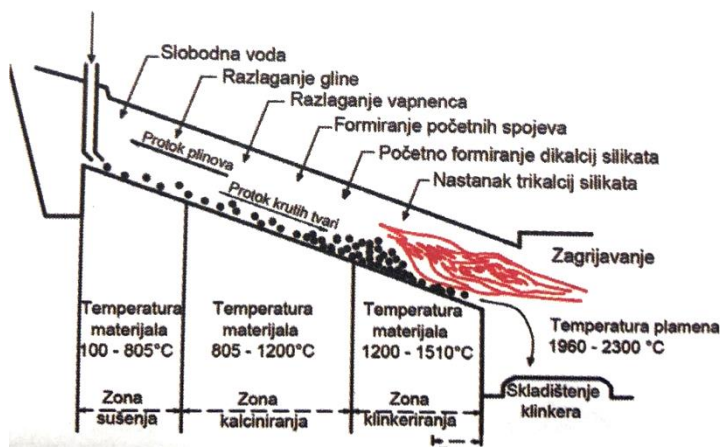
Postoje razne vrste cementa, a najčešća podjela je prema normi HRN EN 197-1:2012. Norma HRN EN 197-1:2012 obuhvaća 27 vrsta cementa opće namjene. U tablici 2. prikazane su glavne vrste cementa.

Tablica 2. Glavne vrste cementa prema HRN EN 197-1:2012 [26]

Oznake cementa opće namjene	Vrsta cementa
CEM I	Portlandski cement
CEM II	Portlandski cement s miješanim dodatkom
CEM III	Cement sa zgurom visokih peći ili metalurški cement
CEM IV	Pucolanski cement
CEM V	Miješani cement

3.3.1. Proces proizvodnje cementa

Osnovne sirovine za proizvodnju cementa su vapnenac i glina, one se homogeniziraju i usitnjavaju mokrim ili suhim postupkom u sirovinsko brašno. Zatim se sirovinsko brašno peče na visokoj temperaturi u rotacijskoj peći prikazanoj na slici 8. Na temperaturi od 1450°C dolazi do sinteriranja, a kao produkt dobiva se klinker. Potom se klinker ohladi i prije mljevenja u sitni prah dodaje mu se gips, kako bi se spriječilo trenutno vezivanje i kao konačni proizvod dobiva se cement [7].



Slika 8. Rotacijska peć za proizvodnju klinkera [7]

3.4. Fizikalna i kemijska svojstva cementa i PDB-a

3.4.1. Gustoća

Gustoća cementa obično se kreće u granicama od 2,9 do 3,15 g/cm³. [7]

Gustoća PDB-a kreće se u različitim rasponima, ovisno o vrsti biomase i tehnologiji postrojenja. Rezultati prikazani u tablici 3. [11, 14, 15, 27 - 29] pokazali su da se gustoća pepela kreće od 2,08 do 2,6 g/cm³. Na osnovi tih rezultata vidljivo je da je gustoća pepela manja od gustoće cementa.

Tablica 3. Gustoće PDB-a [11, 14, 15, 27 - 29]

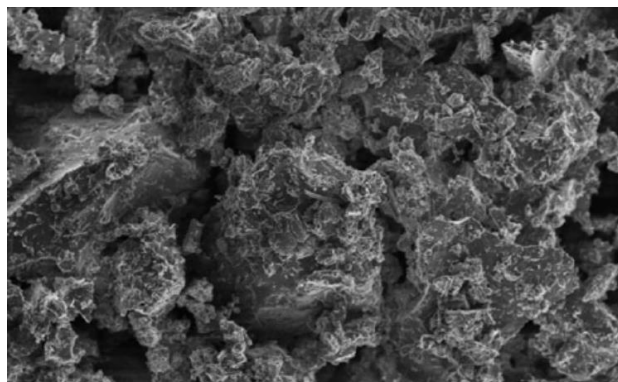
Autor	Gustoća [g/cm ³]
Abdullahi M. [11]	2,13
Naik T.R. i suradnici [14]	2,6
Udoeyo F.F. i suradnici [15]	2,43
Yang Z. i suradnici [27]	2,37
Trybalski K. i suradnici [28]	2,08 – 2,51
Naik T. [29]	2,45-2,48

3.4.2. Veličina, oblik i poroznost čestica

Veličina čestica cementa tj. finoća mliva cementa kreće se od 2 do 80 µm i ona ovisi o procesu mljevenja. Smatra se da će čestice cementa koje su veće od 45 µm sporo hidratizirati, a one veće od 75 µm možda neće nikad potpuno hidratizirati [7].

Prilikom dodavanja vode cementu, sloj vode se oblikuje s vanjske strane čestice, on postaje deblji i brzina hidratacije se usporava, pa će zbog toga manja čestica brže reagirati nego velika čestica [30].

Oblik čestica cementa može biti pravilan (sferni) i nepravilan. Na slici 9. prikazana je morfologija cementa. Cement koji ima čestice pravilnog oblika ima manju površinu od čestica cementa nepravilnog oblika. Razlike u površini čestica dovode do različite potrebe za vodom [31].



Slika 9. Morfologija cementa [32]

Čestice PDB-a se u osnovi sastoje od djelomično spaljenog drva i kore. Da bi se procijenila finoća čestica koriste se sita različite veličine. Prema [29] prosječna količina čestica letećeg PDB-a koji prođe kroz sito veličine 150 μm je 77,4 %, a na situ veličine 9,5 mm postotak prolaza čestica pepela je 100 %.

PDB sadrži mali broj sferičnih čestica i većina čestica je nepravilnog oblika. Na slici 10. prikazana je morfologija čestica određena pomoću elektronskog mikroskopa [1].



Slika 10. Morfologija čestica PDB-a [1]

Prema istraživanjima [3, 28, 33] prikazanim u tablici 4. veličine čestica PDB-a su do 550 μm .

Tablica 4. Veličina čestica [3, 28, 33]

Autor	Veličina čestica [μm]
Rajamma R. i suradnici [3]	< 50
Trybalski K. i suradnici [28]	0 - 550
Wang S. i suradnici [33]	30 - 130

3.4.3. Kemijska svojstva

Sirovine za proizvodnju portlandskog cementa su vapnenac i glina. Vapnenac je po kemijskom sastavu $CaCO_3$. U tablici 5. prikazan je kemijski sastav nekih vapnenaca [8].

Tablica 5. Kemijski sastav vapnenaca [8]

Sastojak [mas. %]	Vapnenac I	Vapnenac II
SiO_2	3,76	6,75
Al_2O_3	1,10	0,71
Fe_2O_3	0,66	1,47
CaO	52,46	49,80
MgO	1,23	1,48
K_2O	0,18	tragovi
Na_2O	0,22	tragovi
SO_3	0,01	1,10
Gubitak žarenjem	40,38	39,65

Druga komponenta potrebna za proizvodnju cementa je glina, kod koje su glavni sastojci alumo-silikati s ugrađenim OH^- skupinama i molekulama vode. Gline su glavni izvor SiO_2 i sadrže određenu količinu željeznog oksida, željeznog sulfida, kvarca, kalcijeva karbonata i sl. U tablici 6. prikazani su kemijski sastavi nekih glina [8].

Tablica 6. Kemijski sastav glina [8]

Sastojak [mas. %]	Glina I	Glina II	Glina III
Gubitak žarenjem	7,19	10,40	6,40
SiO_2	67,29	52,30	60,10
Al_2O_3	8,97	24,70	18,00
Fe_2O_3	4,28	6,10	8,20
CaO	7,27	4,40	0,80
MgO	1,97	0,10	0,20
K_2O	1,20	0,80	2,50
Na_2O	1,51	0,80	2,50
SO_3	0,32	1,10	3,80

Udjeli oksida portland cementnog klinkera obično se kreću u granicama koje prikazuje tablica 7.

Tablica 7. Udio oksida portland cementnog klinkera [8]

Sastojak	mas. %
SiO_2	16 - 26
Al_2O_3	4 - 8
Fe_2O_3	2 - 5
CaO	58 - 67
MgO	1 - 5
$Na_2O + K_2O$	0 - 1
SO_3	0,1 – 2,5
Mn_2O_3	0 - 3
TiO_2	0 - 0,5
P_2O_5	0 – 1,5
Gubitak žarenjem	0 - 0,5

Silicijev dioksid i kalcijev oksid odgovorni su za čvrstoću cementa, aluminijev oksid je odgovoran za brzo početno vezivanje, a željezni oksid i magnezijev oksid za boju i tvrdoću cementa. Udio sumporovog oksida mora biti manji od 2 % i alkalije ne smiju biti prisutne u cementu tj. njihov udio mora biti manji od 1 % [34, 35].

Ako je u cementu veći udio CaO i SiO_2 mogu se proizvesti betoni većih čvrstoća, a što je veći udio Al_2O_3 i SO_3 brže je vrijeme vezivanja [36].

Kemijskom analizom raznih vrsta PDB-a [11, 12, 14, 15] prikazanih u tablici 8. vidljivo je da imaju velik udio kalcijevog oksida i silicijevog dioksida. Zbroj elementa SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 ne smije biti manji od 70 % prema normi HRN EN 450-1:2013 kako bi došlo do pucolanske reakcije [10]. Gubitak žarenjem predstavlja sadržaj preostalog ugljika [37]. Visoka razina gubitka žarenjem može smanjiti pucolansku reakciju [1]. Na osnovi istraživanja prikazanih u [11] gubitak žarenjem bio je veći od dopuštenih kriterija za tri kategorije propisane normom

HRN EN 450-1:2013, a kod [12, 14] gubitak žarenjem zadovoljio je kriterije za drugu i treću kategoriju.

Tablica 8. Kemijski sastav PDB-a [11, 12, 14, 15]

Autor							
M. Kosior – Kazberuk [12]		M. Abdullahi [11]		Naik i suradnici[14]		Udoeyo [15]	
Sastojak	Mas. %	Sastojak	Mas %	Sastojak	Mas %	Sastojak	Mas %
<i>SiO₂</i>	51,6	<i>SiO₂</i>	31,8	<i>SiO₂</i>	61,4	<i>SiO₂</i>	20,8
<i>Al₂O₃</i>	22,8	<i>Al₂O₃</i>	28,0	<i>Al₂O₃</i>	6,2	<i>Al₂O₃</i>	11,6
<i>Fe₂O₃</i>	7,3	<i>Fe₂O₃</i>	2,34	<i>Fe₂O₃</i>	2,6	<i>Fe₂O₃</i>	5,37
<i>CaO</i>	2,3	<i>CaO</i>	10,53	<i>CaO</i>	12,3	<i>CaO</i>	43,41
MgO	1,3	MgO	9,32	MgO	2,9	MgO	4,34
<i>Na₂O</i>	4,2	<i>Na₂O</i>	/	<i>Na₂O</i>	1,4	<i>Na₂O</i>	0,87
<i>SO₃</i>	2,2	<i>SO₃</i>	/	<i>SO₃</i>	0,8	<i>SO₃</i>	2,92
<i>TiO₂</i>	/	<i>TiO₂</i>	/	<i>TiO₂</i>	0,57	<i>TiO₂</i>	1,13
<i>P₂O₅</i>	/	<i>P₂O₅</i>	/	<i>P₂O₅</i>	/	<i>P₂O₅</i>	1,0
<i>K₂O</i>	/	<i>K₂O</i>	10,38	<i>K₂O</i>	3,3	<i>K₂O</i>	6,24
Gubitak žarenjem	6,9	Gubitak žarenjem	27	Gubitak žarenjem	8,4	Gubitak žarenjem	/

4. BETON

4.1. Sastav

Sastavne komponente betona su cement, agregat, voda i dodaci. Kako bi se dobio beton otporan na cikluse smrzavanja-odmrzavanja, koristi se dodatak aerant.

Agregat zauzima približno tri četvrtine volumena betona. Veličine čestica agregata kreću se od 0 do 4 mm koje se nazivaju sitni agregat (pijesak) i od 4 do 125 mm, koje se nazivaju krupni agregat. Agregat je smjesa kamenih zrna različitih frakcija i proizvodi se od prirodnih kamenih materijala i umjetnih materijala. Agregat se dijeli na prirodni, umjetni i reciklirani. Prirodni agregat nalazi se u prirodi i ne mijenja mu se sastav, te se dijeli na drobljeni i riječni.

Umjetni agregat nastaje obradom materijala, pri čemu se mijenja njegov sastav, a tu spadaju razni otpadni materijali i industrijski proizvodi, te specijalni proizvodi. Kemijski dodatak betonu aerant koristi se za uvlačenje malih zračnih mjehurića u betonsku mješavinu, koji postaju dio cementne matrice koja vezuje agregat. Napravljeni su od prirodnih smola, životinjskih i biljnih masti i sintetskih deterdženata. Njihovim dodavanjem u mješavinu stvaraju se sferični zatvoreni mjehurići (10 - 300 μm) jednoliki raspoređeni u cementnoj pasti. Mjehurići su višestruko većih dimenzija od kapilara te ih isprekidaju i onemogućuju njihovu povezanost. Pozitivni utjecaji aeranta na beton su postizanje otpornosti na djelovanje ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, poboljšanje obradljivosti, smanjenje segregacije i izdvajanja vode, a negativni efekti gubitak čvrstoće (za svakih 1 % zraka čvrstoća se smanji za 5 %) i povećanje propusnosti. U slučaju prevelikog doziranja utječe na odgodu vezivanja i očvršćivanja. Ključni sastojak betona je i voda, koja je bitna za njegova svojstva u svježem i očvršnulom stanju. U pravilu se za spravljanje betona koristi pitka voda [7].

4.2. Otpornost betona na djelovanje smrzavanja

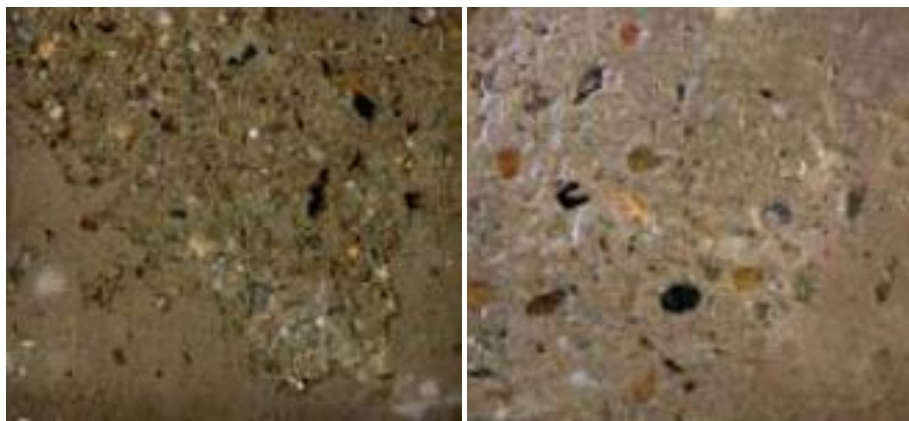
Smrzavanje betona je jedno od najintenzivnijih štetnih djelovanja, koje djeluje na sve betone izložene utjecajima vanjskog okoliša [38].

Otpornost betona na djelovanje smrzavanja jedan je od glavnih pokazatelja trajnosti betona. Trajnost betonskih konstrukcija uvjetovana je poroznom strukturom betona, koja omogućava prodor različitih agresivnih tvari u beton poput ugljičnog dioksida, sulfata, kiselina i sl. [39].

Izlaganje ciklusima smrzavanja i odmrzavanja glavni je uzrok degradacije betona ako beton nema potrebne karakteristike da podnese ovo djelovanje. Razaranje betona smrzavanjem nastupa kada se voda smrzava i prelazi u led te se pri tome širi za oko 9% i povećava volumen betona. To može stvoriti naprezanja, koja prelaze vlačnu čvrstoću betona i tako dolazi do stvaranja pukotina [40].

Mehanizam nastanka oštećenja objašnjava se kritičnim stupnjem zasićenja poroznog materijala, različitim toplinskim rastezanjem komponenata betona, hidrauličkim i osmotskim tlakom u porama, te kemijskim djelovanjem soli za odmrzavanje [38].

