

Svojstva betona ojačanog plastičnim vlaknima od nusproizvoda industrije

Deželjin, Ivan

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:157:006588>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



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

Ivan Deželjin

Svojstva betona ojačanog plastičnim vlaknima od nusproizvoda industrije

Završni rad

Rijeka, 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Prijediplomski sveučilišni studij
Inženjerski materijali

Ivan Deželjin

JMBAG: 0114037870

Svojstva betona ojačanog plastičnim vlaknima od nusproizvoda industrije

Završni rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Završni rad izradio samo samostalno, u suradnji s mentoricom 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.

Ivan Deželjin

U Rijeci, 5. rujna 2024.

ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Nataliji Bede Odorčić na pruženoj pomoći, savjetima, prenesenom znanju i uloženom vremenu pri izradi završnog rada. Također, zahvaljujem laborantima na strpljenju, savjetima i pruženoj pomoći prilikom provođenja svih ispitivanja.

Posebno zahvaljujem svojim roditeljima i prijateljima na razumijevanju, pruženoj podršci i pomoći tijekom studiranja.

SAŽETAK

Uporaba betona je u suvremeno doba u značajnom porastu, što posljedično dovodi i do prekomjerne upotrebe prirodnih resursa. Iz tog se razloga dio prirodnih materijala potrebnih za proizvodnju betona nastoji zamijeniti nekim alternativnim materijalima. Osnovna je tema ovog rada upravo ispitati mogućnost primjene zamjenskih materijala i njihov utjecaj na svojstva betona. Točnije, provjerava se mogućnost korištenja PVC piljevine u spravljanju betonskih mješavina kao zamjene za udio agregata i kao ojačanja u obliku vlakana. Određuje se utjecaj PVC-a na svojstva betona u svježem i očvrslom stanju. U eksperimentalnom su dijelu ovoga rada izrađene ukupno četiri betonske mješavine, referentna mješavina i tri mješavine s istim masenim udjelom metakaolina, od čega dvije s različitim udjelima PVC piljevine. Za spravljene mješavine ispitana su svojstva svježeg betona te mehanička i trajnosna svojstva očvrsllog betona pri starosti od 28 dana. Ispitivanjem se pokazalo da male količine PVC-a u betonu pozitivno utječu na njegova svojstva, dok se povećanjem udjela PVC piljevine smanjuje njegova čvrstoća, ali povećava duktilnost.

Ključne riječi: PVC piljevina, metakaolin, betonska mješavina, svježi beton, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, duktilnost, vodonepropusnost

ABSTRACT

The use of concrete is increasing significantly in modern times, leading to an over-utilisation of natural resources. For this reason, some of the natural materials needed for the production of concrete are being replaced by some alternative materials. The main topic of this article is the study of the possibility of using substitute materials for the properties of concrete. More specifically, the possibility of using PVC sawdust in the production of concrete mixtures as a substitute for aggregates and as a reinforcement in the form of fibers is examined. The influence of PVC on the properties of concrete in both its fresh and hardened states is determined. In the experimental part of this work, a total of four concrete mixtures were made, a reference mix and three mixes with the same mass proportion of metakaolin, two of which with different proportions of PVC sawdust. The properties of fresh concrete, as well as the mechanical and durability properties of hardened concrete at the age of 28 days were tested. Testing results showed that small amounts of PVC in concrete have a positive affect its properties, while increasing the proportion of PVC sawdust reduces its strength but increases its ductility.

Keywords: PVC sawdust, metakaolin, concrete mixture, fresh concrete, compressive strength, tensile strength, ductility, water permeability

Sadržaj

1. UVOD	1
2. BETON I ALTERNATIVNI MATERIJALI ZA SPRAVLJANJE BETONA	3
2.1. Betoni današnjice	4
2.2. Nusproizvodi industrije i deponiranje industrijskog otpada	5
2.2.1. <i>Problem zbrinjavanja plastike</i>	6
2.3. PVC piljevina kao sastavni dio betona.....	8
2.4. Metakaolin.....	11
3. MATERIJALI I METODE ISPITIVANJA	13
3.1. Materijali i metode ispitivanja.....	13
3.1.1. <i>Agregat</i>	13
3.1.2. <i>Cement</i>	19
3.1.3. <i>Metakaolin</i>	21
3.1.4. <i>PVC piljevina</i>	23
3.1.5. <i>Aditivi</i>	25
4. IZRADA BETONSKIH MJEŠAVINA I ISPITIVANJE SVJEŽEG BETONA	27
4.1. Referentna mješavina	29
4.2. Mješavina s 10% metakaolina.....	32
4.3. Mješavina s dodatkom metakaolina i 1% PVC-a.....	34
4.4. Mješavina s dodatkom metakaolina i 15% PVC-a.....	36
4.5. Usporedba rezultata ispitanih mješavina.....	38
5. ISPITIVANJE OČVRSLOG BETONA	39
5.1. Gustoća uzoraka očvrslog betona.....	39
5.2. Određivanje tlačne čvrstoće	41
5.3. Vlačna čvrstoća na savijanje	43

5.4. Prodiranje vode pod pritiskom	48
5.5. Usporedba rezultata čvrstoće ispitanih uzoraka	51
6. ZAKLJUČAK	53
7. LITERATURA	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjer određivanja granulometrijskog sastava frakcije 8 - 16 mm (Izradio autor)	16
Tablica 2. Mase agregata (Izradio autor)	18
Tablica 3. Apsorpcija agregata (Izradio autor)	19
Tablica 4. Svojstva cementa [24]	20
Tablica 5. Gustoća cementa (Izradio autor)	21
Tablica 6. Gustoća metakaolina (Izradio autor)	22
Tablica 7. Gustoća PVC piljevine (Izradio autor)	24
Tablica 8. Rezultati drugog prosijavanja PVC piljevine (Izradio autor)	25
Tablica 9. Sastojci za 1m ³ betona u referentnoj mješavini (REF) (Izradio autor)	28
Tablica 10. Komponente referentne mješavine REF (Izradio autor)	30
Tablica 11. Rezultat ispitivanja gustoće svježeg betona (Izradio autor)	32
Tablica 12. Sastojci mješavine REF + 10M (Izradio autor)	33
Tablica 13. Gustoća REF + 10M (Izradio autor)	34
Tablica 14. Komponente mješavine REF + 10M + 1%PVC (Izradio autor)	34
Tablica 15. Gustoća mješavine REF + 10M + 1%PVC (Izradio autor)	35
Tablica 16. Sastojci mješavine REF + 10M + 15%PVC (Izradio autor)	36
Tablica 17. Gustoća REF + 10M + 15%PVC (Izradio autor)	37
Tablica 18. Usporedba rezultata ispitivanja svježeg betona (Izradio autor)	38
Tablica 19. Dimenzije i mase uzoraka očvrslog betona (Izradio autor)	40
Tablica 20. Gustoće očvrslog betona (Izradio autor)	40
Tablica 21. Tlačna čvrstoća uzoraka (Izradio autor)	42
Tablica 22. Rezultati ispitivanja na savijanje (Izradio autor)	45
Tablica 23. Pomaci dobiveni ispitivanjem na savijanje (Izradio autor)	45
Tablica 24. Rezultati prodora vode (Izradio autor)	50
Tablica 25. Čvrstoća određena cijepanjem (Izradio autor)	50

POPIS SLIKA

Slika 1. Auditorio de Tenerife [3].....	3
Slika 2. Crkva Svetog Oca [4].....	4
Slika 3. Godišnja proizvodnja cementa 1995.- 2023. [7].....	5
Slika 4. Prognoza proizvodnje cementa do 2030. [8]	5
Slika 5. Proizvodnja plastike u milijardama tona 1950. - 2022. [11].....	7
Slika 6. Plastika [12]	7
Slika 7. Odnosi načina upravljanja plastičnim otpadom [14]	8
Slika 8. Prikaz PVC piljevine.....	9
Slika 9. Metakaolin [19].....	11
Slika 10. Agregat frakcije 4 - 8 mm (Foto autor)	14
Slika 11. Sijačica za određivanje granulometrijskog sastava (Foto autor).....	14
Slika 12. Granulometrijske krivulje agregata (Izradio autor)	15
Slika 13. Sušenje frakcije 8 - 16 mm (Foto autor)	16
Slika 14. Piknometar ispunjen vodom (Foto autor)	17
Slika 15. Pokušaj postizanja zasićenog, površinski suhog stanja (Foto autor)	18
Slika 16. Le Chatelierova tikvica za određivanje gustoće cementa (Foto autor).....	20
Slika 17. Menzura s petrolejom i metakaolin (Foto autor)	22
Slika 18. Promjena volumena tekućine (Foto autor).....	23
Slika 19. Određivanje volumena PVC-a pomoću menzure (Foto autor)	24
Slika 20. Granulometrijski sastav PVC piljevine (Izradio autor)	25
Slika 21. Određivanje vlažnosti agregata u vreći (Foto autor).....	29
Slika 22. Ispitivanje konzistencije metodom slijeganja (Foto autor).....	31
Slika 23. Porometar (Foto autor).....	31
Slika 24. Rezultat slump testa (Foto autor)	33
Slika 25. Slijeganje mješavine REF + 10M + 1%PVC (Foto autor).....	35
Slika 26. Slijeganje mješavine REF + 10M + 15%PVC (Foto autor).....	36
Slika 27. Udio pora u betonu REF + 10M + 15%PVC (Foto autor)	37
Slika 28. Odnos pora i gustoće (Izradio autor).....	41
Slika 29. Uzorak za vrijeme ispitivanja na tlak (Foto autor)	42

Slika 30. Uzorak nakon tlačnog ispitivanja (Foto autor).....	42
Slika 31. Pripremljen uzorak u uređaju za ispitivanje (Foto autor)	43
Slika 32. Uzorak s postavljenim senzorima pomaka nakon sloma (lijevo) i uzorak nakon provedenog ispitivanja (desno) (Foto autor)	44
Slika 33. Slomljeni uzorak s 15% PVC-a s označenom PVC piljevinom (Foto autor)	46
Slika 34. Grafički prikaz pomaka za mješavinu REF (Izradio autor)	46
Slika 35. Grafički prikaz pomaka za mješavinu REF+10M (Izradio autor)	47
Slika 36. Grafički prikaz pomaka za mješavinu REF+10M+1%PVC (Izradio autor).....	47
Slika 37. Grafički prikaz pomaka za mješavinu REF+10M+15%PVC (Izradio autor).....	48
Slika 38. Uzorci pripremljeni za ispitivanje prodora vode (Foto autor)	49
Slika 39. Označena visina prodora vode i njeno mjerenje (Foto autor).....	49
Slika 40. Grafički prikaz srednjih čvrstoća uzoraka (Izradio autor)	52

1. UVOD

Beton je kompozitni, građevni materijal sastavljen od cementa, agregata i vode, s ili bez kemijskih ili mineralnih dodataka. Najrasprostranjeniji je materijal u području građevinarstva. U suvremeno doba konstantnog razvijanja industrije te neprestanog širenja gradova i povećanja zahtjeva za građenjem, javljaju se sve veće potrebe za građevinskim materijalom. Konkretnije, sve je veća potražnja za sastojcima potrebnim za spravljanje betona. Zbog (ne)dostupnosti i skupoće sastojaka, dio njih nastoji se zamijeniti nekim alternativnim, primjerice recikliranim materijalom. U posljednje se vrijeme otpadne materijale i nusproizvode industrije nastoji koristiti u gradnji kako bi se smanjila njihova količina i štetan utjecaj na okoliš. Raznim se istraživanjima utvrdilo da se isti ti materijali mogu upotrebljavati u spravljanju betona, ako se koriste u određenom postotku. Također, nova istraživanja se i dalje nastavljaju, s ciljem pronalaska optimalne recepture za beton s određenim sastojcima, uz što manji negativan utjecaj na njegova svojstva.

Jedan od najvećih problema današnjice predstavlja plastika i plastični otpad te njegovo zbrinjavanje. Plastika se počela proizvoditi početkom 20. stoljeća, a veliki je porast u svojoj upotrebi doživjela već 20-ih godina tog stoljeća. Karakteristična je po svojoj niskoj cijeni, lakoj obradivosti i maloj težini. Od cjelokupnog plastičnog otpada, otprilike 10% otpada na PVC (polivinil klorid) otpad. PVC se uvelike koristi u građevinskoj industriji za proizvodnju stolarije, cijevi, podnih obloga i sl. Pri njegovom obrađivanju, nastaju znatne količine otpada, poznatog kao PVC piljevina, čije zbrinjavanje u Republici Hrvatskoj nije adekvatno riješeno [1]. Nju se zbog otežanog recikliranja nastoji iskoristiti u neke druge svrhe, među kojima je i spravljanje betonskih mješavina, gdje se može koristiti kao zamjena za dio agregata ili u obliku vlakana.

Cilj ovog rada je ispitati mogućnost zamjene udjela kamenog agregata industrijskim nusproizvodom (PVC piljevinom) ili uporaba navedenog materijala u ulozi vlakana u betonu kako bi se smanjila količina, po okoliš vrlo štetnog otpada i kako bi se smanjilo crpljenje prirodnih resursa. Dodatna prednost uporabe industrijskog otpada jest ekonomičnost, jer su troškovi svedeni na minimum.

U eksperimentalnom dijelu izrađene su četiri betonske mješavine. Dvije su mješavine spravljene sa zamjenom 10% mase cementa metakaolinom, od čega jedna s dodatkom PVC piljevine u volumnom udjelu od 1%, a druga zamjenom 15% volumena agregata PVC piljevinom, jedna je mješavina spravljena samo sa zamjenom 10% mase cementa metakaolinom te je zadnja mješavina spravljena kao referentna. Na svježim mješavinama provodila su se ispitivanja gustoće, udjela pora i obradivosti metodom slijeganja, a za očvrslje se uzorke ispitivala tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem i na savijanje te prodiranje vode pod pritiskom.

Svi dobiveni rezultati usporedili su se s referentnom mješavinom te je donesen zaključak i prijedlog primjene spravljenih uzoraka.

2. BETON I ALTERNATIVNI MATERIJALI ZA SPRAVLJANJE BETONA

Beton je danas gotovo neizostavan materijal u svim oblicima gradnje. Najkorišteniji je materijal kojeg je stvorio čovjek i drugi najkorišteniji materijal na svijetu nakon vode [2]. Karakterističan je po svojoj velikoj tlačnoj čvrstoći, izdržljivosti, dugotrajnosti te mogućnosti izvedbe najraznovrsnijih oblika. Dodatna prednost betona je u pristupačnosti materijala potrebnih za njegovo spravljanje diljem svijeta. U posljednjih se stotinjak godina beton uvelike ističe kao jedan od najodgovornijih za unaprjeđenje globalnog izgrađenog okoliša (infrastrukture, stambenih jedinica i sl.). Zbog širenja gradova i sve većeg postotka gradskog stanovništva, povećavaju se i potrebe za građenjem pa samim time i uporabom betona. Betonske su konstrukcije stoga ključne za pružanje smještaja stanovništvu. Osim toga, one imaju i važnu ulogu pri gradnji infrastrukture, vodnih građevina, transportnih konstrukcija, elektrana i sl.

