

Beton s plastičnim otpadom

Jovanović, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:514489>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Mario Jovanović

Beton s plastičnim otpadom

Završni rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni prijediplomski studij
Inženjerski materijali**

**Mario Jovanović
JMBAG: 0114036964**

Beton s plastičnim otpadom

Završni rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Mario Jovanović

U Rijeci, 17. rujna 2024.

ZAHVALA

Posebno se zahvaljujem svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Nataliji Bede Odorčić na pomoći, brojnim stručnim savjetima te na vođenju kroz cijeli proces izrade završnog rada. Zahvaljujem se i laborantima koji su puno pomogli pri izradi i ispitivanju betonskih mješavina. Zahvaljujem se i svojoj obitelji te prijateljima na neizmjernoj podršci i ohrabrenju za vrijeme studiranja.

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je ispitati mogućnost primjene industrijskog otpada kao dio betonske mješavine. U laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci proveden je eksperimentalni dio rada koji obuhvaća izradu četiri betonske mješavine sa dodatkom metakaolina i PVC piljevine. Nakon izrade betonskih mješavina su ispitana svojstva svježeg betona te mehanička i trajnosna svojstva očvrslog betona nakon 28 dana. Od svojstava svježeg betona je ispitana temperatura betona nakon miješanja, konzistencija betona metodom slijeganje, gustoća te udio pora u betonu. Od mehaničkih svojstava je ispitana tlačna čvrstoća kocki, vlačna čvrstoća prizmi na savijanje, gustoća te vlačna čvrstoća kocki cijepanjem, a od trajnosnih je ispitana otpornost na habanje te prodiranje vode pod pritiskom-VDP. Ispitivanjem se pokazalo da manji udio PVC-a pozitivno utječu na mehanička i trajnosna svojstva betona, dok veći udio značajno smanjuju čvrstoću betona. Stoga se može zaključiti da se PVC piljevina u optimalnom omjeru može koristiti kao dodatak u betonu, pazeći pri tome da se uspostavi ravnoteža između trajnosti i čvrstoće.

Ključne riječi: industrijski otpad, betonska mješavina, metakaolin, PVC piljevina, svježi beton, mehanička svojstva, trajnosna svojstva

ABSTRACT

The topic of this thesis is to examine the possibility of using industrial waste as part of a concrete mix. The experimental part of the study was conducted in the Materials Laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Rijeka, where four concrete mixes were made with the addition of metakaolin and PVC sawdust. After the production of the concrete mixtures, the properties of fresh concrete as well as the mechanical and durability properties of hardened concrete were tested after 28 days. The properties of fresh concrete that were tested include the temperature of the concrete after mixing, consistency using the slump test method, density, and air content. The mechanical properties tested were compressive strength of cubes, flexural tensile strength of prisms, density, and tensile splitting strength of cubes. Durability properties tested were resistance to abrasion and water penetration under pressure (WDP). The tests showed that smaller amounts of PVC positively affect the mechanical and durability properties of concrete, while higher amounts significantly reduce its strength. Therefore, it can be concluded that PVC sawdust can be used in optimal proportions as an additive in concrete, ensuring a balance between durability and strength.

Key words: industrial waste, concrete mix, metakaolin, PVC sawdust, fresh concrete, mechanical properties, durability properties

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. BETONI DANAŠNJICE	3
2.1. Komponente betona	4
2.1.1. Agregat	5
2.1.2. Cement	6
2.1.3. Voda	7
2.1.4. Aditivi	8
3. BETONI SA ZAMJENSKIM MATERIJALIMA	9
3.1. Metakaolin kao djelomična zamjena za cement	10
3.2. PVC otpad kao djelomična zamjena za prirodni agregat.....	11
3.3. Deponiranje otpada industrije.....	13
4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA	16
4.1.1. Agregat	17
4.1.2. Cement	22
4.1.3. Voda	24
4.1.4. Aditiv.....	25
4.1.5. Metakaolin	25
4.1.6. PVC piljevina.....	27
5. IZRADA I ISPITIVANJE SVJEŽEG BETONA	30
5.1. Temperatura svježeg betona.....	31
5.2. Slijeganje svježeg betona	32
5.3. Gustoća svježeg betona.....	34
5.4. Sadržaj pora svježeg betona	35
6. ISPITIVANJE OČVRSLOG BETONA.....	37
6.1. Gustoća očvrslog betona	37

6.2. Tlačna čvrstoća nakon 28 dana	39
6.3. Vlačna čvrstoća na savijanje nakon 28 dana	42
6.4. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem	45
6.5. Otpornost na habanje	48
6.6. Prodiranje vode pod pritiskom-VDP	51
7. ZAKLJUČAK	54
8. LITERATURA	57

POPIS SLIKA

Slika 1: Drevni beton – Panteon [1].....	4
Slika 2: Moderni beton – Sydney Opera House [1].....	4
Slika 3: Označavanje cementa u Hrvatskoj prema normi HRN EN 197-1 [8]	7
Slika 4: Metakaolin [15].....	11
Slika 5: PVC piljevina [18]	12
Slika 6: Industrijski otpad [22]	15
Slika 7: Uređaj za prosijavanje [foto autor]	17
Slika 8: Grafički prikaz kumulativnog postotka prolaza za pojedinu frakciju [izradio autor]	18
Slika 9: Potopljene frakcije agregata u vodi [foto autor]	19
Slika 10: Uređaj za vaganje pod vodom [foto autor].....	19
Slika 11: Zasićen površinski suh pijesak [foto autor]	20
Slika 12: Piknometar ispunjen s vodom i pijeskom [foto autor].....	21
Slika 13: Ispitivanje gustoće cementa pomoću Le Chatelierove tikvice [foto autor] ...	24
Slika 14: Ispitivanje gustoće metakaolina [foto autor]	26
Slika 15: Grafički prikaz kumulativnog postotka prolaza PVC piljevine i pijeska [izradio autor]	27
Slika 16: Zrna PVC piljevine (lijevo) i pijeska (desno) [foto autor]	28
Slika 17: Određivanje gustoće PVC piljevine [foto autor].....	29
Slika 18: Mjerenje temperature mješavine termometrom [foto autor]	31
Slika 19: Ispitivanje konzistencije svježih betonskih mješavina metodom slijeganja [foto autor]	33
Slika 20: Pore i šupljine u mješavini REF (lijevo) i REF + 10M + 15%PVC (desno) [foto autor]	34
Slika 21: Ispitivanje sadržaja pora porometrom [foto autor]	36
Slika 22: Grafički prikaz rezultata ispitivanja gustoće očvrslog betona [izradio autor]	38
Slika 23: Preša za ispitivanje tlačne čvrstoće [foto autor].....	39
Slika 24: Grafički prikaz tlačne čvrstoće nakon 28 dana [izradio autor]	41
Slika 25: Preša za ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje sa dvije koncentrirane sile [foto autor]	43

Slika 26: Grafički prikaz vlačne čvrstoće nakon 28 dana [izradio autor].....	44
Slika 27: Uređaj za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem [foto autor].....	45
Slika 28: Slom kocke cijepanjem REF+10M+1%PVC [foto autor]	46
Slika 29: Grafički prikaz vlačne čvrstoće cijepanjem [izradio autor]	47
Slika 30: Stroj za ispitivanje otpornosti na habanje [foto autor]	48
Slika 31: Grafički prikaz otpornosti na habanje [izradio autor]	50
Slika 32: Stroj za utiskivanje vode pod tlakom [foto autor]	51
Slika 33: Dubina prodiranja vode u mješavinu REF+10M [foto autor]	52
Slika 34: Grafički prikaz dubine prodiranja vode [izradio autor].....	53

POPIS TABLICA

Tablica 1: Rezultati prosijavanja agregata za pojedinu frakciju [izradio autor]	18
Tablica 2: Izračun volumenske mase agregata [izradio autor]	21
Tablica 3: Fizikalna i kemijska svojstva cementa [25]	23
Tablica 4: Rezultati ispitivanja gustoće cementa [izradio autor]	24
Tablica 5: Rezultati ispitivanja gustoće metakaolina [izradio autor]	26
Tablica 6: Rezultati prosijavanja PVC piljevine [izradio autor]	27
Tablica 7: Ispitivanje gustoće PVC piljevine [izradio autor]	29
Tablica 8: Udio sastojaka za 1m ³ betona [izradio autor]	30
Tablica 9: Udio sastojaka za izradu uzoraka [izradio autor]	31
Tablica 10: Temperature svježeg betona [izradio autor]	32
Tablica 11: Slijeganje svježeg betona [izradio autor]	34
Tablica 12: Gustoće svježeg betona [izradio autor]	35
Tablica 13: Udio pora svježeg betona [izradio autor]	36
Tablica 14: Rezultati ispitivanja gustoće očvrslog betona [izradio autor]	38
Tablica 15: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 28 dana [izradio autor]	41
Tablica 16: Dimenzije i mase prizmi od svake mješavine [izradio autor]	42
Tablica 17: Rezultati vlačne čvrstoće na savijanje nakon 28 dana [izradio autor]	44
Tablica 18: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem [izradio autor]	47
Tablica 19: Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje [izradio autor]	50
Tablica 20: Rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode [izradio autor]	53

1. UVOD

Beton je jedan od najzastupljenijih materijala u građevinarstvu, jer omogućuje izgradnju održivih, dugotrajnih i ekonomičnih struktura. Zahvaljujući izuzetnoj čvrstoći i trajnosti, fleksibilnosti u oblikovanju, ekonomičnosti, otpornosti na požar i štetočine te mogućnosti reciklaže ima ključnu ulogu u građevinarstvu. Međutim, korištenje betona nosi sa sobom određene probleme i nedostatke, pretežito u aspektu održivog razvoja i zaštite okoliša. Proizvodnja cementa odgovorna je za stvaranje visokog udjela globalnih emisija ugljikovog dioksida, što uvelike doprinosi problemu klimatskih promjena i globalnog zagrijavanja. Također, pretjerana upotreba prirodnih resursa poput pijeska i šljunka dovodi do narušavanja ekosustava i degradacije okoliša. Stoga, ekološki prihvatljivo rješenje nastoji se dobiti zamjenom standardnih sastojaka betona s alternativnim sastojcima.

Sve više je zastupljena primjena industrijskih nusproizvoda koji nastoje u određenom udjelu zamijeniti tradicionalne agregate u betonu. Korištenje nusproizvoda u betonu rezultira smanjenjem onečišćenja i zagađenja okoliša, za razliku od prije kada su se odlagali kao otpad. Neophodno je adekvatno upravljanje otpadom jer može izazvati ekološki rizik i stvoriti probleme zbog potrebe za zbrinjavanjem. Jedan on nusproizvoda koji se može izdvojiti je PVC piljevina, koja nastaje obradom polivinil klorida. Korištenje PVC piljevine kao djelomične zamjene za standardne agregate u betonu smanjuje potrebu za korištenjem prirodnih resursa te smanjuje ukupni ekološki otisak. Također, pruža ekonomske prednosti jer smanjuje troškove nabave materijala te reducira količine otpada koji se generira u industriji plastike. Prednosti upotrebe PVC piljevine u betonu su: smanjenje vlastite težine, dobra toplinska i zvučna izolacija te povećana otpornost na kemikalije.

Uz PVC piljevinu postoji još nekoliko materijala koji potencijalno mogu zamijeniti agregat u betonskim mješavinama. To su: reciklirani beton, otpadne gume, mljeveno otpadno staklo, poljoprivredni otpad i reciklirani plastični otpad. Reciklirani beton nastaje drobljenjem betonskog otpada iz srušenih betonskih konstrukcija. Može se koristiti kao zamjena za krupni i sitni agregat, ali je potrebno voditi računa o kvaliteti

recikliranog betona jer ona utječe na čvrstoću i trajnost novog betona. Otpadne gume se drobe u sitne čestice kako bi se mogle koristiti kao zamjenski agregat. Koriste se za djelomičnu zamjenu krupnog agregata, a betonu daju veću otpornost na pucanje i veću fleksibilnost. Otpadno staklo se usitnjava do određene veličine kako bi se moglo koristiti kao zamjena za pijesak i šljunak. Glavni doprinos mljevenog stakla je u vidu estetike, osobito kada se koristi u ukrasnim betonskim površinama. Poljoprivredni otpad uključuje materijale kao što su pepeo šećerne trske, kokosove ljuske te pepeo rižinih ljuski. Korištenje ovih materijala može poboljšati toplinska i zvučna svojstva betona. Plastični otpad se može usitniti kako bi se mogao koristiti kao zamjena za agregat. Upotreba plastike kao agregata smanjuje težinu betona i povećava njegovu izolaciju. Plastični otpad je primjenjiv u situacijama gdje čvrstoća betona nije ključni faktor, primjerice za nenosive zidove.

U ovom završnom radu nastoji se ispitati mogućnost primjene industrijskog otpada (PVC piljevine) kao djelomične zamjene za prirodni materijal - pijesak u betonskim mješavinama. U eksperimentalnom dijelu izrađene su četiri betonske mješavine. Jedna mješavina je referentna, i ona je poslužila za usporedbu rezultata s ostalim mješavinama. Sljedeća mješavina je sa zamjenom 10% mase cementa metakaolinom, s njom su se usporedili rezultati od mješavina koje sadrže PVC piljevinu. Preostale dvije su sa zamjenom 10% mase cementa metakaolinom i zamjenom udjela agregata PVC piljevinom od 15% te s dodatkom PVC piljevine u volumnom udjelu od 1%. Cilj ovog rada je bio ispitati utjecaj zamjenskih materijala, metakaolina i PVC piljevine, na svojstva svježeg betona te mehanička i trajnosna svojstva očvrslog betona. Na kraju rada je donesen zaključak i prijedlog primjene spravljenog betona.

2. BETONI DANAŠNJICE

Beton je danas građevni materijal koji se često koristi i dobro je poznat zbog svoje čvrstoće, izdržljivosti te prilagodljivosti. Međutim, beton u povijesti koji su koristile drevne civilizacije, bio je izrađen od različitih materijala, uključujući beton na bazi portland cementa, koji se danas obično koristi. Najraniji poznati primjer betonske konstrukcije potječe od starih Egipćana. Oni su koristili vrstu betona koja se sastojala od mješavine slame, blata i gipsa za izgradnju svojih piramida, a najstarija među njima je izgrađena prije više od 4500 godina. Ova vrsta betona predstavlja značajan korak u povijesti građevinarstava, unatoč tome što je dosta slabija u usporedbi s modernijim vrstama betona kojeg su kasnije razvili Grci i Rimljani.

Rimljani su postigli izvanrednu čvrstoću i trajnost u svom betonu zahvaljujući upotrebi materijala zvanog „pozzolana“ zajedno sa živim vapnom. Njihov beton sastojao se od mješavine lokalnog agregata, vapna i vulkanskog pepela, a korišten je za izgradnju mnogih važnih i poznatih građevina, kao što je primjerice Panteon (Slika 1). Njegova jedinstvena kemijska struktura omogućavala je autogeno zacjeljivanje kroz proces demineralizacije što je značajno pridonosilo dugovječnosti betona.

Suprotno tome, moderni beton koristi portland cement kao vezivni materijal (Slika 2). Iako je beton na bazi portland cementa čvrst i izdržljiv, nije toliko izdržljiv kao pucolanski beton jer može početi erodirati već nakon nekoliko desetljeća. Znatno je podložniji fizičkoj i kemijskoj degradaciji tijekom vremena, osobito kad je izložen utjecaju okoliša kao što je sol te ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Međutim današnji beton je napravljen od lako dostupnih materijala kao što su glina, vapnenac i drugi minerali, što ga čini pristupačnijim i jeftinijim za razliku od pucolanskog betona koji je zahtijevao uvoz materijala sa raznih lokacija. Također, jedna od prednosti današnjeg betona je što se brzo veže i suši za razliku od pucolanskog [1].