Oštećenja betona zbog smrzavanja pojavljuju se u nekoliko različitih oblika: pojava pukotina, odlamanje betona, ljuštenje betona, pucanje zrna agregata. Površinsko ljuštenje betona je prikazano na slici 11.a), pucanje zrna agregata na slici 11.b) i nastajanje pukotina na slici 11.c). Najčešće dolazi do pojave pukotina i odlamanja dijelova betona [39].



a) Površinsko ljuštenje betona

b) Pucanje zrna agregata



c) Nastajanje pukotina

Slika 11. Oštećenja betona zbog smrzavanja [39]

Betoni otporni na smrzavanje moraju biti projektirani tako da imaju odgovarajući sustav uvučenih zračnih pora, što manji vodo-cementni omjer, agregat niske potrebe za vodom, toplinski koeficijent istezanja kompatibilan toplinskom koeficijentu istezanja cementnog kamena, trebaju biti pravilno ugrađeni i njegovani. Sustav pora koji povećava otpornost na smrzavanje postiže se kao što je već spomenuto dodatkom aeranta, dodatak betonu koji pri miješanju izaziva stvaranje zračnih mjehurića, koji su ravnomjerno raspoređenih u betonu i djeluju kao amortizeri tlaka. Udaljenost između kraja jednog i početka drugog mjehurića trebala bi iznositi od 0,10 do 0,20 mm [38].

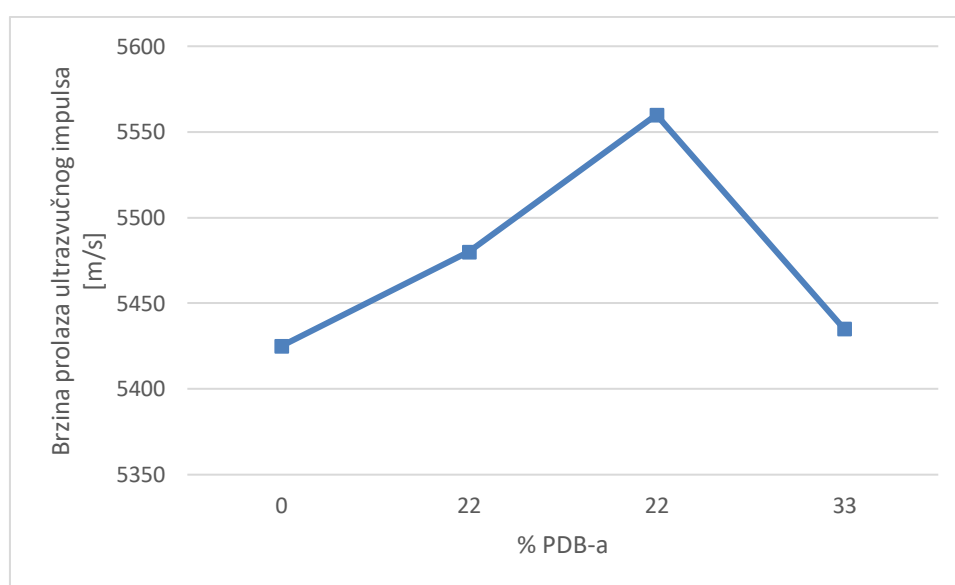
Smrzavanjem vode u sustavu pora betona pojavljuju se naprezanja, a ako ona pređu vlačnu čvrstoću betona dolazi do razaranja strukture betona. Eksperimenti su pokazali da je beton sa

sitnijim frakcijama agregata otporniji na djelovanje smrzavanja od betona s krupnim agregatom. Ovo se objašnjava time što kod sitnijeg agregata dio vode pri smrzavanju uspijeva izaći van i smanjiti tlak. Na makroskopskoj razini oštećenja strukture betona smrzavanjem odražavaju se u smanjivanju statičkog i dinamičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće. Kod većih oštećenja vide se pukotine i odvajanje cementne paste na rubu zrna agregata [39].

Na trajnost betona izloženog smrzavanju i odmrzavanju sa ili bez soli za odmrzavanje utječe sastav i vrsta cementa, finoća i sastav mliva cementa, te agregata određene poroznosti. Sastav i vrsta cementa, finoća i sastav mliva cementa imaju bitan utjecaj na trajnost betona izloženog smrzavanju i odmrzavanju sa ili bez soli za odmrzavanje. Ako se udio cementa poveća, poveća se i otpornost betona na djelovanje smrzavanja i odmrzavanja. Kod finije mljevenih cementa poboljšana je otpornost na ljuštenje betona, razlog može biti veća brzina hidratacije. Korištenjem cementa niske lužnatosti i s malim udjelom C_3A smanjuje se količina ljuštenja. Sadržaj alkalija u cementu utječe na učinkovitost dodataka za uvlačenje zraka tj. aeranta, te na stabilnost pora u svježem betonu i faktor razmaka pora. Agregati male poroznosti i velike čvrstoće ne dovode do oštećenja betona, jer su naprezanja u porama agregata manja od vlačne čvrstoće betona. Kod agregata srednje poroznosti uslijed hidrauličnog tlaka može doći do pucanja zrna i pojave točkastih oštećenja uzrokovanih izbacivanjem dijelova zrna iz betona. Propusnost agregata određuje stupanj zasićenosti agregata vodom i određuje stupanj u kojem će voda izlaziti iz agregata. Pokazalo se da se povećanjem najvećeg zrna agregata smanjuje sadržaj zraka u betonu. Smatra se da je frakcija pijeska srednje veličine od oko 150 do 600 mikrona najvažnija pri uvlačenju zračnih mjehurića. Prostori između čestica u tom rasponu veličina su otprilike veličine najvećeg dijela zračnih mjehurića u aeriranom betonu, pa je to možda razlog što srednja frakcija pijeska ima takvu važnost pri uvlačenju zraka u beton [41].

Provedena su razna ispitivanja otpornosti na smrzavanje s betonom s različitim udjelima PDB-a. Ispitivanja koja su proveli [33] na betonu sa PDB-om pokazala su da je mali utjecaj PDB-a na ponašanje pri smrzavanju/odmrzavanju i da je gubitak mase isti ili manji od referentne mješavine. Beton s PDB-om će biti otporan na smrzavanje ako se doda uvučeni zrak tj. aerant i njegova otpornost na cikluse smrzavanja odmrzavanja će biti slična betonu kod kojeg nije bilo zamijene udjela cementa sa PDB-om. U navedenom istraživanju provedeno je 300 ciklusa smrzavanja odmrzavanja prema američkoj normi ASTM C666. Parametri betonske mješavine bili su sljedeći: udio pepela 25 %, omjer vode i pepela 0,5, konzistencija slijeganjem 7,5 – 12,5 cm i udio zraka 4 – 6 %.

Otpornost betonskih mješavina na smrzavanje određena je mjerenjem brzine ultrazvuka, određivanjem relativnog dinamičkog modula elastičnosti i gubitkom mase. Naik T.R. i suradnici ispitali su četiri mješavine betona [14], jednu referentnu za usporedbu rezultata s betonima koji su sadržavali udjele pepela oko 22 %, 29 % i 33 %. Relativni dinamički modul se vrlo malo smanjio s porastom broja ciklusa, a brzina ultrazvuka kod 300 ciklusa za referentnu mješavinu iznosila je 5425 m/s, i za ostale tri mješavine iznosila je 5480 m/s, 5560 m/s i 5435 m/s, rezultati su prikazani na slici 12. Prema provedenom istraživanju zaključeno je da PDB nema značajan utjecaj na smrzavanje betonskih mješavina.

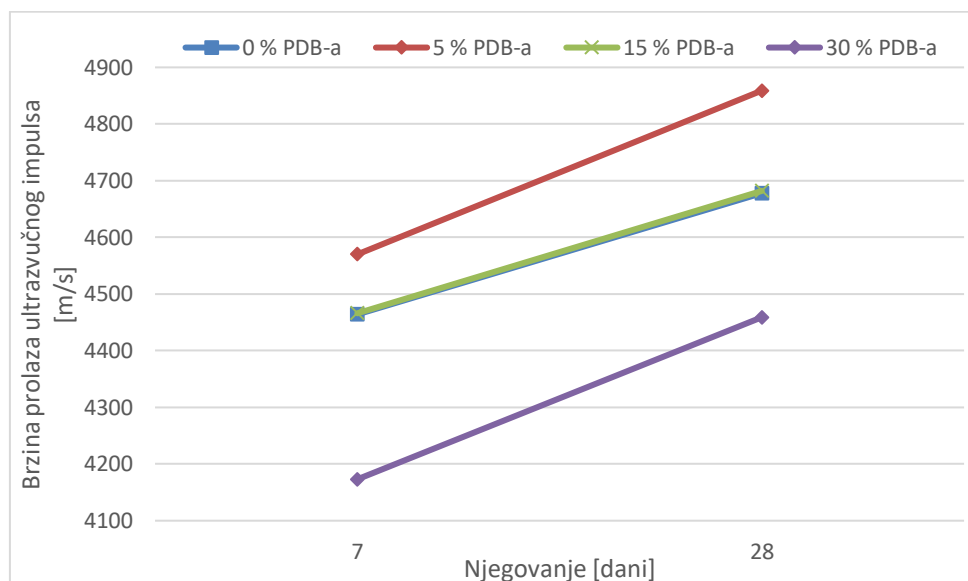


Slika 12. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa [14]

Na dobru otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja utječe i pravilno uvlačenje zraka. U istraživanju [1] provedeno je ispitivanje na mješavinama sa 0 %, 5 %, 15 % i 25 % PDB-a na masu cementa uz dodatak aeranta od 0,05 % i 0,10 % na masu veziva. Dodavanje aeranta od 0,05 % utjecalo je na poboljšanje otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja kod betona koji sadržavaju do 15 % pepela. Povećanjem udjela aeranta na 0,10 % na masu veziva uzrokovalo je otpornost ispitanih betona na smrzavanje, osim kod betona koji je sadržavao 25 % PDB-a.

U istraživanju [42] prikazani su rezultati brzine prolaska ultrazvučnog impulsa, s manjom brzinom prolaska ultrazvučnih impulsa širenje ultrazvučnih valova postaje duže. Što je više mikropukotina u betonu, povećava se udaljenost širenja impulsa, a smanjuje se brzina tj.

mikropukotine uzrokuju propagaciju ultrazvučnih impulsa generiranih ultrazvučnim valovima oko mikropukotina. Nakon 7 dana ciklusa smrzavanja/odmrzavanja najveća brzina ultrazvučnog impulsa iznosila je 4570 m/s kod uzorka s udjelom PDB-a od 5 %, dok je najmanja vrijednost iznosila 4173 m/s kod uzorka s udjelom PDB-a od 30 %. Nakon 28 dana najveća je vrijednost iznosila 4849 m/s kod uzorka s udjelom pepela od 5 %, dok je najmanja vrijednost od 4459 m/s dobivena kod uzorka s udjelom PDB-a od 30 %, rezultati su prikazani na slici 13. Ispitivanja su pokazala da se povećanjem udjela pepela do 15 % brzina ultrazvuka povećava i postiže se bolja otpornost na cikluse smrzavanja odmrzavanja.



Slika 13. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa [42]

Prema pregledu postojećih istraživanja zaključuje se da PDB u betonskim mješavinama ne utječe značajno na otpornost betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanje.

4.3. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća je najvažnije osnovno svojstvo betona. Definira se razredom tlačne čvrstoće C $f_{ck,cyl}/f_{ck,cube}$. Oznaka f_{ck} predstavlja najmanju karakterističnu tlačnu čvrstoću betona mjerne jedinice N/mm^2 u starosti od 28 dana dobivenu na kockama brida 150 mm ili valjcima visine 300 mm i promjera 150 mm. Izraz za određivanje tlačne čvrstoće je:

$$f_c = \frac{F_{max}}{A} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

gdje je:

F_{max} - maksimalna sila [N]

A - površina uzorka [mm^2][7].

Provedena su mnogobrojna istraživanja tlačne čvrstoće betonskih mješavina s PDB-om.

Na osnovi rezultata ispitivanja koja su prikazana [11, 14, 15, 27, 43] vidi se da se povećanjem udjela PDB-a tlačna čvrstoća smanjuje.

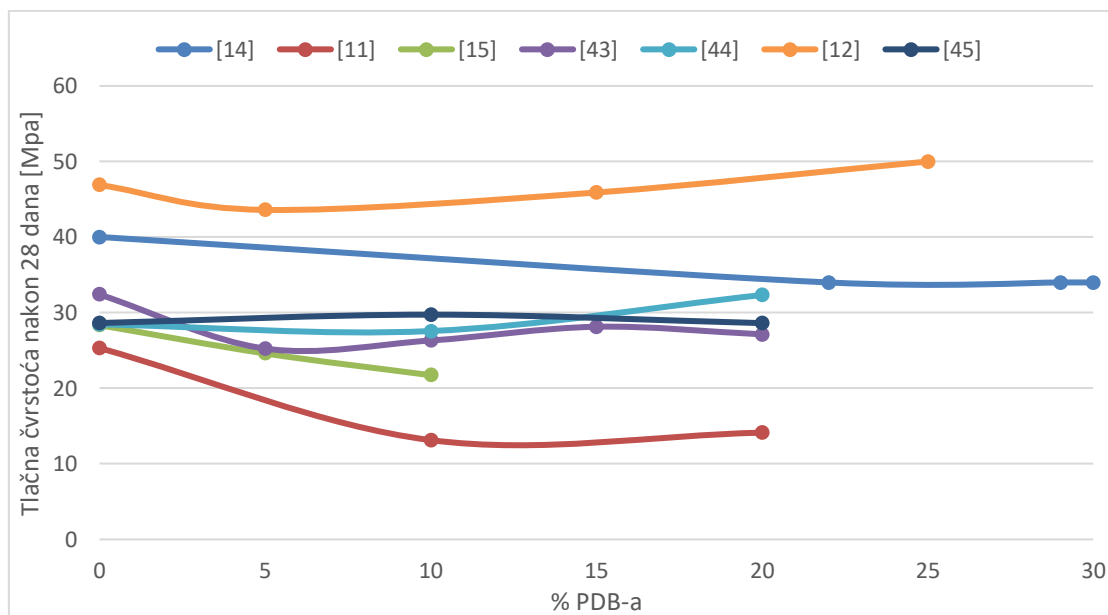
U istraživanju [14] referentna mješavina betona imala je srednju vrijednost tlačne čvrstoće nakon 28 dana $40,02 \text{ N/mm}^2$, a mješavine s udjelima PDB-a od 22 %, 29 % i 33 % imale su jednaku tlačnu čvrstoću u iznosu od 34 MPa. U istraživanju [11] pojedinačne vrijednosti tlačnih čvrstoća referentnih mješavina iznosile su 27,78 MPa, 24,00 MPa i 24,09 MPa, a mješavina s 10 % PDB-a iznosile su 12,14, 14,40 i 12,89 MPa, dok su s 20 % PDB-a iznosile 13,87, 14,31 i 14,22 MPa. Prema istraživanjima prikazanim u [15], 28-dnevna tlačna čvrstoća referentne mješavine iznosila je $28,35 \pm 2,64 \text{ MPa}$, mješavine s udjelom PDB-a od 5 % $24,61 \pm 0,51 \text{ MPa}$, s udjelom od 10 % PDB-a iznosila je $21,86 \pm 1,11 \text{ MPa}$ i mješavina s 15 % PDB-a $21,73 \pm 0,84$. Kod [43] tlačna čvrstoća referentne mješavina iznosila je $32,41 \text{ N/mm}^2$, mješavina s 5 % PDB-a $25,25 \text{ N/mm}^2$, s 10 % $26,32 \text{ N/mm}^2$, s 15 % $28,14 \text{ N/mm}^2$ i 20 % $27,14 \text{ N/mm}^2$.

Na osnovi ispitivanja prikazanih u [44] ,mješavina koja nije sadržavala PDB (referentna mješavina) imala je manju vrijednost tlačne čvrstoće od mješavina koje su imale udio PDB-a u iznosu od 10 % i 20 %. Tlačna čvrstoća referentne mješavina nakon 28 dana iznosila je $28,46 \text{ N/mm}^2$, s 10 % PDB-a $27,57 \text{ N/mm}^2$ i s 20 % PDB-a $32,34 \text{ N/mm}^2$.

Kod mješavina prikazanih u [12] s 0 %, 5 %, 15 %, 25 % PDB-a, tlačna čvrstoća nakon 28 dana iznosila 46,9, 43,6, 45,9, 50,0 N/mm^2 , a nakon 90 dana 49,0, 54,0, 62,1 i 63,4 MPa. Tlačna čvrstoća betona s PDB-om ima sporiji prirast od referentne mješavine s portlandskim cementom. Nakon 90 dana, tlačna čvrstoća betona s PDB-om bila je veća nego kod kontrolne mješavine.