Kada je riječ o raznovrsnosti tipova građevinskih objekata i raznolikosti oblika koji se mogu postići betonom, gotovo da i ne postoji granica. Moguće je izvesti od vrlo jednostavnih i pravilnih do iznimno složenih i ljuskastih oblika. Primjer nekih složenih konstrukcija su svakako operna kuća Auditorio de Tenerife (Slika 1) ili pak crkva Svetog Oca u Rimu (Slika 2). Operna kuća Auditorio de Tenerife izgrađena je od bijelog betona i visoka je 58 metara. Njeno najveće krilo betonirano je u 32 segmenta. Crkva Svetog Oca u Rimu prepoznatljiva je po svoja tri jarbola koji su izvedeni kao dijelovi kugle.



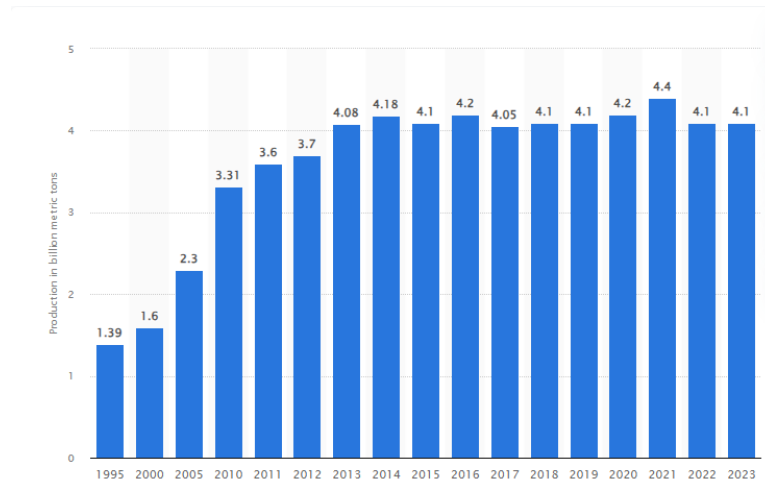
Slika 1. Auditorio de Tenerife [3]



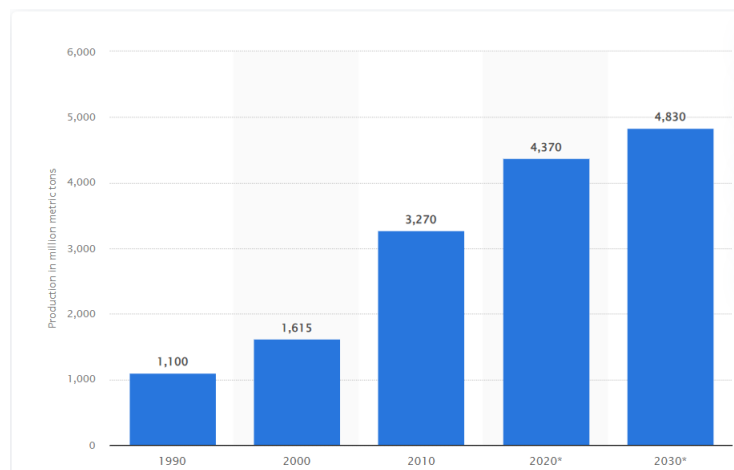
Slika 2. Crkva Svetog Oca [4]

2.1. Betoni današnjice

U današnje vrijeme proizvodnja betona doseže rekordne razine, a predviđa se da će se u budućnosti ona još i dodatno povećavati. Slijedno tome, u porastu su i potrošnja i upotreba prirodnih sirovina što se očitava kao negativan utjecaj na okoliš u vidu zagađenja okoliša emisijom stakleničkog plina CO₂, ali i u obliku gubitka prirodnih sirovina. Proizvodnja betona odgovorna je za 4 do 8% ukupnih svjetskih emisija CO₂ [5]. Prema posljednjim mjerenjima i analizama, došlo se do zaključka da se godišnje u svijetu u prosjeku izradi oko 30 milijardi tona betona [6]. Od toga se otprilike 30 do 40% iskoristi za izgradnju stambenih objekata. Nadalje godišnje se proizvede i oko 4,1 milijarda tona cementa. U usporedbi s 2000., kada je godišnja proizvodnja cementa bila 1,6 milijardi tona, vidi se da je u tom razdoblju došlo do ukupnog porasta od 256,25% [7]. Slike 3 i 4 prikazuju godišnje količine proizvedenog cementa u razdoblju od 1995. do 2023. te prognoziranu proizvodnju cementa do 2030. Može se primijetiti da je najveća razlika u proizvodnji nastupila između 2005. i 2010. godine, kada se povećala za 1,01 milijardu tona. Važno je napomenuti i da se prilikom proizvodnje svake tone cementa, proizvede gotovo ista količina ugljikovog dioksida, pa se tako godišnje s proizvodnjom cementa, u atmosferu ispusti i oko 4 milijarde tona CO₂.



Slika 3. Godišnja proizvodnja cementa 1995.- 2023. [7]



Slika 4. Prognoza proizvodnje cementa do 2030. [8]

Iz navedenog se može zaključiti da je proizvodnja cementa i betona u neprestanom porastu, a samim time i njihov loš utjecaj na okoliš. Stoga se ona nastoji smanjiti na način da se cement u betonu zamijeni nekim prirodnim ili sintetičkim materijalom.

2.2. Nusproizvodi industrije i deponiranje industrijskog otpada

Industrijski otpad odnosi se na nusproizvode nastale industrijskom aktivnošću i uključuje bilo koji materijal koji postane neupotrebljiv tijekom procesa proizvodnje. Nastaje prilikom proizvodnje u tvornicama, rudarstvu, građevinarstvu, kemijskoj industriji i energetici. Vrste

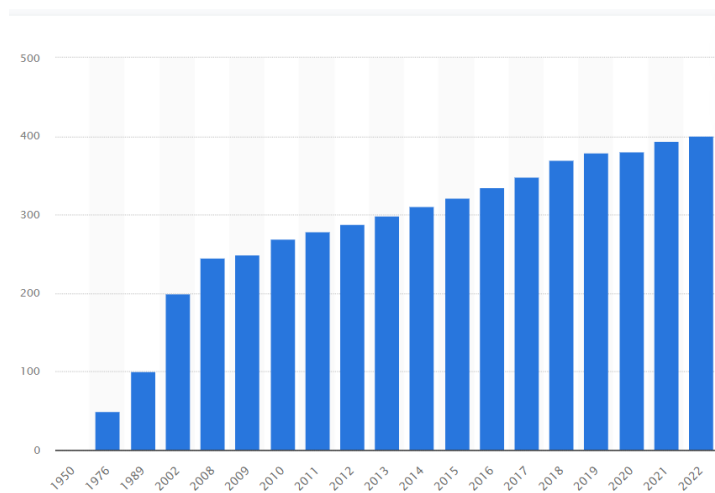
industrijskog otpada stoga mogu biti raznolike. Može se zateći u obliku šljunka, prljavštine, kemikalija, metala, plastike, betona i sličnih materijala. Uz navedeno, ovaj oblik otpada može biti u tekućem, krutom i polu krutom stanju, a s obzirom na svoje karakteristike, može biti opasan i neopasan otpad [9]. Tekući industrijski otpad predstavlja veliki problem u obliku otpadnih voda, koje nastaju prilikom kontakta vode sa štetnim kemikalijama prilikom proizvodnje. Ukoliko se takva voda ispusti u prirodu bez pročišćavanja, posljedice mogu biti vrlo opasne po zdravlje okoliša i čovjeka. Kada je riječ o krutom otpadu, najčešće se misli na materijal koji nije opasan, poput otpada iz dvorišta ili građevinskog otpada. Opasni se otpad s druge strane definira na posebne načine radi pažljivijeg i složenijeg rukovanja, a kao takav se klasificira prema karakteristikama zapaljivosti, reaktivnosti, korozivnosti i toksičnosti. Jako je važno stoga razumjeti izvore i vrste industrijskog otpada kako bi se mogle razviti učinkovite strategije gospodarenja takvim otpadom.

Otpadne se vode nastoje pročišćavati u što je moguće većoj količini. Za ostvarenje se navedenog razvijaju i implementiraju napredne tehnologije sa ciljem da se što više štetnih kemikalija i drugih zagađivača ukloni iz vode prije njenog ispuštanja u okoliš. Glede ispuštanja štetnih plinova u atmosferu, uvode se razne regulative i tehnologije poput filtera i ispiraća plinova kako bi se smanjio njihov negativan utjecaj na atmosferu. Većina se otpada ipak nastoji reciklirati i ponovno upotrijebiti, a za onaj otpad koji se ne može zbrinuti na taj način važno je da se osigura sigurno odlaganje na posebno označenim odlagalištima. Jedna od najopasnijih vrsta industrijskih nusproizvoda jest i plastika, iako se češće pojavljuje i kao glavni proizvod različitih grana industrije.

2.2.1. Problem zbrinjavanja plastike

Plastika je sintetički materijal širokog opsega primjene korišten pri izradi raznovrsnih predmeta i materijala, s velikom učinkovitošću zamjene prirodnih sirovina (Slika 6). Prvi se put u svijetu pojavila sredinom 19. stoljeća, nakon čega ulazi u sve širu proizvodnju. Sa Slike 5 vidljivo je da u razdoblju od 1976. do 2022. godine dolazi do porasta u proizvodnji plastike od 800%. Većina se suvremene plastike dobiva iz kemikalija na bazi fosilnih goriva poput nafte ili plina, a kao glavni sastojak za proizvodnju koriste se polimeri. Njihova plastičnost omogućuje oblikovanje, ekstrudiranje i prešanje u čvrste predmete različitih oblika. Uz to,

plastika je uvelike korištena i zbog svojih svojstava izdržljivosti, fleksibilnosti, niske cijene i sl. [10].



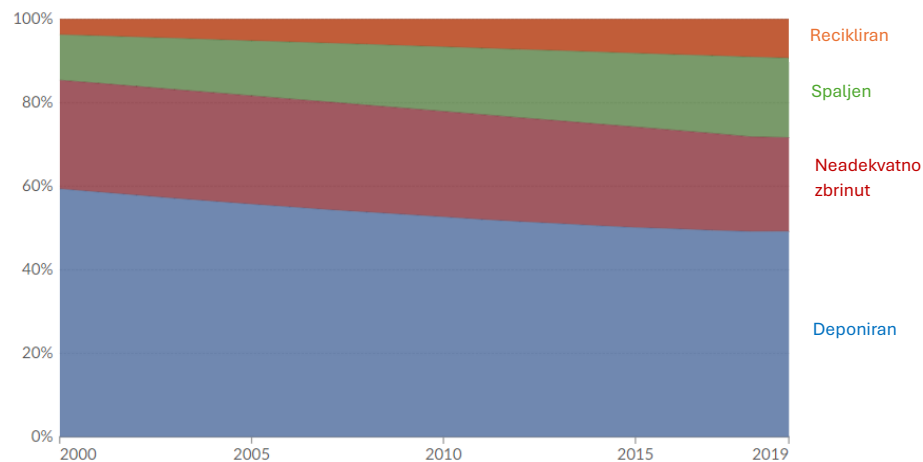
Slika 5. Proizvodnja plastike u milijardama tona 1950. - 2022. [11]



Slika 6. Plastika [12]

Značajan problem predstavlja pitanje zbrinjavanja plastike nakon prestanka njezine uporabe (Slika 7). Svaki se proizvod ikada proizveden i korišten i dalje nalazi na planeti, bilo u svom prvotnom obliku, recikliranom ili djelomično razgrađenom. Upravo zbog svog svojstva dugotrajnosti i izdržljivosti, količine plastike i plastičnog otpada postaju sve veće, a velik dio toga otpada završava u prirodi. Brzina kojom se plastika razgrađuje ovisi o njezinoj strukturi i materijalu, a osim toga ovisi i o izloženosti plastike sunčevoj svjetlosti. Isto kao i

ljudska koža, plastika apsorbira UV zračenje koje razgrađuje molekule. I tog se razloga i na odlagalištima plastični otpad često izlaže suncu kako bi se pospješio proces razgradnje. Uobičajeno je plastici potrebno od 20 do 500 godina da se u potpunosti razgradi [13]. Zbog tog zabrinjavajućeg podatka plastični se otpad najčešće nastoji sanirati spaljivanjem, ali i to za sobom nosi velike posljedice, kako u ekološkom, tako i u ekonomskom smislu. Stoga kao najjednostavnije rješenje preostaje recikliranje i ponovna upotreba otpada, što se u posljednje vrijeme nastoji što više popularizirati među ljudima.



Slika 7. Odnosi načina upravljanja plastičnim otpadom [14]

U ovom se radu iz tog razloga istražuje mogućnost korištenja plastike (PVC) u betonu s ciljem smanjenja plastičnog otpada te samim time i doprinos građevinskog sektora u smanjenju otpada i očuvanju okoliša.

2.3. PVC piljevina kao sastavni dio betona

U današnje vrijeme za spravljanje betona koriste se različiti zamjenski materijali kao alternativa standardnim sastojcima betona, cementu i agregatu. Agregat čine čvrsti zrnati materijali kao što su šljunak, pijesak ili drobljeni kamen, koji su uz cement i vodu glavni sastojci betona. Upravo agregat čini najveći udio u betonskim mješavinama i to čak od 60 do 80% mješavine te se najčešće stavlja u trima različitim, susjednim frakcijama. Proizvodnja agregata vrši se u kamenolomima te se naknadno usitnjava do potrebnih frakcija

ili se može vaditi s morskog dna ili iz riječnog korita. Prilikom njegove proizvodnje koriste se razna postrojenja koja troše znatne količine energije, što također doprinosi negativnom utjecaju na okoliš, ali je on ipak uvelike manji od utjecaja proizvodnje cementa. Proizvodi se od 4 do 10 kilograma CO₂ po toni proizvedenog agregata. Agregat se može podijeliti po nekoliko kriterija pa se tako dijeli na fini i grubi, ali i na agregate od prirodnog materijala, industrijske proizvode i industrijske nusproizvode. Jedan od takvih industrijskih nusproizvoda je PVC piljevina, prikazana na Slici 8.