Slika 1: Drevni beton – Panteon [1]



Slika 2: Moderni beton – Sydney Opera House [1]

Jedan od nedostataka današnjeg betona je korištenje armaturnih šipki za suzbijanje vlačnih sila, zbog čega beton može vrlo lako popucati, jer korozija čelika može izazvati širenje i pucanje betona. Za razliku od današnjeg, rimski beton se oslanja isključivo na čvrstoću betonskog spoja kako bi se odupro napetosti. Također, nedostatak je što proizvodnja portland cementa emitira oko 8% ugljičnog dioksida u atmosferu [2].

2.1. Komponente betona

Osnovne komponente od kojih se sastoji današnji beton su cement, voda, krupni agregat (kamen) te sitni agregat (pijesak). Agregat (pijesak i kamen) u betonu služi kao kostur. Cement i voda tvore cementnu pastu koja oblaže površinu agregata i ispunjava praznine između njih. Pijesak i kamen u betonu obično ne sudjeluju u kemijskoj reakciji između cementa i vode, njihova glavna uloga je smanjenje upotrebe cementa, podnošenje tereta i ograničavanje skupljanja stvrdnutog cementa. Također, u beton se dodaju dodatne komponente kao što su mineralni dodaci (leteći pepeo, silicijska

prašina i drugi) i aditivi (plastifikatori, superplastifikatori, reduktori vode, usporivači vezivanja, ubrzivači vezivanja). Dodaci i aditivi osim što poboljšavaju svojstva betona, omogućuju prilagodbu betona specifičnim uvjetima te doprinose uštedi cementa [3].

2.1.1. Agregat

Agregat je granulirani mineralni materijal prirodnog, industrijski proizvedenog ili recikliranog podrijetla, a sastoji se od grupe istovrsnih čestica. Agregat doprinosi značajnoj čvrstoći betona, kao i njegovim toplinskim i elastičnim karakteristikama, te pomaže u održavanju stabilnosti dimenzija i volumena. Također, dodavanje agregata u mješavinu može pomoći u kontroliranju skupljanja i smanjenju rizika od pucanja. Za kvalitetnu betonsku mješavinu, agregati trebaju biti čvrsti, čisti i bez prisutnosti kemikalija i slojeva gline te drugih finih materijala koji mogu izazvati propadanje betona [4].

Agregati čine 60 do 75 % ukupnog volumena betona i dijele se u dvije glavne kategorije: sitni i krupni. Sitni agregat (pijesak) čine čestice veličine zrna od 0 do 4 mm, dok krupni agregat se sastoji od čestica veličine zrna od 4 mm do 125 mm. Agregatni materijali nalaze se u sedimentima pod zemljom, kamenolomima, rudnicima ili nekim vrstama naslaga. Neke vrste agregata koji se koriste u betonu su: pijesak, šljunak, drobljena stijena i reciklirani beton.

Pješčani agregat dolazi iz prirodnih izvora, obično putem rudarenja ili iz ležišta. Pijesak je fini materijal sastavljen od kamena i mineralnih čestica, ali njegov sastav se razlikuje ovisno o mjestu porijekla. Može se dobiti iz rijeka, oceana i jama kao bi se postigla odgovarajuća veličina čestica. Koristi se za izradu betona ili za gradnju cesta, a dostupan je u različitim veličinama. Šljunak nastaje erozijom i vlagom te se može birati između različitih veličina. Pogodan je za razne građevinske projekte (proizvodnja betona) te estetske i dekorativne projekte. Drobljena stijena se dobiva vađenjem iz kamenoloma i rudnika, te se drobi dok se ne postigne odgovarajuća tekstura i veličina. Koristi se u različitim građevinskim projektima kao što su šetnice, ceste i parkirališta. Kod recikliranog betona agregat dolazi iz srušenih građevinskih projekata te se može lomiti i brusiti do odgovarajuće veličine. Tekstura i oblik čestica značajno utječu na

svojstva svježeg miješanog betona. Najpovoljnije je u betonu koristiti glatke zaobljene čestice jer se sa njima postiže dobra obradivost betona, za razliku od uglatih, grubih i izduženih čestica koje zahtijevaju veću količinu vode za postizanje obradivosti, zbog čega je potrebno povećati sadržaj cementa. Također, kod agregata se mora u obzir uzeti upijanje i površinska vlažnost, jer se u unutrašnjosti može nalaziti voda. Otpornost agregata na klizanje i abraziju je kritična u betonu izloženom stalnoj abraziji (pločnici i podovi), zbog čega se biraju tvrdi agregati kako bi se smanjilo trošenje čestica minerala [5].

2.1.2. Cement

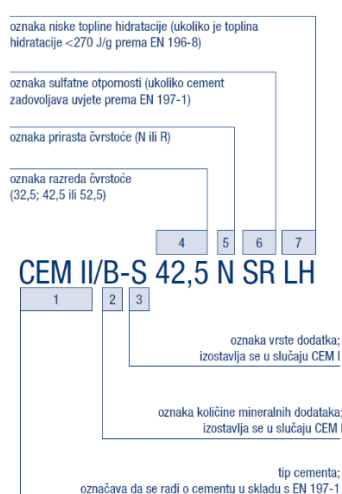
Cement je jedan osnovnih građevinskih materijala koji služi kao vezivo jer veže i stvrdnjava druge materijale. Njegova primarna uloga je povezivanje šljunka i pijeska čime se dobije beton. Također, s cementom se može dobiti mort za zidanje nakon što se pomiješa s finim agregatom. U građevinarstvu se danas primjenjuju cementi anorganskog podrijetla koji su najčešće na bazi kalcijevog silikata ili vapna. Mogu se podijeliti na hidrauličke i nehidrauličke vrste, ovisno o njihovoj sposobnosti stvrdnjavanja da se stvrdnu u prisutnosti vode.

Hidraulički cement (Portland cement) se kroz kemijsku reakciju između vode i suhih sastojaka stvrdnjava i postaje ljepljiv. Ta kemijska reakcija se zove hidratacija cementa koja rezultira stvaranjem mineralnih hidrata koji su slabije topivi u vodi, te pruža dodatnu zaštitu stvrdnutom materijalu od kemijskog napada. Stari Rimljani su otkrili kemijski proces za hidraulički cement tako što su koristili kalcijev oksid (vapno) pomiješan s pucolanom (vulkanski pepeo). Za razliku od hidrauličkog cementa nehidraulički se ne stvrdnjava u prisutnosti vode. On se stvrdnjava dok se suši te reagira s ugljičnim dioksidom iz zraka [6].

Cement se prema namjeni može podijeliti u pet osnovnih skupina, koje se razlikuju prema udjelu klinkera i drugih glavnih sastojaka. To su: CEM I (čisti portland cement) koji se sastoji od mljevenog klinkera i manjeg udjela dodatnih sastojaka (do 5%), CEM II (miješani portland cement) sastavljen od sedam vrsta koje sadržavaju klinker i oko 35% drugog pojedinačnog sastojka, CEM III (metalurški cement) sastavljen od klinkera

i većeg udjela troske visoke peći, CEM IV (pucolanski cement) koji sadržava klinker, leteći pepeo, mješavinu silicijevog dioksida i pucolan te CEM V (miješani cement) koji se sastoji od klinkera, pucolana, letećeg pepela i većeg udjela troske iz visokih peći [7].

Svaka vrsta cementa posjeduje specifična svojstva, primjenu i prednosti koje proizlaze iz materijala korištenih u njegovoj proizvodnji. Prilikom označavanja cementa u Hrvatskoj (Slika 3) razlikuju se: osnovne oznake, oznake količine dodataka, oznake vrste dodataka, oznake razreda čvrstoće, oznake brzine prirasta čvrstoće te dodatne oznake [8].



Slika 3: Označavanje cementa u Hrvatskoj prema normi HRN EN 197-1 [8]

2.1.3. Voda

Voda je jedan od glavnih sastojaka u betonu kada se pomiješa s cementom tvori cementnu pastu koja povezuje agregat. Voda ima udjel oko 15% do 18% u ukupnom volumenu betona. Jedna od njezinih glavnih uloga je stvrdnjavanje betona kroz kemijski proces poznat kao hidratacija. Hidratacija je kemijska reakcija u kojoj osnovni spojevi u cementu stvaraju kemijske veze s molekulama vode, koji postaju proizvodi hidratacije ili hidrati. Vrlo je važno da voda bude čista kako bi se spriječile neželjene pojave koje mogu oslabiti te ometati proces hidratacije. Omjer vode i cementa bitan je za proizvodnju kvalitetnog betona. Previše vode smanjuje čvrstoću betona, dok premalo vode čini beton teškim za obradu. Beton mora biti obradiv kako bi se mogao oblikovati u željene strukture (kupole, zidove, itd.) [9].

2.1.4. Aditivi

Aditivi su materijali koji se dodaju u beton tijekom njegovog miješanja kako bi se poboljšala svojstva betona. Razlikuju se aditivi koji modificiraju svojstva cementa i aditivi koji modificiraju svojstva svježeg ili očvrstlog betona. Prva skupina ubrzava ili odgađa vrijeme vezanja i stvrdnjavanja, dok druga skupina poboljšava čvrstoću, obradivost, vodonepropusnost, otpornost na morsku vodu, otpornost na smrzavanje i slično. Aditivi se prema načinu djelovanja mogu podijeliti na plastifikatore, superplastifikatore, ubrzivače, usporivače, aerante, i druge [10].

Plastifikatori povećavaju obradivost betona i fluidnost. Poznati su kao tvari koje smanjuju potrebu za vodom, jer omogućuju da beton s nižim vodocementnim omjerom ima istu obradivost kao beton s višim vodocementnim omjerom, što povećava tajnost i čvrstoću betona. Postoje dvije glavne skupine plastifikatora: obični plastifikatori i superplastifikatori. Superplastifikatori se koriste za proizvodnju visoko obradivih betona koji se lako postavljaju i kompaktiraju bez segregacije, što bi se moglo dogoditi povećanjem količine vode ili običnog plastifikatora. Također, mogu se koristiti za proizvodnju betona visoke čvrstoće bez upotrebe velikih količina cementa. Ubrzivači se primjenjuju za povećanje brzine očvršćavanja cemente paste ili betona, čime se povećava čvrstoća u ranim fazama. To omogućuje ranije uklanjanje oplata te skraćuje vrijeme njegovanja betona ugrađenog pri niskim temperaturama. Usporivači su kemikalije koje odgađaju početak vezivanja cementa. Koriste se kada je potrebno smanjiti ubrzanje vezivanja zbog betoniranja pri visokim temperaturama, posebice u slučajevima kada se vrši transport betona na veće udaljenosti. Koriste se isto kada se nastoje izbjeći radne greške pri betoniranju sloja na sloj betona. Aeranti su organske tvari koje uvlače u cementu pastu određenu količinu zraka kada se dodaju u vodu. Glavni razlog za uvlačenje zraka je postizanje betona otpornog na smrzavanje. Količina uvučenog zraka treba biti između 4% i 7% kako bi zaštita betona bila učinkovita. Važan čimbenik predstavlja i faktor razmaka pora, što je manji faktor razmaka beton se smatra opornijim na smrzavanje. Aerant ima važan sekundarni utjecaj na beton jer zračni mjehurići djeluju kao lubrikant, povećavajući obradivost betona, a također mogu zamijeniti udio sitnih čestica u betonskoj smjesi, čime se povećava kohezivnost [11].

3. BETONI SA ZAMJENSKIM MATERIJALIMA

Betoni sa zamjenskim materijalima postaju popularna vrsta betona zbog ekonomskih i ekoloških prednosti. To je vrsta betona koja sadrži nove vrste agregata, poput PVC piljevine, drobljenog stakla i drugih ekološki prihvatljivih sastojaka. Osim toga, sadrži zamjenske vezivne materijale, poput metakaolina, letećeg pepela, troske, koji se koriste kao alternativa tradicionalnom cementu. Danas se materijali kao što su leteći pepeo, troska iz visokih peći, vapnenac te drugi materijali s pucolanskim svojstvima sve češće testiraju i primjenjuju. Razvoj ovih trendova postaje bitan čimbenik za smanjenje utjecaja cementne industrije, koja je odgovorna za značajnu količinu emisije stakleničkih plinova. Korištenje alternativnih materijala ne samo da može poboljšati svojstva betona i smanjiti troškove, već i omogućuje recikliranje otpada, što je posebno bitno u kontekstu kružnog gospodarstva. Od alternativnih materijala koji se danas koriste u betonu, može se izdvojiti leteći pepeo, nastao iz termoelektrana na ugljen. Koristi se za djelomičnu zamjenu portland cementa, pri čemu njegova svojstva ovise o ugljenu koji se spaljuje. Mljevena granulirana zgura iz visokih peći je nusproizvod proizvodnje čelika, sadrži latentna hidraulička svojstva te se koristi za zamjenu portland cementa. Vapnenasti leteći pepeo posjeduje latentna hidraulička svojstva, za razliku od silikatnog letećeg pepela koji ima pucolanska svojstva. Silicij dioksid je nusproizvod u proizvodnji silicija i ferosilicijevih legura, koristiti se za povećanje trajnosti i čvrstoće betona. Zbog male veličine čestica zahtijeva uporabu superplastifikatora. Ugljična nanovlakna se dodaju u betonu za povećanje tlačne čvrstoće i poboljšanje električnih svojstava, što omogućuje praćenje naprezanja i procjenu oštećenja betona. Sveučilište Kitakyushu iz Japana smatra da reciklirana smjesa iskorištenih pelena može biti održivo rješenje za smanjenje količine otpada i upotrebu manje pijeska u betonu [12].

Emisije ugljičnog dioksida iz industrije betona stvaraju ozbiljan ekološki problem, prvenstveno zbog uporabe cementa u betonu, koji je glavni izvor emisija ugljičnog dioksida. Cementne industrije pridonose emisijama ugljičnog dioksida zbog ispuštanja CO₂, za vrijeme proizvodnje klinkera, koji je glavni sastojak cementa. Za vrijeme procesa proizvodnje dolazi do kalcinacije, odnosno do zagrijavanja vapnenca na visokim temperaturama, pri čemu se oslobađa CO₂ u prirodu. Oko 0,5 do 0,7 tona CO₂

se emitira kroz kalcinaciju za proizvodnju jedne tone klinkera. Izgaranje fosilnih goriva, poput prirodnog plina i ugljena, također je bitan izvor emisija ugljičnog dioksida. Proizvodnja cementa čini oko 7 do 8% globalnih emisija CO₂, pa značajno pridonosi efektu staklenika i klimatskim promjenama. To dovodi do narušavanja ekosustava, povećanja učestalosti i intenziteta vremenskih događaja te ugrožavanja biološke raznolikosti. Ugljični otisak ima i vrlo bitan učinak na zakiseljavanje oceana, dolazi do procesa acidifikacije prilikom apsorpcije veće razine CO₂. To negativno utječe na morske ekosustave te narušava njihovu ravnotežu. Strategije za smanjenje emisije ugljičnog dioksida obuhvaćaju različite pristupe usmjerene na smanjenje emisije ugljika i poticanje održivosti. Jedan od glavnih pristupa je korištenje alternativnih materijala poput troske, letećeg pepela i pucolana. Alternativni cementni materijali mogu djelomično zamijeniti klinker i na taj način smanjiti ugljični otisak. Korištenje tehnologije hvatanja CO₂ emisija iz cementara i skladištenja ugljika pod zemljom imaju vrlo bitnu ulogu u smanjenju emisije ugljičnog dioksida. Razvoj cementa s niskim udjelom ugljika pruža ekološki prihvatljivije alternative te povećanje energetske učinkovitosti u proizvodnji cementa, kroz primjenu energetski učinkovitijih tehnologija i povrata otpadne topline. Pristupi kružnom gospodarstvu poput upotrebe alternativnih goriva i recikliranja betonskog otpada, dodatno pridonose naporima za dekarbonizaciju cementne industrije [13].