U istraživanju [45] prikazane su mješavine s 0 %, 10 % i 20 % PDB-a. Tlačne čvrstoće nakon 28 dana iznosile su 28,63, 29,74 i 28,62 N/mm^2 . Kod mješavina sa udjelom PDB-a od 10 % zabilježen je prirast tlačne čvrstoće u odnosu na referentnu mješavinu.

Na slici 14. prikazani su rezultati istraživanja [11, 14,15, 43 - 45] tlačne čvrstoće nakon 28 dana s različitim postotkom PDB-om.



Slika 14. Tlačna čvrstoća nakon 28 dana s različitim udjelima PDB-a [11, 12, 14, 15, 43 - 45]

Zaključeno je da bi upotreba većeg postotka od 20 % i 30 % PDB-a kao zamjene dijela cementa utjecala na dodatno smanjenje 28 dnevne tlačne čvrstoće [27]. O udjelu PDB-a kao zamjene za dio cementa ovisi hoće li tlačna čvrstoća biti veća ili manja. Provedena istraživanja variraju, kod nekih su dobivene veće vrijednosti tlačne čvrstoće s 5 %, 10 % i 15 % PDB-a u odnosu na mješavinu koja nije sadržavala PDB, a kod drugih se vrijednost smanjuje u odnosu na kontrolnu mješavinu.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Materijali

Za izradu betonskih mješavina korišteni su sljedeći materijali:

- cement CEM I 42,5 R
- drobljeni agregat frakcija 0-4, 4-8 i 8-16 mm
- voda
- aerant
- leteći PDB iz 3 različita izvora

Korišten je cement CEM I 42,5 R proizvođača Holcim (Hrvatska) d.o.o. Oznaka CEM I predstavlja cement opće namjene s udjelom klinkera od 95 – 100 % razreda čvrstoće cementa 42,5 MPa nakon 28 dana, a R ('rapid') predstavlja visoku ranu čvrstoću. Ova vrsta cementa preporuča se koristiti za zahtjevne građevinske projekte gdje se traži visoka mehanička otpornost, velika početna čvrstoća, te za izradu vrlo otpornih betona na smrzavanje i soli [46, 47].

Fizikalna i kemijska svojstva CEM I 42,5 R u usporedbi s normom HRN EN 197-1:2012 dana su u tablici 9.

Tablica 9. Fizikalna i kemijska svojstva cementa [46]

FIZIKALNA SVOJSTVA	Mjerna jedinica	Holcim Primus cement CEM I 42,5 R	Uvjet norme
Postojanost volumena	mm	0	≤ 10
Početak vezivanja	min	160	≥ 60
Tlačna čvrstoća nakon 2 dana	MPa	31,0	≥ 20
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana	MPa	53,0	$\geq 42,5 \leq 62,5$
KEMIJSKA SVOJSTVA	Mjerna jedinica	Holcim Primus cement CEM I 42,5 R	Uvjet norme
SO_3	%	2,9	$\leq 4,0$
Cl	%	0,0072	$\leq 0,10$
Gubitak žarenjem	%	3,5	$\leq 5,0$
Netopivi ostatak	%	0,9	$\leq 5,0$

S ciljem povećanja otpornosti betona na smrzavanje/odmrzavanje i soli za odleđivanje korišten je aerant oznake META AIR proizvođača BASF, kao sredstvo za stvaranje zračnih mikropora u betonu. Preporučeno doziranje je oko 0,01 - 0,7 % na masu cementa. U ovom radu dozirano je 0,05 % aeranta na masu cementa.

Za izradu betona korištena je voda iz gradskog vodovoda.

Agregat je drobljeni iz kamenoloma Očura proizvođača Holcim, gustoće $2,81 \text{ kg/dm}^3$ sa tri frakcije: 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm. Udio frakcija u mješavinama iznosi za frakciju 0 - 4 mm 50 %, za frakciju 4 - 8 mm 19 % i za frakciju 8 - 16 mm 31 %. Na slici 15. prikazane su frakcije agregata.

Proračun granulometrijskog sastava prikazan je u prilogu 1.



Slika 15. Frakcije agregata

U ovom radu korišteni su pepeli drvene biomase iz postrojenja LIKA ENERGO EKO d.o.o. (UDB), BE-TO GLINA d.o.o (GL) i Univerzal d.o.o. (VŽ). PDB-ovi se razlikuju po kemijskim svojstvima i gustoći.

Gustoća PDB-a u skladu s normom ASTM C188-16 određena je pomoću La Chatelierove tikvice. Tikvica je napravljena od stakla i ispunjena se terpentinom do volumena V_1 , zatim se doda uzorak mase 65 grama i izmjeri se volumen V_2 . Rezultati ispitivanja gustoće su prikazani u tablici 10. Izraz za određivanje gustoće je:

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} [\text{g/cm}^3]$$

Na slici 16. prikazana je potrebna aparatura za provođenje ispitivanja gustoće.



Slika 16. Aparatura za ispitivanje gustoće

Tablica 10. Rezultati ispitivanja gustoće PDB-a

Oznaka PDB-a	Gustoća [g/cm^3]
UDB	2,72
GL	2,42
VŽ	2,00

Kod PDB-a iz Varaždina uočeno je dosta čestica crne frakcije tj. neizgorenog drva, koje su se zadržavale u gornjem dijelu tikvice, a kod PDB-a iz Udbine i Gline nije ih bilo u tolikoj mjeri.

Kemijska svojstva dobivena su pomoću laboratorijskih ispitivanja provedenih u okviru projekta TAREC² i dobiveni su slijedeći kemijski sastavi 3 vrste PDB-a (tablica 11).

Tablica 11. Kemijski sastav PDB-a

Sastojak	Udbina (UDB)	Glina (GL)	Varaždin (VŽ)
SiO_2	18,19	16,77	49,34
Al_2O_3	3,14	2,53	12,42
Fe_2O_3	2,10	1,71	4,78
CaO	57,93	43,68	18,58
MgO	6,17	3,92	3,68
Na_2O	0,57	1,12	2,12
SO_3	1,70	6,58	1,17
TiO_2	0,13	0,10	1,21
P_2O_5	1,97	2,09	1,40
K_2O	8,10	21,51	5,28
Gubitak žarenjem	3,0	17,7	6,0

Na osnovi kemijskog sastava vidi se da zbroj SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 prema normi HRN EN 450-1:2013 nije veći od 70 % mase i ispitani PDB-ovi se ne smatraju pucolanima.

U eksperimentalnom dijelu rada izrađeno je sedam mješavina, od kojih je jedna mješavina bila referentna (bez PDB-a), a kod ostalih šest mješavina udio cementa je zamijenjen s 10 % i 15 % PDB-a.

Oznake mješavina:

- REF- referentna mješavina s cementom i drobljenim agregatom
- UDB10-mješavina kod koje je 10% cementa zamijenjeno PDB-om iz energane u Udbini
- UDB15-mješavina kod koje je 15 % cementa zamijenjeno PDB-om iz energane u Udbini
- GL10-mješavina kod koje je 10 % cementa zamijenjeno PDB-om iz energane u Glini
- GL15-mješavina kod koje je 15 % cementa zamijenjeno PDB-om iz energane u Glini
- VŽ10-mješavina kod koje je 10% cementa zamijenjeno PDB-om iz energane u Varaždinu
- VŽ15-mješavina kod koje je 15% cementa zamijenjeno PDB-om iz energane u Varaždinu

Sastojci mješavina su: cement, agregat, voda, PDB i aerant. Ukupni volumen jedne mješavine iznosio je 35 l, a određen je na osnovi potrebne količine betona za izradu uzoraka. Ukupan broj uzoraka je deset tj. sedam kocki dimenzija 150x150x150 mm i tri valjka promjera 150 mm i visine 150 mm. U proračun potrebnog volumena ulaze ispitivanja u svježem stanju (temperatura, konzistencija, udio zraka i volumenska masa).

U tablici 12. prikazan je sastav betonskih mješavina, a u prilogu 2. proračun sastava za svaku mješavinu.

Tablica 12. Sastav betonskih mješavina

Sastav betonskih mješavina							
Oznaka mješavine	Cement [kg]	Voda [l]	v/c	Aerant [kg]	% PDB-a	PDB [kg]	Agregat [kg]
REF	380	180	0,5	0,19	0	/	1823,1
UDB10	342	171		0,17	10	38	1843,22
UDB15	323	161,5		0,16	15	57	1867,30
GL10	342	171		0,17	10	38	1838,36
GL15	323	161,5		0,16	15	57	1860,02
VŽ10	342	171		0,17	10	38	1829,09
VŽ15	323	161,5		0,16	15	57	1846,11

Mješavine su spravljene u laboratorijskoj miješalici ukupnog volumena 75 l. Prije nego se započne s miješanjem, miješalica mora biti navlažena pomoću spužve. U miješalicu se prvo stave tri frakcije agregata i pola vode predviđene za mješavinu i miješa se dvije minute, zatim dvije minute stanke i onda se doda cement i pepeo. Nastavlja se miješati agregat, cement i pepeo i nakon 30 sekundi doda se ostatak vode i nastavi miješati. Po završetku miješanja treba ručno lopaticom provjeriti homogenost mješavine. Nakon toga se kreće ugrađivati beton u kalupe i provode se ispitivanja svojstava betona u svježem stanju. Na slici 17. prikazan je postupak miješanja betona.



Slika 17. Postupak miješanja betona

Beton je ugrađen na način da je svaki kalup napunjen otprilike do pola, vibriran na vibrostolu i nakon toga napunjen do vrha i ponovno vibriran. Površina ugrađenog betona u kalupu je zaglađena zidarskom žlicom do ruba. Vibriranje uzoraka provodi se radi zbijanja betona i izbacivanja viška zahvaćenog zraka. Ugrađeni uzorci su nakon miješanja prekriveni plastičnim prekrivačem u trajanju od 24 sata i onda se raskalupe. Uzorci se označavaju i smještaju u vlažnu komoru temperature 20 ± 2 °C i relativne vlažnosti veće od 95 %. Na slici 18. prikazani su uzorci s pripadajućim oznakama.



Slika 18. Uzorci sa pripadajućim oznakama

Program ispitivanja prikazan je u tablici 13.

Tablica 13. Program ispitivanja

Metoda ispitivanja (norma)	Ispitana svojstva	Dimenzije [mm]	Broj uzoraka po mješavini
Ispitivanje svježeg betona – 6. dio: Gustoća (HRN EN 12350-6:2009)	Gustoća	/	/
Ispitivanje svježeg betona – 7. dio: Sadržaj pora (HRN EN 12350-7:2009)	Sadržaj pora	/	/
Ispitivanje svježeg betona – 2. dio: Ispitivanje slijeganjem (HRN EN 12350-2:2009)	Slijeganje rasprostranjem	/	/
Ispitivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje – oštećenje unutarnje strukture ispitnih uzoraka (CEN/TR 15177:2006)	Smrzavanje/odmrzavanje	150 x 150 x 150	4 po mješavini
Ispitivanje očvrnulog betona – 3. dio: Tlačna čvrstoća (HRN RN 12390-3:2009)	Tlačna čvrstoća	150 x 150 x 150	3 po mješavini
Ispitivanje očvrnulog betona – 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom (HRN EN 12390-8:2009)	Vodopropusnost	150 x 300	3 po mješavini
Dodaci betonu, mortu i mortu za injektiranje – Ispitne metode – 11. dio: Određivanje zračnih pora u očvrnulom betonu	Faktor razmaka pora	100 x 20 x 150	1 po mješavini

5.2. Ispitivanja betona u svježem stanju

Kao što je prikazano u tablici 13. na mješavinama su ispitana slijedeća svojstva betona u svježem stanju:

- gustoća prema normi HRN EN 12350-6:2009
- sadržaj pora prema normi HRN EN 12350-7:2009
- konzistencija slijeganjem (Slump test) prema normi HRN EN 12350-2:2009

- temperatura

5.2.1. Određivanje gustoće

Gustoća svježeg betona određuje se prema normi HRN EN 12350-6:2009 u posudi poznatog volumena.

Beton se mora zbiti odmah nakon postavljanja u posudu, tako da se postigne potpuno zbijanje betona bez pretjerane segregacije tj. izdvajanja. Zbijanje se odvija na vibro-stolu i pri tom se posuda s materijalom mora čvrsto držati rukama na stolu. Vibracije su minimalnog trajanja kako bi se postigla potpuna zbijenost betona.

Izvaži se masa posude, zatim se posuda napuni betonom do pola, vibrira se na vibro stolu, potom se posuda napuni do vrha i ponovno vibrira i odredi se masa posude sa uzorkom.

Gustoća betona izračuna se kao omjer mase uzorka i volumena posude. Izraz za određivanje gustoće svježe betonske mješavine:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

gdje je:

- ρ - gustoća betona u kg/m^3

- m_2 - masa posude ispunjena betonom

- m_1 - masa posude

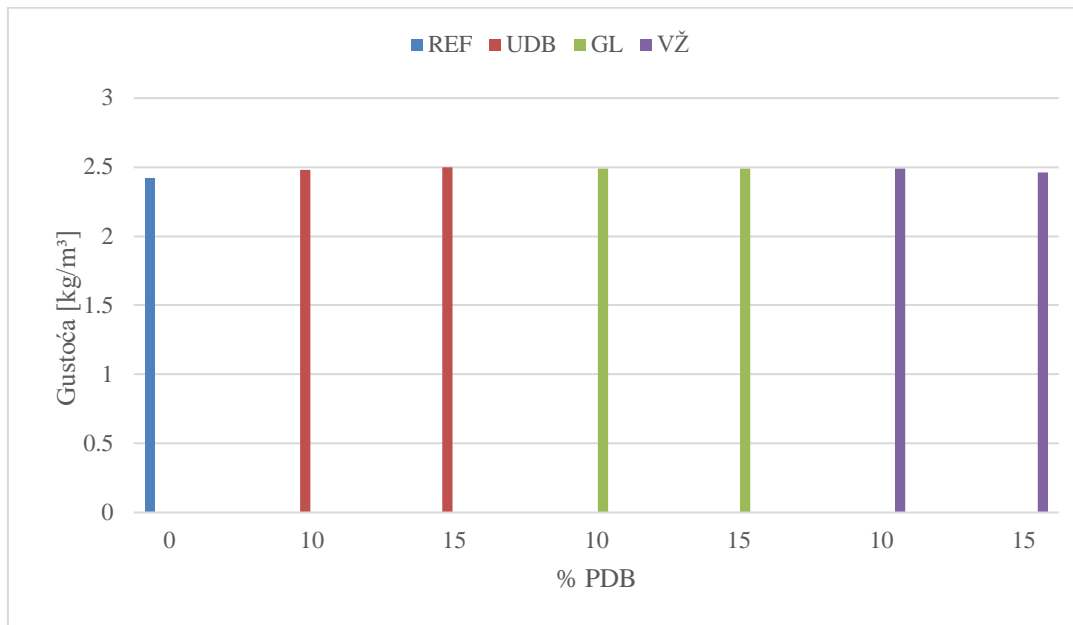
- V - volumen posude u m^3 [48].

Rezultati ispitivanja gustoće svježe betonske mješavine prikazani su u tablici 14.

Tablica 14. Gustoće svježih betonskih mješavina

Oznaka mješavine	REF	UDB10	UDB15	GL10	GL15	VŽ10	VŽ15
Gustoća [kg/m^3]	2,42	2,48	2,50	2,49	2,49	2,49	2,46

Na slici 19. Prikazani su rezultati ispitivanja gustoća betona u svježem stanju u ovisnosti o zamijenjenom dijelu cementa s PDB-om.



Slika 19. Gustoće svježeg betona

Na osnovi rezultata prikazanih u tablici 14. i slici 19., može se zaključiti da povećanjem udjela pepela dolazi do povećanja gustoće kod mješavina GL i VŽ, dok kod mješavine UDB smanjenjem udjela pepela dolazi do povećanja gustoće. Mješavine GL15, GL10 i VŽ10 imaju približno jednake gustoće.

5.2.2. Određivanje temperature

Temperatura se određuje pomoću digitalnog termometra s ubodnom iglom. Termometar je prikazan na slici 20. U svježju betonsku mješavinu se postavi igla termometra, koja prikazuje temperaturu u °C i ne smije dodirivati posudu.