Slika 8. Prikaz PVC piljevine

Polivinil klorid, skraćeno PVC, treći je najrašireniji sintetski polimer plastike u svijetu. Prvobitno je stvoren još u drugoj polovici 19. stoljeća i od tada se opseg njegove uporabe neprestano širi. Nastaje stvaranjem vinil klorida reakcijom etilena i klora te daljnjom polimerizacijom. U njegovom sastavu postoje različite varijacije pa se stoga i njegova svojstva mogu razlikovati s obzirom na vrstu dodataka koji se dodaju prilikom polimerizacije. Ipak, glavna je podjela PVC-a na kruti i savitljivi PVC [15]. PVC se uvelike koristi u građevinskoj industriji prilikom proizvodnje prozorskih okvira ili vrata, u vodovodnim instalacijama, podovima, tapetama ili čak pri izolaciji električnih kabela. Uz to, široka je primjena i u predmetima za svakodnevnu upotrebu. Najčešće su to jednokratni predmeti, ali se koristi i za proizvodnju boca, igračaka, sportske opreme, školske opreme, ambalaže za kozmetiku i mnogih drugih proizvoda. Široka upotreba PVC-a prisutna je zbog njegovih povoljnih svojstava poput niske cijene, dugotrajnosti, visoke čvrstoće te njegovih

izolatorskih svojstava i vodootpornosti. Međutim, uz sve navedeno, PVC ima i značajna negativna svojstva, ponajviše zbog njegove toksičnosti. PVC se naime smatra najštetnijim oblikom plastike za naš okoliš, a razlog tome je što se štetnost očitava u svakom njegovom koraku proizvodnje, korištenju i u daljnjem zbrinjavanju. Mnoge države svijeta stoga nastoje regulirati korištenje PVC-a, a posebice u proizvodima za djecu poput igračaka i školskog pribora. Samo se oko 1% ukupnog PVC otpada reciklira, dok ostatak ostaje nezbrinut ili završava u prirodi. Prilikom njegove razgradnje nastaje mikroplastika koja se nakuplja u okolišu, infiltrira u tlo i završava u vodi. Slijedno tome završava i u životinjama pa se tako dovodi i u čovjekov hranidbeni lanac. Iz tih se razloga taj otpad nastoji u što je većim količinama reciklirati ili ponovno upotrijebiti. Građevinska struka tome doprinosi korištenjem PVC piljevine. Ona nastaje rezanjem, bušenjem i obradom stolarije i sličnih proizvoda, a čini ukupno od 2 do 5% cjelokupnog otpada. U građevinarstvu se upotrebljava na način da se dodaje betonskim mješavinama kao zamjena za udio agregata ili se dodaje u funkciji vlakana za ojačanje.

PVC piljevina se u betonske mješavine u ulozu vlakana dodaje u malim količinama, a utjecaj tih vlakana na svojstva betona ovisi o njihovim dimenzijama, količini i orijentaciji unutar betonske smjese. Nažalost je utjecaj PVC-a u ulozu vlakana vrlo malo istražen. Na temelju dosadašnjih istraživanja došlo se do spoznaja kako uporabom PVC-a u betonu dolazi do povećanja duktilnosti, smanjenja gustoće i otpornosti na pucanje. Negativno se može utjecati na tlačnu čvrstoću, koja se dodatkom ovog sastojka smanjuje.

S druge strane, u betonske se mješavine često dodaju druge vrste vlakana poput čeličnih, staklenih ili sintetičkih vlakana. Ona uvelike doprinose čvrstoći betona na tlak i savijanje te povećavaju duktilnost. Sintetička vlakna, primjerice, imaju vrlo široku primjenu. Ona sprječavaju nastanak mikropukotina, smanjuju slijeganje, povećavaju otpornost betona na vlak i habanje te osiguravaju mogućnost prihvaćanja veće količine energije [16]. U suvremeno doba raste i uporaba makrosintetičkih vlakana koja imaju sve tehničke i sigurnosne zahtjeve klasične armature, ali sa sobom donose prednosti poput nepostojanja rizika od korozije[17].

2.4. Metakaolin

Prilikom spravljanja betonskih mješavina koriste se voda, agregat, cement i potrebni dodaci. Udio cementa u betonu varira u granicama od otprilike 10 do 15%. Kako je već navedeno, prilikom proizvodnje cementa emitira se 4 do 8% ukupne svjetske količine ugljikovog dioksida. Također, valja napomenuti da se uz CO₂ troši i značajna količina energije pa tako građevinska industrija spada i među industrije s najvećom potrošnjom energije. Kao posljedica takvog negativnog utjecaja, dio se ukupnog cementa u betonu nastoji zamijeniti nekim alternativnim, po mogućnosti prirodnim materijalom. Dakako, u cilju je da taj materijal ne narušava svojstva betona, već da ona ostanu ista ili, ako je moguće budu i bolja. Jedan od takvih materijala je metakaolin, Slika 9.

Metakaolin je kalcinirani oblik minerala gline kaolinita. Neke od stijena koje su bogate mineralom kaolinitom poznate su kao porculanska glina ili kaolin. On nastaje zagrijavanjem porculanske gline na temperaturu između 600 i 800 °C i daljnjim usitnjavanjem do finoga praha. Tradicionalno se koristi u proizvodnji porculana, dok se u novije vrijeme koristi i za spravljanje betona kao zamjena za udio cementa. U betonske se mješavine stavlja kao udio mase potrebnog cementa u rasponu od 8 do 20%, ali najčešće u rasponu od 5 do 10% mase [18]. Gustoća metakaolina nešto je manja od gustoće cementa i iznosi 2.6 g/cm³, a njegove su čestice finije od cementnih.



Slika 9. Metakaolin [19]

Kada se koristi kao zamjena cementa na razinama od 5 do 10% težine, proizvedeni beton općenito je kohezivniji i manje je vjerojatno da će krvariti. Tome rezultiraju jednostavniji procesi pumpanja i dorade koji zahtijevaju manje napora. Tlačna se čvrstoća ovakvog očvrslog betona, u ovim granicama zamjene, također povećava.

Kada se udio cementa pak zamjenjuje u nešto većim količinama (od 10 do 20% mase), stvara se cementna matrica koja ima nisku poroznost i propusnost. To rezultira poboljšanoj otpornosti očvrslog betona na napade sulfata, kloridnih iona i drugih agresivnih tvari, kao što su mineralne i organske kiseline. Također se poboljšava i otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, a rizik od oštećenja uzrokovan udarcima ili abrazijom smanjen je za ovakav beton koji je pravilno obrađen i očvrsnuo.

Nadalje, za njegovu proizvodnju potrebna je znatno manja količina energije nego za proizvodnju cementa te su samim time i manje emisije CO₂ u atmosferu. To uvelike pomaže očuvanju okoliša te je dodatan razlog za upotrebu metakaolina u betonu.

3. MATERIJALI I METODE ISPITIVANJA

S namjerom postizanja glavnog cilja istraživanja, bilo je potrebno izraditi betonske mješavine s određenim postotkom PVC otpada kao zamjene za udio pijeska i kao ojačanja u obliku vlakana. Da bi betonska mješavina mogla biti pravilno ugrađena u kalupe postavljen je osnovni zahtjev da pripremljene mješavine moraju imati zadovoljavajuću konzistenciju, odnosno razred slijeganja, koji je ispitan postupkom sukladno normi HRN EN 12350-2. [20]

U sklopu ovog rada izrađene su ukupno četiri betonske mješavine na kojima su provedena ispitivanja za analizu mehaničkih i trajnosnih svojstava. Za izradu mješavina korišteni su uobičajeni materijali, tj. cement, pijesak i voda, uz dodavanje aditiva te pojedini zamjenski materijali, metakaolin i PVC piljevina.

3.1. Materijali i metode ispitivanja

Prije spravljanja betonskih mješavina provedena su vlastita laboratorijska ispitivanja na svim sastojcima koji su se koristili prilikom miješanja betona. Ispitivane su karakteristike sastojaka sukladno normama za cement, agregat i dodatke.

3.1.1. Agregat

Za izradu betona korišten je agregat tvrtke Holcim d.o.o. Za korišteni pijesak i krupni agregat provodila su se ispitivanja za određivanje granulometrijskog sastava, volumenske mase i apsorpcije.



Slika 10. Agregat frakcije 4 - 8 mm (Foto autor)

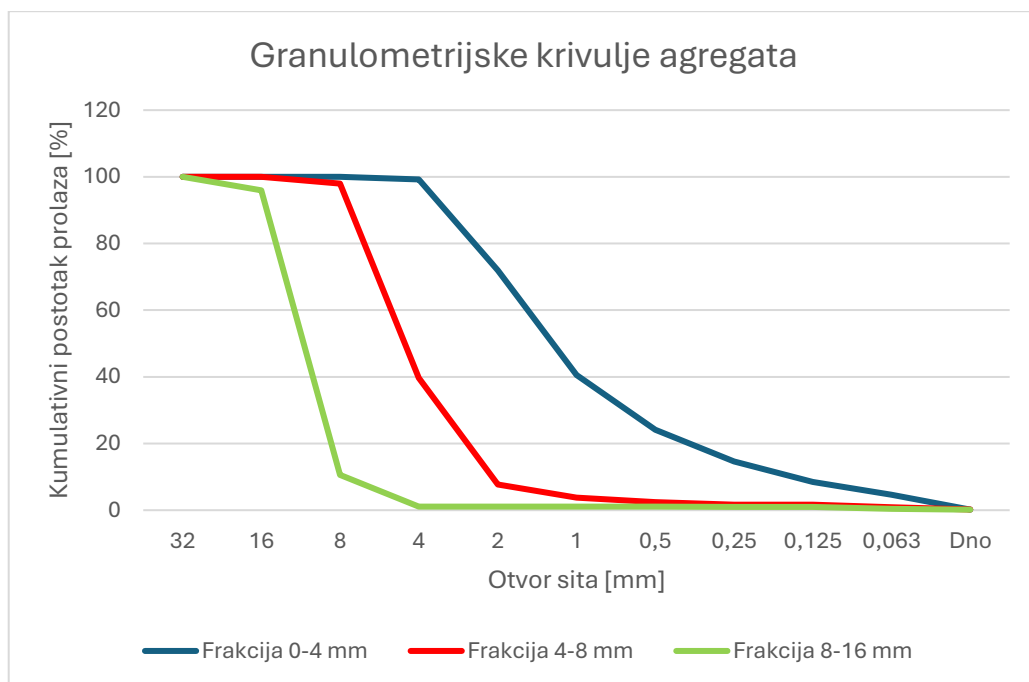
Granulometrijski sastav određivao se za frakcije 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm pomoću metode sijanja prema normi HRN EN 933-1 [21], korištenjem potpuno suhих uzoraka materijala (Slika 10). Veličina otvora sita za sijanje odredila se na način da se uzelo sito većeg otvora od najvećeg zrna frakcije koja se sije kao najgornje sito, a zatim su se sita manjih otvora postavljala redom od većeg prema manjem otvoru prema dnu (Slika 11). Vrijeme sijanja određeno je na način da se broj sita korišten prilikom ispitivanja pomnoži s 2 minute. Minimalna masa ispitnog uzorka ovisi o veličini maksimalnog zrna agregata u mm.



Slika 11. Sijačica za određivanje granulometrijskog sastava (Foto autor)

Nakon prosijavanja, sa svakog se sita određuje masa agregata ostalog na pojedinom situ te se iz tih podataka računa kumulativni postotak prolaza kroz sita. Rezultat prosijavanja prikazuje se zatim grafički u koordinatnom sustavu tako da apscisa predstavlja otvor sita u

mm (u logaritamskom mjerilu), a na ordinati se prikazuje postotak prolaza agregata kroz sita, Slika 12. Za vrijeme ispitivanja frakcija 0-4 mm i 4-8 mm korišteno je 8 sita i dno, dok je za frakciju 8-16mm korišteno 9 sita i dno. Slijedno tome, sijanja su trajala od 16 do 18 minuta po uzorku. Za frakcije 0-4 mm i 8-16 mm provedena po dva ispitivanja, dok se frakcija 4-8 mm ispitivala 3 puta zbog blagog odstupanja rezultata od norme HRN EN 12620 [22]. Prilikom ispitivanja se zaključilo da postoji mogućnost da je prilikom pakiranja agregata u vreće došlo do segregacije uzorkovanog materijala pa se u daljnjem dijelu laboratorijskog rada kao važeći granulometrijski sastav uzimala srednja vrijednost provedenih triju ispitivanja. U nastavku je prikazan primjer tablice s rezultatima ispitivanja, kao i prikaz granulometrijskih krivulja.



Slika 12. Granulometrijske krivulje agregata (Izradio autor)

Tablica 1. Primjer određivanja granulometrijskog sastava frakcije 8 - 16 mm (Izradio autor)

Frakcija: 8-16			
Masa, M1 (g): 2462,7g			
Otvor sita d (mm)	Ostatak na situ (g)	Ostatak na situ (%)	Kumulativni postotak prolaza
32	0	0	100
16	99,5	4,04	95,96
8	2102,8	85,39	10,57
4	232,6	9,44	1,13
2	1	0,04	1,09
1	0,6	0,02	1,07
0,5	0,2	0,01	1,06
0,25	0,7	0,03	1,03
0,125	/	0	/
0,063	14,8	0,6	0,43
Dno	6,9	0,28	0,15
Zbroj	2459,1	99,85	

Volumenska masa krupnog agregata (frakcija 8 – 16 mm) određivala se pomoću uređaja za vaganje pod vodom. Za pravilno ispitivanje agregat je bilo potrebno prethodno držati potopljenog u vodi 24 sata kako bi bio zasićen vodom. Uzorak agregata se zatim ocijedi kroz mrežastu košaru uređaja za vaganje pod vodom i izvaže na zraku (m_{wv}). Nakon toga se obriše kako bi se odstranila površinska vlažnost te se tako zasićen, površinski suh uzorak izvaže na zraku (m_z). Zatim se isti uzorak važe pod vodom (m_{zw}) pazeći pritom da se prije početka vaganja mrežasta košara „nulira“ pod vodom. Za kraj se uzorak izvadi iz vode i suši do stalne mase koja se zabilježi (m_d). Uzorak se smatra potpuno suhim kada se u dva uzastopna vaganja postigne jednaka masa, uz dozvoljena odstupanja od 0,1%. Dobivanje mase suhog uzorka provodilo se sušenjem u posudi na električnoj ploči kako bi se proces sušenja ubrzao (Slika 13).



Slika 13. Sušenje frakcije 8 - 16 mm (Foto autor)

Za frakciju krupnog agregata 4 – 8 mm volumenska se masa određivala drugačijim postupkom, metodom piknometra (Slika 14). Uzorak je ponovno bilo potrebno potopiti u vodi u razdoblju od 24 sata nakon čega se izvadio iz vode i sušio do zasićenog, površinski suhog stanja. Takav se uzorak zatim važe na zraku te se rezultat zabilježi (m_z). Sljedeći je korak u ovom ispitivanju izvagati piknometar ispunjen vodom do označenog nivoa (m_{Bw}). U njega se onda pažljivo ubacuje agregat, obriše se te se odredi masa (piknometar + agregat + voda) (m). Za kraj, uzorak se izvadi iz piknometra te se izvaže vlažan agregat nakon čega se on suši do stalne mase i izvaže masa suhog uzorka (m_d).