3.1. Metakaolin kao djelomična zamjena za cement

Metakaolin (Slika 4) je visoko učinkovit pucolanski materijal koji se koristi u betonu. Metakaolin je proizvod koji se prvenstveno proizvodi za upotrebu, za razliku od industrijskih pucolana koji su nusproizvodi. Nastaje zagrijavanjem mineral kaolina i pucolanske gline na temperaturi između 600 i 800 °C, što rezultira konzistentnijim materijalom te omogućava kontrolu kvalitete tijekom proizvodnje. Prvi puta je korišten u Brazilu 1960-ih godina za izgradnju velikih brana s ciljem suzbijanja oštećenja izazvanih reakcijom alkalija-silicijevog dioksida. Kada se koristi za zamjenu cementa u rasponu od 5 do 10% mase, proizvedeni beton postaje kohezivniji, što olakšava procese pumpanja i završne obrade. Također, dolazi do povećanja tlačne čvrstoće očvrsllog betona na ovoj razini zamjene. Veće razine zamjene (do 20%) rezultiraju poboljšanjem otpornosti očvrsllog betona na djelovanje iona, sulfata te mineralnih i

organskih kiselina, dolazi do poboljšanja otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje te otpornosti na abraziju [14].



Slika 4: Metakaolin [15]

Korištenje metakaolina u betonu pruža razne prednosti kao što su: povećanje čvrstoće i trajnosti betona, smanjenje skupljanja betona tijekom sušenja, poboljšanje vodonepropusnosti i nepropusnosti betona, što ga čini pogodnim za vodonepropusne konstrukcije. Također, metakaolin ubrzava početno vrijeme vezivanja betona, pospješuje ranu čvrstoću betona što povećava produktivnost, jer se oplata može ranije ukloniti. Ima izvrsnu sposobnost raspršivanja, ekološki je prihvatljiv te je lako dostupan na tržištu za razliku od drugih mineralnih dodataka. Nedostatak korištenja metakaolina je smanjenje obradivosti betona, zbog čega je potrebno koristiti dodatke ili reduktore vode kako bi se postigla odgovarajuća obradivost betona. Metakaolin se koristi pri izgradnji cesta, skladišta, nuklearnih elektrana, industrijskih podova. Osim toga, ključan je za masovno betoniranje i proizvodnju laganog betona visokih performansi. Koristi se u visokim zgradama i off-shore konstrukcijama te pri izgradnji brana i mostova [16].

3.2. PVC otpad kao djelomična zamjena za prirodni agregat

Polivinil-klorid ili skraćeno PVC je plastomerni materijal koji se dobije polimerizacijom vinil-klorida, pretežito u vodenoj suspenziji, ali i u medijima kao što su emulzije, različite otopine i masa. Dodavanjem raznih stabilizatora, plastifikatora i punila te dodavanjem drugih monomera tijekom polimerizacije, svojstva PVC-a se mogu uvelike mijenjati. Više od stotinu modifikacija PVC-a postoji, sa širokim rasponom svojstava,

od tvrdih i žilavih do mekih i elastomernih materijala. Kruti i savitljivi polivinil-klorid su dvije temeljne vrste. Žilav, proziran, tvrd materijal, otporan na atmosferske utjecaje, s dobrim dielektričnim svojstvima, ali krhak izrazito je kruti materijal. Krhkost se smanjuje kopolimerizacijom s vinil-acetatom i miješanjem s drugim polimerima poput poliakrilata. Savitljivi PVC sadrži 20 do 30% omekšavala, što značajno olakšava njegovu preradu. Povećanjem omekšavala smanjuju se modul elastičnosti, staklište i prekidna čvrstoća, dok se povećava udarna žilavost i istezanje, što poboljšava mehanička svojstva pri nižim temperaturama. PVC se najviše koristi u građevinarstvu za izradu prozorskih okvira, tapeta, roleta, oluka, podnih obloga, ambalaže za lijekove te odvodnih cjevovoda. Pjenasti PVC koristi se za proizvodnju presvlaka za namještaj i vozila, te za izradu putnih torbi. Tijekom obrade polivinil-klorida nastaje PVC piljevina (Slika 5), koja ima široku primjenu u raznim industrijama. Piljevina je nusproizvod koji se pojavljuje kada se PVC materijal reže, brusi ili oblikuje tijekom proizvodnje različitih proizvoda [17].



Slika 5: PVC piljevina [18]

Osnovne prednosti PVC-a su da je jeftin, savitljiv te jednostavan za rukovanje i ugradnju. Za razliku od polimera drugih vrsta, njegov proizvodni proces nije limitiran za upotrebu prirodnog plina ili sirove nafte. Izdržljiv je i otporan na koroziju, otporan je na pucanje pod kemijskim naprezanjem, ima nisku toplinsku vodljivost te zahtijeva malo održavanja. Njegova formulacija se može pretvoriti u različite oblike za upotrebu u industrijskim primjenama. PVC se može reciklirati kao termoplastika i pretvoriti u nove proizvode za razne industrije, iako to nije jednostavan proces zbog različitih formulacija koje se koriste za proizvodnju. Glavni nedostatak PVC-a je njegov štetan

utjecaj na zdravlje, jer se u njegovoj proizvodnji često koristi ugljik iz naftnih derivata, koji može osloboditi toksine za vrijeme procesa proizvodnje, kada se razgrađuje na odlagalištima ili kada je izložen vatri. Zabrinutost zbog rizika povezanih s PVC-om potaknulo je istraživanje korištenja etanola iz šećerne trske kao sirovine umjesto sirove nafte [19].

Korištenje PVC-a kao agregata u betonu donosi niz prednosti i izazova zato jer utječe na smanjenje crpljenja prirodnih resursa, omogućuje održiviju gradnju te utječe na mehanička svojstva betona. PVC agregati su manje gustoće od tradicionalnih agregata poput pijeska i šljunka, što dovodi do smanjenja ukupne težine betona. To je vrlo korisno kod izvedbe montažnih građevina, podova i lakših konstrukcija. Beton s PVC agregatima osigurava bolju toplinsku izolaciju, jer PVC ima nisku toplinsku vodljivost, što može doprinijeti energetske učinkovitosti zgrada. PVC agregati poboljšavaju otpornost betona na vodu, što čini beton pogodnim za primjenu u vlažnim okruženjima. Recikliranje PVC otpada smanjuje potrebu za korištenjem prirodnih resursa te pridonosi smanjenju ugljičnog otiska, što predstavlja veliku prednost u odnosu na tradicionalne agregate. Uporaba tradicionalnih agregata utječe na iscrpljivanje prirodnih resursa, stvaranje emisije ugljičnog dioksida, uništavanje ekosustava, eroziju tla te zagađenje zraka i vode. Zamjena prirodnih agregata s PVC-om također ima i neke nedostatke, prvenstveno kada je riječ o tlačnoj čvrstoći betona. Veći udjeli PVC-a značajno smanjuju tlačnu čvrstoću betona, što ograničava njegovu upotrebu u nosivim konstrukcijama. Povećana poroznost je također jedan od nedostataka uporabe PVC-a kao agregata. Veći broj pora može uzrokovati mikropukotine te otežati korištenje betona u uvjetima gdje su velika opterećenja te ekstremni klimatski uvjeti. Pored toga, PVC ima slabiju kompatibilnost s cementom, što otežava povezivanje agregata i cementne paste [20].

3.3. Deponiranje otpada industrije

Zbrinjavanje industrijskog otpada predstavlja ozbiljan izazov za suvremeno društvo (Slika 6). Sa sve većim porastom industrijalizacije dolazi do konstantnog rasta količine otpada, što naglašava važnost njegove sigurne i odgovorne obrade. Jedan od najvećih problema kod upravljanja industrijskim otpadom je zbrinjavanje tih materijala te

određivanje odgovarajuće metode obrade koja ima ključan utjecaj za očuvanje okoliša i zaštitu javnog zdravlja. Jedna od često korištenih metoda zbrinjavanja industrijskog otpada je odlaganje na odlagalištima. To su posebno pripremljena mjesta gdje se otpad zakopava i prekriva slojem zemlje. Prednosti ove metode su jednostavnost i ekonomska isplativost, ali također postoje nedostaci kao što su zauzimanje velike površine zemljišta te rizik od ispuštanja kemikalija u vodu i zrak. Druga metoda zbrinjavanja industrijskog otpada je spaljivanje. Ova metoda podrazumijeva sagorijevanje otpada pri visokim temperaturama kako bi se smanjila njegova zapremnina i uništile štetne tvari. Ovo može isto kao i kod odlagališta dovesti do ispuštanja opasnih tvari u okoliš. Recikliranje predstavlja još jednu od metoda upravljanja industrijskim otpadom. Većina materijala iz industrijskog otpada se može reciklirati i ponovno koristiti za proizvodnju novih proizvoda, što pomaže u očuvanju prirodnih resursa te smanjenju količine otpada. Industrijski otpad se može kategorizirati prema vrsti materijala i njihovim specifičnim karakteristikama. Može se izdvojiti kemijski otpad, koji uključuje kiseline, pesticide, otapala, te kemijske ostatke. Ta vrsta otpada može uzrokovati ozbiljne probleme za ljudsko zdravlje i okoliš. Otpad od teških metala, poput žive, nikla, olova, kadmija, ima tendenciju zadržavanja u okolišu, što može dovesti do ekoloških i zdravstvenih problema. Elektronički otpad sastoji se od odbačene elektronike kao što su mobilni uređaji i računala. Nepravilnim odlaganjem ovog otpada može doći do oslobodjenja otrovnih tvari u okoliš. Biološki otpad, proizveden u farmaceutskoj industriji ili zdravstvenim ustanovama, može uključivati lijekove kojima je istekao rok trajanja, stoga je potrebno spriječiti širenje patogena. Radioaktivni otpad nastaje iz nuklearnih elektrana, sadrži radioaktivne izotope, pa zahtijeva pažljivo rukovanje i odlaganje otpada kako bi se spriječilo izlaganje zračenju. Polimerni i plastični otpad sadrži odbačene materijale za pakiranje te plastične ostatke od industrije. Tekstilni otpad uključuje odbačena vlakna, tkanine i druge materijale iz tekstilne industrije. Često sadrži kemikalije i boje koje mogu zagađivati okoliš ako se nepravilno odlažu. U poljoprivredni otpad ubrajaju se agrokemijski ostatci i spremnici pesticida koji mogu sadržavati kemikalije koje mogu dovesti do onečišćenja tla i vode. Rudarski otpad, poput troske, jalovine i drugih ostataka, može sadržavati teške metale i druge toksine, koji mogu smanjiti kvalitetu vode i tla. Otpadne vode i mulj sadrže suspendirane krutine, organske spojeve i teške metale. Ovo su neke od osnovnih vrsta kako se može kategorizirati industrijski otpad.

Stoga je potrebno razumjeti vrste industrijskog otpada, ulagati u modernije i ekološki prihvatljivije tehnologije, koje će doprinijeti očuvanju okoliša, ljudskog zdravlja te očuvanju prirodnih resursa za buduće naraštaje [21].



Slika 6: Industrijski otpad [22]

4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U ovom eksperimentalnom radu se nastojao ispitati utjecaj zamjenskih materijala u pripremi betona, PVC piljevine kao zamjene za dio sitnog agregata te metakaolina kao zamjene za određeni udio cementa. Cilj je bio istražiti mogućnosti poboljšanja mehaničkih i trajnosnih svojstava betona korištenjem ovih materijala.

Stoga je bilo potrebno napraviti četiri betonske mješavine na temelju kojih su određena svojstva betona. Prije izrade mješavina provedena su ispitivanja određenih sastojaka koji su se koristili pri izradi betonskih mješavina. Za agregat su određeni volumenska masa, apsorpcija te granulometrijski sastav agregata metodom sijanja za frakcije 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm. Za cement i metakaolin je provedeno ispitivanje gustoće, a za PVC piljevinu je bilo potrebno odrediti gustoću i njezin granulometrijski sastav. Nakon ispitivanja sastojaka započeo je proces izrade mješavina. Najprije je izrađena referentna mješavina REF, na temelju koje su uspoređivani rezultati ispitivanja s drugim mješavinama. Potom je napravljena mješavina u kojoj je 10% mase cementa zamijenjeno metakaolinom, a označena je kao REF + 10M. Rezultati ove mješavine su uspoređeni s rezultatima mješavina koje sadrže PVC. Nakon toga su napravljene još dvije mješavine s istim udjelom metakaolina s dodatkom PVC piljevine u volumnom udjelu od 1% te zamjenom 15% volumena pijeska s PVC piljevinom. Te mješavine su označene kao REF + 10M + 1%PVC i REF + 10M + 15%PVC. Pri izradi svake mješavine je korišten superplastifikator radi postizanja zadovoljavajuće obradivosti betona.

Nakon izrade betonskih mješavina su provedena ispitivanja svojstava svježeg betona. Od svojstva svježeg betona je ispitana temperatura betona, slijeganje betona, gustoća te udio pora. Poslije ispitivanja svojstava, beton se ugrađivao u kalupe oblika kocke brida 15 cm, prizme 100 mm × 100 mm × 400 mm te kocke brida 7,1 cm. Zatim su se uzorci njegovali 28 dana u vodi kako bi se mogla provoditi ispitivanja mehaničkih i trajnosnih svojstava betona sukladno zahtjevima normi. Od mehaničkih svojstava betona su ispitana gustoća, vlačna čvrstoća cijepanjem i tlačna čvrstoća na kockama brida 15 cm te vlačna čvrstoća na savijanje na prizmama 100 mm × 100 mm × 400 mm. Od trajnosnih svojstava su ispitana otpornost na habanje na kockama brida 7,1 cm te prodiranje vode pod pritiskom na kockama brida 15 cm.

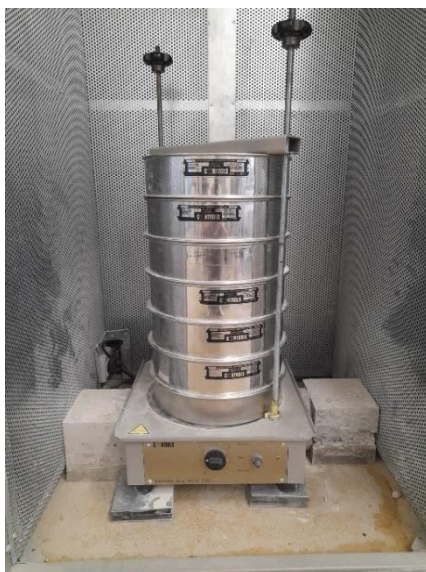
4.1. Korišteni sastojci i metode ispitivanja

Materijali koji su korišteni u betonskim mješavinama su: agregat, cement, voda, aditiv, metakaolin i PVC piljevina. Od ovih sastojaka bilo je potrebno ispitati svojstva agregata, cementa, metakaolina te PVC piljevine.

4.1.1. Agregat

Za izradu betona korišten je agregat dobiven od tvrtke Holcim d.o.o. Za agregat je bilo potrebno ispitati granulometrijski sastav, volumensku masu te apsorpciju.