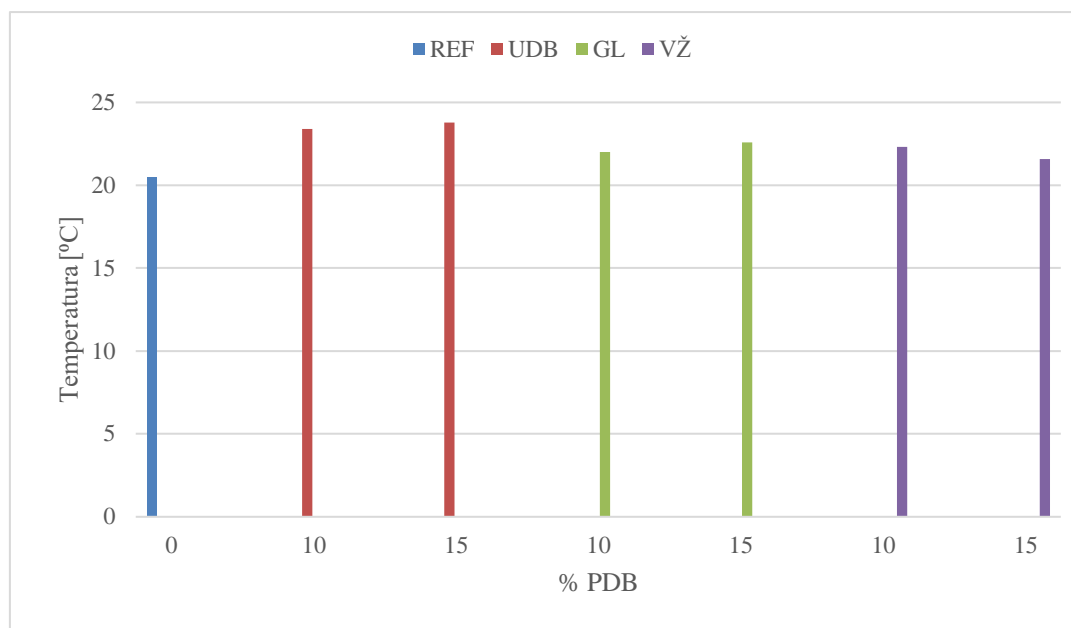


Slika 20. Digitalni termometar

U tablici 15. i na slici 21. prikazani su rezultati ispitivanja temperatura betonskih mješavina u svježem stanju.

Tablica 15. Temperature ispitnih mješavina

Oznaka mješavine	REF	UDB10	UDB15	GL10	GL15	VŽ10	VŽ15
Temperatura [°C]	20,5	23,4	23,8	22,0	22,6	22,3	21,6



Slika 21. Temperature ispitnih mješavina

Na osnovi rezultata ispitivanja, vidljivo je da su sve betonske mješavine imale veću početnu temperaturu u odnosu na referentnu. Najveću temperaturu za vrijeme mjerenja imala je mješavina UDB15, ona iznosi 23,8 °C.

5.2.3. Ispitivanje sadržaja pora

Sadržaj pora ispituje se prema normi HRN EN 12350–7:2009. Za ispitivanje se koristi porometar, prikazan na slici 22.

Postupak se zasniva na Boyle – Mariotteovom zakonu. Poznati volumen zraka pri poznatom tlaku spaja se s zabrtvljenim spremnikom s nepoznatim volumenom zraka u uzorku betona. Brojčanik na porometru je kalibriran tako da se rezultirajući tlak pokazuje kao postotak zraka [49].



Slika 22. Porometar

U cilindričnu posudu poznatog volumena ugradi se beton u 3 sloja, te se vibrira tako da se zrak u što većoj mjeri odstrani iz uzorka. Beton se izravna u razini ruba posude, a rub se obriše kako bi se osiguralo brtvljenje poklopca. Glavni ventil za zrak se zatvori, a otvore se dva ventila i kroz jedan od njih se unosi voda, koja teče do drugog ventila. Porometar se tada lagano udara čekićem da bi se izbacio sav zarobljeni zrak. Zatim se zatvori ventil za odušak i upumpava zrak u zračnu komoru dok kazaljka na brojčaniku ne dođe u početni položaj. Slijedi zatvaranje ventila, te otvaranje glavnog ventila za zrak. Vrijednost udjela pora očita se direktno na brojčaniku. Dobiveni rezultat ispitivanja je postotak pora u svježem betonu. [50]

Udio pora svježe betonske mješavine računa se prema izrazu:

$$\rho_z = \frac{V_z}{V_u}$$

gdje je:

- ρ_z – volumenski postotak zraka u uzorku [vol %]

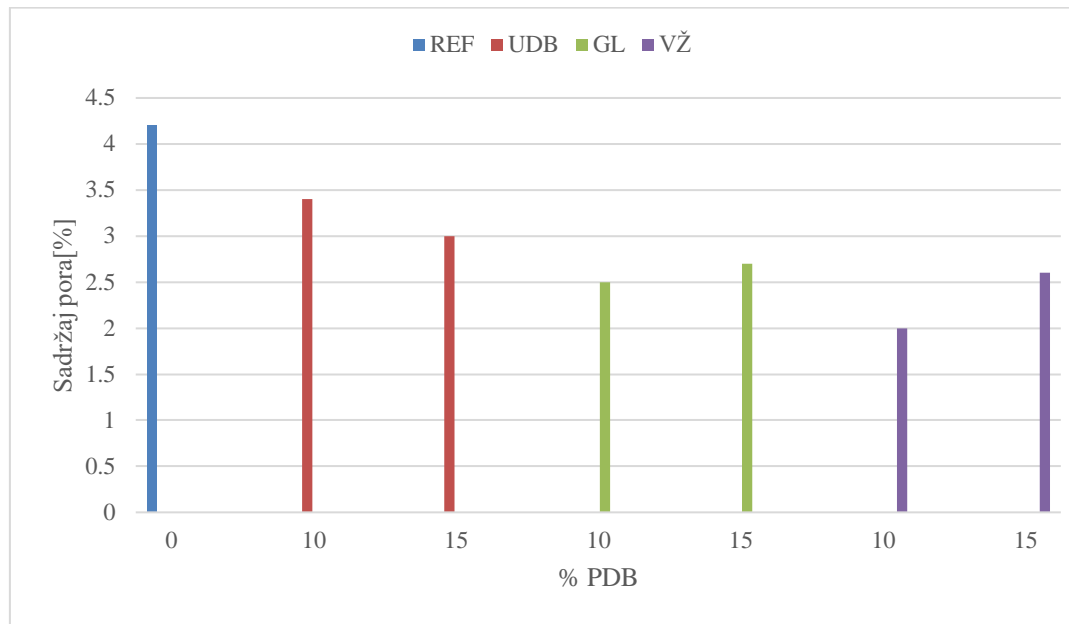
- V_z – volumen zraka u uzorku [m^3]

- V_u – volumen uzorka u posudi [m^3] [49].

Rezultati ispitivanja udjela pora u svježem betonu dani su u tablici 16., također je na slici 23. dan i dijagram prikaza udjela pepela za sve betonske mješavine.

Tablica 16. Sadržaj pora ispitnih mješavina

Oznaka mješavine	REF	UDB10	UDB15	GL10	GL15	VŽ10	VŽ15
Sadržaj pora [%]	4,2	3,4	3	2,5	2,7	2	2,6



Slika 23. Sadržaj pora ispitnih mješavina

Iz analize rezultata vidi se da udio pora raste s povećanjem udjela pepela kod svih betonskih mješavina, osim kod mješavine s PDB-om iz Udbine, kod njega udio pora značajno pada povećanjem udjela pepela u mješavini. Mješavina VŽ10 ima udio zraka za 50 % manji od referentne mješavine. Najveći udio pora izmjeren je kod referentne mješavine, a zatim kod mješavine s 10 % PDB-a iz Udbine.

5.2.4. Određivanje konzistencije betona slijeganjem

Konzistencija slijeganjem prema normi HRN EN 12350-2:2009 ispituje se na način da se metalni kalup u obliku krnjeg stošca puni betonom u 3 sloja. Svaki sloj betona se zbije čeličnom šipkom 25 puta do dubine prethodnog sloja. Krnji stožac je promjera 200 ± 2 mm, promjera vrha 100 ± 2 mm i visine 300 ± 2 mm. Tijekom punjenja kalup se čvrsto drži na dnu, kako ne bi došlo do izlivanja betona pri dnu. Nakon zbijanja zadnjeg sloja, višak betona se odstrani pomoću ravne lopatice. Zatim se diže kalup ravno prema gore u vremenu od dvije do pet sekundi. Odmah nakon dizanja kalupa mjeri se slijeganje betona koje je određeno razlikom visine kalupa i najviše točke slegnutog uzorka, prikazano na slici 24 [51].

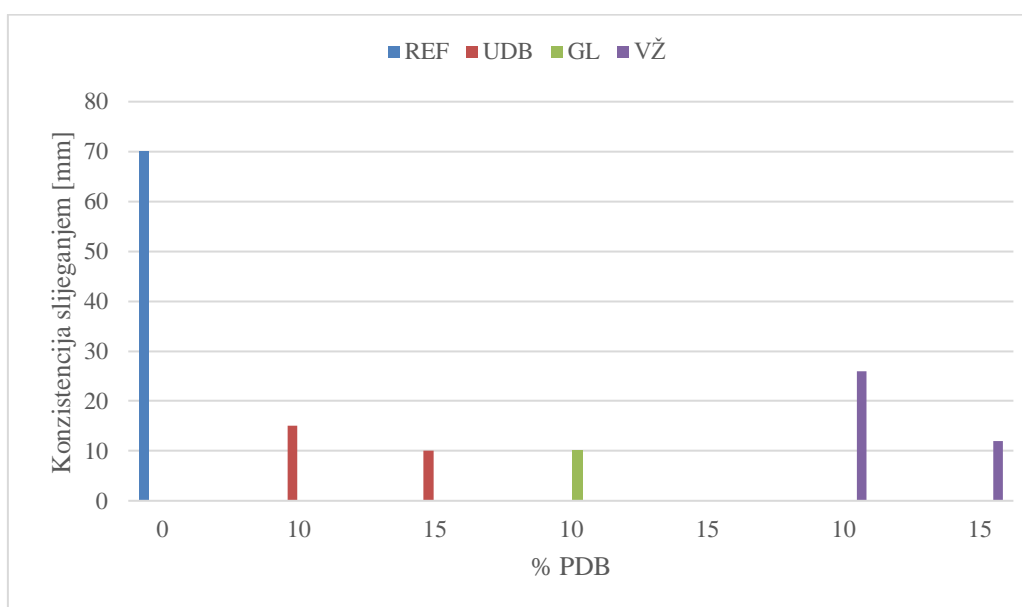


Slika 24. Ispitivanje konzistencije betona slijeganjem

U tablici 17. i na slici 25. prikazani su rezultati ispitivanja konzistencije slijeganjem.

Tablica 17. Rezultati ispitivanja konzistencije

Oznaka mješavine	REF	UDB10	UDB15	GL10	GL15	VŽ10	VŽ15
Konzistencija slijeganjem [mm]	70	15	10	10	0	26	12



Slika 25. Dijagram ispitivanja konzistencije

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da dodavanjem PDB-a dolazi do značajnog smanjenja obradljivosti betonske mješavine. Konzistencija betona se u svim mješavinama smanjuje s porastom udjela pepela. Zanimljiv rezultat dobiven je kod pepela iz Gline kod kojeg konzistencija iznosi 0 mm.

5.3. Ispitivanja betona u očvrslom stanju

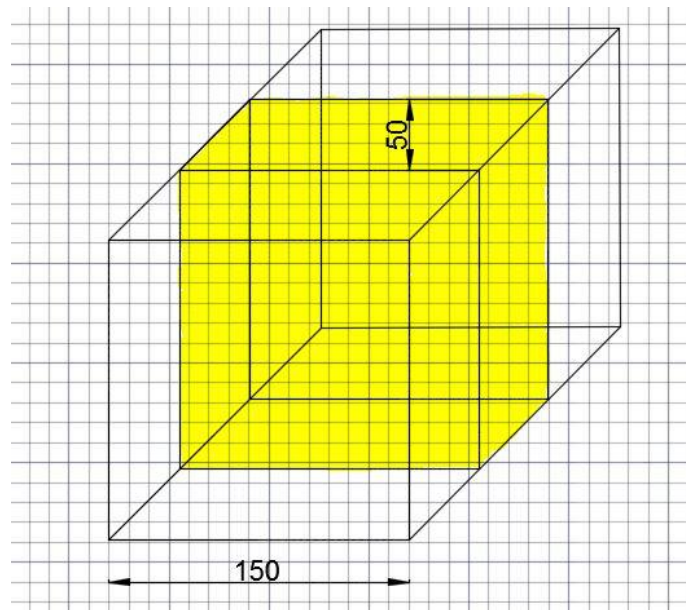
Na mješavinama su ispitana sljedeća svojstva betona u očvrslom stanju:

- otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje prema normi CEN/TR 15177:2006
- tlačna čvrstoća prema normi HRN EN 12390-3:2009
- vodopropusnost prema normi HRN EN 12390-8:2009
- faktor razmaka pora postupkom Rapid Air.

5.3.1. Otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje

Ispitivanje se provodi prema normi CEN/TR 15177:2006. Postoje tri ispitne metode za procjenu otpornosti betona na smrzavanje: ispitivanje prizme, ispitivanje ploče i CIF ispitivanje. U ovom radu primijenjeno je ispitivanje ploče.

Za ispitivanje su potrebna četiri uzorka, koja se prvi dan čuvaju u kalupima na temperaturi od 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti od 95 ± 5 %. Uzorci se vade iz kalupa nakon 24 ± 2 h i odmah se stavljaju u kupku s pitkom vodom, a kad dosegnu starost od 7 dana vade se iz vodene kupke i stavljaju u klimatsku komoru. Iz klimatske komore izvade se uzorci stari 21 dan i ispile pomoću dijamantne pile okomito na gornju površinu iz četiri kocke dimenzija $150 \times 150 \times 150$ mm da se dobiju ploče debljine 50 ± 2 mm. Položaj ispitnog uzorka na ispiljenoj kocki prikazan je na slici 26. Nakon piljenja uzorci se operu u pitkoj vodi i obriše se višak vode pomoću vlažne spužve. Uzorci ploče izlažu se djelovanju smrzavanja i odmrzavanja nanoseći 3 mm debeli sloj 3 %-tne otopine natrijevog klorida (NaCl). Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje mjeri se kao relativni dinamički modul elastičnosti uporabom vremena prolaska ultrazvučnog impulsa nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Jedan ciklus smrzavanja i odmrzavanja traje 24 h[52].



Slika 26. Položaj ispitnog uzorka na ispiljenoj kocki

Potrebno je naznačiti točke na uzorku na površini betona na dvije paralelne bočne površine, koje se upotrebljavaju za određivanje oštećenja unutarnje strukture. Točke ne bi smjele imati oštećenja, pore i trebaju se zaštititi papirnatim naljepnicama koje imaju promjer 26 ± 1 mm. Na uzorak se prilijepe guma debljine $3 \pm 0,5$ mm i izbuše rupice promjera 26 ± 1 mm na dvije paralelne bočne površine. Guma se postavi na pet površina uzorka, a šesta površina uzorka je ispitna površina na koju se nanese ljepilo oko ispitne površine između betona i gume. Prije ispitivanja, sve se površine uzorka osim ispitne površine toplinski izoliraju s polistirenom debljine 0,1 do 0,2 mm. Ispitivanje smrzavanja i odmrzavanja počinje nakon 28 dana i na uzorke se 72 ± 2 h postavi otopina NaCl debljine 3 mm na temperaturi od 20 ± 2 C, 15 minuta prije nego što se uzorci stave u komoru za smrzavanje ukloni se otopina. Potom se odredi početna vrijednost za mjerenje oštećenja i izlije 67 ml sredstva za smrzavanje na ispitnu površinu tako da se postigne debljina od 3 mm. Potrebno je spriječiti isparavanje sredstva za smrzavanje primjenom polietilenske folije. Na slici 27. prikazani su uzorci za ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja/ odmrzavanja. Uzorci se postavljaju u komoru za smrzavanje i započinje se s ciklusom smrzavanja i odmrzavanja. Nakon što prođe 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, mjeri se prolaz ultrazvučnog impulsa. Uzorci se smjeste na podložak i osigura se kontakt između sonde i betonske površine pomoću nekog sredstva npr. gumom ili čvrstim držanjem sonde pomoću ruke. Potrebno je izmjeriti vrijeme prolaska ultrazvučnog vala tri puta kako bi se dobila prosječna vrijednost [52].