Slika 14. Piknometar ispunjen vodom (Foto autor)

Volumenska masa pijeska određuje se istim postupkom, ali se razlikuje dobivanje podatka o masi zasićenog, površinski suhog uzorka. Ona se za ovu frakciju dobila sušenjem uzorka električnim puhalom, na podlozi koja ne apsorbira vodu. Kada se smatra da se postiglo željeno stanje pijeska, on se postavlja u kalup krnjeg stošca postavljenog širom bazom prema dolje. Stožac se puni do vrha i nabija šipkom s 25 udaraca. Ako pijesak ima još površinske vlažnosti, nabijeni uzorak će zadržati oblik stošca, a ako je previše suh, uzorak će se u potpunosti raspasti te je u oba slučaja potrebno ponoviti ispitivanje. Ispitivanje se ponavlja dok se uzorak ne osipa samo djelomično (Slika 15), nakon čega se on važe na zraku i zabilježi masa zasićenog površinski suhog uzorka (m_z).



Slika 15. Pokušaj postizanja zasićenog, površinski suhog stanja (Foto autor)

Nakon prikupljenih svih podataka o masama agregata, volumenska se masa određuje preko izraza (1):

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

gdje je $\rho_{z(ZPS)}$ volumenska masa zasićenog površinski suhog (ZPS) uzorka, $m_{zps,z}$ masa zasićenog, površinski suhog materijala, ρ_w gustoća vode, a m_z i m_{zw} mase uzorka vaganog na zraku i pod vodom. Rezultati provedenog ispitivanja prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2. Mase agregata (Izradio autor)

SVOJSTVO (g)		MATERIJAL		
		Krupni agregat: 8 - 16 mm	Krupni agregat: 4 - 8 mm	Pijesak: 0 - 4 mm
Masa vlažnog materijala	m_{ww}	2295,31	438,36	477,54
Masa materijala zasićenog površinski suhog - vaganog na zraku	m_z	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	1404,60
Volumenska masa [g/cm ³]		2,64	2,70	2,69

Apsorpcija agregata također se odredila iz gore dobivenih vrijednosti masa, prema izrazu (2):

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

gdje je A_w apsorbirana voda, m_z masa zasićenog, površinski suhog materijala i m_d masa suhog materijala. Dobiveni rezultati prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 3. Apsorpcija agregata (Izradio autor)

SVOJSTVO	Pijesak: 0 - 4 mm	Krupni agregat: 4 - 8 mm	Krupni agregat: 8 - 16 mm
Apsorpcija [%m]	1,39%	1,33%	0,81%

Primjećuje se kako se s povećanjem promjera frakcije smanjuje njena apsorpcija.

3.1.2. Cement

Prilikom spravljanja betona korišten je cement Holcim Ekspert cement, CEM II/B-M (S-V) 42,5 N, miješani portlandski cement prema HRN EN 197-1 [23]. Prema tehničkim uputama, ovaj se cement sastoji od 65-79% portlandskog cementnog klinkera, 21-35% miješanog dodatka (granulirana zgura visoke peći (S) i silicijski leteći pepeo (V)), do 5% filtarske prašine dobivene iz procesa proizvodnje portlandskog cementnog klinkera. Kao regulator vezivanja koristi se industrijski gips [24]. Posebno je prilagođen za nosive betonske konstrukcije i betonske radove više završne čvrstoće. Neka od bitnijih svojstava ove vrste cementa su umjeren zahtjev za vodom; mali gubitak optimalne početne konzistencije; optimalno vrijeme vezanje cementa, prilagođeno za mnoge konstrukcije; srednji razvoj čvrstoće; vrlo umjeren razvoj toplote hidratacije; dobra otpornost na umjereno agresivne utjecaje zbog dodatka granulirane zgure i silicijskog letećeg pepela. Preporuke primjene su iznimno opširne. Tipična fizikalna i kemijska svojstva, kao i usporedba s normom HRN EN 197-1 prikazani su u Tablici 4.

Tablica 4. Svojstva cementa [24]

Fizikalna svojstva	JM	Holcim Ekspert® cement CEM II/B-M (S-V) 42,5 N	Uvjet normi
Postojanost volumena (Le Chatelier)	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

Vlastita ispitivanja cementa provedena su samo u vidu određivanja gustoće cementa. Gustoća se određivala pomoću standardne Le Chatelierove tikvice (Slika 16). Tikvica se na početku napunila petrolejom do nivoa između dijelova označenih sa 0 i 1 na dijelu ispod zadebljanja grla tikvice. Nakon toga se u nju ubacilo 65 g cementa pazeći pritom da se materijal ne hvata stijenke tikvice. Za kraj, nakon što se tikvica ostavila da se cement u njoj slegne i izađu mjehurići zraka, očitao se konačan nivo tekućine na gornjem dijelu grla te se zabilježio.



Slika 16. Le Chatelierova tikvica za određivanje gustoće cementa (Foto autor)

Pomoću dobivenih rezultata izračunala se gustoća prema izrazu (3):

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

gdje je ρ_{cem} gustoća cementa [g/cm^3], m_{cem} masa cementa [g] i ΔV promjena volumena nakon dodavanja cementa u tikvicu [cm^3]. Određeno je da gustoća cementa iznosi 2,93 g/cm^3 , što odgovara vrijednosti danoj od proizvođača, a rezultat ispitivanja prikazan je u Tablici 5.

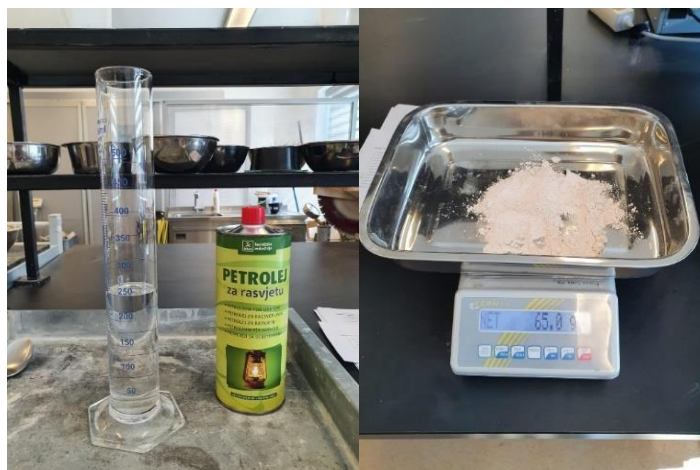
Tablica 5. *Gustoća cementa (Izradio autor)*

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		ρ	g/cm^3	2,93

3.1.3. *Metakaolin*

Za potrebe ovog istraživanja koristio se metakaolin MetaverTM M, proizvođača Newchem. Ova se vrsta metakaolina proizvodi kalcinacijom koncentriranog kaolina i crvenkaste je boje. Korištenjem ovog sastojka ne zahtjeva se veća potreba za vodom, a može pridonijeti čvrstoći i gustoći betona. Preporučena količina doziranja ovog sastojka je zamjena za 5 – 15% potrebne mase cementa [25].

Za upotrebljavani metakaolin se od samostalnih ispitivanja također provodilo samo ispitivanje gustoće. Odredila se na sličan način kao i gustoća cementa, gdje se zbog sitnijih čestica ovog materijala ponovno koristio petrolej, a umjesto Le Chatelierove tikvice se koristila menzura. Menzura se koristila iz razloga što bi se sitan prah metakaolina previše lijepio za stijenke tikvice te se ne bi uspjelo kvalitetno provesti ispitivanje. Osim alata korištenih prilikom ispitivanja, postupak je isti. U menzuru se ulio petrolej do određene razine koja se zabilježila. Potom se ubacilo 65 g metakaolina te se menzura ostavila da sav zrak iz nje izađe i da metakaolin slegne na dno, Slike 17 i 18.



Slika 17. Menzura s petrolejom i metakaolin (Foto autor)

Na posljertku se očitala nova razina petroleja u menzuri te e gustoća odredila prema istom izrazu (3) kao i za cement:

$$\rho_m = \frac{m_m}{\Delta V} \quad (3)$$

gdje je ρ_m gustoća metakaolina [g/cm^3], m_m masa metakaolina [g], a ΔV promjena volumena nakon dodavanja metakaolina u menzuru [cm^3]. Određena gustoća iznosi $2,6 \text{ g}/\text{cm}^3$, što u potpunosti odgovara vrijednosti danoj u tehničkom listu ovog proizvoda. Rezultat ispitivanja prikazan je u Tablici 6.

Tablica 6. *Gustoća metakaolina (Izradio autor)*

Gustoća metakaolina				
Nivo tekućine	Prije dodatka	V1	cm^3	250
	Nakon dodatka	V2	cm^3	275
Metakaolin	Masa	m_c	g	65
	Volumen	ΔV	cm^3	25
Gustoća metakaolina		ρ	g/cm^3	2,6



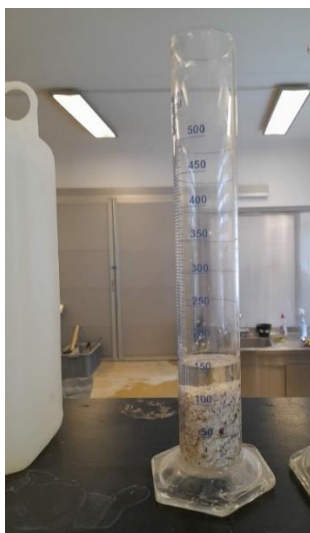
Slika 18. Promjena volumena tekućine (Foto autor)

3.1.4. PVC piljevina

Pošto se dio agregata u betonskim mješavinama zamijenio PVC otpadom, bilo je potrebno ispitati i svojstva PVC piljevine. PVC otpad je naime i dalje relativno neistražen materijal pa je bilo potrebno prilagoditi ispitivanja. Za početak je bilo potrebno odrediti njegovu gustoću koja se ponovno ispitivala na isti način kao i za prethodne materijale (Slika 19). Jedina je razlika u tome što je umjesto 65 g materijala, u ovom pokusu korišteno 10 g materijala zbog njegovog velikog volumena. Određeno je da gustoća iznosi 1g/cm^3 te se upravo iz tog razloga za tekućinu u menzuri koristio petrolej koji ima nižu gustoću kako bi piljevina uspjela potonuti na dno i kako bi se ispitivanje uspješno provelo. Valja dodatno napomenuti da gustoća piljevine može varirati u određenim granicama, a ovisi o uzorku koji se ispituje. Pritom se mogu razlikovati dimenzije, oblici i karakteristike same piljevine. Rezultati dobivene gustoće PVC piljevine korištene u svrhu ovog rada prikazani su u Tablici 7.

Tablica 7. Gustoća PVC piljevine (Izradio autor)

Gustoća PVC-a				
Nivo tekućine	Prije dodatka	V1	cm ³	150
	Nakon dodatka	V2	cm ³	160
PVC	Masa	mc	g	10
	Volumen	ΔV	cm ³	10
Gustoća PVC-a		ρ	g/cm ³	1

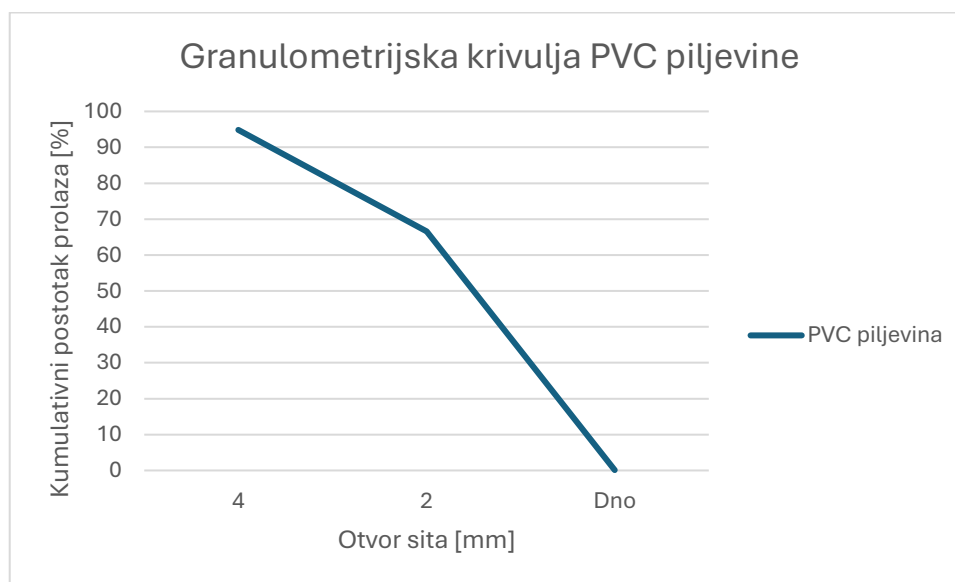


Slika 19. Određivanje volumena PVC-a pomoću menzure (Foto autor)

Granulometrijski se sastav piljevine određivao istim postupkom kao i za agregat, ali je za ovaj materijal korišten manji broj sita. Bez obzira na to, duljina prosijavanja svakog uzorka ipak je trajala duže zbog nepravilnosti segmenata piljevine, kako bi ispitivanje bilo što točnije. Prilikom ispitivanja koristili su se uzorci mase 200 grama i provedena su ukupno 4 prosijavanja. Primjer jednog prosijavanja te granulometrijska krivulja određena srednjim vrijednostima svih prosijavanja prikazani su u nastavku.

Tablica 8. Rezultati drugog prosijavanja PVC piljevine (Izradio autor)

PVC - 2. mjerenje			
Masa, M1 (g): 200,0g			
Otvor sita d (mm)	Ostatak na situ (g)	Ostatak na situ (% ukupne mase)	Kumulativni postotak prolaza (% ukupne mase)
4	30,2	15,1	84,9
2	40	20	64,9
Dno	129,57	64,79	0,11
Zbroj	199,77	99,89	



Slika 20. Granulometrijski sastav PVC piljevine (Izradio autor)

3.1.5. Aditivi

Od aditiva se prilikom izrade mješavina koristio samo superplastifikator. Došlo se do spoznaje da se s povećanjem količine PVC piljevine značajno smanjuje obradivost svježeg betona. Stoga se u svrhu povećanja obradivosti i olakšanja ugrađivanja betonske smjese dodao superplastifikator.