Granulometrijski sastav agregata je određen pomoću metode sijanja suhих uzoraka prema normi HRN EN 933-1 [23]. Bilo je potrebno odrediti sastav za frakcije agregata 0-4 mm, 4-8 mm te 8-16 mm. Za ispitivanje granulometrijskog sastava je složen set sita od vrha do dna, na način da je za najgornje uzeto sito većeg otvora od maksimalnog zrna frakcije koje se sije. Nakon što je složen set sita usut je materijal za prosijavanje. Potom je uključen uređaj za sijanje (Slika 7), a vrijeme trajanja sijanja je određeno na način da se broj sita pomnožio sa 2 min. Nakon završetka sijanja je određena masa agregata na svakom situ i izračunat je kumulativni postotak prolaza.

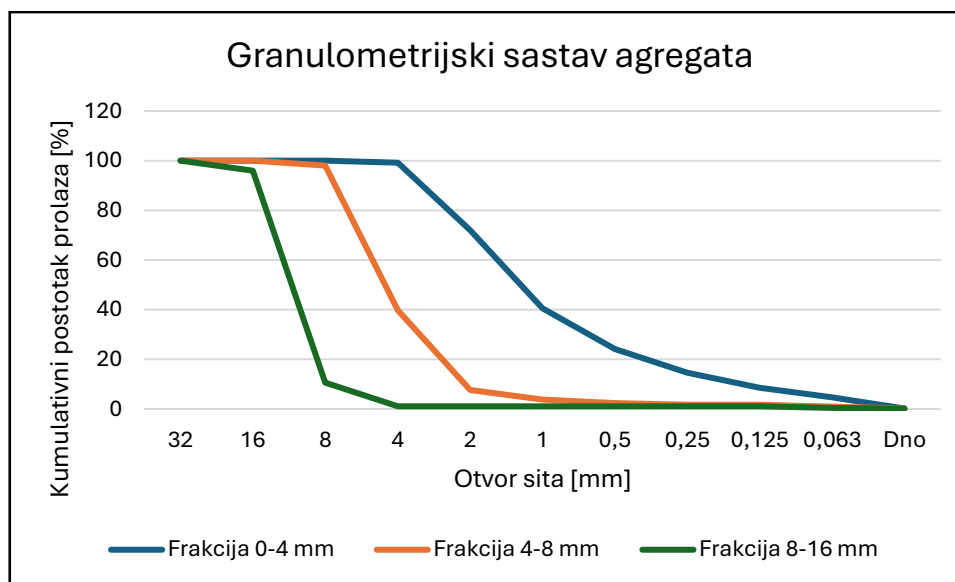


Slika 7: Uređaj za prosijavanje [foto autor]

Dva puta je provedeno prosijavanje frakcija 0-4 mm i 8-16 mm, a za frakciju 4-8 mm je ispitivanje provedeno tri puta. Za svaku frakciju je uzeta srednja vrijednost prosijavanja te je izračunat kumulativni postotak prolaza za svaku pojedinu frakciju. Rezultati kumulativnog prolaza su prikazani tablično (Tablica 1) i grafički (Slika 8).

Tablica 1: Rezultati prosijavanja agregata za pojedinu frakciju [izradio autor]

Otvor sita d [mm]	Kumulativni postotak prolaza [%]		
	Frakcija 0-4 mm	Frakcija 4-8 mm	Frakcija 8-16 mm
32	100	100	100
16	100	100	95,96
8	100	98,01	10,57
4	99,21	39,69	1,13
2	71,96	7,66	1,09
1	40,53	3,81	1,07
0,5	24,16	2,38	1,06
0,25	14,61	1,69	1,03
0,125	8,51	1,69	1,03
0,063	4,67	0,89	0,43
Dno	0,18	0,22	0,15



Slika 8: Grafički prikaz kumulativnog postotka prolaza za pojedinu frakciju [izradio autor]

Volumenska masa za frakciju agregata 8-16 mm (krupni agregat) se provodila na način da su uzorci prije ispitivanja bili potopljene u vodi 24 sata (Slika 9). Potom se agregat ocijedio kroz mrežastu košaru odnosno uređaj za vaganje pod vodom (Slika 10) te se izvagao na zraku (m_{wv}). Nakon toga se dobila masa zasićenog, površinski suhog uzorka vaganog na zraku (m_z), tako što se krpom odstranila površinska vlažnost uzorka. Zatim se uzorak izvagao pod vodom (m_{zw}), ali prije vaganja je trebalo tarirati mrežastu košaru. U konačnici se uzorak izvadio iz vode te sušio do stalne mase. Uzorak je bio potpuno suh kada je u dva uzastopna vaganja postignuta razlika između masa od 0,1%. Za kraj ispitivanja je zabilježena masa potpuno suhog agregata (m_a).



Slika 9: Potopljene frakcije agregata u vodi [foto autor]



Slika 10: Uređaj za vaganje pod vodom [foto autor]

Za frakciju agregata 0-4 mm (sitni agregat) ispitivanje se provodilo na drugačiji način od krupnog agregata. Uzorak je bio potopljen u vodi 24 sata, pa ga je trebalo osušiti do zasićenog, površinski suhog stanja. Sušenje se vršilo pomoću električnog fena, uz konstantno miješanje uzorka, dok uzorak nije postao zasićen površinski suh. Potom se kalup u obliku krnjeg stošca napunio pijeskom te se nabijao šipkom 25 puta. Poslije podizanja kalupa uzorak se nije djelomično osipao, pa mu se mogla odrediti masa na zraku (m_z). Za dobivanje zasićenog, površinski suhog pijeska (Slika 11) bilo je potrebno više puta puniti i podizati kalup krnjeg stošca. Potom je trebalo izvagati piknometar ispunjen vodom do određene granice (m_{Bw}). Poslije toga se uklonio dio vode iz piknometra, a pomoću lopatice se dodao zasićen, površinski suh pijesak u piknometar (Slika 12). Zatim se dodala voda do određene granice te se odredila njegova masa (m). Na kraju se odredila masa vlažnog pijeska (m_{wv}), a poslije sušenja se odredila i masa suhog pijeska (m_d). Za frakciju agregata 4-8 mm (krupni agregat) ispitivanje se provodilo na isti način kao i kod sitnog agregata. Jedina je razlika što se umjesto električnog fena koristila krpa za dobivanje zasićenog, površinski suhog agregata.



Slika 11: Zasićen površinski suh pijesak [foto autor]



Slika 12: Piknometar ispunjen s vodom i pijeskom [foto autor]

Volumenska masa agregata je određena preko sljedećeg izraza (1):

$$\rho_{z(ZPS)} = \frac{m_{zps,z} \cdot \rho_w}{m_z - m_{zw}} \quad (1)$$

Oznaka $\rho_{z(ZPS)}$ označava volumensku masu zasićenog, površinski suhog uzorka (g/cm^3), $m_{zps,z}$ masu zasićenog, površinski suhog uzorka (g), ρ_w gustoću vode (g/cm^3), m_z masu uzorka vaganog na zraku (g) i m_{zw} masu uzorka vaganog pod vodom (g). Rezultati ispitivanja volumenske mase su prikazani u Tablici 2.

Tablica 2: Izračun volumenske mase agregata [izradio autor]

Svojstvo [g]	Frakcija 8-16mm	Frakcija 4-8mm	Frakcija 0-4mm
Masa vlažnog materijala (m_{wv})	2295,31	438,36	477,54
Masa materijala zasićenog površinski suhog vaganog na zraku (m_{zw})	2223,86	404,51	405,27
Masa materijala zasićenog površinski suhog vaganog pod vodom (m_{zw})	1380,81	/	/
Masa suhog materijala (m_d)	2205,94	399,2	399,7
Masa piknometra ispunjenog vodom (m_{Bw})	/	1149,96	1149,96
Masa materijala + piknometra + vode (m)	/	1404,72	1404,6
Volumenska masa [g/cm^3]	2,64	2,7	2,69

Apsorpcija agregata je određena pomoću sljedećeg izraza (2):

$$A_w = \frac{m_z - m_d}{m_d} * 100\% \quad (2)$$

Oznaka A_w označava apsorbiranu vodu (%), m_z masu zasićenog, površinski suhog agregata (g), m_d masu suhog agregata (g). Na temelju dobivenih rezultata apsorpcija za frakciju 0-4 mm iznosi 1,39%, za frakciju 4-8 mm 1,33% te za frakciju 8-16 mm 0,81%.

4.1.2. Cement

U proizvodnji betona korišten je miješani portlandski cement CEM II/B-M (S-V) 42,5 N trgovačkog naziva Holcim Ekspert. Ovaj cement se sastoji od 65-79% portlandskog cementnog klinkera, 21-35% miješanog dodatka (granulirana zgura (S) i silicijski leteći pepeo(V)), do 5% filtarske prašine, a za regulaciju vezivanja se koristi industrijski gips. Ova vrsta cementa je posebno prilagođena za radove na nosivim betonskim konstrukcijama koje zahtijevaju visoku završnu čvrstoću. Njegova osnovna svojstva su: optimalno vrijeme vezivanja, dobra otpornost na agresivne uvjete, srednji razvoj čvrstoće, mali gubitak početne konzistencije te umjeren zahtjev za vodom. Primjenjuje se za proizvodnju transportnih i pumpanih betona, izgradnju tunela, mostova, vijadukata te za cestogradnju i podzemne radove. Isporučuje se u vrećama od 25 kg te se preporučuje da se vrećani cement ugradi u roku 6 mjeseci, a rasuti u roku od 3 mjeseca. Treba se skladištiti na suhom i zaštićenom mjestu. U Tablici 3 su prikazana fizikalna i kemijska svojstva cementa te usporedba s normom HRN EN 197-1[24].

Tablica 3: Fizikalna i kemijska svojstva cementa [25]

Fizikalna svojstva	Holcim Ekspert® cement CEM II/B-M (S-V) 42,5 N	Uvjet normi
Postojanost volumena [mm]	0,3	≤ 10
Početak vezivanja [min]	237	≥ 60
Tlačna čvrstoća na 2 dana [MPa]	24	≥ 10
Tlačna čvrstoća na 28 dana [MPa]	54,8	≥ 42,5 ≤ 62,5
Specifična težina cementa [g/cm ³]	3	/
Kemijska svojstva		
SO ₃ [%]	2,77	≤ 3,5
Cl [%]	0,058	≤ 0,1
Cl [%]	0,058	≤ 0,1

Od laboratorijskog ispitivanja cementa određena je samo njegova gustoća pomoću Le Chatelierove tikvice (Slika 13). Ispitivanje se provodilo na način da se boca napunila petrolejom do razine između 0 i 1 na donjem dijelu grla te se zabilježio nivo tekućine. Postepeno je ubačeno 65 g cementa, pazeći pritom da se materijal ne hvata za stijenke tikvice. Zatim se boca rotirala kako bi izišli mjehurići zraka iz ispitivanog uzorka, te su se zabilježili rezultati konačne razine tekućine očitane na gornjem graduiranom dijelu grla. Rezultati ispitivanja su prikazani u Tablici 4 te se pomoću njih odredila gustoća cementa preko sljedećeg izraza (3):

$$\rho_{cem} = \frac{m_{cem}}{\Delta V} \quad (3)$$

Oznaka ρ_{cem} označava gustoću cementa (g/cm³), m_{cem} masu cementa (g) i ΔV promjenu volumena nakon dodavanja cementa (cm³).



Slika 13: Ispitivanje gustoće cementa pomoću Le Chatelierove tikvice [foto autor]

Rezultatima ispitivanja dobivena je gustoća cementa od $2,93 \text{ g/cm}^3$. Dobivena vrijednost odgovara vrijednosti danoj od strane proizvođača, što ukazuje na to da je cement u skladu s tehničkim specifikacijama.

Tablica 4: Rezultati ispitivanja gustoće cementa [izradio autor]

Gustoća cementa				
Nivo tekućine	Prije dodatka	V1	cm ³	0
	Nakon dodatka	V2	cm ³	22,2
Cement	Masa	Mc	G	65
	Volumen	ΔV	cm ³	22,2
Gustoća cementa		P	g/cm ³	2,93

4.1.3. Voda

Za vodu nije bilo potrebno provesti nikakva ispitivanja, jer posjeduje potrebnu čistoću i kemijsku stabilnost za upotrebu u betonu. Voda je uzeta iz slavine laboratorija odnosno gradskog vodoopskrbnog sustava, koji zadovoljava sve standarde za kvalitetu vode.

4.1.4. Aditiv

Od aditiva je korišten superplastifikator Dynamon SF 16S izrađen na bazi polikarboksilatnog etera. Ovaj superplastifikator omogućuje da beton zadrži svoju konzistenciju duži period nakon miješanja te ima nisku ljepljivost, što omogućuje lakše rukovanje betonom. Ovaj superplastifikator može se koristiti za tekući beton, ekspanirani beton, samozbijajući beton, beton visoke čvrstoće te za betoniranje pri visokim temperaturama. Razvijen je s ciljem postizanja visokog stupnja smanjenja količine vode bez utjecaja na obradivost betona, što olakšava rad i doprinosi preciznijem oblikovanju. Omogućuje produljenje vijeka trajanja očvrstlog betona, povećava čvrstoću i smanjuje propusnost. Prilikom uporabe Dynamon SF 16S potrebno je pažljivo dozirati njegovu količinu koja će se dodati u beton, a ona će se odrediti na temelju početnih testiranja. U smjesu se dodaje nakon što su dodane sve druge komponente, a bitno je da je barem 80% vode dodano prije njega. Također, potrebno se pridržavati normi i propisa za proizvodnju betona. Preporučena doza je od 0,2% do 2% u odnosu na masu cementa. U REF mješavinu je dodano 0,2% superplastifikatora, dok je u REF + 10M mješavinu dodano 0,5%. U mješavine REF + 10M + 1%PVC i REF + 10M + 15%PVC je dodano 0,4% superplastifikatora. Prilikom korištenja ovog superplastifikatora nije bilo potrebno provesti nikakva ispitivanja [26].

4.1.5. Metakaolin

Korišten je metakaolin Metaver™ M koji je dobiven kalcinacijom koncentriranog kaolina. Ovaj metakaolin može poboljšati hidrauličke performanse betona. Vrlo lako se miješa te daje plastičnu konzistenciju koja ne zahtijeva povećanje količine vode. Pokazao je razne prednosti gdje je potrebna čvrstoća, otpornost i gustoća. Poboljšava plastičnost špricanog betona, premaza i mortova. Povećava čvrstoću žbuka na bazi cementa i vapna te poboljšava vezivanje vapna u ljepilima za pločice, premazima za cijevi i rezervoarima za vodu. Također, poboljšava otpornost na konstrukcijama izloženim morskoj vodi te omogućuje bolju disperziju pigmenata u predgotovljenom betonu [27].

Za korišteni metakaolin je bilo potrebno odrediti gustoću. Gustoća je određena na gotovo identičan način kao i za cement, samo je umjesto Le Chatelierove tikvice korištena menzura (Slika 14). Petrolej ima manju gustoću od vode, stoga je korišten kako bi se metakaolin brže slegnuo u menzuri, jer je njegova gustoća veća od cementa. Korištenje menzure je omogućilo jednostavnije i kvalitetnije ispitivanje gustoće, jer se čestice metakaolina nisu lijepile za stijenke menzure. U ispitivanju se petrolej ulio do određenog nivoa i izmjerio. Potom je stavljeno 65 g metakaolina te se protreslo menzuru kako bi izašli mjehurići zraka. Na kraju su zabilježeni rezultati ispitivanja (Tablica 5), a gustoća se odredila prema istom izrazu kao i za cement.