Slika 27. Uzorci za ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

U slučaju da beton ima nedovoljnu otpornost na smrzavanje i odmrzavanje može doći do dvije vrste oštećenja: unutarnjeg oštećenja i ljuštenja. Unutarnje oštećenje se ne vidi na površini, ali uzrokuje promjene svojstava betona npr. smanjenje dinamičkog modula elastičnosti, a ljuštenje je gubitak materijala na površini betona.

U tablicama 18. i 19., prikazani su rezultati ispitivanja gubitka mase i vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa.

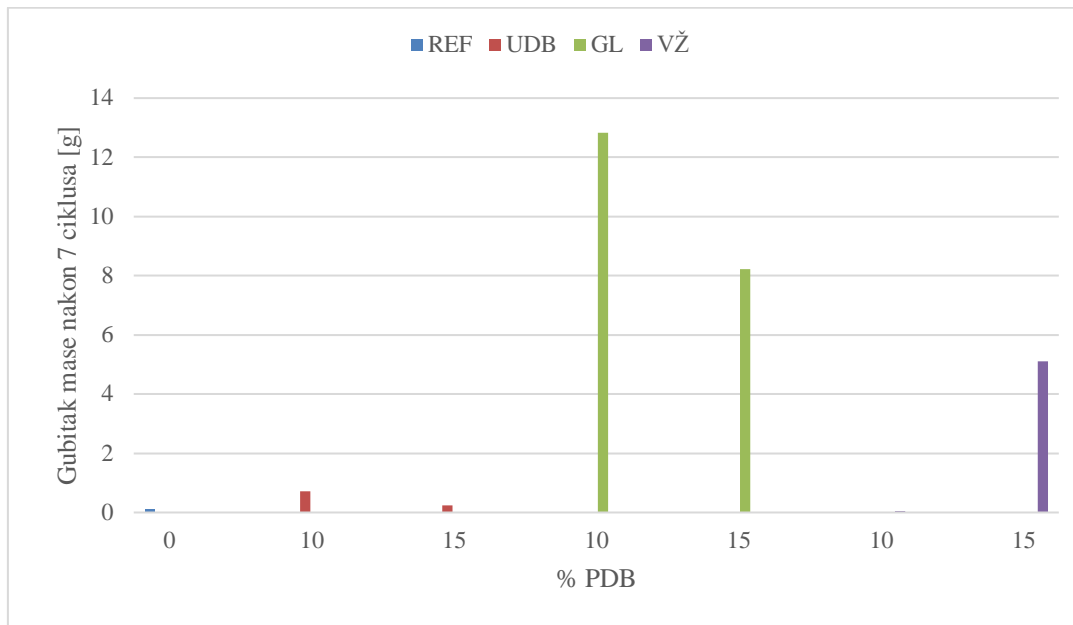
Tablica 18. Gubitak mase nakon 7, 14 i 28 ciklusa

Oznaka mješavine	Gubitak mase nakon 7 ciklusa [g]		Gubitak mase nakon 14 ciklusa [g]		Gubitak mase nakon 28 ciklusa [g]	
	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost
REF	0,13	0,14	0,01	0,05	0,02	0,08
	0,13		0,03		0,02	
	0,05		0,01		0,01	
	0,26		0,15		0,28	
UDB10	0,23	0,72	0,69	0,67	0,10	0,12
	0,61		0,54		0,03	
	0,64		0,40		0,29	
	1,39		1,06		0,06	
UDB15	0,13	0,24	0,09	0,20	0,06	0,26
	0,11		0,06		0,18	
	0,24		0,23		0,45	
	0,49		0,41		0,34	
GL10	5,85	12,82	12,52	15,63	3,52	6,11
	11,55		7,30		8,14	

	19,46		24,98		3,14	
	14,43		17,70		9,63	
GL15	19,66	8,22	11,31	7,12	2,57	2,85
	3,29		4,8		3,35	
	3,10		4,59		0,83	
	6,84		7,78		4,63	
VŽ10	0,01	0,04	0,45	0,66	/	/
	0,07		0,56		/	
	0,05		0,93		/	
	0,03		0,68		/	
VŽ15	6,02	5,11	14,23	12,30	/	/
	6,41		13,75		/	
	2,66		8,34		/	
	5,35		12,73		/	

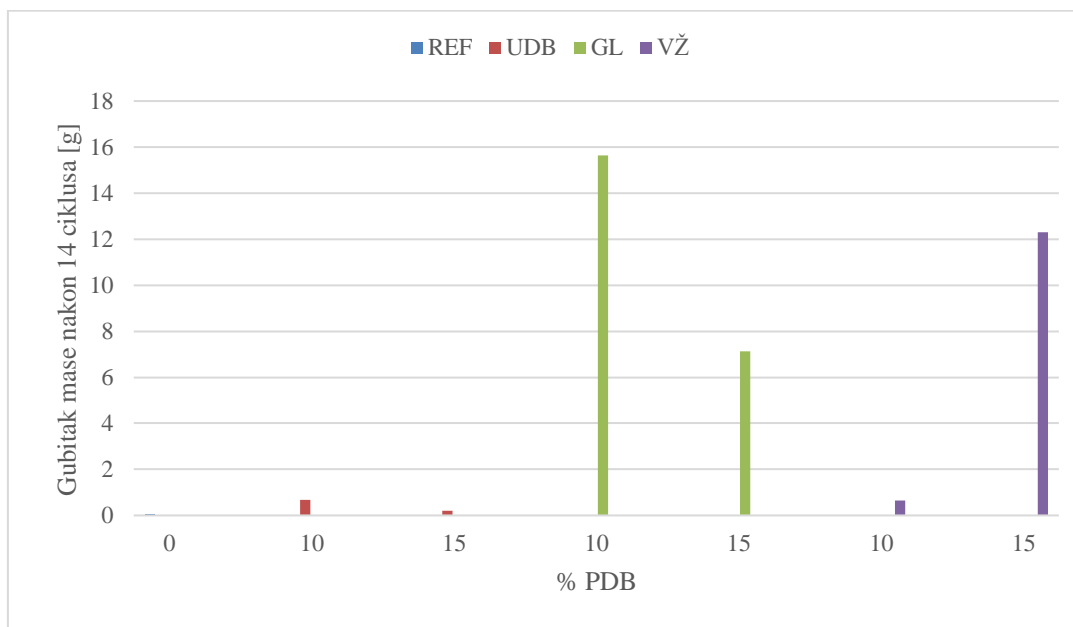
Kod referentne mješavine i mješavina UDB10, VŽ10 i 15UDB slabo je ljuštenje površine uzorka i ispadaju sitna zrna agregata do dubine od 2 mm, to je indicacija da će beton biti otporan na smrzavanje i odmrzavanje, a kod mješavina GL10, GL15 i VŽ15 srednje je ljuštenje tj. 50 % površine uzorka se ljušti i dolazi do ispadanja zrna agregata dubine veće od 4 mm i to je indicacija da beton neće biti otporan na smrzavanje i odmrzavanje.

Na slikama 28., 29. i 30. prikazane su srednje vrijednost gubitka mase uzoraka nakon 7, 14 i 28 ciklusa.



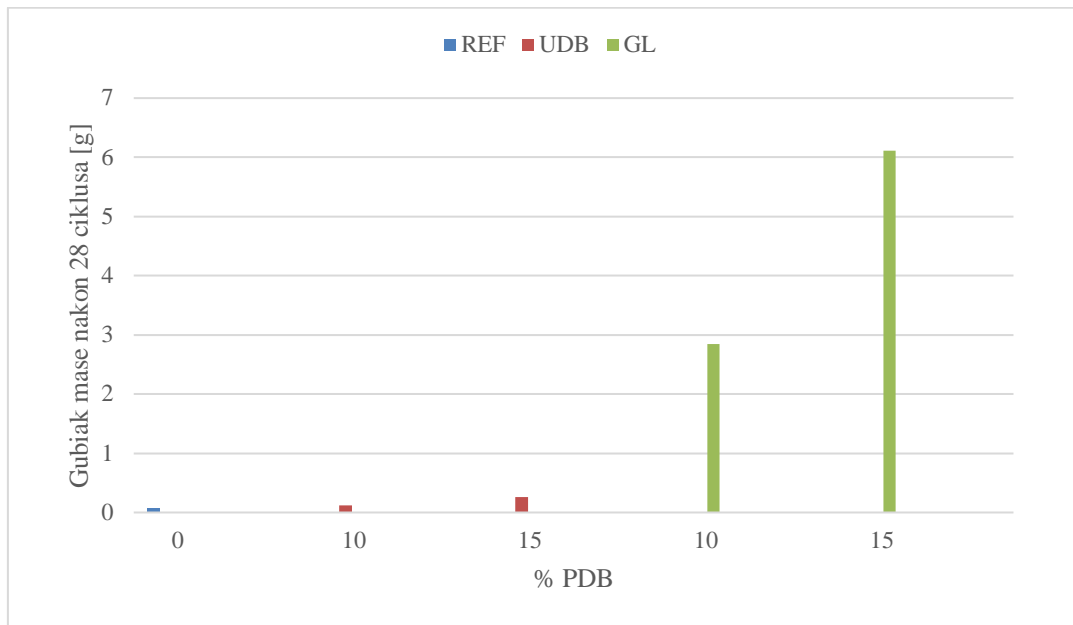
Slika 28. Srednja vrijednost gubitka mase nakon 7 ciklusa

Na slici 28. vidi se da je najveći gubitak mase nakon 7 ciklusa kod mješavine sa udjelom PDB-a od 10 % iz Gline u iznosu od 12,82 grama, a najmanji gubitak mase kod referentne mješavine i mješavine s 10 % PDB-a iz Varaždina u iznosu od 0,14 i 0,04 grama.



Slika 29. Srednja vrijednost gubitka mase nakon 14 ciklusa

Na slici 29. vidi se da je najveći gubitak mase prisutan kod mješavine s 10 % PDB-a iz Gline u iznosu od 15,63 grama, a najmanji kod referentne mješavine u iznosu od 0,2 grama i mješavine 10 % PDB-a iz Varaždina i znosi 0,66 grama.



Slika 30. Srednja vrijednost gubitka mase nakon 28 ciklusa

Na slici 3. vidi se da je najmanji gubitak mase nakon 28 ciklusa kod referentne mješavine u iznosu od 0,08 grama, a najveći kod mješavine s 15 % PDB-a iz Gline u iznosu od 6,11 grama.

Tablica 19. Vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa

Oznaka mješavine	Vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa nakon 0 ciklusa [μ s]	
	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost
REF	29,6	29,6
	29,6	
	29,3	
	29,7	
UDB10	28,5	27,9
	28,7	
	28,2	
	29,5	
UDB15	28,3	28,0
	28,4	
	27,5	
	27,9	
GL10	30,7	31,0
	31,3	

	30,9	
	31,3	
GL15	31,0	32,5
	33,8	
	31,5	
	33,8	
VŽ10	30,7	31,1
	30,7	
	31,5	
	31,5	
VŽ15	31,6	31,2
	30,3	
	30,9	
	31,9	
Oznaka mješavine	Vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa nakon 7 ciklusa [μ s]	
	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost
REF	33,0	31,7
	31,3	
	31,0	
	31,5	
UDB10	30,1	31,1
	30,2	
	30,1	
	34,1	
UDB15	30,2	29,8
	30,1	
	29,3	
	29,7	
GL10	31,4	31,5
	31,7	
	31,5	
	31,5	
GL15	31,5	32,5
	34,2	

	31,6	
	32,7	
VŽ10	30,6	30,7
	30,8	
	30,6	
	30,8	
VŽ15	31,1	30,9
	30,6	
	31,1	
	30,7	
Oznaka mješavine	Vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa nakon 14 ciklusa [μ s]	
	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost
REF	31,2	31,1
	31,0	
	30,6	
	31,6	
UDB10	30,0	30,4
	30,0	
	30,1	
	31,5	
UDB15	30,0	29,8
	29,9	
	29,4	
	29,6	
GL10	37,0	36,3
	35,8	
	36,2	
	36,2	
GL15	34,6	33,9
	33,2	
	32,9	
	34,9	

VŽ10	30,2	31,5
	34,5	
	30,6	
	30,6	
VŽ15	30,4	30,7
	30,3	
	31,4	
	30,6	
Oznaka mješavine	Vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa nakon 28 ciklusa [μ s]	
	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost
REF	30,8	30,7
	30,8	
	30,4	
	30,8	
UDB10	29,5	30,2
	29,5	
	29,4	
	32,3	
UDB15	29,7	29,4
	29,7	
	28,9	
	29,3	
GL10	43,1	40,7
	38,9	
	40,2	
	40,6	
GL15	33,6	34,4
	33,9	
	33,6	
	36,3	

Relativni modul elastičnosti određuje se prema izrazu:

$$RDM = \left(\frac{t_o}{t_n}\right)^2 \times 100 [\%]$$

gdje je:

- t_o - početno vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa [μ s]

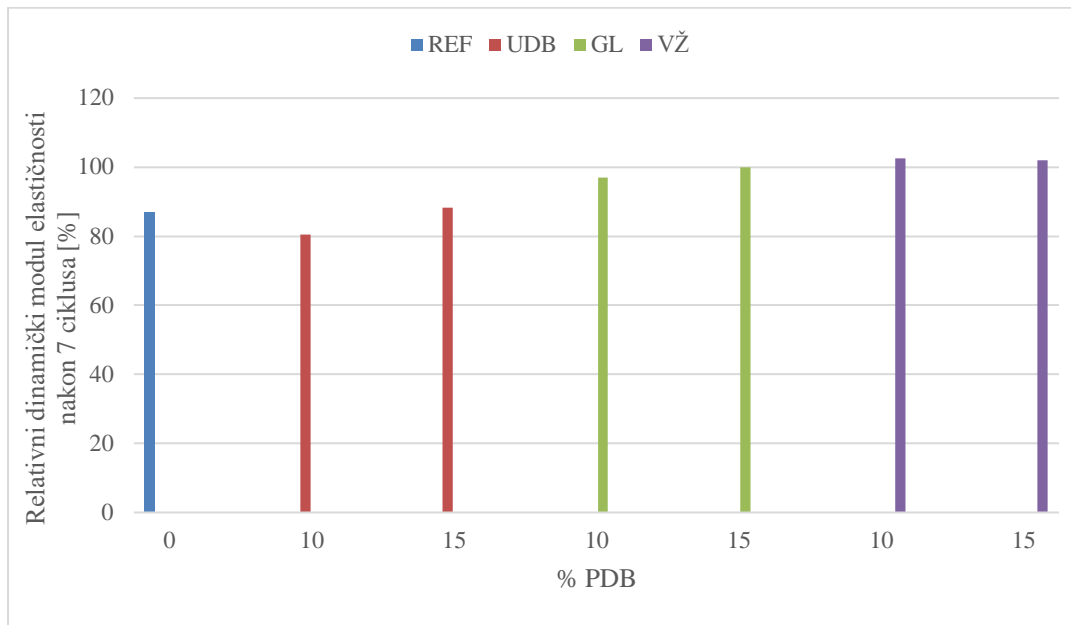
- t_n - vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa nakon n ciklusa [μ s] [52].

Dobivene vrijednosti relativnih modula elastičnosti su prikazane u tablici 20. i na slikama 31., 32. i 33.

Tablica 20. Relativni modul elastičnosti

Oznaka mješavine	Relativni modul elastičnosti nakon 7 ciklusa[%]	Relativni modul elastičnosti nakon 14 ciklusa[%]	Relativni modul elastičnosti nakon 28 ciklusa[%]
REF	87,2	90,6	93,0
UDB10	80,5	84,2	85,4
UDB15	88,3	88,3	90,7
GL10	96,9	72,9	58,0
GL15	100	91,9	89,3
VŽ10	102,6	97,5	/
VŽ15	102,0	103,3	/

Smatra se da je beton izložen agresivnom djelovanju okoliša razreda XF1 otporan na smrzavanje, ako je to utvrđeno ispitivanjem prema normi HRN CEN/TR 15177 u 28 ciklusa. Za beton otporan na smrzavanje izložen agresivnom djelovanju okoliša razreda XF1, pad dinamičkog modula elastičnosti ne smije biti veći od 25%. Kod mješavina REF, UDB10, UDB15, GL15 pad dinamičkog modula elastičnosti nije veći od 25 %, pa se može reći da su otporne na smrzavanje, a kod mješavina VŽ10, VŽ15 može se pretpostaviti da će biti otporne nakon 28 ciklusa. Kod mješavine GL10 dolazi do pada dinamičkog modula elastičnosti za 38,9 % i ona nije otporna na smrzavanje.