Za izradu mješavina u svrhu ovog rada koristio se superplastifikator Dynamon SF 16S, proizvođača MAPEI. To je tekući aditiv mliječne boje, gustoće $1,06 - 1,10 \text{ g/cm}^3$. Karakterističan je za univerzalnu primjenu, a izrađen je na bazi polikarboksilatnog etera, okarakteriziran dobrim rasprostiranjem i malom ljepljivošću svježeg betona. Ovaj superplastifikator je izrađen u svrhu smanjenja vode, ne mijenjajući pritom obradivost betona. Uz to, može se postići manja propusnost, veća čvrstoća i povećana trajnost očvrslog betona. Preporuča se korištenje ovog dodatka u količinama od 0,2% do 2,0% ukupne mase cementa, dok maksimalna doza iznosi 2,5% [26].

4. IZRADA BETONSKIH MJEŠAVINA I ISPITIVANJE SVJEŽEG BETONA

Za izradu svake pojedine mješavine betona na kojima su se vršila ispitivanja morala se odrediti zasebna receptura na temelju sastava koji je za početak određen za 1m^3 betona. Projektom je zahtjevan razred čvrstoće C30/37, razred izloženosti okolišu XS1 te se nastojalo postići razred konzistencije slijeganjem svježeg betona S3 (100 – 150 mm). Prilikom izrade betona korišten je frakcionirani, trofrakcijski agregat, čiji se kumulativni sastav izračunao prema graničnoj liniji B16. Udio frakcije 0-4 mm iznosio je 54%, 4-8 mm 24% te 8-16 mm 22%. Projektirane su četiri različite mješavine betona u kojima su količina cementa i vode zadržane konstantnima.

Prva betonska mješavina spravljena je sa standardnim sastojcima betona bez dodanog PVC otpada, označena je kao REF te će ona služiti kao referentna mješavina (Tablica 9), odnosno koristit će se za usporedbu rezultata ispitivanja s drugim mješavinama. Druga je mješavina napravljena s dodatkom metakaolina umjesto dijela mase cementa. Sastojci su dakle isti kao u referentnoj mješavini, ali je 10% mase cementa zamijenjeno metakaolinom te je označena kao REF + 10M. Nadalje, jedna je mješavina napravljena s dodatkom PVC piljevine u uložni vlakana na način da su dodana u volumnom udjelu od 1%, dok su ostali sastojci jednaki kao u mješavini REF + 10M. U nastavku teksta ova je mješavina pod oznakom REF + 10M + 1%PVC. Naposljetku, izrađena je još jedna mješavina s dodatkom PVC-a, ali je njime zamijenjeno 15% volumena pijeska, označena REF + 10M + 15%PVC. Valja napomenuti da je u svim mješavinama vodocementni omjer konstantan. Također, u navedene se mješavine dodavao i superplastifikator u različitim udjelima radi osiguravanja obradivosti. U referentnu mješavinu dodalo ga se u udjelu od 0,2%, mješavini REF + 10M dodalo se 0,5% i preostalim mješavinama 0,4% mase cementa (i metakaolina).

Za početak je napravljena referentna mješavina, nakon koje je uslijedila probna mješavina za smjesu s dodatkom metakaolina bez PVC otpada. Nastojalo se postići približno jednake razrede slijeganja kao i kod referentne mješavine. Probna je mješavina služila da se ustanovi kojih sastojaka treba dodati ili smanjiti te na koji način korigirati količinu aditiva. U ovom slučaju samo je bilo potrebno povećati količinu superplastifikatora kako bi se postigla

zadovoljavajuća obradivost. U ostalim dvjema mješavinama tu je količinu pak bilo potrebno malo smanjiti.

Nakon izrađenih optimalnih betonskih mješavina provedena su ispitivanja za određivanje svojstava svježeg betona u skladu s normama za beton. Odmah po završetku miješanja provedena su ispitivanja temperature svježeg betona, gustoće, slijeganja te udio pora u betonu. Za svaku se mješavinu svježi beton ugrađivao u 6 kalupa oblika kocke brida 150 mm, 3 kalupa oblika prizme dimenzija 100 x 100 x 400 mm te također u 3 kalupa oblika kocke brida 71 mm. Ispitivanja na očvrslim uzorcima provodila su se nakon 28 dana njegovanja uzoraka u bazenu s vodom temperature $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Provedena ispitivanja odnose se na određivanje mehaničkih i trajnosnih svojstava betona. Na kockama brida 150 mm ispitana je tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem i vodonepropusnost (VDP), koja je ispitana prodorom vode pod pritiskom, dok su na prizmama provedena ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje uz kontrolu pomaka. Na kockama brida 71 mm provedena su ispitivanja otpornosti betona na habanje.

Tablica 9. Sastojci za 1m^3 betona u referentnoj mješavini (REF) (Izradio autor)

Komponenta	Masa za 1 m^3 [kg]
Cement	410,00
Voda	205
v/c (0,50)	/
Dodatak (0,2%)	0,82
Zrak (2,5%)	/
Agregat	1686,59
UKUPNO	2302,41

Spravljanje svake mješavine započelo se određivanjem vlažnosti korištenog agregata te daljnjim korigiranjem mase sastojaka u odnosu na izmjerenu vlažnost. Potrebni su se sastojci zatim izvagali te se ubacili u miješalicu. Za početak su se ubacile samo suhe komponente betona te se promiješale kako bi se njihova smjesa sjedinila nakon čega se dodala voda u koju je pomiješana potrebna količina superplastifikatora te se nastavilo s miješanjem betona dodatne dvije minute.

4.1. Referentna mješavina

Referentna mješavina izrađena je pomoću tri osnovna, prije navedena sastojka betona uz dodatak superplastifikatora u količini od 0,2% mase cementa (vidjeti Tablicu 10). Ona služi kao osnova s kojom će se uspoređivati svojstva ostalih betonskih mješavina s dodatkom metakaolina i PVC piljevine.

Spravljanje mješavine započeto je određivanjem vlažnosti svake frakcije korištenog agregata te korigiranjem masa sastojaka, Slika 21.



Slika 21. Određivanje vlažnosti agregata u vreći (Foto autor)

Potrebni sastojci za spravljanje 1m^3 kao i potrebnog volumena od 46 dm^3 za ovu mješavinu prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 10. Komponente referentne mješavine REF (Izradio autor)

Komponenta	Masa za 46 dm^3	Masa za 1m^3
	kg	kg
Cement	18,99	410,00
Voda	8,83	205,00
Dodatak	0,04	0,82
Fracija 0-4	43,25	910,76
Fracija 4-8	18,5	404,78
Fracija 8-16	17,04	371,05

Točno izvagane suhe komponente (cement i sve frakcije agregata) ubacile su se u miješalicu kako bi se homogenizirale pa se zatim dodala voda pomiješana sa superplastifikatorom. Nakon dvije minute miješanja smjese odredila se temperatura svježe mješavine i počelo se sa ispitivanjem slijeganja prema normi HRN EN 12350-2 [20]. Metoda ispitivanja slijeganja omogućava određivanje konzistencije i obradivosti betona. Za ovaj test potrebni su metalni konus, šipka za nabijanje, metar i navlažena podloga. Provodi se na način da se svježi beton ugrađuje u metalni konus (Abramsov konus) u 3 razine. Svaki se sloj ubačene smjese nabija s 25 udaraca metalnom šipkom kako bi se popunio sav prostor i istisnuo zrak iz mješavine. Naposljetku se konus pažljivo vertikalno podiže te se izmjeri razlika između visine konusa i slegnutog betona (Slika 22). Očitana vrijednost slijeganja za mješavinu REF iznosi 170 mm, što prema normi pripada razredu S4.



Slika 22. Ispitivanje konzistencije metodom slijeganja (Foto autor)

U međuvremenu je očitana i temperatura svježeg betona koja iznosi 25°C. Nadalje, potrebno je odrediti udio pora u svježem stanju betona prema normi HRN EN 12350-7 [27]. Analiza udjela pora se provodi porometrom, Slika 23.



Slika 23. Porometar (Foto autor)

Porometar funkcionira na način da se napuni svježim betonom do vrha, nakon čega se njegovi rubovi obrišu radi boljeg prianjanja poklopca. Zatim se u njega polagano kroz ventil na poklopcu ubacuje voda i povećava tlak unutar porometra. Nakon povećanja tlaka i naknadnim ispuštanjem zraka, očitava se udio pora u betonu u obliku postotka. Udio pora u

referentnoj mješavini iznosi 4,5%. Po završetku ispitivanja svojstava svježeg betona, on se ugrađivao u kalupe te se njegovao narednih 28 dana kako bi se mogla provesti ispitivanja očvrsllog betona. Također, određena je gustoća svježeg betona prema normi HRN EN 12350-6 [28] pomoću masa i poznatog volumena kalupa u kojeg je ugrađivan. Radi točnijih rezultata, računala se gustoća triju uzoraka, a kao referentna vrijednost koristi se aritmetička sredina svih rezultata. Dobivena gustoća prikazana je u Tablici 11.

Tablica 11. Rezultat ispitivanja gustoće svježeg betona (Izradio autor)

Gustoća betona		
m [kg]	V [dm ³]	ρ [kg/dm ³]
7,889	3,375	2,34
7,77	3,375	2,30
7,83	3,375	2,32
ρ_0		2,32
Standardna devijacija		0,02

4.2. Mješavina s 10% metakaolina

Betonska mješavina kod koje je 10% mase cementa zamijenjeno metakaolinom izrađena je pomoću 17,09 kg cementa, 77,41 kg agregata, 1,9 kg metakaolina i 9,85 kg vode, uz dodatak superplastifikatora u količini 0,5% ukupne mase veziva (cementa i metakaolina). Označena je kao REF + 10M.

Za početak je ponovno bilo potrebno odrediti vlažnost agregata kako bi se mogle odrediti mase svih potrebnih sastojaka. Točniji prikaz sastojaka i raspodjele masa među pojedinim frakcijama agregata prikazan je u Tablici 12.

Tablica 12. Sastojci mješavine REF + 10M (Izradio autor)

Komponenta	Masa za 46 dm ³	Masa za 1m ³
	kg	kg
Cement	17,09	369,00
Metakaolin	1,90	41,00
Voda	9,85	205,00
Dodatak	0,09	2,05
Frakcija 0-4	42,0	906,57
Frakcija 4-8	18,45	402,92
Frakcija 8-16	16,96	369,34

Nadalje, sam postupak spravljanja betona nije se razlikovao od spravljanja referentne mješavine. Nakon početnog vaganja svih sastojaka i miješanja suhih komponenti, dodala se voda pa se započelo s ispitivanjem svježe smjese. Već se prilikom miješanja moglo primijetiti da je smjesa nešto manje obradivosti od prethodne, što se i dokazalo ispitivanjem konzistencije slijeganjem. Slump testom je određeno slijeganje od 150 mm, što prema normi spada u razred slijeganja S3, koji se i nastojao postići (Slika 24).



Slika 24. Rezultat slump testa (Foto autor)

Izmjerena temperatura svježe smjese iznosi 25°C. Udio pora ponovno se određivao istim postupkom. Primijećen je značajan pad u udjelu pora u odnosu na referentnu mješavinu, a iznosi 1,2%. Srednja vrijednost gustoće za mješavinu REF + 10M iznosi 2,30 kg/dm³, a vrijednosti dobivene ispitivanjem gustoće prikazani su u Tablici 13.

Tablica 13. Gustoća REF + 10M (Izradio autor)

Gustoća betona		
m [kg]	V [dm ³]	ρ [kg/dm ³]
7,74	3,375	2,29
7,87	3,375	2,33
7,71	3,375	2,28
ρ ₀		2,30
Standardna devijacija		0,03

4.3. Mješavina s dodatkom metkaolina i 1% PVC-a

U sljedećoj se betonskoj mješavini dodala PVC piljevina. Cilj ovog rada je istražiti kako PVC piljevina kao sastojak betona utječe na njegova svojstva. Stoga se za početak izradila mješavina sa samo 1% PVC-a kao ojačanja u obliku vlakana, označena je kao REF + 10M + 1%PVC. Količina sastojaka prikazana je u Tablici 14.

Tablica 14. Komponente mješavine REF + 10M + 1%PVC (Izradio autor)

Komponenta	Masa za 46 dm ³	Masa za 1m ³
	kg	kg
Cement	17,09	369,00
Metakaolin	1,90	41,00
Voda	10,01	205,00
Dodatak	0,08	1,64
PVC	0,46	10,00
Frakcija 0-4	41,19	892,64
Frakcija 4-8	18,17	396,73
Frakcija 8-16	16,7	363,67

Pripremanje mješavine ponovno je započeto određivanjem vlažnosti agregata i korigiranjem masa. Prilikom miješanja suhih komponenti, u miješalicu se radi homogeniziranja ubacila i potrebna količina PVC piljevine, nakon čega su dodani voda i superplastifikator. Odmah po završetku miješanja bilo je primjetno da već mali udio PVC-a utječe na smanjenje konzistencije i da će biti smanjena obradivost, što će se ponovno ispitati slump testom, Abramsovim konusom. Mjerenjem temperature ponovno je utvrđeno da ona iznosi 25°C. Ispitivanjem konzistencije slijeganjem izmjerila se razina slijeganja od 70 mm, što pripada razredu slijeganja S2 (Slika 25). Iako to ne pripada željenom razredu slijeganja te bi za

njegovo postizanje bilo potrebno povećati količinu superplastifikatora, mješavina svježeg betona ugrađena je u odgovarajuće kalupe uz nešto slabiju obradivost.



Slika 25. Slijeganje mješavine REF + 10M + 1%PVC (Foto autor)

Postupkom određivanja pora u betonu primijećeno je da se s dodatkom PVC-a povećava njihov udio. Izmjereno je da ovaj beton sadrži 4,8% pora. Kao krajnje ispitivanje, ponovno je određena gustoća svježeg betona prilikom njegovog ulijevanja u kalupe i pripreme za dalja ispitivanja. Srednja vrijednost gustoće REF + 10M + 1%PVC iznosi $2,29 \text{ kg/dm}^3$, a rezultati ispitivanja su prikazani u Tablici 15.

Tablica 15. Gustoća mješavine REF + 10M + 1%PVC (Izradio autor)

Gustoća betona		
m [kg]	V [dm ³]	ρ [kg/dm ³]
7,7	3,375	2,28
7,83	3,375	2,32
7,69	3,375	2,28
ρ_0		2,29
Standardna devijacija		0,02

4.4. Mješavina s dodatkom metakaolina i 15% PVC-a

Posljednja se mješavina napravila istim postupkom i istim materijalima kao i prethodna, jedina je razlika u tome što je 15% volumena pijeska zamijenjeno PVC piljevinom pa je slijedno tome ona imenovana kao REF + 10M + 15%PVC. Količine sastojaka prikazane su u Tablici 16.