Slika 14: Ispitivanje gustoće metakaolina [foto autor]

Rezultatima ispitivanja dobivena je gustoća metakaolina od $2,6 \text{ g/cm}^3$, što odgovara u potpunosti u odnosu na vrijednosti dane od strane proizvođača.

Tablica 5: Rezultati ispitivanja gustoće metakaolina [izradio autor]

Gustoća metakaolina				
Nivo tekućine	Prije dodatka	V1	cm ³	250
	Nakon dodatka	V2	cm ³	275
Cement	Masa	Mc	G	65
	Volumen	ΔV	cm ³	25
Gustoća metakaolina		P	g/cm ³	2,6

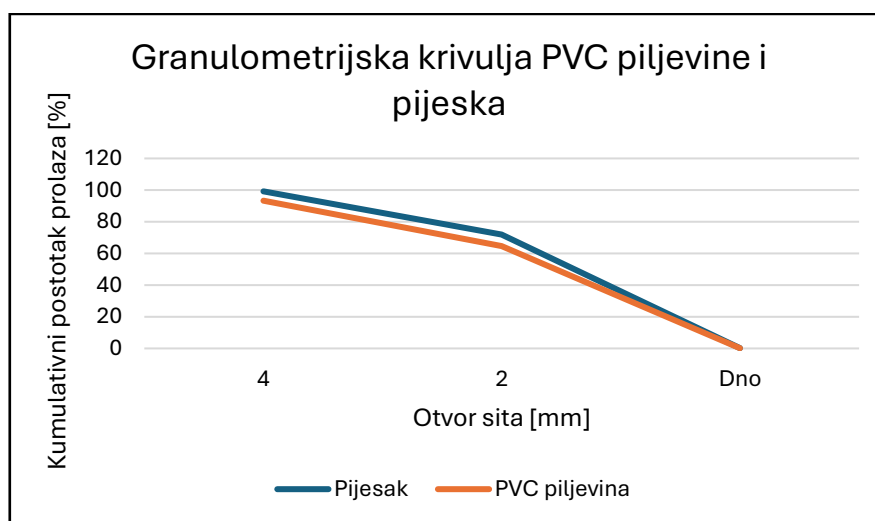
4.1.6. PVC piljevina

Za PVC piljevinu su provedena ispitivanja granulometrijskog sastava i gustoće piljevine. Granulometrijski sastav piljevine je određen je na isti način kao i za agregat, ali je upotrijebljen manji broj sita. Koristila su se sita otvora 4 mm, 2 mm te dno. Prosijavanje je trajalo malo više od dvije minute po situ, zbog znatno većeg volumena piljevine u odnosu na agregat. Provedena su četiri prosijavanja PVC piljevine te je na temelju njih uzeta srednja vrijednost kumulativnog postotka prolaza za svako sito (Tablica 6).

Tablica 6: Rezultati prosijavanja PVC piljevine [izradio autor]

Otvor sita d [mm]	Kumulativni postotak prolaza [%]
4	93,31
2	64,55
Dno	0,14

Granulometrijska krivulja PVC piljevine i pijeska (Slika 15) prikazuje usporedbu kumulativnog postotka prolaza kroz različite veličine otvora sita. Sličnost između PVC piljevine i pijeska je da obje granulometrijske krivulje pokazuju sličan trend, s visokim postotkom prolaza kroz veće otvore sita, koji postupno opada s manjim veličinama sita. Razlika je u tome što pijesak ima nešto veći postotak prolaza kroz sva sita, što ukazuje na sitnije čestice u odnosu na PVC piljevinu.



Slika 15: Grafički prikaz kumulativnog postotka prolaza PVC piljevine i pijeska [izradio autor]

Zrno pijeska je prirodni materijal nepravilnog oblika koje ima oštre rubove i glatku površinu, a sastavljeno je većinom od minerala poput kvarca. Zrno PVC piljevine je umjetni materijal, koji je obično lakši i ima plastičnu strukturu s glatkijom i manje hrapavom površinom u usporedbi s pijeskom. Zrna PVC piljevine i pijeska su prikazani na Slici 16.



Slika 16: Zrna PVC piljevine (lijevo) i pijeska (desno) [foto autor]

Određivanje gustoće PVC piljevine (Slika 17) je određeno na isti način kao i za metakaolin. Korištena ja menzura, petrolej te 10 g PVC Piljevine. Korišteno je znatno manje materijala u odnosu na prethodne, jer PVC piljevina ima znatno veći volumen od cementa i metakaolina. Petrolej se koristio jer ima manju gustoću od vode te omogućuje da materijal prije utone. Rezultati ispitivanja gustoće PVC Piljevine su prikazani u Tablici 7. Ispitivanjem je dobivena gustoća PVC-a od $1,0 \text{ g/cm}^3$.



Slika 17: Određivanje gustoće PVC piljevine [foto autor]

Tablica 7: Ispitivanje gustoće PVC piljevine [izradio autor]

Gustoća PVC-a				
Nivo tekućine	Prije dodatka	V1	cm ³	150
	Nakon dodatka	V2	cm ³	160
PVC piljevina	Masa	Mc	G	10
	Volumen	ΔV	cm ³	10
Gustoća PVC-a		P	g/cm ³	1

5. IZRADA I ISPITIVANJE SVJEŽEG BETONA

Izrađene su četiri betonske mješavine: referentna mješavina (REF), mješavina s 10% zamjene mase cementa metakaolinom (REF + 10M), te mješavine s istim udjelom metakaolina i dodatkom PVC piljevine u volumnom udjelu od 1% (REF + 10M + 1%PVC) te s zamjenom 15% volumena sitnog agregata (REF + 10M + 15%PVC). Prije izrade mješavina bilo je neophodno odrediti udio sastojaka odnosno recepturu za svaku pojedinu mješavinu. Prvo je određena receptura svake mješavine za 1m³ betona (Tablica 8), a kasnije je određen udio sastojka za izradu uzoraka (Tablica 9). Bilo je potrebno korigirati mase sastojaka na temelju određivanja vlažnosti agregata. Zatim su se sastojci izvagali i ubacili u miješalicu. Najprije su se ubacili suhi sastojci koji su se miješali oko jedne minute. Poslije toga je dodana voda pomiješana s dodatkom, a proces miješanja se nastavio i trajao je oko dvije minute. Za svaku mješavinu su napravljene tri prizme dimenzija 100 mm × 100 mm × 400 mm, tri kocke brida 7,1 cm te šest kocki brida 15 cm. Projektom je zahtjevan razred čvrstoće C30/37, razred izloženosti agresivnom djelovanju okoliša XS1 te razred konzistencije slijeganjem svježeg betona S3.

Tablica 8: Udio sastojaka za 1m³ betona [izradio autor]

Sastojci	Oznaka mješavine			
	REF	REF+10M	REF+10M+1%PVC	REF+10M+15%PVC
cement [kg]	410	369	369	369
voda [l]	205	205	205	205
v/c	0,5	0,5	0,5	0,5
zrak [%]	2,5	2,5	2,5	2,5
dodatak [kg]	0,82	2,05	1,64	1,64
frakcija 0-4 [kg]	910,76	906,57	892,64	833,63
frakcija 4-8 [kg]	404,78	402,92	396,73	370,50
frakcija 8-16 [kg]	371,05	369,34	363,67	339,63
metakaolin [kg]	/	41	41	41
PVC [kg]	/	/	10	50,77

Tablica 9: Udio sastojaka za izradu uzoraka [izradio autor]

Sastojci	Oznaka mješavine			
	REF	REF+10M	REF+10M+1%PVC	REF+10M+15%PVC
cement [kg]	18,99	17,09	17,09	17,09
voda [l]	8,83	9,85	10,01	9,48
v/c	0,5	0,5	0,5	0,5
zrak [%]	2,5	2,5	2,5	2,5
dodatak [kg]	0,04	0,09	0,08	0,08
frakcija 0-4 [kg]	43,25	42,00	41,19	38,99
frakcija 4-8 [kg]	18,50	18,45	18,17	16,95
frakcija 8-16 [kg]	17,04	16,96	16,7	15,59
metakaolin [kg]	/	1,9	1,9	1,9
PVC [kg]	/	/	0,46	2,35

Nakon izrade mješavina obavljena su ispitivanja svježeg betona. Od ispitivanja svježeg betona su ispitana temperatura betona, slijeganje betona 10 minuta nakon miješanja, gustoća i udio pora u betonu.

5.1. Temperatura svježeg betona

Temperatura svježeg betona je važan parametar jer utječe na čvrstoću betona, proces hidratacije cementa i vrijeme vezivanja. Mjerenje temperature (Slika 18) je provedeno za sve četiri mješavine, a rezultati mjerenja su prikazani u Tablici 10. Ovaj parametar i nije toliko mjerodavan s obzirom da sve mješavine nisu izrađene istog dana, a temperatura uvelike ovisi o sobnoj temperaturi.



Slika 18: Mjerenje temperature mješavine termometrom [foto autor]

Sve mješavine su imale su temperaturu 25 °C, a mješavina REF + 10M + 15%PVC je imala 24 °C. To je u skladu sa zahtjevom da temperatura betona ne smije prelaziti +35 °C, čime su ispunjeni zahtjevi za svaku mješavinu.

Tablica 10: Temperature svježeg betona [izradio autor]

Mješavina	Temperatura [°C]
REF	25
REF+10M	25
REF+10M+1%PVC	25
REF+10M+15%PVC	24

5.2. Slijeganje svježeg betona

Ispitivanje konzistencije svježeg betona metodom slijeganja je poznato kao slump test. Na temelju izmjerene vrijednosti slijeganja se donosi ocjena obradivosti i konzistencije svježeg betona, odnosno njegove sposobnosti da se ugrađuje i oblikuje bez segregacije. Konzistencija slijeganjem je ispitana pomoću Ambramsov-og kalupa u obliku krnjeg stošca prema normi HRN EN 12350-2 [28]. Ispitivanje se provodi na način da je prvo potrebno navlažiti baznu ploču i kalup, kojeg treba držati čvrsto pritisnutog na baznu ploču za vrijeme punjenja. Kalup se puni betonom u tri sloja, pri čemu svaki sloj predstavlja trećinu visine kalupa nakon zbijanja. Svaki sloj se zbija sa 25 udaraca šipkom za zbijanje, na način da se udarci ravnomjerno raspoređuju po površini. Nakon što je gornji sloj betona zbijen, potrebno je ukloniti višak betona s bazne ploče i pažljivo podignuti kalup vertikalno. Postupak podizanja treba trajati 2 do 5 sekundi. Odmah nakon uklanjanja kalupa se mjeri i zapisuje slijeganje betona u mm, na temelju čega se određuje razred konzistencije slijeganjem. Ispitivanje konzistencije svježih betonskih mješavina metodom slijeganja je prikazano na Slici 19, a rezultati slijeganja su prikazani u Tablici 11.



Slika 19: Ispitivanje konzistencije svježih betonskih mješavina metodom slijeganja [foto autor]

Za mješavinu REF očitana vrijednost slijeganja iznosi 170 mm, što prema normama svrstava ovu mješavinu u razred S4. Ovaj rezultat ukazuje na visoku obradivost betona. Za mješavinu REF + 10M očitana vrijednost slijeganja iznosi 150 mm, što prema normama svrstava ovu mješavinu u razred S3. Rezultat pokazuje uspješno postignutu obradivost betona jer se nastojao dobiti razred S3. Za mješavinu REF + 10M + 1%PVC očitana vrijednost slijeganja iznosi 70 mm, što prema normama svrstava ovu mješavinu u razred S2. Rezultat je unatoč slabijoj obradivosti usvojen, a za postizanje bolje obradivosti trebalo je povećati količinu superplastifikatora. Za mješavinu REF + 10M + 15%PVC očitana vrijednost slijeganja iznosi 0 mm, što prema normama svrstava ovu mješavinu u razred S1.

Tablica 11: Slijeganje svježeg betona [izradio autor]

Mješavina	Slijeganje [mm]
REF	170
REF+10M	150
REF+10M+1%PVC	70
REF+10M+15%PVC	0

5.3. Gustoća svježeg betona

Gustoća svježeg betona je važan pokazatelj kvalitete jer utječe na čvrstoću, trajnost, vodonepropusnost te otpornost betona na smrzavanje. Gustoća svježeg betona je određena prema normi HRN EN 12350-6 [29] pomoću poznatog volumena kalupa u kojeg se beton ugrađivao i poznate mase svježeg uzorka. Za mješavinu s metakaolinom i s 15% PVC-a provedena su ispitivanja gustoće za četiri uzorka, a za sve ostale mješavine za tri uzorka. Na temelju tih ispitivanja koristila se srednja vrijednost gustoće za svaku mješavinu.

Najveću gustoću je imala referentna mješavina REF koja iznosi $2,32 \text{ kg/dm}^3$, a najmanju je imala mješavina sa 15% PVC-a koja iznosi $2,15 \text{ kg/dm}^3$. Mješavina REF + 10M je imala gustoću $2,30 \text{ kg/dm}^3$, a mješavina REF + 10M + 1%PVC $2,29 \text{ kg/dm}^3$. Na temelju dobivenih rezultata se može zaključiti da povećanje udjela PVC-a u betonu znatno smanjuje njegovu gustoću te povećava udio pora i šupljina. Na Slici 20 su prikazane pore i šupljine od referentne mješavine i od mješavine REF + 10M + 15%PVC. Rezultati ispitivanja gustoće prikazani su u Tablici 12.



Slika 20: Pore i šupljine u mješavini REF (lijevo) i REF + 10M + 15%PVC (desno) [foto autor]

Tablica 12: Gustoće svježeg betona [izradio autor]

Gustoća betona				
Uzorak	Masa [kg]	Volumen [dm ³]	Gustoća [kg/dm ³]	Srednja vrijednost gustoće [kg/dm ³]
1. REF	7,89	3,375	2,34	2,32
2. REF	7,77	3,375	2,30	
3. REF	7,83	3,375	2,32	
1. REF+10M	7,74	3,375	2,29	2,30
2. REF+10M	7,87	3,375	2,33	
3. REF+10M	7,71	3,375	2,28	
1. REF+10M+1%PVC	7,7	3,375	2,28	2,29
2. REF+10M+1%PVC	7,83	3,375	2,32	
3. REF+10M+1%PVC	7,69	3,375	2,28	
1. REF+10M+15%PVC	7,13	3,375	2,11	2,15
2. REF+10M+15%PVC	7,36	3,375	2,18	
3. REF+10M+15%PVC	7,34	3,375	2,17	
4. REF+10M+15%PVC	7,2	3,375	2,13	

5.4. Sadržaj pora svježeg betona

Sadržaj pora u svježem betonu se određuje prema normi HRN EN 12350-7 [30] i odnosi se na količinu zraka zarobljenog unutar betonske mješavine tijekom miješanja i ugradnje. Vrlo je važan čimbenik jer utječe na čvrstoću, trajnost i otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje. Za ispitivanje sadržaja pora koristi se porometar prikazan na Slici 21. Spremnik porometra se puni svježim betonom u tri sloja pomoću lopatice, s ciljem da se što više zraka ukloni iz uzorka. Prije mjerenja potrebno je očistiti spremnik i poklopac. Potom se zatvara glavni ventil, dok se druga dva otvaraju. Zatim se ubrizgava voda kroz jedan od ventila sve dok ne počne izlaziti na drugi ventil. Poslije toga se zatvara ventil za odušak, a zrak se upumpava u zračnu komoru. Nakon toga se zatvara ventil kroz koji je ubrizgana voda i otvara se glavni ventil za zrak. Udio pora se očitava direktno sa brojanika, a dobiveni rezultat predstavlja postotak pora u svježem betonu.