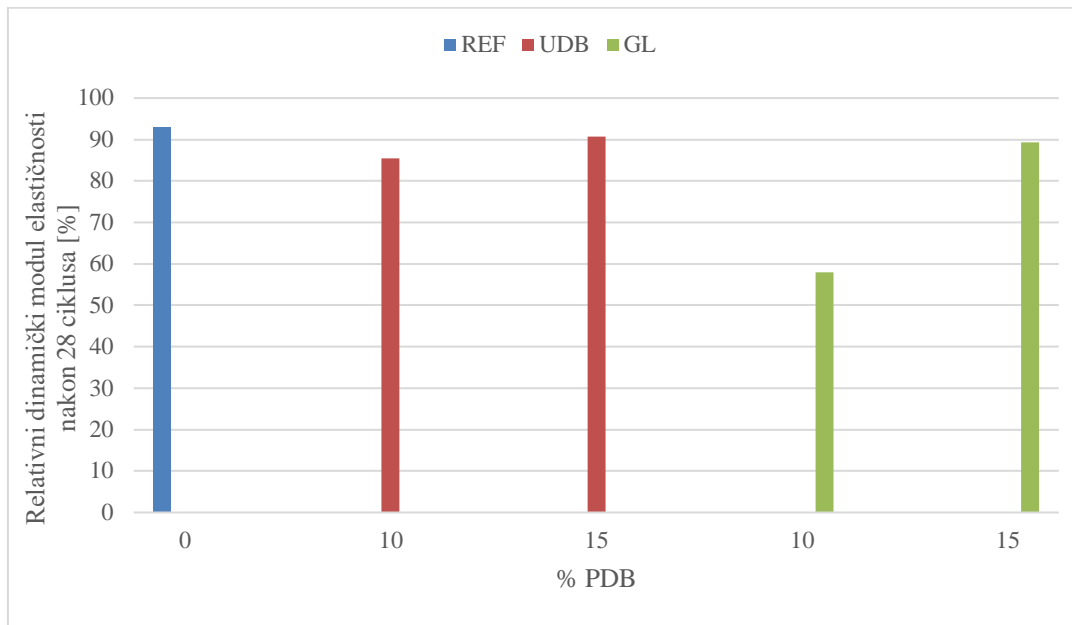
Slika 31. Relativni modul elastičnosti nakon 7 ciklusa

Iz slike 31. vidi se da je najveći relativni modul elastičnosti kod VŽ10 i VŽ15, a najmanji kod referentne mješavine i UDB10.



Slika 32. Relativni modul elastičnosti nakon 14 ciklusa

Na osnovu slike 32. vidljivo je da je najveća vrijednost relativnog modula elastičnosti nakon 14 ciklusa kod mješavine VŽ10 i VŽ15, a najmanja vrijednost relativnog modula elastičnosti kod GL10.



Slika 33. Relativni modul elastičnosti nakon 28 ciklusa

Na osnovu slike 33. vidi se da je relativni modul elastičnosti najveći kod referentne mješavine u iznosu od 93 %, a najmanji kod mješavine GL10 u iznosu od 58,0 %.

5.3.2. Tlačna čvrstoća

Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je prema normi HRN EN 12390-3:2009 na tri betonske kocke dimenzija 150x150x150 mm. Prije samog početka ispitivanja uzorci se vade iz komore, izmjere se dimenzije pomoću pomičnog mjerila i postave se u centar ležaja preše, tako da je smjer nanošenja opterećenja okomit na smjer ugradnje uzorka. U softver se unesu podaci o dimenzijama uzorka i opterećuju se u tlačnoj preši koja djeluje stalnom brzinom od 0,50 $N/mm^2 \cdot s$ do loma. Prilikom obrade rezultata kao mjerodavna vrijednost uzima se srednja vrijednost od tri uzorka.

Vrijednost tlačne čvrstoće izračuna se po formuli:

$$f_c = \frac{F}{A_c} [N/mm^2]$$

Gdje je:

-F-maksimalna sila u N

A_c -površina uzorka u mm^2 [53]

Na slici 34. je prikazan sustav za ispitivanje tlačne čvrstoće betona.

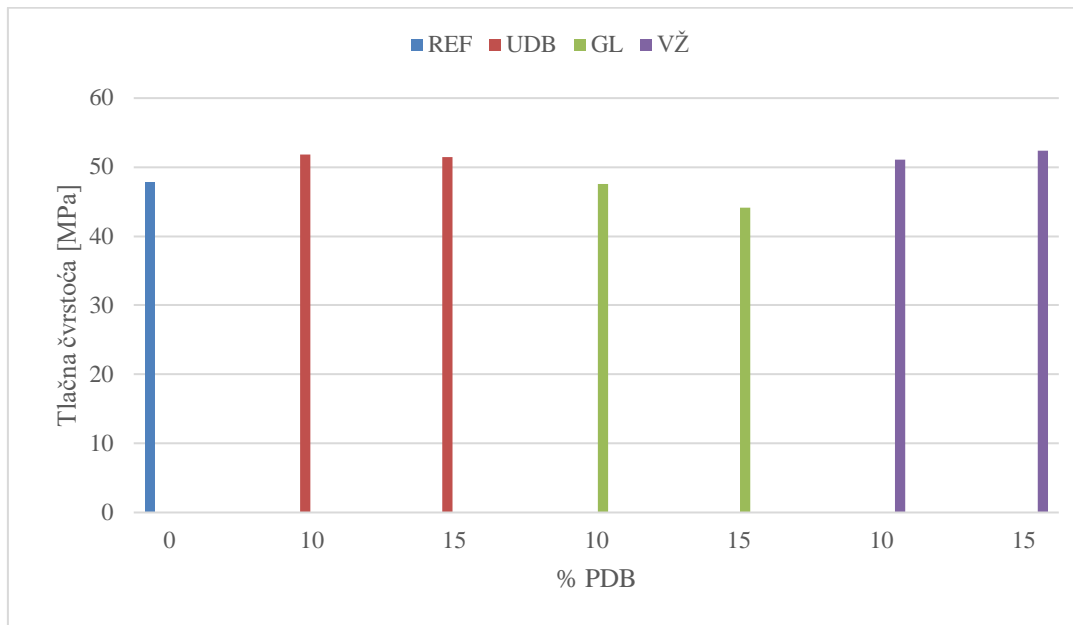


Slika 34. Sustav za ispitivanje tlačne čvrstoće betona

U tablici 21. i na slici 35. prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona.

Tablica 21. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

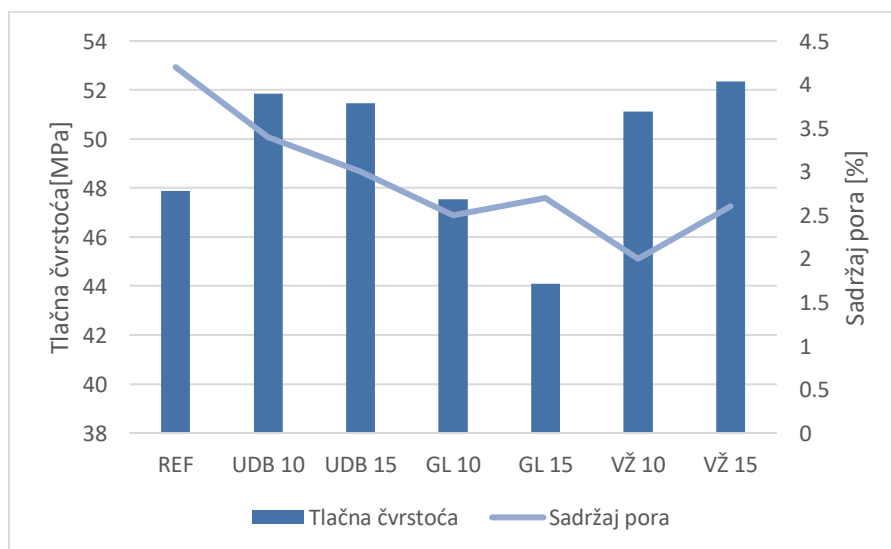
Oznaka uzorka	Pojedinačna vrijednost tlačne čvrstoće [MPa]			Srednja vrijednost tlačne čvrstoće [MPa]
REF	48,95	46,52	48,14	47,87
UDB10	53,93	50,91	50,71	51,85
UDB15	49,33	54,25	50,78	51,45
GL10	46,46	47,50	48,65	47,54
GL15	45,31	41,96	45,03	44,10
VŽ10	51,77	53,16	48,40	51,11
VŽ15	49,82	53,89	53,34	52,35



Slika 35. Rezultati tlačne čvrstoće

Analizom rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 28 dana uočava se smanjenje tlačne čvrstoće kod pepela iz Gline, a kod pepela iz Varaždina i Udbine povećanje u odnosu na referentnu mješavinu. Kod pepela iz Varaždina zabilježen je najveći porast tlačne čvrstoće (oko 8,6 %) u odnosu na referentnu mješavinu. Kod pepela iz Gline zabilježeno je smanjenje tlačne čvrstoće oko 7,9 %.

Tlačna čvrstoća nakon 28 dana može se povezati sa sadržajem zraka u mješavini. Ako je veći udio zraka bit će manja tlačna čvrstoća. Na slici 36. prikazan je odnos tlačne čvrstoće i sadržaja zraka.



Slika 36. Odnos tlačne čvrstoće i sadržaja zraka

Iz rezultata vidi se da referentna mješavina ima najveći sadržaj zraka, a time i najmanju tlačnu čvrstoću nakon 28 dana, mješavine sa PDB-om iz Varaždina i Udbine imaju manji sadržaj zraka i veću tlačnu čvrstoću.

5.3.3. Dubina prodora vode

Ispitivanje dubine prodora vode tj. vodopropusnosti betona provedeno je na tri valjka visine 150 mm i promjera 150 mm prema normi HRN EN 12390-8:2009. Betonska mješavina se postavlja u kalupe oblika valjka, nakon 24 ± 2 h uzorci se vade iz kalupa i stavljaju na sedam dana u vodenu kupku. Ispitivanje kreće nakon što uzorci dosegnu starost od 28 dana. Zatim se postave u uređaj za ispitivanje koji je prikazan na slici 37. i izlažu se konstantnom tlaku vode od 500 ± 50 kPa u trajanju od 72 ± 2 h. Nakon nanesenog tlaka uzorci se pomiču iz uređaja, obriše se višak vode i cijepanjem se prepolaovi uzorak i izmjeri se visina prodiranja vode [54].



Slika 37. Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti betona

Razredi dubine prodiranja vode prikazani su u tablici 22.

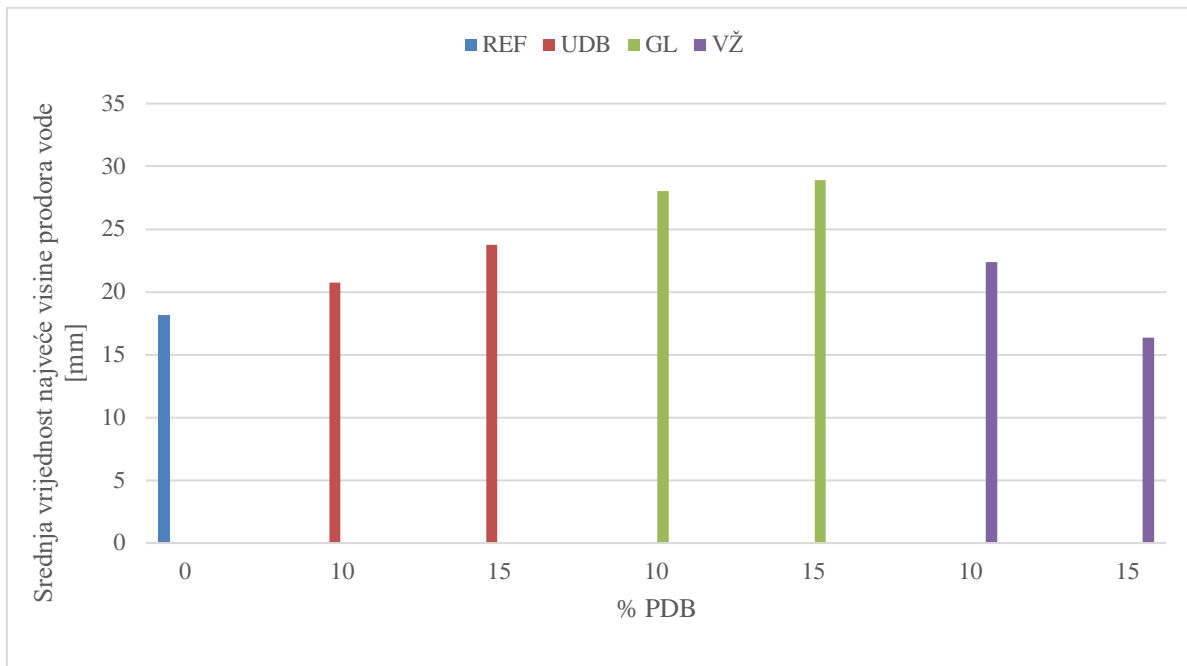
Tablica 22. Razredi dubine prodiranja vode [54]

Razred vodonepropusnosti	Dopušteni prodor vode [mm]
VDP 1	50
VDP 2	30
VDP 3	15

Rezultati ispitivanja dubine prodora vode prikazani su u tablici 23. i na slici 38.

Tablica 23. Rezultati ispitivanja dubine prodora vode

Oznaka ispitnog tijela	Najveća visina prodora vode (mm)	Srednja vrijednost najveće visine prodora vode (mm)
REF	21,65	18,12
	18,03	
	14,68	
UDB10	20,72	20,76
	19,43	
	22,14	
UDB15	33,94	23,74
	15,18	
	22,09	
GL10	37,32	28,04
	25,74	
	21,05	
GL15	26,01	28,88
	33,31	
	27,31	
VŽ10	17,49	22,40
	28,57	
	21,14	
VŽ15	15,39	16,38
	17,09	
	16,65	



Slika 38. Rezultati ispitivanja dubine prodora vode

Iz dobivenih rezultata vidi se da je najmanji prodor vode kod referentne mješavine u iznosu od 18,12 mm i mješavine sa udjelom pepela od 15% iz Varaždina u iznosu od 16,38 mm. Najveći prodor vode vidljiv je kod mješavina s udjelom pepela Gline od 15 % i 10 % i on iznosi 28,88 mm i 28,04 mm.

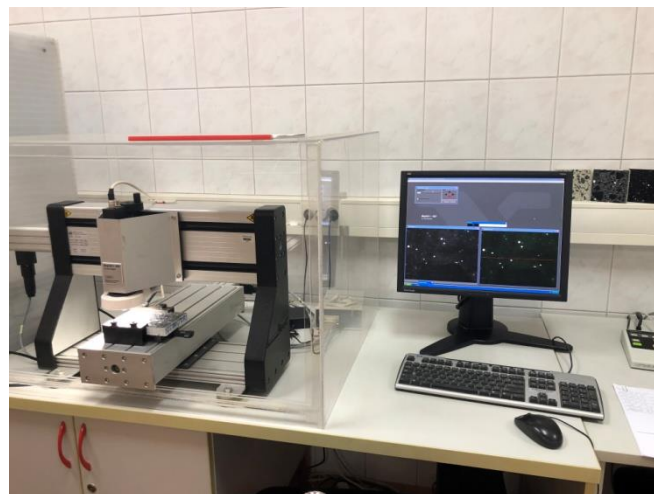
5.3.4. Faktor razmaka pora metodom Rapid Air

Linijska mikroskopska analiza tj. Rapid Air provodi se prema normi HRN EN 480-11:2005. Uzorci za provedbu ispitivanja su ispiljeni iz kocki dimenzija 150x150x150 mm. Dimenzije uzoraka za ispitivanje su širine 100 mm, visine 150 mm i debljine 20 mm. Prije nego što započne ispitivanje uzorci se ispoliraju dok ne budu potpuno ravni, nakon toga se površina očisti pomoću vode, zraka ili četke kako bi se uklonili svi ostaci od brušenja. Površina koja se ispituje i njezina suprotna strana moraju biti što je više moguće paralelne. Svrha postupka je izraditi površinu prikladnu za mikroskopsko ispitivanje strukture betona. Prikladna površina mora imati mat sjaj kad se osuši i rubovi moraju biti oštri, ne zaobljeni. Zatim se uzorak prikazan na slici 39. kontrastira tintom na površini i utiskuje se bijeli prah u zračne šupljine [56].