Tablica 16. Sastojci mješavine REF + 10M + 15%PVC (Izradio autor)

Komponenta	Masa za 46 dm ³	Masa za 1m ³
	kg	kg
Cement	17,09	369,00
Metakaolin	1,90	41,00
Voda	9,48	205,00
Dodatak (0,4 m _v)	0,08	1,64
PVC	2,35	50,77
Frakcija 0-4	38,99	833,63
Frakcija 4-8	16,95	370,50
Frakcija 8-16	15,59	339,63

Po završetku miješanja odmah se primijetio problem još manje obradivosti. Temperatura ove mješavine iznosi 24°C. Slump testom se pokazalo da slijeganja gotovo niti nema te je zbog svoje neznatne vrijednosti ono zabilježeno sa 0 mm, što se prema normi klasificira u razred S1 (Slika 26).



Slika 26. Slijeganje mješavine REF + 10M + 15%PVC (Foto autor)

Porometrom je određeno da udio pore iznosi 6,8%, što nas dovodi do zaključka da se s povećanjem udjela PVC piljevina povećava i udio pora u betonu (Slika 27).



Slika 27. Udio pora u betonu REF + 10M + 15%PVC (Foto autor)

Gustoća se kod ove smjese radi točnosti i zbog otežane ugradnje betona u kalupe računala za četiri uzorka. Referentna vrijednost gustoće iznosi $2,15 \text{ kg/dm}^3$. Rezultati su prikazani u Tablici 17.

Tablica 17. Gustoća REF + 10M + 15%PVC (Izradio autor)

Gustoća betona		
m [kg]	V [dm ³]	ρ [kg/dm ³]
7,13	3,375	2,11
7,36	3,375	2,18
7,34	3,375	2,17
7,2	3,375	2,13
ρ_0		2,15
Standardna devijacija		0,03

4.5. Usporedba rezultata ispitanih mješavina

Analizom svih dobivenih rezultata ispitivanja betona u svježem stanju uočavaju se promjene u njegovim svojstvima. Tako se naime konzistencija značajno smanjuje s povećanjem zamjenskih materijala koji su se koristili umjesto cementa i agregata, a posebno se ističe dodavanje PVC otpada. Jasno je vidljivo kako se s povećanjem udjela PVC piljevine znatno smanjuje konzistencija i obradivost mješavine. Slijeganje referentne mješavine iznosi 170 mm, što prema normi spada pod razred S4, a već pri dodavanju male količine PVC-a, tek s volumnim udjelom od 1%, slijeganje se smanjilo za 100 mm u odnosu na referentnu mješavinu (razred slijeganja S2). S dodatkom od 15% volumnog udjela pijeska, gotovo da i nije bilo primijećeno slijeganje, što bi pripadalo razredu slijeganja S1. Za mješavinu bez PVC otpada, u kojoj je samo dio cementa zamijenjen metakaolinom, zabilježeno je slijeganje od 150mm (razred S3). Nadalje, s dodavanjem plastičnog otpada betonskim mješavinama može se primijetiti blago opadanje njihove gustoće. Kada je riječ o udjelu pora u betonu, lako se da zaključiti kako se zamjenom dijela cementa metakalinom njihova količina znatno smanjuje. Suprotno tomu, povećanjem se udjela PVC-a količina pora izrazito povećava. Radi lakše usporedbe i analize, konačni su rezultati ispitivanja prikazani u Tablici 18.

Tablica 18. Usporedba rezultata ispitivanja svježeg betona (Izradio autor)

Mješavina	Temperatura, t	Slijeganje, S	Gustoća, ρ	Udio pora
	°C	mm	kg/dm ³	%
REF	25	170	2,32	4,5
REF + 10M	25	150	2,30	1,2
REF + 10M + 1%PVC	25	70	2,29	4,8
REF + 10M + 15%PVC	24	0	2,15	6,8

5. ISPITIVANJE OČVRSLOG BETONA

Ispitivanja na očvrslim uzorcima betona započeta su nakon 28 dana njegovanja uzoraka u bazenu s vodom, a provedena su u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. Mehanička svojstva (tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća savijanjem) ispitala su se točno 28 dana nakon spravljanja mješavina. Ispitivanja su provedena prema normama HRN EN 12390-3 [29] i HRN EN 12390-5 [30] na hidrauličkim prešama proizvođača Controls. Od trajnosnih svojstava ispitano je prodiranje vode u beton pod pritiskom prema normi HRN EN 12390-8 [31]. Prodiranje vode ispitano je nakon dodatnih 72 sata, za vrijeme kojih su uzorci bili izloženi prodoru vode na uređaju.

5.1. Gustoća uzoraka očvrslog betona

Za početak ispitivanja uzorci su izvađeni iz bazena s vodom u kojem su bili njegovani, nakon čega im je uklonjena površinska voda. Nadalje, za određivanje gustoće, svaki je od uzoraka izvagan te su im izmjerene dimenzije. Iz dobivenih rezultata gustoća se ponovno odredila prema izrazu (3):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

gdje je m masa uzorka [g], V je volumen uzorka [cm^3] i ρ je gustoća uzorka [g/cm^3]. Za svaku se mješavinu gustoća određivala na tri uzorka oblika kocke, duljine brida 150 mm, a rezultati ispitivanja prikazani su u Tablicama 19. i 20.

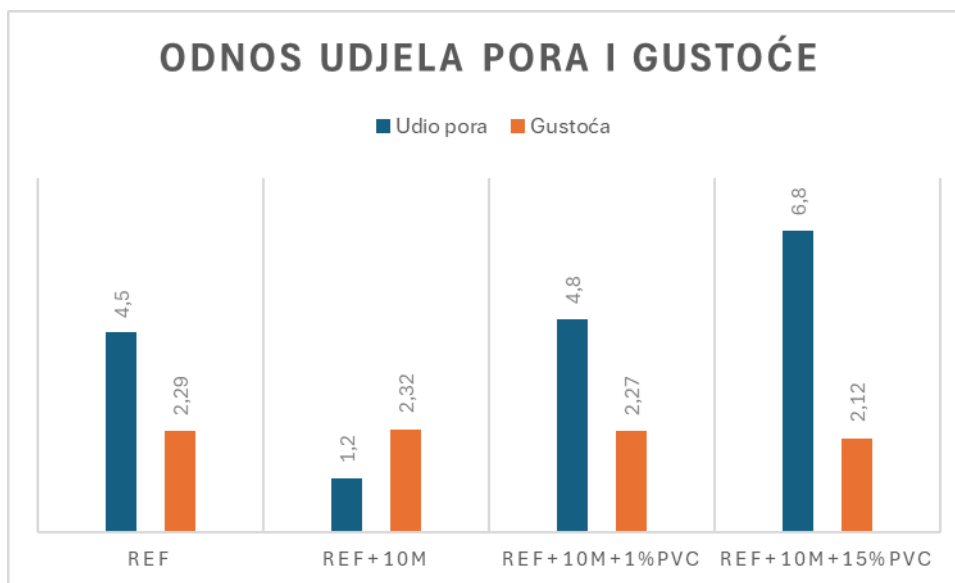
Tablica 19. Dimenzije i mase uzoraka očvrsllog betona (Izradio autor)

Uzorak	a [mm]	b [mm]	c [mm]	masa [g]	Volumen [cm ³]
1. REF	150,20	152,00	150,20	7851,60	3429,13
2. REF	150,10	151,00	150,10	7820,30	3402,03
3. REF	150,20	150,70	150,20	7797,20	3399,80
1. REF+10M	150,10	147,10	150,10	7788,29	3314,16
2. REF+10M	150,10	150,30	150,10	7788,40	3386,26
3. REF+10M	150,10	150,50	150,00	7793,57	3388,51
1. REF+10M+1%PVC	149,90	152,80	150,00	7753,30	3435,71
2. REF+10M+1%PVC	149,95	151,15	150,15	7768,00	3403,14
3. REF+10M+1%PVC	150,20	152,00	150,10	7770,40	3426,84
1. REF+10M+15%PVC	150,00	152,10	149,80	7285,80	3417,69
2. REF+10M+15%PVC	150,20	151,55	150,10	7194,10	3416,70
3. REF+10M+15%PVC	150,00	151,85	150,15	7251,20	3420,04

Tablica 20. Gustoće očvrsllog betona (Izradio autor)

Uzorak	Gustoća [g/cm ³]	Srednja gustoća [g/cm ³]	Standardna devijacija
1. REF	2,29	2,29	0,005
2. REF	2,30		
3. REF	2,29		
1. REF+10M	2,35	2,32	0,02
2. REF+10M	2,30		
3. REF+10M	2,30		
1. REF+10M+1%PVC	2,26	2,27	0,01
2. REF+10M+1%PVC	2,28		
3. REF+10M+1%PVC	2,27		
1. REF+10M+15%PVC	2,13	2,12	0,01
2. REF+10M+15%PVC	2,11		
3. REF+10M+15%PVC	2,12		

Dobiveni su rezultati u skladu s očekivanima. Primjećujemo kako se povećanjem udjela PVC piljevine u betonu smanjuje njegova gustoća pa je tako mješavina sa dodanih 15% PVC-a upravo ona s najmanjom gustoćom. S druge strane, mješavina u kojoj se dodao samo metakaolin ima najveću gustoću. To se može povezati i s udjelom pora u betonu koji se određivao za svježje betonske mješavine. Prilikom određivanja pora, najmanji udio sadržavala je smjesa REF + 10M, dok je najveći postotak pora sadržavala upravo mješavina REF + 10M + 15%PVC. Iz Slike 28 vidljivo je da se, što je veći udio pora, gustoća betona smanjuje.



Slika 28. Odnos pora i gustoće (Izradio autor)

5.2. Određivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća betona ispitivala se na istim uzorcima starosti 28 dana pomoću kojih se odredila i gustoća svake mješavine, korištenjem preše proizvođača Controls (Slika 29). Za svaku su mješavinu dakle provedena po 3 ispitivanja na temelju kojih se odredio prosjek rezultata te je tako dobivena srednja vrijednost tlačne čvrstoće po mješavini. Prilikom ispitivanja, potrebno je obratiti pozornost na to da se uzorak opterećuje na tlak u smjeru okomitom na smjer lijevanja betona u kalup. Za svaki uzorak brzina nanošenja opterećenja iznosila je 0,60 MPa/s. Na Slici 30 prikazan je tipični oblik sloma za referentnu mješavinu.



Slika 29. Uzorak za vrijeme ispitivanja na tlak
(Foto autor)



Slika 30. Uzorak nakon tlačnog ispitivanja
(Foto autor)

Konačni rezultati svih ispitanih uzoraka, kao i njihova srednja vrijednost, prikazani su u Tablici 21.

Tablica 21. Tlačna čvrstoća uzoraka (Izradio autor)

Tlačna čvrstoća				
Uzorak	Sila sloma	Rezultat ispitnog uzorka	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
	[kN]	[Mpa]	[Mpa]	
1. REF	855,70	37,48	37,71	0,85
2. REF	880,20	38,85		
3. REF	832,90	36,80		
1. REF + 10M	831,80	37,69	38,26	0,47
2. REF + 10M	862,80	38,26		
3. REF + 10M	876,90	38,83		
1. REF + 10M + 1%PVC	952,40	41,61	39,91	1,92
2. REF + 10M + 1%PVC	843,70	37,23		
3. REF + 10M + 1%PVC	933,60	40,89		
1. REF + 10M + 15%PVC	696,20	30,51	31,87	0,97
2. REF + 10M + 15%PVC	737,70	32,41		
3. REF + 10M + 15%PVC	744,90	32,70		

Usporedbom rezultata srednjih vrijednosti tlačne čvrstoće vidljivo je kako se ona povećava dodatkom metakaolina, a još se dodatno povećava daljnjim dodavanjem manje količine PVC piljevine. Već kod mješavine s većim udjelom PVC-a vidi se značajniji pad u tlačnoj čvrstoći.

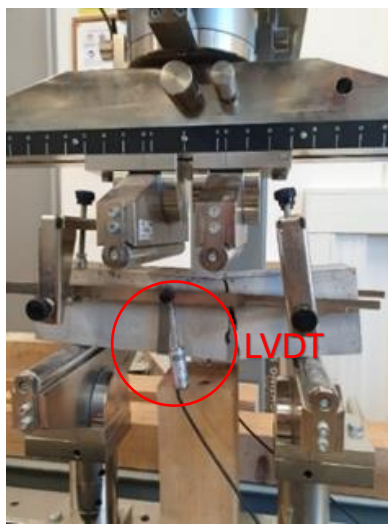
5.3. Vlačna čvrstoća na savijanje

Vlačna čvrstoća ispitana je savijanjem na uzorcima oblika prizme dimenzija $100 \times 100 \times 400$ mm. Za svaku su mješavinu ponovno provedena po tri ispitivanja. Ispitivanje se provodilo opterećenjem dvjema koncentriranim silama preko valjaka do sloma uzorka. Uzorak se postavlja u uređaj tako da se gornje koncentrirane sile nalaze na trećinama raspona, odnosno svaki za 10 cm od krajnjih oslonaca i na međusobnoj udaljenosti od također 10 cm. Donja se dva valjka nalaze na udaljenosti od 5 cm od ruba prizme (Slika 31). Opterećenje se ne smije nanositi na stranu prizme koja je bila strana lijevanja mješavine u kalup. Od oslonaca i valjaka preko kojih se nanose sile, 2 moraju biti nepomična, dok ostala dva moraju omogućavati blage pomake kako bi se osigurala pravilna raspodjela opterećenja po uzorcima. Prilikom određivanja vlačne čvrstoće također su se promatrali i pomaci na uzorcima uslijed pojave sloma kako bi se mogla pratiti duktilnost svake od analiziranih prizmi. Pomak je mjereno pomoću dva LVDT uređaja marke Controls, model 82-P0311/CC, koji su postavljeni s prednje i stražnje strane uzorka (Slika 32).



Slika 31. Pripremljen uzorak u uređaju za ispitivanje (Foto autor)

Za početak ispitivanja i njegovo pravilno odvijanje najprije su se odstranile nepravilnosti na rubovima uzorka kako se ispitivanje ne bi prisilno zaustavilo. Uređaj pomoću kojeg se vršilo ispitivanje prepoznao bi u suprotnom pucanje tih nepravilnosti te bi se ispitivanje zaustavilo pošto bi podatak bio prepoznat kao da je došlo do sloma. Nadalje, određena je sredina uzorka od koje se sa svake strane na udaljenosti od 2 cm postavio metalni L profil na kojeg su se kasnije postavili senzori za praćenje pomaka (LVDT). Za kraj su određena mjesta, odmaknuta 5 cm od svakog kraja uzorka na koje se uzorak prilikom ispitivanja oslanjao.