Slika 21: Ispitivanje sadržaja pora porometrom [foto autor]

U Tablici 13 prikazani su rezultati za sve četiri mješavine. Zamjenom dijela cementa metakaolinom značajno se smanjuje udio pora, dok se povećanjem udjela PVC-a značajno povećava udio pora u svježem betonu.

Tablica 13: Udio pora svježeg betona [izradio autor]

Mješavina	Udio pora [%]
REF	4,5
REF+10M	1,2
REF+10M+1%PVC	4,8
REF+10M+15%PVC	6,8

6. ISPITIVANJE OČVRSLOG BETONA

Ispitivanja očvrsljelih betonskih uzoraka su provedena 28 dana nakon njegovanja u vodi. Od mehaničkih svojstava očvrsljelog betona je ispitana gustoća betona, tlačna čvrstoća na kockama brida 15 cm, vlačna čvrstoća na savijanje na prizmama 100 mm × 100 mm × 400 mm te vlačna čvrstoća kocki cijepanjem. Od trajnosnih svojstva je ispitana otpornost na habanje na kockama brida 7,1 cm te prodiranje vode pod pritiskom-VDP. Prodiranje vode pod pritiskom je ispitano nakon dodatna 72 sata od postavljanja u uređaj za ispitivanje prodora vode. Ispitivanje je provedeno na hidrauličkim prešama proizvođača Controls.

6.1. Gustoća očvrsljelog betona

Gustoća je jedan od ključnih faktora za ocjenjivanje kvalitete i svojstava betona. Gustoća se definira kao omjer mase betona i njegovog volumena, stoga je potrebno izvagati betonske uzorke i odrediti njihov volumen. Formula za gustoću (4) je sljedeća:

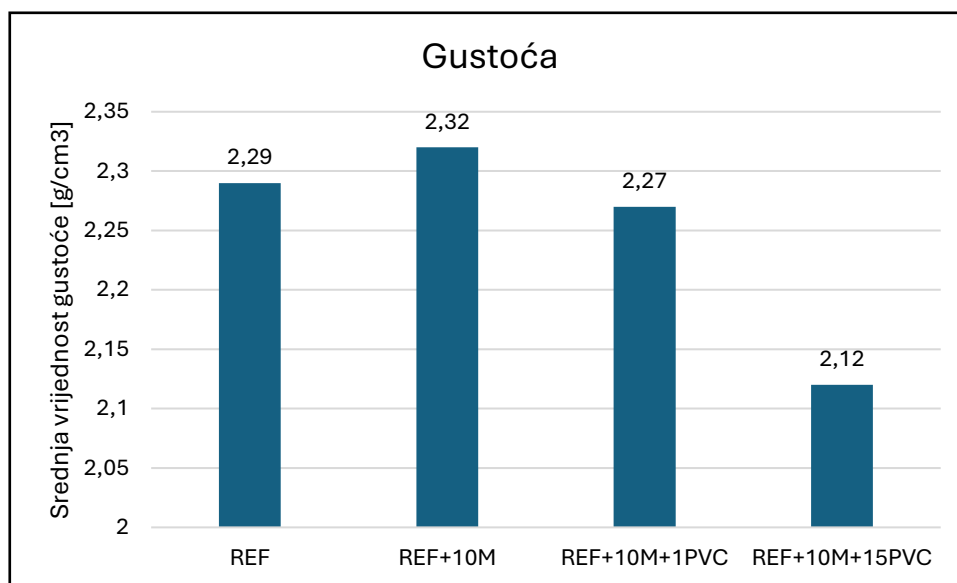
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Oznaka ρ označava gustoću (g/cm^3), m masu uzorka (g), a V volumen uzorka (cm^3). Određena je gustoća za sve četiri betonske mješavine. Za svaku mješavinu određena je gustoća triju kocaka, a kao rezultat uzeta je srednja vrijednost gustoće za ispitanu mješavinu. Rezultati ispitivanja su prikazani u Tablici 14, a na Slici 22 su grafički prikazani rezultati ispitivanja.

Rezultatima ispitivanja je utvrđeno da mješavina REF + 10M ima najveću gustoću, dok mješavina REF + 10M + 15%PVC ima znatno manju gustoću. Rezultati ispitivanja su očekivani za mješavine s PVC piljevinom, jer se s povećanjem udjela PVC-a znatno smanjuje gustoća betona. Rezultati kod mješavina REF i REF + 10M ne pružaju precizne vrijednosti zbog toga što bi metakaolin trebao smanjiti, a ne povećati gustoću mješavine. Stoga su dobivene vrijednosti gustoće za svježi beton puno realnije.

Tablica 14: Rezultati ispitivanja gustoće očvrsllog betona [izradio autor]

Gustoća							
Uzorak	a [mm]	b [mm]	c [mm]	masa [g]	Volumen [cm ³]	Gustoća [g/cm ³]	Srednja gustoća [g/cm ³]
1. REF	150,2	152	150,2	7851,6	3429,13	2,29	2,29
2. REF	150,1	151	150,1	7820,3	3402,03	2,30	
3. REF	150,2	150,7	150,2	7797,2	3399,80	2,29	
1. REF+10M	150,1	147,1	150,1	7788,3	3314,16	2,35	2,32
2. REF+10M	150,1	150,3	150,1	7788,4	3386,26	2,30	
3. REF+10M	150,1	150,5	150	7793,6	3388,51	2,30	
1. REF+10M+1%PVC	149,9	152,8	150	7753,3	3435,71	2,26	2,27
2. REF+10M+1%PVC	149,9	151,1	150,1	7768	3399,75	2,28	
3. REF+10M+1%PVC	150,2	152	150,1	7770,4	3426,84	2,27	
1. REF+10M+15%PVC	150	152,1	149,8	7285,8	3417,69	2,13	2,12
2. REF+10M+15%PVC	150,2	151,6	150,1	7194,1	3417,83	2,10	
3. REF+10M+15%PVC	150	151,9	150,1	7251,2	3420,03	2,12	



Slika 22: Grafički prikaz rezultata ispitivanja gustoće očvrsllog betona [izradio autor]

6.2. Tlačna čvrstoća nakon 28 dana

Tlačna čvrstoća je jedna od najvažnijih karakteristika betona kojom se određuju mehanička svojstva betona. Definira se kao maksimalno opterećenje po jedinici površine koju beton može izdržati prije pojave loma. Ispitivanje tlačne čvrstoće provodi se na normiranim kockama brida 15 cm ili normiranim valjcima promjera 15 cm i visine 30 cm. Tlačna čvrstoća betona se mjeri 28 dana nakon izlijevanja betona u kalupe. Nakon toga se uzorak vadi iz kalupa i obriše krpom. Izmjere mu se dimenzije i masa te se postavlja u prešu (Slika 23) za ispitivanje tlačne čvrstoće. Uzorak je potrebno smjestiti centrično u prešu, jer se opterećenje nanosi okomito na smjer lijevanja betona u kalup. Za vrijeme ispitivanja se mjeri rast sile u vremenu te maksimalno opterećenje pri kojem je došlo do sloma uzorka. Tlačna čvrstoća se izražava preko sljedeće formule (5):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Oznaka σ označava čvrstoću na tlak (MPa), F silu sloma (N), a A površinu opterećenja (mm^2).



Slika 23: Preša za ispitivanje tlačne čvrstoće [foto autor]

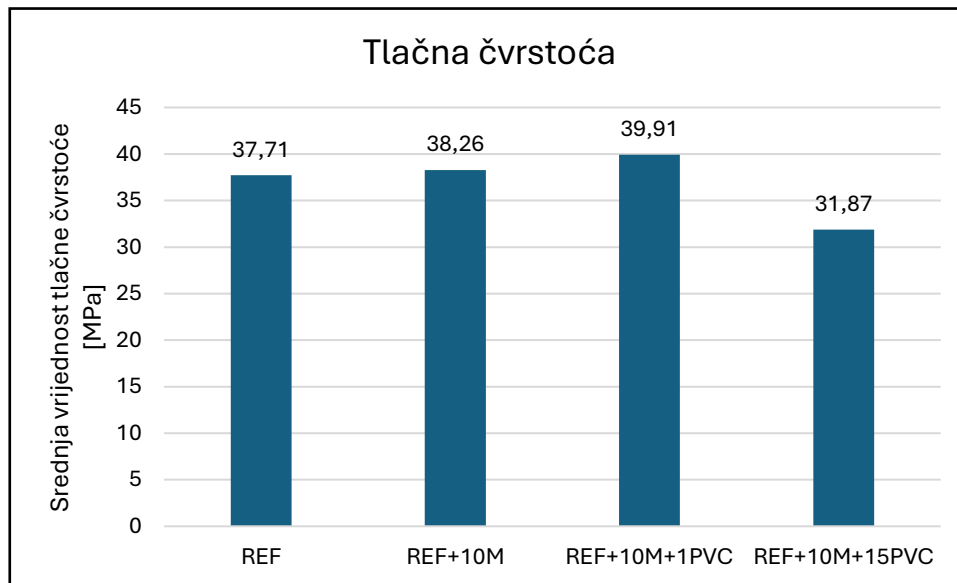
Ispitivanje tlačne čvrstoće je provedeno 28 dana nakon izrade mješavine na betonskim kockama brida 15 cm prema normi HRN EN 12390-3 [31]. Za sve četiri betonske mješavine ispitane su po tri kocke. Kocke su pri vađenju iz kalupa obrisane krpom te su izvagane mase i izmjerene dimenzije svake kocke. Potom su stavljene u prešu okomito na smjer lijevanja betona u kalupe. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće su prikazani u Tablici 15 i grafički na Slici 24.

Najveću tlačnu čvrstoću ima mješavina REF + 10M + 1%PVC, s povećanjem čvrstoće od 5,83% u odnosu na referentnu mješavinu, što ukazuje da manji dodaci PVC-a mogu poboljšati strukturu mješavine. Najmanju tlačnu čvrstoću ima mješavina REF + 10M + 15%PVC, s padom čvrstoće od 15,49%. Razlog tomu može biti da veći udio PVC-a smanjuje gustoću i homogenost smjese, a ujedno time smanjuje i njegovu otpornost na tlak. Mješavina REF + 10M je zabilježila rast čvrstoće od 1,46%.

Mješavina REF + 10M + 1%PVC je zabilježila porast tlačne čvrstoće od 4,31%, a mješavina REF + 10M + 15%PVC je imala 16,70% manju čvrstoću u usporedbi s mješavinom REF + 10M. Na temelju ove usporedbe se može zaključiti da manja količina PVC-a povećava čvrstoću, dok prevelika količina PVC-a može dovesti do značajnog pada čvrstoće.

Tablica 15: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 28 dana [izradio autor]

Tlačna čvrstoća			
Uzorak	Sila sloma [kN]	Naprezanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]
1. REF	855,7	37,48	37,71
2. REF	880,2	38,85	
3. REF	832,9	36,8	
1. REF+10M	831,8	37,69	38,26
2. REF+10M	862,8	38,26	
3. REF+10M	876,9	38,83	
1. REF+10M+1%PVC	952,4	41,61	39,91
2. REF+10M+1%PVC	843,7	37,23	
3. REF+10M+1%PVC	933,6	40,89	
1. REF+10M+15%PVC	696,2	30,51	31,87
2. REF+10M+15%PVC	737,7	32,41	
3. REF+10M+15%PVC	744,9	32,7	



Slika 24: Grafički prikaz tlačne čvrstoće nakon 28 dana [izradio autor]

6.3. Vlačna čvrstoća na savijanje nakon 28 dana

Vlačna čvrstoća na savijanje je mehaničko svojstvo materijala koje se definira kao maksimalno naprezanje na savijanje koje materijal može izdržati prije pojave loma. Ovo svojstvo je vrlo važan pokazatelj kod materijala koji su izloženi vlačnim naprezanjima, poput betona, keramike i plastike. Ispitivanje vlačne čvrstoće betona na savijanje se provodi na normiranim betonskim prizmama 100 mm × 100 mm × 400 mm nakon 28 dana od izrade mješavine. Nakon 28 dana njegovanja u vodi, prizme se vade iz vode te krpom obrišu kako bi se uklonila voda i zrnca materijala. Potom je potrebno izvagati uzorak te mu izmjeriti dimenzije (Tablica 16). Ispitivanje je moguće provesti na dva načina, nanošenjem opterećenja sa jednom koncentriranom silom na sredini raspona ili nanošenjem opterećenja s dvije koncentrirane sile na trećinama raspona udaljenosti između oslonaca. Kada se odabere način ispitivanja, uzorak se postavlja u prešu za ispitivanje čvrstoće na savijanje (Slika 25) u smjeru okomitom na smjer lijevanja betona u kalup. Za vrijeme ispitivanja se mjeri rast sile i pomaka u vremenu, a kao rezultat se dobije sila sloma i način sloma uzorka.

Tablica 16: Dimenzije i mase prizmi od svake mješavine [izradio autor]

Dimenzije i mase					
Uzorak	l [mm]	b [mm]	h [mm]	masa [g]	Volumen [cm ³]
1. REF	401	102,9	100,1	9391,8	4130,42
2. REF	401	100,15	102,9	9417,3	4132,48
3. REF	401	100,2	102,4	9418,6	4114,45
1. REF+10M	400	100,2	100	9305,2	4008,00
2. REF+10M	401	100,3	100,25	9299,2	4032,09
3. REF+10M	401	100,5	101,5	9320,5	4090,50
1. REF+10M+1%PVC	401	103,6	100,35	9280,8	4168,90
2. REF+10M+1%PVC	401	100,4	100,45	9004,7	4044,16
3. REF+10M+1%PVC	403	103,85	100,15	9361,2	4191,43
1. REF+10M+15%PVC	401	100,2	100,75	8646,9	4048,16
2. REF+10M+15%PVC	401	100,4	100,4	8800,3	4042,14
3. REF+10M+15%PVC	401	100,55	100	8588	4032,06



Slika 25: Preša za ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje sa dvije koncentrirane sile [foto autor]

Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje je provedeno prema normi HRN EN 12390-5 [32] na betonskim prizmama nakon 28 dana. Ispitivanje je provedeno nanošenjem opterećenja sa dvije koncentrirane sile na trećinama raspona udaljenosti između oslonaca. Ispitane su tri prizme za svaku mješavinu. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje su prikazani u Tablici 17 te grafički na Slici 26. Vlačna čvrstoća na savijanje je izračunata kao srednja vrijednost tri ispitane prizme prema sljedećem izrazu (6):

-opterećenje se nanosi s dvije koncentrirane sile

$$\sigma_f = \frac{F_f * l}{b * h^2} \quad (6)$$

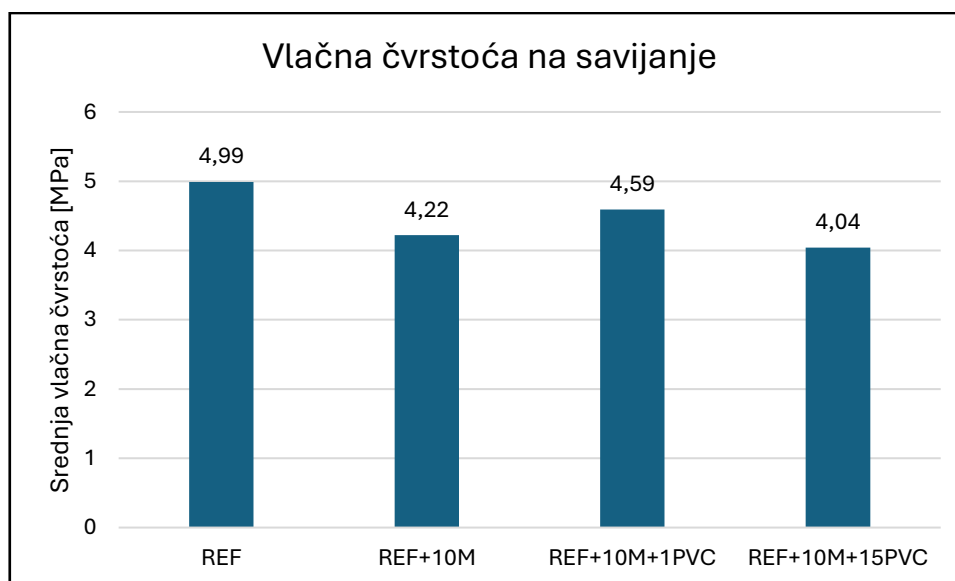
Oznaka σ_f označava čvrstoću na savijanje (MPa), F_f silu sloma (N), l udaljenost između oslonaca (mm), b širinu poprečnog presjeka (mm), a h visinu poprečnog presjeka (mm).