Slika 39. Uzorak za ispitivanje metodom Rapid Air

Ovim ispitivanjem se određuje sadržaj zraka, specifična površina i faktor razmaka betona u očvrslom stanju. Uređaj za ispitivanje se sastoji od pomičnog postolja na kojem se nalazi video kamera i računala koje prima i obrađuje podatke (slika 40). Uzorak se postavi na pomični stol i pomoću vijaka se fiksira i postavlja u horizontalni položaj, zatim se pozicionira kamera i uključuje program. U program se unese izračunata količina cementne paste, odredi područje snimanja na uzorku, broj linija koje se vuku u jednom potezu i duljinu snimanja. Minimalna duljina linije po kojoj uređaj snima po uzorku iznosi 2413 mm [54].



Slika 40. Uređaj za ispitivanje

Struktura zračnih pora dobije se skeniranjem serije traverznih linija koje idu paralelno prema gornjoj površini, dobivena slika u računalu pretvara se u digitalni zapis. Računalo pribrojava

piksele bijele boje tj. šupljine i crne boje tj. cementne paste ili agregata. Izbrojane piksele računalo pretvara u duljinu, tj. 1 piksel je jednak duljini od 2,1 μm. Prilikom mjerenja pravci sijeku mjehuriće uglavnom kao sekante. Kod ispitivanja se mjere dužine između kraja jednog i početka drugog mjehurića i mjeri se duljina sekante svakog zračnog mjehurića. Od mjerenja se izuzimaju mjehurići čija je sekanta veća od 4mm [54].

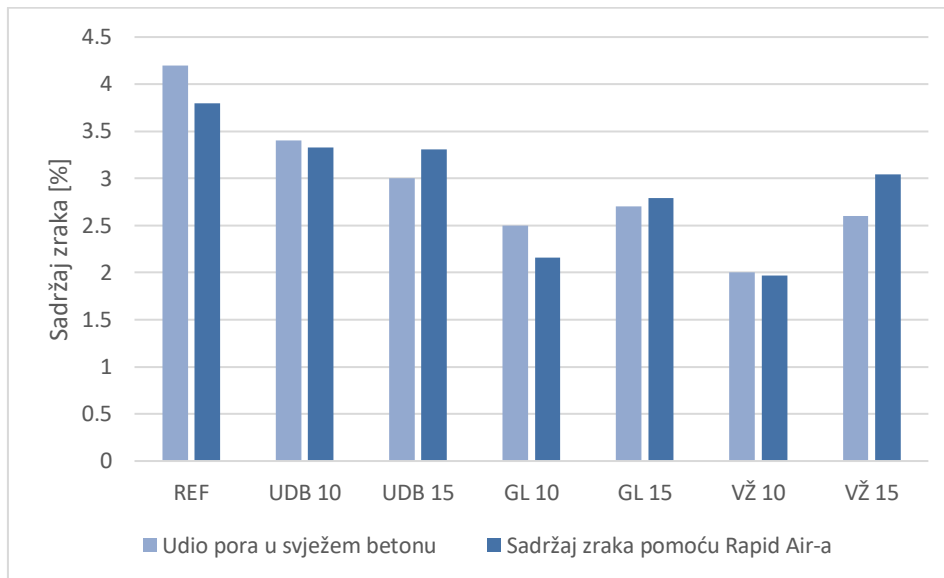
U tablici 24. su prikazani rezultati ispitivanja koji sadrže faktor razmaka, proračunatu količinu cementne paste i sadržaj zraka.

Tablica 24. Rezultati ispitivanja testom Rapid Air

Oznaka uzorka	Količina cementne paste [m^3]	Faktor razmaka [mm]	Sadržaj zraka [%]
REF	30,1	0,099	3,80
UDB10	29,4	0,160	3,33
UDB15	28,6	0,134	3,31
GL10	29,6	0,249	2,16
GL15	28,8	0,147	2,79
VŽ10	29,9	0,255	1,97
VŽ15	29,3	0,187	3,04

Analizom rezultata vidi se da referentna mješavina i mješavine koje sadrže 15 % i 10 % PDB-a iz Udbine, 15 % pepela iz Gline i 15 % pepela iz Varaždina imaju faktor razmaka manji od 2 mm i pretpostavlja se da će biti otporne na smrzavanje odmrzavanje, a mješavine koje sadrže 10 % pepela iz Gline i Varaždina neće biti otporne na smrzavanje.

Sadržaj zraka dobiven testom Rapid Air može se usporediti s udjelom pora u svježem betonu. Korelacija rezultata je prikazana na slici 41.



Slika 41. Korelacija udjela pora u svježem betonu i sadržaj zraka pomoću Rapid Air-a.

Iz korelacije rezultata vidljivo je da je većina rezultata dobivenih ispitivanjem udjela pora u svježem stanju veća od sadržaja zraka pomoću Rapid Air-a. Kod mješavina s 15 % PDB-a iz Udbine, Gline i Varaždina sadržaj zraka je veći sa testom Rapid Air.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedeno je istraživanje zamjene udjela pepela drvene biomase s cementom u betonu. Istraživanje je provedeno s tri PDB-a dobivena iz energana na drvenu biomasu iz Udbine, Gline i Varaždina. Na osnovu dobivenih rezultata ustanovljeno je:

Gustoća svježih betonskih mješavina u usporedbi s mješavinom koja nije sadržavala PDB je veća kod svih mješavina s PDB-om iz Udbine (UDB), Gline (GL) i Varaždina (VŽ).

Temperatura u svježem betonu raste s dodatkom PDB-a u mješavini, najmanji iznos zabilježen je kod referentne mješavine u iznosu od 20,5 °C, a najveći iznos kod mješavine s udjelom PDB-a od 15 % iz Udbine u iznosu od 23,8 °C.

Udio pora u betonu se smanjuje s povećanjem udjela PDB-a kod svih mješavina. Najveći udio pora zabilježen je kod referentne mješavine u iznosu od 4,5 %, a najmanji udio pora kod mješavine s PDB-om od 10 % iz Varaždina u iznosu od 2 %.

Konzistencija slijeganjem pada s porastom udjela PDB-a u betonu, najveća vrijednost dobivena je kod referentne mješavine u iznosu od 70 mm, zanimljiv rezultat konzistencije zabilježen je kod mješavine s 15 % PDB-a iz Gline u iznosu od 0 mm.

Utjecaj betona na smrzavanje i odmrzavanje opisan je gubitkom mase na površini i unutarnjim oštećenjem opisanim relativnim dinamičkim modulom elastičnosti nakon 28 ciklusa kod mješavina s 0 % PDB-a, s 10 % i 15 % PDB-a iz Udbine i Gline i nakon 14 ciklusa kod mješavina s 10 % i 15 % PDB-a iz Varaždina. Gubitak mase je najmanji kod mješavina s 0 %, 10 % PDB-a iz Udbine i Varaždina. Najveći gubitak mase prisutan je kod mješavina s 10 % i 15 % PDB-a iz Gline. Gubitak mase je vidljiv na površini i karakteriziran je slabim ljuštenjem, srednjim ljuštenjem, vrlo velikim i jako velikim ljuštenjem. Kod mješavina s 10 % i 15 % PDB-a iz Gline i 15 % PDB-a iz Varaždina prisutno je srednje ljuštenje, otpadaju zrna agregata do dubine od 4 mm i dolazi do ljuštenja 50 % površine uzorka. Unutarnje oštećenje se očituje u smanjenju relativnog dinamičkog modula elastičnosti. Kod mješavine s 10 % PDB-a iz Gline dolazi do pada dinamičkog modula elastičnosti za 38,9 % i ona neće biti otporna na smrzavanje, jer prema normi HRN CEN/TR 15177 u 28 ciklusa, pad dinamičkog modula elastičnosti ne smije biti veći od 25 % da bi beton bio otporan na djelovanje smrzavanja. Mješavine REF, UDB10, UDB15 su otporne na djelovanje smrzavanja i odmrzavanja nakon 28 ciklusa, a za mješavine VŽ10 i VŽ15 za

pretpostavit je da će biti otporne nakon 28 ciklusa, zbog malog pada u relativnom dinamičkom modulu elastičnosti nakon 14 ciklusa.

Tlačna čvrstoća raste kod mješavina UDB10, UDB15, VŽ10, VŽ15 u usporedbi s REF, a pada kod mješavina GL10 i GL15. Referentna mješavina imala je tlačnu čvrstoću nakon 28 dana u iznosu od 48,87 MPa, a kod GL10 i GL15 tlačna čvrstoća iznosila je 47,54 i 44,10 MPa. Tlačna čvrstoća nakon 28 dana može se korelirati sa sadržajem zraka. Ako je veći udio zraka biti će manja tlačna čvrstoća.

Dubina prodora vode najmanja je kod referentne mješavine u iznosu od 18,12 mm i mješavine VŽ15 u iznosu od 16,38 mm. Najveći prodor vode zabilježen je kod mješavina GL10 i GL15 u iznosu od 28,88 mm i 28,04 mm.

Faktor razmaka pora proveden je metodom Rapid Air i ako je manji od 2 mm pretpostavlja se da će uzorci biti otporni na smrzavanje i odmrzavanje. Mješavine REF, UDB10, UDB15, VŽ15, GL15 imale su faktor razmaka manji od 2 mm, a mješavine GL10 i VŽ10 imale su faktor razmaka pora veći od 2 mm.

Eksperimentima je dokazano da se PDB može upotrijebiti kao adekvatna zamjena dijela cementa u betonu, iako su rezultati ispitivanja zadovoljavajući potrebna su daljnja ispitivanja zbog nedovoljne istraženosti ovog područja.

7. ZAHVALE

Veliko hvala mentorici prof. dr. sc. Nini Štirmer na pruženoj prilici, izdvojenom vremenu, savjetima i znanju tijekom izrade i pisanja ovog rada.

Hvala Zvezdani Matuzić i Miri Matuzić na pruženoj pomoći i ugodnoj atmosferi u laboratoriju Zavoda za materijale na Građevinskom fakultetu u Zagrebu.

8. POPIS LITERATURE

- [1] Kosior-Kazberuk M. (2013), Surface scaling resistance of concrete with fly ash from co-combustion of coal and biomass. *Procedia Engineering*, 57, 605–613.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.077>
- [2] URL1: Biomasa <https://bs.wikipedia.org/wiki/Biomasa> (14.3.2019.)
- [3] Rajamma R., Ball R. J., Tarelho L. A. C., Allen G. C., Labrincha J. A., Ferreira V. M. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials, *Journal of Hazardous Materials*, 172(2–3), 1049–1060, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>
- [4] Štirmer, N. (2016). Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću, Hrvatska zaklada za znanost, Zagreb,
<https://bib.irb.hr/datoteka/929289.Tarec-brosura.pdf>
- [5] URL2: Strateški ciljevi Europske Unije do 2030. godine, <https://www.enu.hr/ee-u-hrvatskoj/20-20-20-i-dalje/ciljevi-eu-2030/> (15.4.2019.)
- [6] Projekt TAREC² Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću IP-06-2016-7701, Hrvatska zaklada za znanost,
<http://www.grad.unizg.hr/tarec>
- [7] Bjegović D., Štirmer N., (2015.), Teorija i tehnologija betona, Tiskara Zelina, Zagreb
- [8] Đureković A., (1996), Cement, cementni kompozit i dodaci za beton, Školska knjiga
- [9] Thomas M., (2007.) Optimizing the use of fly ash in concrete,
https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf
- [10] HRN EN 450-1:2003 Leteći pepeo za beton – 1.dio Definicije, specifikacije i kriterij sukladnost, <https://hrn4you.hzn.hr/>
- [11] Abdullahi, M. (2006), Characteristics of Wood ASH/OPC Concrete, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, (8), 9–16.
- [12] Kosior-Kazberuk M., Józwiak-Niedzwiedzka, D. (2010). Influence of Fly Ash From Co-Combustion of Coal and Biomass on Scaling Resistance of Concrete, *Archives of Civil Engineering*, 56(3), 239–254, <https://doi.org/10.2478/v.10169-010-0013-x>

- [13] Carrasco B., Cruz N., Terrados J., Corpas F.A., Perez L., (2014.), An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks, *Fuel* 118, 272-280, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.077>
- [14] Naik T.R., Siddique R., Kraus R.N., (2003), Mechanical properties and freezing and thawing resistance of concrete incorporating wood fly ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*
- [15] Udoeyo F.F., Inyang H., Young D. T., Oparadu E.E., (2006), Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Concrete, *Journal of materials in civil engineering*, 18:605 – 611
- [16] Ukrainczyk N., Koenders E. A. B., Vrbos N., (2016.), Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials, *Chem. Biochem. Eng. Q.* 30, 137-148
- [17] URL3: NN 100/2015 Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_09_100_1937.html (20.4.2019.)
- [18] URL4: Drvna biomasa-gorivo budućnosti http://www.ba.undp.org/content/dam/bosnia_and_herzegovina/docs/News/E&E%20Sector/Biomasa/Drvna%20biomasa%20brosura%202017.pdf (14.3.2019.)
- [19] Agrela F., Cabrera M., Morales M. M., Zamorano M., Alshaaer M. (2018), Biomass fly ash and biomass bottom ash, In *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete (Vol. 3)*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102480-5.00002-6>
- [20] URL5: Drvna sječa, https://www.moja-djelatnost.hr/sjeca-vuca-prerada-i-prodaja-drvnih-sortimenata-udbina/sumarski-obrt-tina-vera-rogić/MMx_4qjh (14.3.2019.)
- [21] URL6: Peleti, <http://www.biogrijanje.hr/info-pult/baza-znanja/zasto-peleti-5> (14.3.2019.)
- [22] URL7: Briketi, <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1028/preview> (14.3.2019.)
- [22] Pels J. R., De Nie D. S., Kiel J. H. A. (2005), Utilization of ashes from biomass combustion and gasification, Published at 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, 17-21 October 2005, (October), 17–21.
- [24] Dragičević, V., (2011), Optimizacija ložišta za izgaranje biomase, Doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci

- [25] Milovanović, B. (2017), Vrste i količine dostupnog pepela iz drvene biomase, <https://www.hgk.hr/documents/2-milovanovic-vrste-i-kolicine-pepela59f733a2222ef.pdf>
- [26] HRN EN 197-1:2012, Cement – 1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene <https://hrn4you.hzn.hr/>
- [27] Yang Z., Huddleston J., Brown H. (2016), Effects of Wood Ash on Properties of Concrete and Flowable Fill, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 04(07), 101–114. <https://doi.org/10.4236/msce.2016.47013>
- [28] Trybalski K., Kępys W., Krawczykowska A., Krawczykowski D., Szponder D. (2014), Co-combustion of coal and biomass – chemical properties of ash. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(4), 1427–1431.
- [29] Naik, T. R. (1999). Tests of Wood Ash as a Potential Source for Construction Materials. Center for By-Products Utilization, (August), [https://www4.uwm.edu/cbu/Papers/1999 CBU Reports/REP-365.pdf](https://www4.uwm.edu/cbu/Papers/1999%20Cement%20Reports/REP-365.pdf)
- [30] URL8: The fineness and particle size distribution of Portland cement, http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph3_7.html (6.4.2019.)
- [31] URL9: Particle Size and Shape Analysis of Cement Samples, <https://www.microscop.ru/uploads/AppNote%203.2%20Cement.pdf> (6.4.2019.)
- [32] Jozwiak-Niedzwiedzka D.,(2015.), Microscopic Observations of Self-Healing Products in Calcareous Fly Ash Mortars, *Microscopy Research and Technique* 78:22–29
- [33] Wang S., Llamazos E., Baxter L., Fonseca F. (2008), Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests. *Fuel*, 87(3), 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.027>
- [34] URL10: What is the role of silicon dioxide and calcium oxide in cement, <https://www.quora.com/What-is-the-role-of-silicon-dioxide-and-calcium-oxide-in-cement> (16.4.2019.)
- [35] URL11: 8 Main Cement Ingredients & Their Functions, <https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/cement/10-cement-ingredients-with-functions> (16.4.2019.)
- [36] Arimanwa M.C., Onwuka D.O., Arimanwa J.I., (2016.), Effect of Chemical Composition of Ordinary Portland cement on the Compressive Strength of Concrete, *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 5(3)