Slika 32. Uzorak s postavljenim senzorima pomaka nakon sloma (lijevo) i uzorak nakon provedenog ispitivanja (desno) (Foto autor)

Vlačna se čvrstoća odredila pomoću izraza:

$$\sigma_f = \frac{F_f * l}{b * h^2} \quad (4)$$

gdje je σ_f čvrstoća na savijanje (N/mm^2), F_f sila sloma (N), l udaljenost između oslonaca (mm), b širina poprečnog presjeka (mm) te h visina poprečnog presjeka (mm).

U Tablicama 22 i 23 prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje za svaki uzorak kao i pomaci zabilježeni prilikom postizanja maksimalne sile.

Tablica 22. Rezultati ispitivanja na savijanje (Izradio autor)

Vlačna čvrstoća				
Uzorak	Sila sloma	Vlačna čvrstoća	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
	[N]	[MPa]	[MPa]	
1. REF	17800,00	5,34	4,99	0,30
2. REF	15350,00	4,61		
3. REF	16790,00	5,04		
1. REF + 10M	12840,00	3,85	4,22	0,34
2. REF + 10M	13770,00	4,13		
3. REF + 10M	15590,00	4,68		
1. REF + 10M + 1%PVC	14620,00	4,39	4,59	0,28
2. REF + 10M + 1%PVC	14660,00	4,40		
3. REF + 10M + 1%PVC	16610,00	4,98		
1. REF + 10M + 15%PVC	13230,00	3,97	4,04	0,23
2. REF + 10M + 15%PVC	14510,00	4,35		
3. REF + 10M + 15%PVC	12640,00	3,79		

Tablica 23. Pomaci dobiveni ispitivanjem na savijanje (Izradio autor)

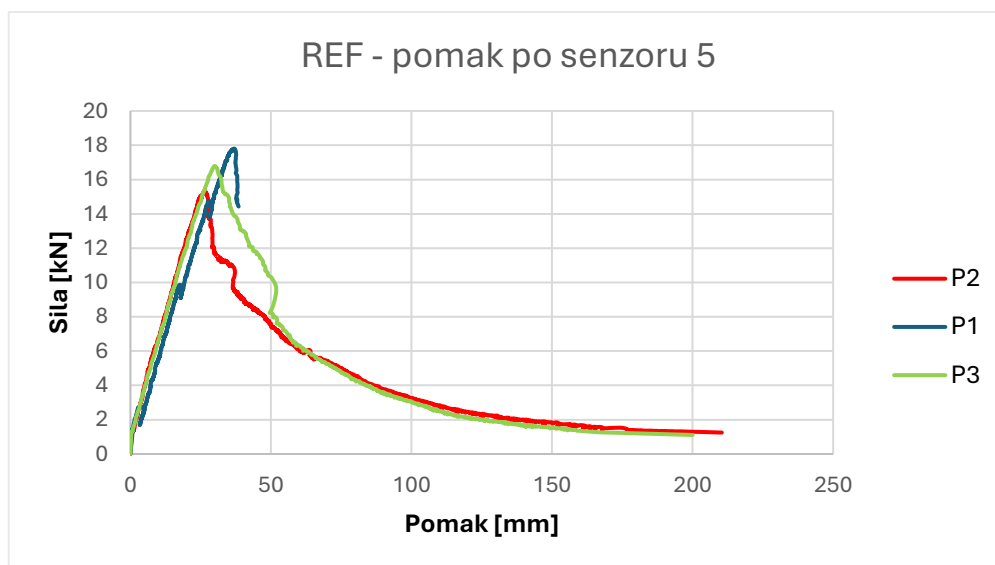
Uzorak	Pomak po senzoru 5	Srednja vrijednost pomaka	Pomak po senzoru 6	Srednja vrijednost pomaka
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1. REF	37,10	31,20	31,80	28,43
2. REF	26,50		24,60	
3. REF	30,00		28,90	
1. REF + 10M	19,4	22,03	18,8	23,90
2. REF + 10M	21,5		26,2	
3. REF + 10M	25,2		26,7	
1. REF + 10M + 1%PVC	24,8	29,23	17,5	25,83
2. REF + 10M + 1%PVC	29		32,2	
3. REF + 10M + 1%PVC	33,9		27,8	
1. REF + 10M + 15%PVC	33,40	34,07	37,3	39,50
2. REF + 10M + 15%PVC	33,40		46,2	
3. REF + 10M + 15%PVC	35,40		35	

Iz dobivenih se rezultata može zaključiti da najveću vlačnu čvrstoću ima referentna mješavina, dok je mješavina s dodatkom od 15% PVC piljevine ona s najmanjom čvrstoćom. Kada je riječ o pomacima zaključuje se da je najkrtija mješavina ona u kojoj se samo udio cementa zamijenio metakaolinom. Najveći se pomaci naprotiv primjećuju kod mješavine koja ima najmanju čvrstoću što dovodi do zaključka kako se povećanjem udjela PVC-a u

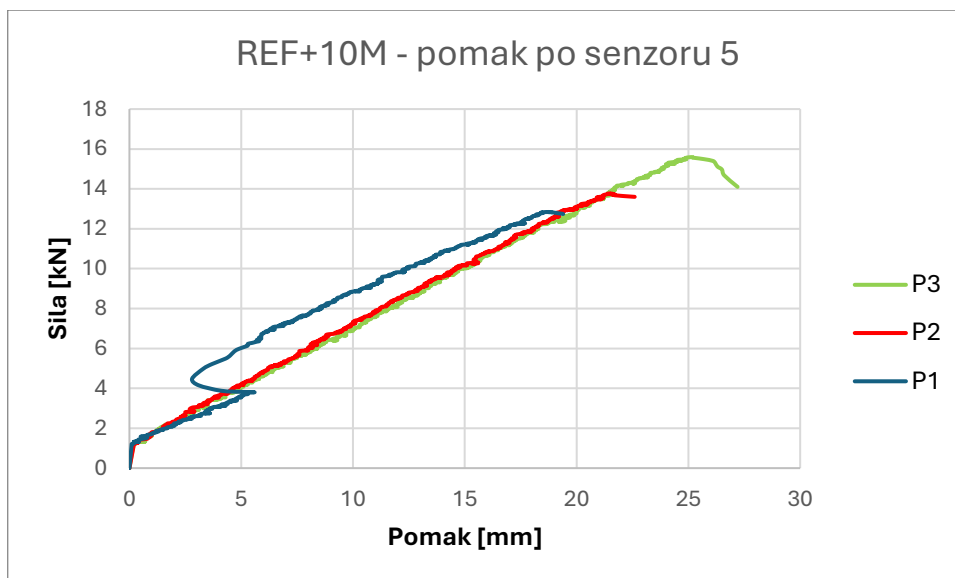
betonu, povećava i njegova duktilnost. Prilikom promatranja uzoraka za vrijeme ispitivanja, također se lako primijetilo znatno povećanje nastale pukotine prije pojave konačnog sloma. Slika 33 prikazuje slomljeni uzorak mješavine s 15% PVC-a u kojem se može vidjeti raspored dodane piljevine. Na Slikama 34 – 37 prikazani su grafički prikazi pomaka zabilježenih na senzoru 5 na svim ispitanim uzorcima.



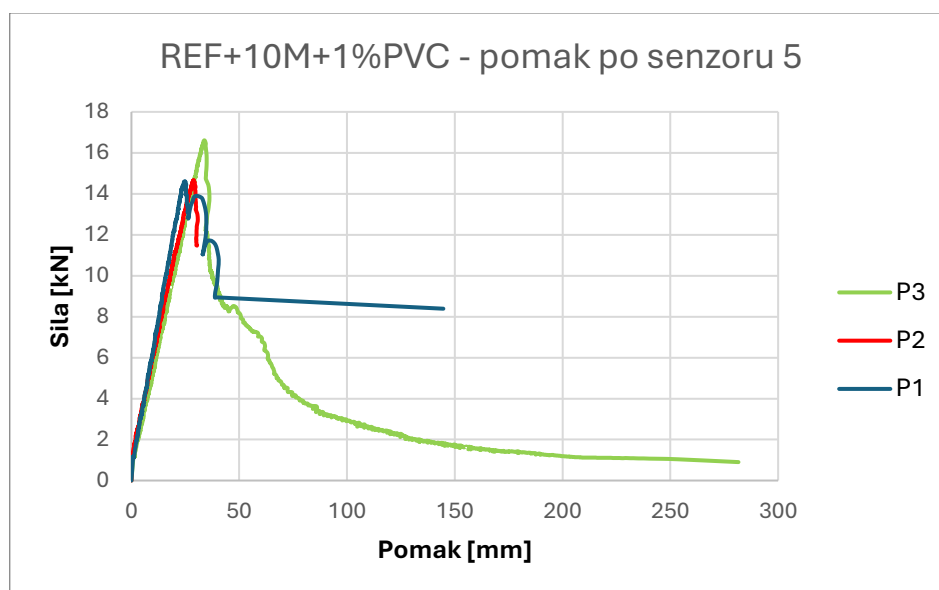
Slika 33. Slomljeni uzorak s 15% PVC-a s označenom PVC piljevinom (Foto autor)



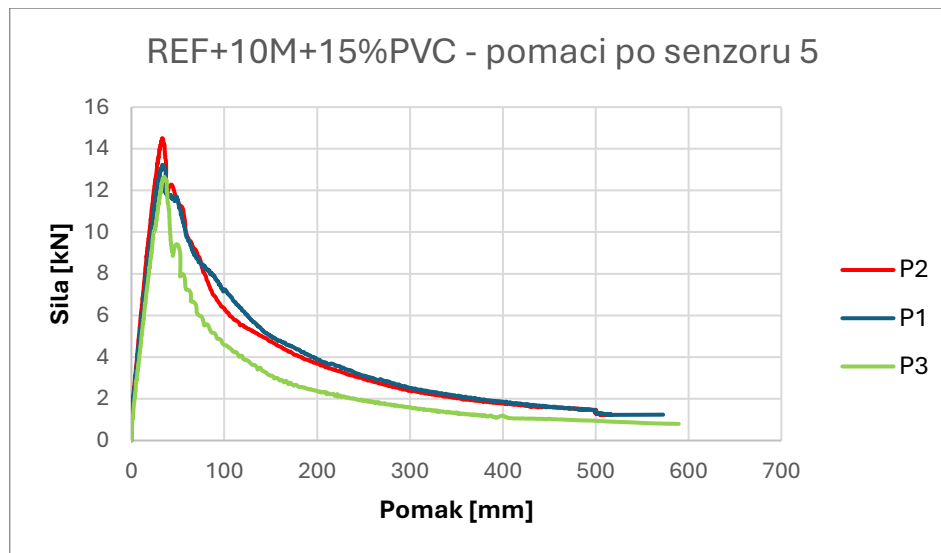
Slika 34. Grafički prikaz pomaka za mješavinu REF (Izradio autor)



Slika 35. Grafički prikaz pomaka za mješavinu REF+10M (Izradio autor)



Slika 36. Grafički prikaz pomaka za mješavinu REF+10M+1%PVC (Izradio autor)



Slika 37. Grafički prikaz pomaka za mješavinu REF+10M+15%PVC (Izradio autor)

Među rezultatima se također vide anomalije u pojedinim podacima kao i nejednolikost pomaka na sensorima. Razlog tomu može se smatrati neravnomjeren slom uzorka pa se tako obje polovice uzorka ne nastavljaju slamati jednakim intenzitetom.

5.4. Prodiranje vode pod pritiskom

Ispitivanje prodiranja vode pod pritiskom započelo je pripremom uzoraka za postavljanje u uređaj. Suhi uzorci starosti betona od 28 dana postavili su se u uređaj pomoću kojeg voda pod pritiskom djeluje na ispitne uzorke (Slika 38). Taj je dio ispitivanja trajao 72 sata, nakon kojih su se uzorci stavljali u prešu kako bi se cijepanjem odredila visina prodiranja vode u svaki pojedini uzorak, kao i čvrstoća uzoraka na cijepanje.



Slika 38. Uzorci pripremljeni za ispitivanje prodora vode (Foto autor)

Ispitivanje cijepanjem provodilo se sukladno normi HRN EN 12390-8 [31], na način da se uzorak postavi na ravnu podlogu, a opterećenje se nanosi na uzorak preko valjka, po sredini uzorka, na stranu paralelnu sa smjerom prodora vode. Nakon sloma uzorka izmjerene su visine prodora vode, Slika 39.



Slika 39. Označena visina prodora vode i njeno mjerenje (Foto autor)

Brzina nanošenja opterećenja iznosi 0,060 MPa/s. Rezultati ispitivanja dani su u Tablicama 24 i 25.

Tablica 24. Rezultati prodora vode (Izradio autor)

Prodor vode			
Uzorak	Visina prodora vode	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
	[mm]	[mm]	
1. REF	33,00	28,67	3,09
2. REF	27,00		
3. REF	26,00		
1. REF + 10M	31,00	33,00	5,89
2. REF + 10M	41,00		
3. REF + 10M	27,00		
1. REF + 10M + 1%PVC	20,00	17,67	2,05
2. REF + 10M + 1%PVC	18,00		
3. REF + 10M + 1%PVC	15,00		
1. REF + 10M + 15%PVC	27,00	23,00	2,94
2. REF + 10M + 15%PVC	20,00		
3. REF + 10M + 15%PVC	22,00		

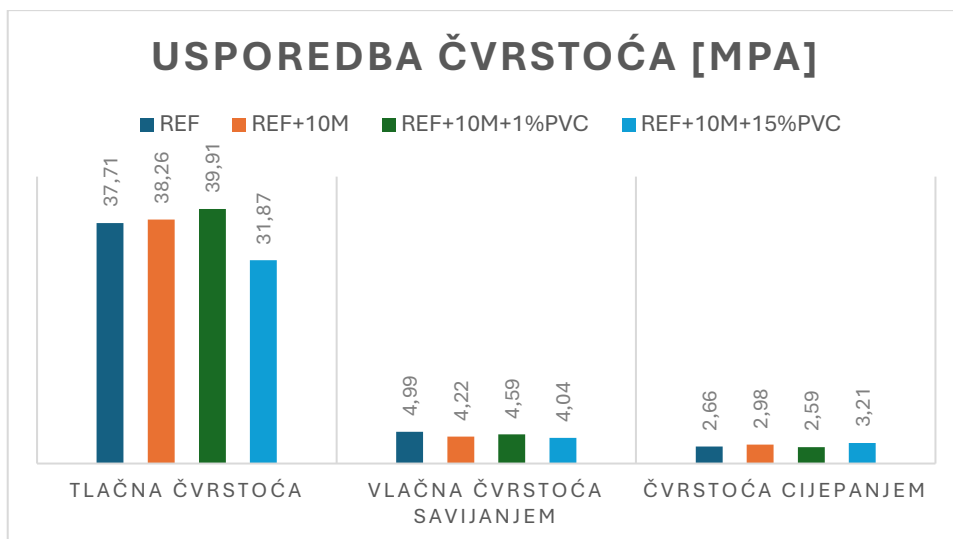
Tablica 25. Čvrstoća određena cijepanjem (Izradio autor)

Čvrstoća cijepanjem			
Uzorak	Čvrstoća	Srednja vrijednost čvrstoće	Standardna devijacija
	[MPa]	[MPa]	
1. REF	2,69	2,66	0,06
2. REF	2,72		
3. REF	2,57		
1. REF + 10M	3,26	2,98	0,21
2. REF + 10M	2,78		
3. REF + 10M	2,89		
1. REF + 10M + 1%PVC	3,38	2,59	0,57
2. REF + 10M + 1%PVC	2,03		
3. REF + 10M + 1%PVC	2,36		
1. REF + 10M + 15%PVC	3,05	3,21	0,13
2. REF + 10M + 15%PVC	3,22		
3. REF + 10M + 15%PVC	3,36		

Iz dobivenih se rezultata primjećuje kako se u betonu sa dodatkom metakaolina bez PVC piljevine voda podiže do najviše razine, dok je najmanji prodor vode primijećen kod betona s dodanih još 1% PVC-a. Kao mješavina s najvećom čvrstoćom ovim se ispitivanjem pokazala REF + 10M + 15%PVC. Najmanju čvrstoću ima beton s dodatkom 1% PVC-a.