Najveću čvrstoću na savijanje ima referenta mješavina REF u iznosu od 4,99 MPa, dok mješavina REF + 10M + 15%PVC ima najmanju vlačnu čvrstoću, s padom vlačne čvrstoće od 19,04%. Mješavina REF + 10M je zabilježila pad od 15,43%, a mješavina REF + 10M + 1%PVC pad od 8,02%.

Mješavina REF + 10M + 1%PVC je zabilježila porast vlačne čvrstoće od 8,76%, a mješavina REF + 10M + 15%PVC je imala pad od 4,27% u odnosu na mješavinu REF + 10M. Također se može zaključiti da kao i kod tlačne čvrstoće manja količina PVC-a povećava vlačnu čvrstoću, dok veća količina smanjuje.

Tablica 17: Rezultati vlačne čvrstoće na savijanje nakon 28 dana [izradio autor]

Vlačna čvrstoća na savijanje			
Uzorak	Sila sloma [kN]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]
1. REF	17,8	5,34	4,99
2. REF	15,35	4,61	
3. REF	16,79	5,04	
1. REF+10M	12,84	3,85	4,22
2. REF+10M	13,77	4,13	
3. REF+10M	15,59	4,68	
1. REF+10M+1%PVC	14,62	4,39	4,59
2. REF+10M+1%PVC	14,66	4,40	
3. REF+10M+1%PVC	16,61	4,98	
1. REF+10M+15%PVC	13,23	3,97	4,04
2. REF+10M+15%PVC	14,51	4,35	
3. REF+10M+15%PVC	12,64	3,79	



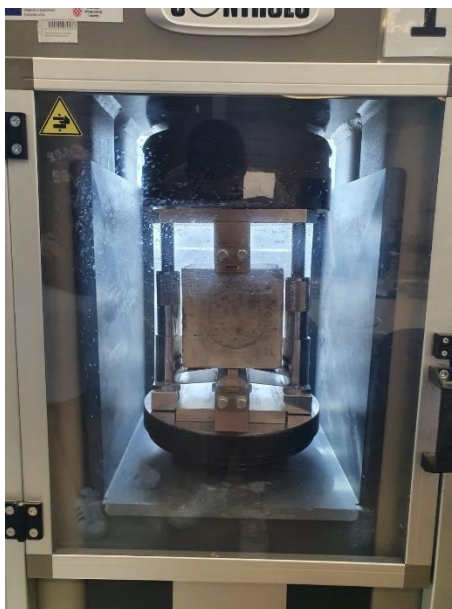
Slika 26: Grafički prikaz vlačne čvrstoće nakon 28 dana [izradio autor]

6.4. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem je provedeno prema normi HRN EN 12390-6 [33] na betonskim kockama brida 15 cm. Betonski uzorci su se nakon 28 dana njegovanja u vodi postavili u stroj za utiskivanje vode pod tlakom, pa su se nakon dodatna 72 sata cijepali u uređaju za ispitivanje čvrstoće na cijepanje (Slika 27). Na Slici 28 je prikazan primjer slomljenog uzorka nakon cijepanja (REF + 10 M + 1%PVC). Za svaku mješavinu su ispitane tri kocke, na temelju kojih je izračunata čvrstoća kao srednja vrijednost tri ispitana uzorka. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem su prikazani u Tablici 18 te grafički na Slici 29. Vlačna čvrstoća cijepanjem je određena po formuli (7):

$$\sigma_s = \frac{2 \cdot F_f}{A} \quad (7)$$

Oznaka σ_s označava vlačnu čvrstoću dobivenu cijepanjem (MPa), F_f silu sloma (kN) i A površinu ispitivanog uzorka (mm²).



Slika 27: Uređaj za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem [foto autor]



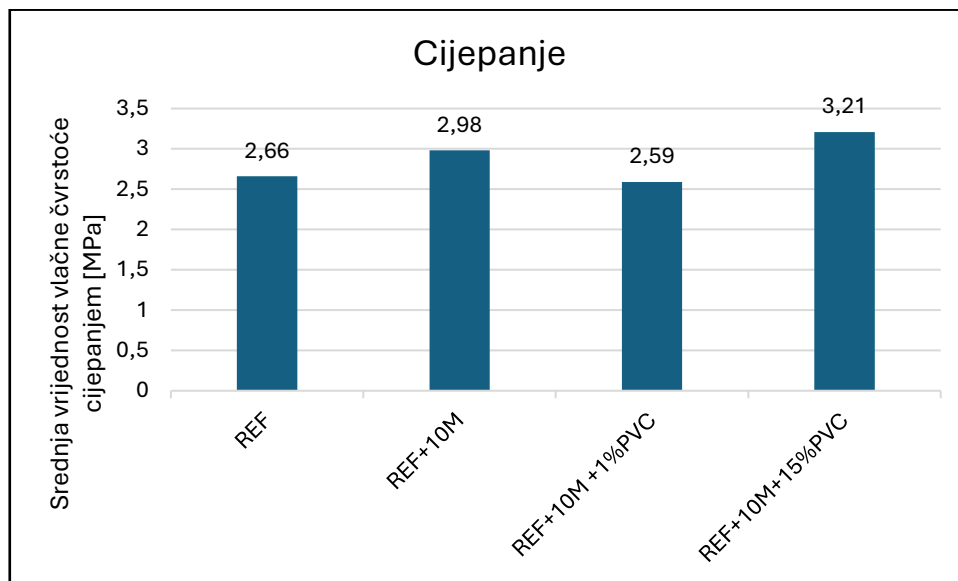
Slika 28: Slom kocke cijepanjem REF+10M+1%PVC [foto autor]

Nakon cijepanja kocki mješavina REF + 10M + 15%PVC je imala najveću vlačnu čvrstoću, s porastom od 20,68% u odnosu na referentnu mješavinu. Najmanju čvrstoću je imala mješavina REF + 10M + 1%PVC s padom od 2,63%. Mješavina REF+10M je zabilježila rast od 12,03% u odnosu na referentnu mješavinu.

Mješavina REF + 10M + 1%PVC je nakon cijepanja imala pad vlačne čvrstoće od 13,09%, a mješavina REF + 10M + 15%PVC je imala porast od 7,17%. Pad vlačne čvrstoće pri manjoj koncentraciji PVC-a može nastati zbog nehomogenog rasporeda PVC čestica u smjesi zbog čega se stvara nepovoljna mikrostruktura. Veća količina PVC-a može stvoriti elastičniji i fleksibilniji materijal, što omogućuje bolju apsorpciju prije pucanja.

Tablica 18: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem [izradio autor]

Cijepanje		
Uzorak	Čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost čvrstoće [MPa]
1. REF	2,69	2,66
2. REF	2,72	
3. REF	2,57	
1. REF+10M	3,26	2,98
2. REF+10M	2,78	
3. REF+10M	2,89	
1. REF+10M+1%PVC	3,38	2,59
2. REF+10M+1%PVC	2,03	
3. REF+10M+1%PVC	2,36	
1. REF+10M+15%PVC	3,05	3,21
2. REF+10M+15%PVC	3,22	
3. REF+10M+15%PVC	3,36	



Slika 29: Grafički prikaz vlačne čvrstoće cijepanjem [izradio autor]

6.5. Otpornost na habanje

Otpornost na habanje kao jedno od trajnosnih svojstava betona odnosi se na sposobnost betonske površine da izdrži mehanička opterećenja i abraziju. Pri određivanju otpornosti na habanje (Bohme) potrebni su betonski uzorci (kocka $7,1 \times 7,1$ cm), kvarcni pijesak, posuda, usisavač, vaga te instrument za određivanje abrazije prema Bohme metodi. Za provođenje postupka potrebno je izvagati betonske uzorke i zapisati njihove početne mase. Također, potrebno je raspodijeliti 20 g kvarcnog pijeska po cijeloj duljini kružnog pojasa koji će prolaziti ispod uzorka. Nakon toga, kocku treba namjestiti u prihvat na stroju i pritisnuti je. Zatim se pokreće stroj (Slika 30), a ispitivanje završava nakon 16 ciklusa od 22 okreta. Poslije svakog ciklusa potrebno je očistiti i usisati ostatke od pijeska i betonske kocke na ohrapavljenom kružnom pojasu. Potom je potrebno kocku zaokrenuti za 90 stupnjeva i nanijeti 20 g novog kvarcnog pijeska na instrument te pokrenuti ponovno stroj. Nakon svaka 4 ciklusa potrebno je zapisati mase svakog uzorka, jer će one dati uvid u brzinu trošenja materijala.



Slika 30: Stroj za ispitivanje otpornosti na habanje [foto autor]

Ispitivanje otpornosti na habanje (Bohme) je provedeno prema normi EN 13892-3 [34]. Ispitane su četiri betonske mješavine (kocke 7 cm), a za svaku mješavinu ispitane su tri kocke. Na početku je određena početna masa m_1 svake kocke, a nakon svakog četvrtog ciklusa je provedeno ponovno vaganje uzorka. Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje se dobiju oduzimanjem završne mase od početne, nakon čega se taj rezultat podijeli sa gustoćom uzorka. Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje su prikazani u

Tablici 19 i grafički na Slici 31. Otpornost na habanje je određena prema sljedećoj formuli (8):

$$A = \Delta V = \frac{\Delta m}{\rho r} = \Delta l * 5 \quad (8)$$

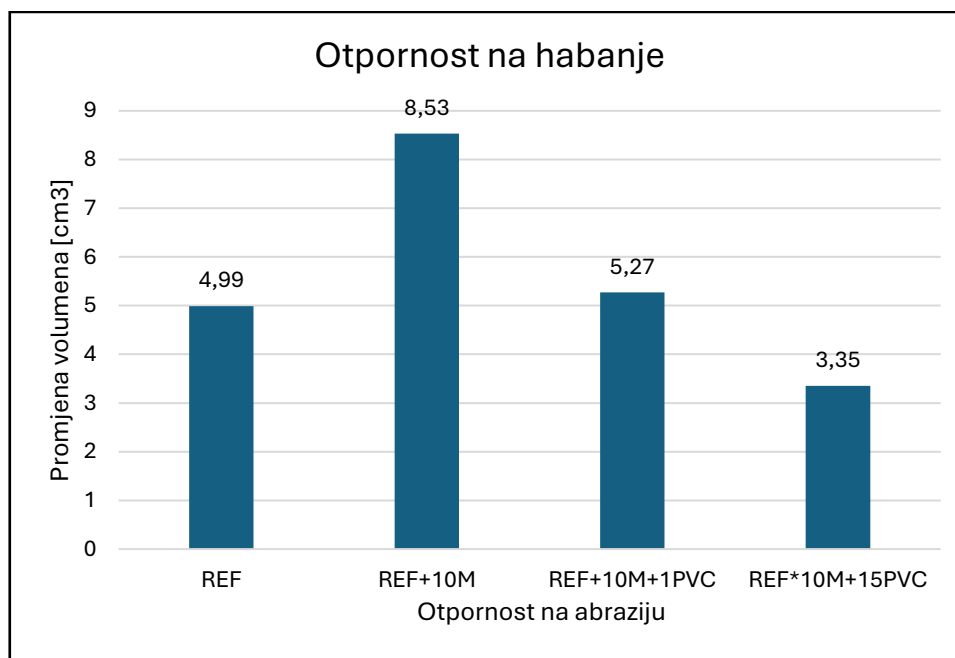
Oznaka A označava otpornost na habanje (cm³), ΔV promjenu volumena (cm³), ρr gustoću uzorka, a Δm promjenu mase nakon habanja.

Mješavina REF + 10M ima najslabiju otpornost na habanje, s padom otpornosti od 70,94% u odnosu na referentnu mješavinu. Najbolju otpornost pokazuje mješavina REF + 10M + 15%PVC, s porastom od 32,87%. Mješavina REF + 10M + 1%PVC je zabilježila pad otpornosti od 5,61%. Sam metakaolin povećava habanje, dok kombinacija PVC-a i metakaolina smanjuje habanje. Povećanje udjela PVC-a rezultira značajnim poboljšanjem otpornosti na habanje.

Mješavina REF + 10M + 1%PVC je imala porast otpornosti na habanje od 38,22%, a mješavina REF + 10M + 15%PVC je imala porast od 60,73% u odnosu na mješavinu REF + 10M. Obje mješavine s PVC-om pokazuju značajno povećanje otpornosti na habanje. Veća količina PVC-a još više poboljšava otpornost zbog stvaranja plastičnije, elastičnije i otpornije površinske strukture betona.

Tablica 19: Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje [izradio autor]

Otpornost na habanje									
Uzorak	m1 [g]	4. ciklus [g]	8. ciklus [g]	12. ciklus [g]	16. ciklus [g]	Δm [g]	ρ [g/cm ³]	ΔV [cm ³]	ΔV_{uk} [cm ³]
1. REF	813,5	809,9	808,7	807,6	805,5	8	2,29	3,49	4,99
2. REF	842,2	838,9	835,5	833,1	827,4	14,8	2,29	6,46	
3. REF	757,7	753	750,4	748,6	746,2	11,5	2,29	5,02	
1. REF+10M	805,1	797,2	789,1	782,4	777,5	27,6	2,34	11,79	8,53
2. REF+10M	805,1	797,8	793,6	790	786	19,1	2,34	8,16	
3. REF+10M	835,1	831,6	827,7	825,5	821,9	13,2	2,34	5,64	
1. REF+10M+1%PVC	769,9	765,7	762,3	760,1	755,7	14,2	2,25	6,31	5,27
2. REF+10M+1%PVC	775,9	771,3	769,1	767	765,8	10,1	2,25	4,49	
3. REF+10M+1%PVC	661,8	658,5	656,6	653,9	650,5	11,3	2,25	5,02	
1. REF+10M+15%PVC	776,1	774,6	773	772,6	771,4	4,7	2,12	2,22	3,35
2. REF+10M+15%PVC	789,6	787,6	785,9	782,3	778,2	11,4	2,12	5,38	
3. REF+10M+15%PVC	832,1	830,4	829	827,9	826,9	5,2	2,12	2,45	



Slika 31: Grafički prikaz otpornosti na habanje [izradio autor]

6.6. Prodiranje vode pod pritiskom-VDP

Ispitivanje prodora vode pod pritiskom je provedeno prema normi HRN EN 12390-8 [35] na kockama brida 15 cm. Betonski uzorci su se nakon 28 dana njegovanja u vodi postavili u stroj za utiskivanje vode pod tlakom (Slika 32). Nakon 72 sata su izvađeni iz stroja te su obrisani krpom i izmjerene su im dimenzije. Poslije toga su betonski uzorci postavljeni u prešu te su cijepanjem prepolaženi okomito na površinu izloženoj vodi. Ispitivanjem su dobiveni rezultati dubine prodiranja vode u betonske uzorke. Nakon cijepanja markerom je označen trag vode (Slika 33), a dubina prodiranja je izražena u milimetrima. Rezultati prodiranja vode su prikazani u Tablici 20 te grafički na Slici 34.