- [37] Fapohunda C., Akinbile B., Oyelade A., (2018.) A review of the properties, structural characteristics and application potentials of concrete containing wood waste as partial replacement of one of its constituent material, De Gruyter
- [38] Hranilović A., Uzelac S. (2005.), Metode ispitivanja otpornosti betona na smrzavanje, GRAĐEVINAR, 57 (5)
- [39] Ille M., Sekulić D., (2006.), Mehanizmi i modeliranje oštećenja betona djelovanjem smrzavanja, Građevinar, GRAĐEVINAR 58 (1)
- [40] Obla K. H., Kim H., Lobo C. L. (2016). Criteria for Freeze-Thaw Resistant Concrete Mixtures. *Advances in Civil Engineering Materials*, 5(2)
- [41] Hranilović Trubić A. (2011.) Projektiranje sastava betona otpornog na smrzavanje i odmrzavanje, Doktorski rad, Građevinski fakultet Zagreb
- [42] Nagrockienė D., Daugėla A. (2018), Investigation into the properties of concrete modified with biomass combustion fly ash, *Construction and Building Materials*, 174, 369–375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.125>
- [43] Batt A. S., Garg A. (2017). Partial Replacement of Wood Ash with Ordinary Portland Cement and Foundry Sand as Fine Aggregate. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 07(02). <https://doi.org/10.4172/2165-784x.1000272>
- [44] Akhter M. (2017). Experimental Study on Effect of Rice Husk Ash on Strength of Concrete, *International Journal of Modern Trends in Engineering & Research*, 4(7), 109–112. <https://doi.org/10.21884/ijmter.2017.4218.5o5gf>
- [45] Subbaramaiah G., prof. Rao H. S., Dr. Ghorpade V.G., (2015.) Effect of Addition And Partial Replacement of Cement By Wood Waste Ash on strength Properties of Structural Grade Concrete, *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, izdanje 9,
- [46] URL12: Holcim, Tehnička uputa https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/atoms/files/2014_05_08_tehnicka_uputa_holcim_pri_mus.pdf (13.3.2019.)
- [47] URL13: Auditorne vježbe: Cement http://www.grad.unizg.hr/_download/repository/TTB_1_Vjezbe_Cement_2016%5B1%5D.pdf (13.3.2019.)
- [48] HRN EN 12350-6:2009-Ispitivanje svježeg betona-6.dio-Gustoća
- [49] URL14: Vouk D., Nakić D., Štirmer N., Serdar M., Baričević A., Rezultati ispitivanja na betonu,

http://www.grad.hr/rescue/materijali/Izvjestaji_1/Izvjestaj_br_5_Rezultati_ispitivanja_na_betonu.pdf (15.3.2019.)

[50] HRN EN 12350-7:2009-Ispitivanje svježeg betona-7.dio-Sadržaj pora

[51] HRN EN 12350-2:2009-Ispitivanje svježeg betona-2.dio-Ispitivanje slijeganjem

[52] HRN CEN/TR 15177:2006-Ispitivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje

[53] HRN EN 12390-3:2009-Ispitivanje očvrsnulog betona-3.dio-Tlačna čvrstoća

[54] URL15: Propusnost http://www.grad.unizg.hr/_download/repository/P6-Propusnost-2017-2018.pdf (22.3.2019.)

[55] HRN EN12390-8:2009-Ispitivanje očvrsnulog betona-8.dio-Dubina prodora vode

[56] HRN EN 480-11:2005- Dodaci betonu, mortu, mortu za injektiranje

9. SAŽETAK

Mikrostruktura betona s pepelom drvene biomase pri djelovanju smrzavanja i odmrzavanja

Iva Ereš

U građevinskoj industriji velika je potražnja za cementom, koji je glavni sastojak betona. Proizvodnja cementa uključuje intenzivno korištenje energije i sirovina, a u isto vrijeme se oslobađa velika razina ugljičnog dioksida. Održivost okoliša ugrožena je zbog nekontroliranog i masovnog korištenja neobnovljivih resursa u nastajanju betonskih konstrukcija. Pepeo drvene biomase jedan je od alternativnih materijala koji se može upotrijebiti za zamjenu djela cementa. PDB je otpadni materijal iz energana za proizvodnju električne energije na drvenu biomasu i može poslužiti u proizvodnji "zelenijeg" betona. U radu su prikazane karakteristike tri PDB-a kao zamjene za udio cementa CEM I 42,5 R. Provedena su ispitivanja u svježem i očvrslulom stanju betona, te se ispitaio utjecaj PDB-a na promjenu mikrostrukture betona pri djelovanju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja kao bitnog svojstva za sve vrste betona namijenjene za primjenu u vanjskom okolišu. Istraživanja su provedena u sklopu projekta TAREC²: Transformacija pepela iz drvene biomase u građevne kompozite s dodanom vrijednošću.

Ključne riječi: pepeo, biomasa, smrzavanje, odmrzavanje, beton

10. SUMMARY

Microstructure of concrete with wood biomass ash under freeze-thaw action

Iva Ereš

There is great demand in the construction industry for cement, the main component in concrete. Cement production includes the intensive use of energy and raw material, while at the same time releases high levels of carbon dioxide. Environmental sustainability is jeopardized by the uncontrolled and massive use of non-renewable resources in concrete constructions. Wood ash biomass (WAB) is one of the alternative materials that can be used to replace cement. WAB is waste material from the production of electricity in power plants and it can serve in the production of "greener" concrete. This paper presents the characteristics of three WABs as replacement for cement CEM I 42,5 R. Tests are conducted in fresh and hardened conditions of concrete and influence of WAB on microstructure of concrete during the freeze thaw cycles for all types of concrete intended for use in the external environment is shown. The research is part of the TAREC² project: Transformation of ashes from wood biomass into value-added construction composites.

Keywords: ash, biomass, freeze, thaw, concrete

POPIS SLIKA

Slika 1. Postrojenja na drvnu biomasu [6].....	2
Slika 2. Energana na drvnu biomasu [4].....	3
Slika 3. Izvor biomase.....	5
Slika 4. Drvna sječa [20].....	6
Slika 5. Peleti [21].....	7
Slika 6. Briketi [22].....	7
Slika 7. Shematski proces u ložištu [24].....	9
Slika 8. Rotacijska peć za proizvodnju klinkera [7].....	11
Slika 9. Morfologija cementa [32].....	13
Slika 10. Morfologija čestica PDB-a[1].....	13
Slika 11. Oštećenja betona zbog smrzavanja [39].....	18
Slika 12. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa [14].....	20
Slika 13. Brzina prolaska ultrazvučnog impulsa [42].....	21
Slika 14. Tlačna čvrstoća nakon 28 dana s različitim udjelima PDB-a [11, 12, 14, 15, 43 - 45]	23
Slika 15. Frakcije agregata.....	25
Slika 16. Aparatura za ispitivanje gustoće.....	26
Slika 17. Postupak miješanja betona.....	29
Slika 18. Uzorci sa pripadnim oznakama.....	29
Slika 19. Gustoće svježeg betona.....	32
Slika 20. Digitalni termometar.....	32
Slika 21. Temperature ispitnih mješavina.....	33
Slika 22. Porometar.....	34
Slika 23. Sadržaj pora ispitnih mješavina.....	35
Slika 24. Ispitivanje konzistencije slijeganjem betona.....	36
Slika 25. Dijagram ispitivanja konzistencije.....	36

Slika 26. Položaj ispitnih uzoraka na ispiljenoj kocki.....	38
Slika 27. Uzorci sa ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja odmrzavanja.....	39
Slika 28. Srednja vrijednost gubitka mase nakon 7 ciklusa.....	41
Slika 29. Srednja vrijednost gubitka mase nakon 14 ciklusa.....	41
Slika 30. Srednja vrijednost gubitka mase nakon 28 ciklusa.....	42
Slika 31. Relativni modul elastičnosti nakon 7 ciklusa.....	47
Slika 32. Relativni modul elastičnosti nakon 14 ciklusa.....	47
Slika 33. Relativni modul elastičnosti nakon 28 ciklusa.....	48
Slika 34. Sustav za ispitivanje tlačne čvrstoće betona.....	49
Slika 35. Rezultati tlačne čvrstoće.....	50
Slika 36. Odnos tlačne čvrstoće i sadržaja zraka.....	50
Slika 37. Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti betona.....	51
Slika 38. Rezultati ispitivanja dubine prodora vode.....	53
Slika 39. Uzorak za ispitivanje metodom Rapid Air.....	54
Slika 40. Uređaj za ispitivanje.....	54
Slika 41. Korelacija udjela pora u svježem betonu i sadržaj zraka pomoću Rapid Air-a.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Lokacije energana u Republici Hrvatskoj i vrste postrojenja [6, 25].....	9,10
Tablica 2. Glavne vrste cementa prema HRN EN 197 – 1:2012 [26].....	11
Tablica 3. Gustoće PDB-a [11, 14, 15, 27, 29].....	12
Tablica 4. Veličina čestica [3, 28, 33].....	13
Tablica 5. Kemijski sastav vapnenca [8].....	14
Tablica 6. Kemijski sastav glina [8].....	14
Tablica 7. Udio oksida portland cementnog klinkera [8].....	15
Tablica 8. Kemijski sastav PDB-a [11, 12, 14, 15].....	16
Tablica 9. Fizikalna i kemijska svojstva cementa [46].....	24

Tablica 10. Rezultati ispitivanja gustoće PDB-a.....	26
Tablica 11. Kemijski sastav PDB-a.....	27
Tablica 12. Sastav betonskih mješavina.....	28
Tablica 13. Program ispitivanja.....	30
Tablica 14. Gustoće svježim betonskih mješavina.....	31
Tablica 15. Temperature ispitnih mješavina.....	33
Tablica 16. Sadržaj pora ispitnih mješavina.....	35
Tablica 17. Rezultati ispitivanja konzistencije.....	36
Tablica 18. Gubitak mase nakon 7, 14, 28 ciklusa.....	39, 40
Tablica 19. Vrijeme prolaska ultrazvučnog impulsa.....	42 - 45
Tablica 20. Relativni modul elastičnosti.....	46
Tablica 21. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće.....	49
Tablica 22. Razredi dubine prodiranja vode [55].....	51
Tablica 23. Rezultatu ispitivanja dubine prodora vode.....	52
Tablica 24. Rezultati ispitivanja testom Rapid Air.....	53

PRILOG 1

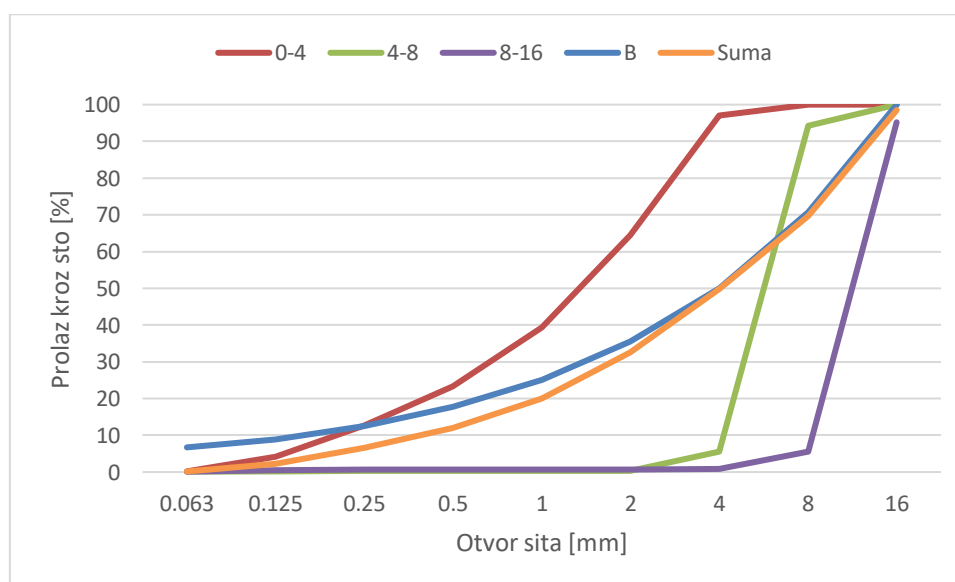
Numerički granulometrijski sastav:

Sito	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0-4	0,2	4,2	12,7	23,4	39,4	64,4	97,1	100	100
4-8	0,12	0,21	0,25	0,29	0,3	0,4	5,5	94,3	100
8-16	0,1	0,45	0,66	0,69	0,72	0,76	0,79	5,6	95,2

Krivulja	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
B	6,27	8,84	12,5	17,68	25	35,36	50	70,71	100

Kumulativni granulometrijski sastav:

Sito	%	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0-4	50	0,1	2,1	6,35	11,7	19,7	32,2	48,55	50	50
4-8	19	0,02	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08	1,05	17,92	19
8-16	31	0,03	0,14	0,20	0,21	0,22	0,24	0,25	1,74	29,51
Suma:	100	0,15	2,28	6,6	11,97	19,98	32,52	49,85	69,66	98,51



PRILOG 2

Referentna mješavina:

Komponenta	Masa [kg]	Gustoća [kg/dm^3]	Volumen [dm^3]	Masa za 37 l
cement	380	3,14	121,02	13,3
voda	180	1	180	6,3
v/c 0,5	/	/	/	
aerant (0,05% m_C)	0,19	1	0,19	0,007
zrak (5%)	/	/	50	/
agregat	1823,1	2,81	648,79	63,81
Ukupno:	2383,29	2,38	1000	

UDB15:

Komponenta	Masa [kg]	Gustoća [kg/dm^3]	Volumen [dm^3]	Masa za 37 l
cement	323	3,14	102,87	11,31
pepeo	57	2,72	20,96	1,99
voda	161,5	1	161,5	5,65
v/c 0,5	/	/	/	/
aerant (0,05% m_C)	0,16	1,1	0,15	0,0056
zrak	/	/	50	/
agregat	1867,30	2,81	664,52	65,36
Ukupno:	2408,96	2,41	1000	

UDB10:

Komponenta	Masa [kg]	Gustoća [kg/dm^3]	Volumen [dm^3]	Masa za 37 l
cement	342	3,14	108,92	11,97
pepeo	38	2,72	13,97	1,33
voda	171	1	171	5,99
v/c 0,5	/	/	/	/
aerant (0,05% m_C)	0,17	1,1	0,16	0,00595
zrak	/	/	50	/
agregat	1843,22	2,81	655,95	64,51
Ukupno:	2394,39	2,39	1000	

GL15:

Komponenta	Masa [kg]	Gustoća [kg/dm^3]	Volumen [dm^3]	Masa za 37 l
cement	323	3,14	102,87	11,31
pepeo	57	2,42	23,55	1,99
voda	161,5	1	161,5	5,65
v/c 0,5	/	/	/	/
aerant (0,05% m_C)	0,16	1,1	0,15	0,0056
zrak	/	/	50	/
agregat	1860,02	2,81	661,93	65,10
Ukupno:	2401,68	2,40	1000	

GL10:

Komponenta	Masa [kg]	Gustoća [kg/dm^3]	Volumen [dm^3]	Masa za 37 l
cement	342	3,14	108,92	11,97
pepeo	38	2,42	15,70	1,33
voda	171	1	171	5,99
v/c 0,5	/	/	/	/
aerant (0,05% m_C)	0,17	1,1	0,16	0,00595
zrak	/	/	50	/
Agregat	1838,36	2,81	654,22	64,34
Ukupno:	2389,53	2,39	1000	

VŽ15:

Komponenta	Masa [kg]	Gustoća [kg/dm^3]	Volumen [dm^3]	Masa za 37 l
Cement	323	3,14	102,87	11,31
pepeo	57	2	28,5	1,99
voda	161,5	1	161,5	5,65
v/c 0,5	/	/	/	/
aerant (0,05% m_C)	0,16	1,1	0,15	0,0056
zrak	/	/	50	/
agregat	1846,11	2,81	656,98	64,61
Ukupno:	2387,77	2,39	1000	

VŽ10:

Komponenta	Masa [kg]	Gustoća [kg/dm^3]	Volumen [dm^3]	Masa za 37 l
Cement	342	3,14	108,92	11,97
pepeo	38	2	19	1,33
voda	171	1	171	5,99
v/c 0,5	/	/	/	/
aerant (0,05% m_C)	0,17	1,1	0,16	0,00595
zrak	/	/	50	/
agregat	1829,09	2,81	650,92	64,02
Ukupno:	2380,26	2,38	1000	