5.5. Usporedba rezultata čvrstoće ispitanih uzoraka

Analizom dobivenih rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće te vlačne čvrstoće savijanjem i cijepanjem primjećuju se neznatne, ali postojeće razlike. Najveću tlačnu čvrstoću, za 5,83% veću od tlačne čvrstoće referentne mješavine, posjeduje mješavina s 1% PVC piljevine. Mješavina bez dodanog PVC-a, samo s dodatkom metakaolina ima tlačnu čvrstoću za 1,46% veću od referentne. Mješavina s 15% volumena pijeska zamijenjenog PVC piljevinom pokazala se ovim ispitivanjem najlošija te njegova tlačna čvrstoća iznosi 31,87 MPa, odnosno 15,49% je manja od čvrstoće referentne mješavine. Vlačna čvrstoća savijanjem gotovo je jednaka za sve ispitane mješavine. Pritom se najboljom pokazala referentna mješavina, a za njom slijede mješavina s 1% PVC-a čija je čvrstoća 8,02% manja od vlačne čvrstoće referentne mješavine. Mješavina REF + 10M ima vlačnu čvrstoću 15,43% manju od referentne. Najlošijom se ponovno pokazala mješavina s 15% PVC piljevine. Pritom valja napomenuti kako se, iako ima najmanju čvrstoću, pokazala najduktilnijom mješavinom te su upravo kod ove mješavine zabilježeni najveći pomaci. Ispitivanjem čvrstoće cijepanjem rezultati su nešto drugačiji. Ovim se ispitivanjem mješavina s 15% PVC piljevine pokazala najčvršćom, dok najmanju čvrstoću posjeduje referentna mješavina. Na Slici 40 prikazan je grafički prikaz srednjih čvrstoća svih ispitanih mješavina radi lakšeg uvida u rezultate i mogućnosti njihove usporedbe.



Slika 40. Grafički prikaz srednjih čvrstoća uzoraka (Izradio autor)

6. ZAKLJUČAK

Tema ovog završnog rada bila je istražiti utjecaj dodavanja PVC piljevine, kao moguću alternativu za određeni udio pijeska te u kao ojačanja u obliku vlakana, na mehanička i trajnosna svojstva betona. Glavni cilj istraživanja bio je odrediti svojstva betona za mješavine s različitim udjelima zamjenskih materijala te po potrebi korigirati sastojke kako bi se odredila optimalna betonska mješavina s dodatkom PVC piljevine. Dodatkom PVC piljevine betonskim mješavinama pridonosi se smanjenju potrošnje prirodnih resursa, odnosno potrebnog agregata te namjenskoj proizvodnji vlakana. Uz to, spomenutim dodavanjem pomaže se i u rješavanju globalnog problema nagomilavanja plastičnog otpada, u ovom slučaju PVC otpada, koji se smatra jednim od najtoksičnijih otpada i čije zbrinjavanje još uvijek nije u potpunosti definirano.

Analizom rezultata ispitivanja betona s dodatkom plastičnog otpada dolazi se do spoznaje da je potrebno poboljšati svojstva svježeg betona. Konkretnije, potrebno je poboljšati konzistenciju i obradivost dodavanjem aditiva (superplastifikatora), a samim time i ugradnju betona.

Laboratorijska su ispitivanja betona u svježem i očvrslom stanju provedena na ukupno četiri spravljene mješavine. Jedna je od tih mješavina napravljena kao referentna i sadrži samo osnovne sastojke. U ostale se tri mješavine 10% mase cementa zamijenilo metakaolinom i u dvije se mješavine dodatno dodala PVC piljevina u volumnom udjelu od 1% kao ojačanje u obliku vlakana te u količini od 15% volumena pijeska gdje služi kao zamjena dijela agregata. Rezultati ispitivanja uspoređeni su s rezultatima dobivenim za referentnu mješavinu.

Ispitivanjem konzistencije slijeganjem, kod mješavine sa zamjenom 10% mase cementa metakaolinom primjećuje se blago smanjenje obradivosti. Dodavanjem svega 1% PVC-a, smanjuje se slijeganje za 100 mm, dok se kod mješavine sa udjelom od 15% PVC piljevine, slijeganje nije gotovo niti primijetilo. Kada je riječ o gustoći betona, ona dodavanjem PVC piljevine opada. Mješavina u kojoj se samo cement zamijenio metakaolinom ima najveću gustoću. Udio pora povećava se dodavanjem PVC-a. Najveći udio pora sadrži beton s 15%

PVC-a, dok najmanje pora ima beton sa metakaolinom, bez plastičnog otpada. Iz navedenog se može povezati kako betoni s više pora imaju manju gustoću, a smanjenjem udjela pora gustoća raste.

Mješavina s metakaolinom i dodatkom od 1% PVC-a ima najveću tlačnu čvrstoću od svih ispitani uzoraka. Tlačna čvrstoća ove mješavine veća je za 5,83% u odnosu na referentnu. Mješavina s metakaolinom, bez PVC piljevine ima tlačnu čvrstoću za 1,46% veću od referentne. Najmanja tlačna čvrstoća zabilježena je za mješavinu s dodatkom od 15% PVC-a. Zabilježen je pad čvrstoće od 15,49% u odnosu na čvrstoću referentne mješavine. Kada je riječ o vlačnoj čvrstoći na savijanje, najboljom se pokazala referentna mješavina. Za mješavinu s 1% PVC-a primijetio se pad u čvrstoći od 8,11%. Mješavina bez dodatka plastičnog otpada bilježi pad od 15,5%. Najmanja čvrstoća ponovno je određena za mješavinu s 15% PVC piljevine, ali su za nju zabilježeni najveći pomaci te se pokazala kao najduktilnija. Najmanje pomake i najmanju duktilnost rima mješavina s dodatkom metakaolina, bez dodatka PVC-a. Ispitivanjem prodora vode najveća visina zabilježena je za mješavinu bez plastike, dok je najmanja primijećena kod mješavine s 1% PVC piljevine.

Ovim je istraživanjem dokazano kako se svojstva betona s dodacima metakaolina i PVC piljevine u svježem stanju ne razlikuju mnogo od referentne mješavine. Problemom se pokazala samo konzistencija i ugradivost betona, koja opada s povećanjem udjela PVC-a. Stoga je za poboljšanje tih svojstava potrebno samo korigirati količinu superplastifikatora. Usporedbom dobivenih rezultata za sve mješavine, najboljom se pokazala mješavina s dodatkom 10% metakaolina i 1% PVC piljevine. Rezultati dobiveni istraživanjem ukazuju na to da su mehanička svojstva betona te mješavine vrlo slična referentnoj, a otpornost na tlak je čak i bolja. Trajnosna svojstva također su se pokazala najboljima za navedenu mješavinu, za koju je zabilježen najmanji prodor vode od svih ispitanih uzoraka. Iz navedenog se lako može zaključiti da se uporabom PVC piljevine kao ojačanja u obliku vlakana (u volumnom udjelu od 1%) pozitivno utječe na svojstva betona. Također, pokazalo se da se i kod mješavine s dodatkom metakaolina poboljšavaju mehanička svojstva. U ovom je radu naime metakaolinom zamijenjeno samo 10% mase cementa, dok se u literaturi navodi kako je moguće zamijeniti i do 30%, što daje mogućnost dodatnog istraživanja i smišljanja različitih receptura s, po mogućnosti većim udjelima PVC piljevine, ne utječući negativno

na svojstva betona. Na taj bi se način svakako povećala reciklaža navedenog otpada i smanjila potrošnja prirodnih resursa.

Na posljertku, može se zaključiti da se dodavanjem metakaolina, s ili bez manje količine PVC piljevine, ne utječe negativno na svojstva betona u očvrslom stanju. Rezultati ispitivanja svježeg betona također su zadovoljavajući. Uzimajući u obzir povoljne rezultate provedenih ispitivanja, ova bi se vrsta betona mogla primjenjivati u izradi betonskih opločnika ili za betoniranje pješačkih površina. Zbog nedovoljne sveukupne istraženosti ovakvih betona teže je odrediti njihovu primjenu u zahtjevnijim sustavima te bi za to bilo potrebno provesti dodatna ispitivanja.

Provedena istraživanja u svrhu ovog rada ostavljaju pitanje uporabe metakaolina i PVC piljevine u betonu i dalje otvorenim. Međutim, daje se nada za pronalazak optimalne mješavine s navedenim sastojcima, uz veći utrošak oba sastojka. Osim poboljšanja svojstava betona, na taj bi se način omogućila i reciklaža plastičnog otpada, kao i očuvanje prirodnih sirovina, što bi moglo predstavljati prekretnicu u suvremenoj gradnji i razvoju proizvodnje recikliranih betona.

7. LITERATURA

- [1] Cukarić, M., Mogućnost primjene PVC piljevine kao sitnog agregata u mortu i betonu, Rijeka 2020.
- [2] Concrete: the most destructive material on Earth, <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>, pristup 22.6.2024.
- [3] Auditorio de Tenerife, <https://www.peri.fr/projets/batiments-culturels/auditorio-de-tenerife.html>, pristup 22.6.2024.
- [4] Crkva Svetog Oca, <https://hommes.studio/journal/strength-in-concrete-check-out-these-17-best-concrete-buildings/>, pristup 22.6.2024.
- [5] Environmental Impacts of Cement Production, https://hr.environmentgo.com/utjecaj-proizvodnje-cementa-na-okoli%C5%A1/#google_vignette, pristup 8.7.2024.
- [6] Potter, B.: There Will Soon Be More Concrete Than Biomass on Earth, <https://heatmap.news/economy/the-planet-s-jaw-dropping-astonishing-downright-shocking-amount-of-concrete>, pristup 15.7.2024.
- [7] Jaganmohan, M.: Global cement production 1995-2023, <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>, pristup 16.7.2024.
- [8] Statista Research Department: Cement: global production 1990, 2000 and 2010, with forecasts for 2020 and 2030, <https://www.statista.com/statistics/373845/global-cement-production-forecast/>, pristup 16.7.2024.
- [9] DeVroom, M.: What Is Industrial Waste?, <https://blog.idrenvironmental.com/what-is-industrial-waste>, pristup 31.7.2024.
- [10] Plastics, <https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic#>, 24.7.2024.
- [11] Statista Research Department: Global plastic production 1950-2022, <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>, pristup 24.7.2024.

- [12] Letsrecycle, Plastika, <https://www.morski.hr/sabor-usvojio-zakon-jednokratna-plastika-konacno-odlazi-u-povijest/>, pristup 3.8.2024.
- [13] How Long Does It Take for Plastic to Decompose?, <https://chariotenergy.com/blog/how-long-until-plastic-decomposes/>, pristup 3.8.2024.
- [14] Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019, <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>, pristup 31.7.2024.
- [15] PVC: What is it, How is it Made, and What is it Used For?, <https://www.rugpadusa.com/articles/what-is-pvc-polyvinyl-chloride>, pristup 17.7.2024.
- [16] Synthetic Fibers for Concrete, <https://cdn.zephyrcms.com/7cc4b40d-3173-4e14-b4a6-3ffb18f91f26/-/inline/yes/cip-24-synthetic-fibers-for-concrete.pdf>, pristup 31.8.2024.
- [17] Od Podruma do Krova – Blog, <https://blog.ria.hr/gradnja/beton-s-vlaknima/>, pristup 31.8.2024.
- [18] What is Metakaolin?, <https://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=768>, pristup 16.7.2024.
- [19] Meta Kaolin, <https://www.sheetalenterprises.com/meta-kaolin.html>, pristup 17.7.2024.
- [20] HRN EN 12350-2:2019. Ispitivanje svježega betona – 2. dio: Ispitivanje slijeganjem, Hrvatski zavod za norme, 2019.
- [21] HRN EN 933-1:2012. Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sijanja, Hrvatski zavod za norme, 2012.
- [22] HRN EN 12620:2008. Agregati za beton, Hrvatski zavod za norme, 2008.
- [23] HRN EN 197-1:2012. Cement – 1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene, Hrvatski zavod za norme, 2012.
- [24] Tehnička uputa, Holcim Ekspert® cement, CEM II/B-M (S-V) 42,5N https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/2022-05/2022_04_20-tehnicka-uputa-holcim-ekspert-s-v.pdf, pristup 18.8.2024.
- [25] Tehničke informacije Metaver™ M, <https://catalogue.newchem.org/Uploads/636210344155283770PInfo%20Metaver%20M%202013%20e.pdf>, pristup 29.8.2024.

- [26] Dynamon SF16S, https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider15/products-documents/1_10840_dynamon-sf-16s_en_2798aaa50d894ab1aca764caf3edbebc.pdf?sfvrsn=80e97c5f_0, pristup 29.8.2024.
- [27] HRN EN 12350-7:2019. Ispitivanje svježega betona – 7. dio: Sadržaj pora – Tlačne metode, Hrvatski zavod za norme, 2019.
- [28] HRN EN 12350-6:2019. Ispitivanje svježega betona – 6. dio: Gustoća, Hrvatski zavod za norme, 2019.
- [29] HRN EN 12390-3:2019. Ispitivanje očvrsluloga betona – 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka, Hrvatski zavod za norme, 2019.
- [30] HRN EN 12390-5:2019. Ispitivanje očvrsluloga betona – 5. dio: Čvrstoća ispitnih uzoraka na savijanje, Hrvatski zavod za norme, 2019.
- [31] HRN EN 12390-8:2019. Ispitivanje očvrsluloga betona – 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom, Hrvatski zavod za norme, 2019.