Slika 32: Stroj za utiskivanje vode pod tlakom [foto autor]

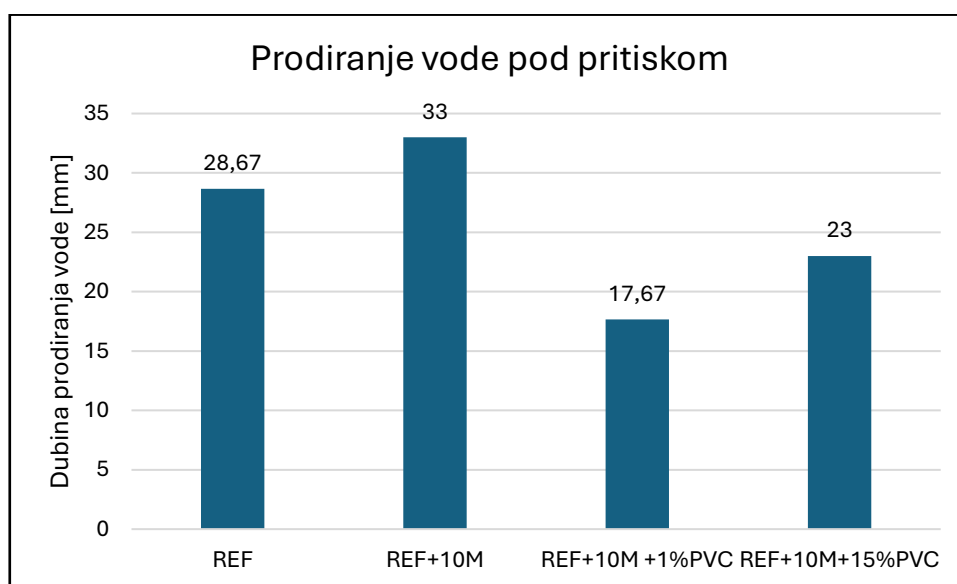


Slika 33: Dubina prodiranja vode u mješavinu REF+10M [foto autor]

Betonska mješavina REF + 10M je imala najveći prodor vode za 15,1% veći od referentne mješavine, dok je najmanji prodor imala mješavina REF + 10M + 1%PVC, s padom od 38,37%. Mješavina REF + 10M + 15%PVC je imala za 19,78% manji prodor vode od referentne mješavine.

Tablica 20: Rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode [izradio autor]

Prodiranje vode pod pritiskom		
Uzorak	Visina prodora vode [mm]	Srednja vrijednost [mm]
1. REF	33	28,67
2. REF	27	
3. REF	26	
1. REF+10M	31	33,00
2. REF+10M	41	
3. REF+10M	27	
1. REF+10M+1%PVC	20	17,67
2. REF+10M+1%PVC	18	
3. REF+10M+1%PVC	15	
1. REF+10M+15%PVC	27	23,00
2. REF+10M+15%PVC	20	
3. REF+10M+15%PVC	22	



Slika 34: Grafički prikaz dubine prodiranja vode [izradio autor]

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog završnog rada je bio ispitati mogućnost primjene industrijskog otpada kao dio betonske mješavine. Od industrijskog otpada je korištena PVC piljevina, uz dodatak metakaolina kao zamjene za cement. Primjena PVC piljevine u betonu značajno pridonosi smanjenju količine plastičnog otpada, što pridonosi održivosti i smanjenju onečišćenja okoliša. Također, upotreba metakaolina umjesto određenog udjela cementa pomaže smanjiti emisije ugljičnog dioksida, budući da proizvodnja cementa emitira veliki udio emisija u okoliš.

U laboratorijskom dijelu izrađene su četiri betonske mješavine, na temelju kojih su provedena ispitivanja svojstava svježeg betona te trajnosna i mehanička svojstva očvrstlog betona. Prvo je izrađena referentna mješavina, pa mješavina sa 10% zamjene mase cementa metakaolinom. Potom su izrađene još dvije mješavine, sa istim udjelom metakaolina i zamjenom udjela agregata PVC piljevinom od 15% te s dodatkom PVC piljevine u volumnom udjelu od 1%.

Od svojstava svježeg betona su ispitana temperatura, slijeganje, gustoća te udio pora. Sve ispitane mješavine su imale približno iste vrijednosti temperature prilikom ispitivanja u iznosima od 24 °C i 25 °C. Ispitivanjem konzistencije slijeganjem, referentna mješavina je postigla najveće slijeganje od 170 mm, što ukazuje na dobru obradivost i konzistenciju betona. Mješavina sa metakaolinom je imala slijeganje od 150 mm, a dodavanjem 1% PVC-a postignuto je slijeganje od 70 mm. Najmanje slijeganje je imala mješavina sa 15% PVC-a, kod koje zapravo nije niti došlo do slijeganja. Povećanje udjela PVC-a ukazuje na izuzetno smanjenje obradivosti svježeg betona. Daljnjim ispitivanjem gustoće i udjela pora, dobivene su očekivane vrijednosti za svaku mješavinu. Najveću gustoću je imala referentna mješavina od 2,32 kg/dm³, dok je najmanju imala mješavina sa 15% PVC-a od 2,15 kg/dm³. Kod ispitivanja udjela pora, mješavina s metakaolinom je imala najmanji udio pora od 1,2%, a mješavina sa 15% PVC-a je imala najveći udio pora od 6,8%. Povećanje udjela PVC-a u betonu rezultira smanjenjem gustoće te povećanjem udjela pora, dok je kod metakaolina obrnuta situacija.

Nakon 28 dana su ispitana svojstva očvrstlog betona. Od mehaničkih svojstava su ispitana tlačna čvrstoća, gustoća, vlačna čvrstoća na savijanje te vlačna čvrstoća cijepanjem, a od trajnosnih otpornost na habanje i prodiranje vode pod pritiskom VDP. Ovi rezultati ispitivanja su uspoređeni sa rezultatima dobivenim za referentnu mješavinu. Najveću tlačnu čvrstoću je pokazala mješavina koja sadrži metakaolin i 1% PVC-a, s porastom čvrstoće od 5,83% u odnosu na referentnu mješavinu. Mješavina s metakaolinom je također pokazala rast tlačne čvrstoće od 1,46%, dok je mješavina sa 15% PVC-a zabilježila pad od 15,49% u odnosu na referentnu mješavinu. Ispitivanjem vlačne čvrstoće sve mješavine zabilježile su pad u odnosu na referentnu mješavinu. Mješavina sa 1% PVC-a je imala pad od 8,02%, mješavina s metakaolinom pad od 15,43%, a mješavina sa 15% PVC-a je imala najveći pad u odnosu na referentnu mješavinu u iznosu od 19,04%. Kod ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem mješavina sa 15% PVC-a je imala za 20,68% veću vlačnu čvrstoću od referentne mješavine, dok je najmanju imala mješavina sa 1% PVC-a, s padom od 2,63% . Kod ispitivanja otpornosti na habanje mješavina sa 15%PVC-a je pokazala rast otpornosti u iznosu od 32,87% u odnosu na referentnu. Mješavina sa 1% PVC-a je zabilježila pad otpornosti od 5,61%, a najveći pad je zabilježila mješavina s metakaolinom u iznosu od čak 70,94%. Najveći prodor vode je imala mješavina s metakaolinom u iznosu od 33 mm, a najmanji prodor je imala mješavina sa 1% PVC-a od 17,7 mm.

Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti da je mješavina sa metakaolinom i dodatkom PVC-a od 1% pokazala najbolja mehanička i trajnosna svojstva, iako se ona ne razlikuju puno od referentne mješavine. Dobivenim rezultatima ispitivanja može se utvrditi da određena količina metakaolina te mala količina PVC-a imaju pozitivan utjecaj na svojstva betona, dok veći udio PVC-a negativno utječe na mehanička svojstva materijala. Veći udjeli PVC-a dovode do smanjenja tlačne čvrstoće, smanjenja čvrstoće na savijanje te lošije obradivosti betona. Za povećanje obradivosti betona potrebno je koristiti određenu količinu superplastifikatora. Na temelju svega navedenog potrebno je napraviti određene izmjene koje će pomoći u daljnjem razvoju betona od industrijskog otpada. Neke izmjene koje mogu pomoći su pronalaženje optimalnog omjera industrijskog otpada u betonu te kombinacija PVC-a s drugim aditivima, kako bi se postigla što bolja tlačna čvrstoća i otpor na vodu.

Mješavina REF + 10M + 15%PVC je pokazala najbolju otpornost na habanje, jer su plastične čestice PVC-a otpornije na trošenje u usporedbi s tradicionalnim mineralnim agregatima. Također, prednost je manja gustoća što rezultira lakšim građevinskim elementima, čime se smanjuje težina konstrukcije bez značajnog utjecaja na osnovna svojstva. Nedostaci ove mješavine su smanjenja tlačna čvrstoća, što može ograničiti primjenu PVC-a u strukturama koje zahtijevaju visoku nosivost. Veća poroznost negativno utječe na dugotrajnost u teškim uvjetima okoline. Ova mješavina bi se mogla koristiti u nenosivim elementima gdje čvrstoća nije primarni zahtjev te za privremene građevinske objekte. Optimalan omjer između PVC-a i ostalih komponenti treba pažljivo razmotriti kako bi se osigurala ravnoteža između mehaničkih i trajnosnih svojstava.

8. LITERATURA

- [1] Ancient Concrete: How it Stood the Test of Time, [Ancient Concrete: How it Stood the Test of Time \(aegweb.org\)](https://www.aegweb.org/), pristup 15.7.2024.
- [2] Roman Concrete vs. Modern Concrete, [Roman Concrete vs. Modern Concrete | Kilgore Companies](https://www.kilgore.com/), pristup 15.7.2024.
- [3] Six Components Of Concrete, [Six Components Of Concrete - Industry News - News \(precastconcretemagnet.com\)](https://www.precastconcretemagnet.com/), pristup 17.7.2024.
- [4] What Is Aggregate and Why Is It Used in Concrete?, [Why is Aggregates used in Concrete? | Total Concrete](https://www.totalconcrete.com/), pristup 17.7.2024.
- [5] The role of aggregates in concrete, <https://www.dcpu1.com/blog/the-role-of-aggregates-in-concrete/>, pristup 19.7.2024.
- [6] Cement, [https://en.wikipedia.org/wiki/Cement#Setting, hardening and curing](https://en.wikipedia.org/wiki/Cement#Setting,_hardening_and_curing), pristup 22.7.2024.
- [7] Cement and Types of Cement Used in Construction, https://structville.com/2020/10/cement-and-types-of-cement-used-in-construction.html#google_vignette?utm_content=cmp=true, pristup 22.7.2024.
- [8] Kako cementi dobijaju ime?, <https://www.cemex.hr/oznacavanje-cemenata>, pristup 22.7.2024.
- [9] Scientific Principles, <https://matse1.matse.illinois.edu/concrete/prin.html>, pristup 25.7.2024.
- [10] Aditivi za beton, <https://www.legalizacija.ba/aditivi-za-beton/>, pristup 25.7.2024.
- [11] MATERIJALI_2_-_14a_-_2009.pdf, https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/8037012/mod_resource/content/1/Aditivi.pdf, pristup 25.7.2024.
- [12] Concrete, <https://en.wikipedia.org/wiki/Concrete>, pristup 1.8.2024.
- [13] Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224004297#sec2>, pristup 1.8.2024.
- [14] What is Metakaolin?, [What is Metakaolin? \(concrete.org.uk\)](https://www.concrete.org.uk/), pristup 5.8.2024.

- [15] Metakaolin za čvršći i dugotrajniji beton, <https://www.gradnja.me/clanak/344/Metakaolin-za-%C4%8Dvr%C5%A1%C4%87i-i-dugotrajniji-beton>, pristup 5.8.2024.
- [16] Metakaolin in Concrete: Its Properties, Advantages & Disadvantages!, <https://gharpedia.com/blog/metakaolin-in-concrete-advantages-and-disadvantages-and-properties/>, pristup 5.8.2024.
- [17] poli(vinil-klorid), <https://www.enciklopedija.hr/clanak/poli-vinil-klorid>, pristup 8.8.2024.
- [18] PVC Shavings, <http://www.plasticscrap.us/product%20page.php?product=PVC+Shavings>, pristup 8.8.2024.
- [19] PVC Plastics: Polyvinyl Chloride, [PVC plastika: polivinilklorid \(thoughtco.com\)](https://www.thoughtco.com/pvc-plastika-polivinilklorid), pristup 8.8.2024.
- [20] A brief review on polyvinyl chloride plastic as aggregate for construction materials, <https://jeas.springeropen.com/articles/10.1186/s44147-023-00319-0>, pristup 8.9.2024
- [21] Industrial Waste Guide 2024, <https://www.wastemanaged.co.uk/our-news/industrial/industrial-waste-guide/#industrial-waste-disposal-methods>, pristup 9.8.2024.
- [22] Većina opasnog industrijskog otpada nepropisno se zbrinjava, <https://www.poslovni.hr/regija/vecina-opasnog-industrijskog-otpada-nepropisno-se-zbrinjava-4342917>, pristup 10.8.2024.
- [23] HRN EN 933-1:2012. Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sisanja, Hrvatski zavod za norme, 2012.
- [24] HRN EN 197-1:2012. Cement – 1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene, Hrvatski zavod za norme, 2012.
- [25] Certifikati i tehničke upute, https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/2022-05/2022_04_20-tehnicka-uputa-holcim-ekspert-s-v.pdf, pristup 10.8.2024.
- [26] Dynamon SF 16S, https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider15/products-documents/1_08748_dynamon-sf-

[16_en_23dbca1d80bc4d5c9bb9eff77937d3d.pdf?sfvrsn=345969d9_](#), pristup 31.8.2024.

[27] TDS Metaver M,

<https://catalogue.newchem.org/Uploads/635757517305059352TDS%20Metaver%20M%202013-hu.pdf>, pristup 31.8.2024.

[28] HRN EN 12350-2:2019. Ispitivanje svježega betona – 2. dio: Ispitivanje slijeganjem, Hrvatski zavod za norme, 2019.

[29] HRN EN 12350-6:2019. Ispitivanje svježega betona – 6. dio: Gustoća, Hrvatski zavod za norme, 2019.

[30] HRN EN 12350-7:2019. Ispitivanje svježega betona – 7. dio: Sadržaj pora – Tlačne metode, Hrvatski zavod za norme. 2019.

[31] HRN EN 12390-3:2019. Ispitivanje očvrsluloga betona – 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka, Hrvatski zavod za norme, 2019.

[32] HRN EN 12390-5:2019. Ispitivanje očvrsluloga betona – 5. dio: Čvrstoća ispitnih uzoraka na savijanje, Hrvatski zavod za norme, 2019.

[33] HRN EN 12390-6:2019. Ispitivanje očvrsluloga betona - 6. dio: Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitnih uzoraka, Hrvatski zavod za norme, 2019.

[34] HRN EN 13892-3. Određivanje otpornosti na habanje-Böhme, Hrvatski zavod za norme, 2015.

[35] HRN EN 12390-8:2019. Ispitivanje očvrsluloga betona – 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom, Hrvatski zavod za norme, 2019.