

Utjecaj polimernih i vunenih vlakana na trajnosna svojstva betona

Edjut, Nikolina

Master's thesis / Diplomski 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:157:070537>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



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**

Nikolina Edjut

Utjecaj polimernih i vunenih vlakana na trajnosna svojstva betona

Diplomski rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij
Hidrotehnika
Teorija i tehnologija betona**

**Nikolina Edjut
JMBAG: 0114029814**

Utjecaj polimernih i vunenih vlakana na trajnosna svojstva betona

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam 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.

Nikolina Edjut

U Rijeci, 8.9.2024.

ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr.sc. Silviji Mrakovčić na pomoći, vođenju kroz diplomski rad, stručnim savjetima i razumijevanju tokom cjelokupnog trajanja studija.

Također, puno zahvaljujem laborantima Dini Juriševiću i Domagoju Štroku na pomoći u izvođenju ispitivanja u laboratoriju.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i kolegama na pruženoj potpori tijekom svih godina studiranja i stvaranju lijepih uspomena.

SAŽETAK

Glavni cilj ovog diplomskog rada je analizirati kako dodavanje polimernih i vunenih vlakana utječe na trajnosna svojstva betona. Zbog širokog raspona uporabe betona, sve više firmi teži pronalasku rješenja kako smanjiti velike količine štetnih plinova koji nastaju prilikom proizvodnje betona. Stoga, uporaba vunenih, prirodnih i industrijski proizvedenih vlakna postaje sve šire rasprostranjena.

Za potrebe ovog rada zamiješano je pet betonskih mješavina, četiri mješavine spravljene su s dodatkom polipropilenskih vlakana te jedna s dodatkom vunenih vlakana. Polipropilenska vlakana dodavala su se u postocima od: 0,5%, 1,0%, 1,5% i 2,0%, dok je postotak dodanih vunenih vlakna iznosio je 0,5%. Nakon njege uzoraka isti su podvrgnuti slijedećim ispitivanjima: poroznosti, otpornosti na habanje Böhme metodom, plinopropusnosti i vodopropusnosti. Dobiveni rezultati ispitivanja upućuju na to da korištenje vunenih vlakna poboljšava svojstva propusnosti. Rezultati poroznosti, vodopropusnosti i plinopropusnosti ispitani na uzorcima s dodatkom vunenih vlakana pokazali su bolje konačne rezultate s obzirom na uzorke s dodatkom polipropilenskih vlakana. Iz toga se može zaključiti da se korištenjem recikliranih vlakana postižu bolja trajnosna svojstva betona od betona bez dodanih vlakana. Gledajući prirodna ili industrijski proizvedena vlakna, prirodna (vunena vlakna) dominiraju nad industrijskim (polipropilenskim vlaknima).

Ključne riječi: vunena vlakna, polipropilenska vlakna, poroznost, otpornost na habanje, Böhme metoda, plinopropusnost, vodopropusnost

ABSTRACT

The main aim of this research was to analyze how the addition of polymer and wool fibers affects the durability of concrete. Due to the wide range of uses of concrete, more and more companies strive to find solutions to reduce the large amounts of harmful gases produced during concrete production. Therefore, the use of wool, natural and industrially produced fibers is becoming more and more widespread.

For the purposes of this thesis, five concrete mixes were mixed, four mixes were made with the addition of polypropylene fibers and one with the addition of wool fibers. Polypropylene fibers were added in percentages of: 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0%, while the percentage of added wool fibers was 0.5%. After proper care and curing, samples were subjected to the following tests: porosity, resistance to wear by the Böhme method, gas permeability and water permeability. The obtained test results indicate that the use of wool fibers improves the permeability properties. The results of porosity, water permeability and gas permeability tested on the samples with the addition of wool fibers showed better final results with regard to the samples with the addition of polypropylene fibers. It can be concluded that the use of recycled fibers achieves better durability properties of concrete than the concrete without added fibers in it. Looking at natural or industrially produced fibers, natural (wool fibers) dominate over industrial (polypropylene fibers).

Key words: wool fibers, polypropylene fibers, porosity, wear resistance, Böhme method, gas permeability, water permeability

Sadržaj

1. UVOD	1
2. PREGLED STANJA PODRUČJA	3
3. ISPITIVANJE SVOJSTAVA TRAJNOSTI BETONA	6
3.1. Poroznost	6
3.2. Otpornost na habanje	8
3.3. Plinopropusnost	9
3.4. Vodopropusnost (Prodor vode pod tlakom)	12
4. EKSPERIMENTALNI DIO RAD	13
4.1. Uvod	13
4.2. Projektiranje betonskih mješavina	13
4.2.1. Cement	16
4.2.2. Voda	17
4.2.3. Polipropilenska vlakna	17
4.2.4. Vunena vlakna	18
4.2.5. Prirodni agregat	19
4.2.6. Superplastifikatori	20
4.3. Sastavi betonskih mješavina	21
4.4. Ispitivanje svojstava betona	24
4.4.1. Ispitivanje poroznosti betona	24
4.4.2. Analiza ispitivanja poroznosti betona	25
4.4.3. Ispitivanje otpornosti betona na habanje - metoda Böhme	27
4.4.4. Analiza rezultata ispitivanja betona na habanje	30
4.4.5. Ispitivanje plinopropusnosti betona	34
4.4.6. Analiza ispitivanja plinopropusnosti betona	37

<i>4.4.7. Ispitivanje vodopropusnosti betona</i>	42
<i>4.4.8. Analiza ispitivanja vodopropusnosti betona</i>	45
4.5. Ispitivanje vunenih vlakana	48
<i>4.5.1. Priprema natrijeve lužine</i>	50
<i>4.5.2. Priprema kalcijeve lužine</i>	51
<i>4.5.3. Proces ispitivanja vlačne čvrstoće vunenih vlakana</i>	53
5. ZAKLJUČAK	57
LITERATURA	59

POPIS SLIKA

Slika 1: Ovisnost vlačne čvrstoće o postotku dodanih vunenih vlakana [1].....	4
Slika 2: Prikaz raspada vunenih vlakana nakon 3 i 27 dana [2]	5
Slika 3.: Poroznost betonske mješavine (Autor: Nikolina Edjut).....	7
Slika 4: Bazen za njegu uzoraka [3]	15
Slika 5: Komora za sušenje uzoraka [3]	15
Slika 6: Portland cement CEM II/B-LL 42,5N (Autor: Nikolina Edjut)	16
Slika 7: Polipropilenska vlakna (Autor: Nikolina Edjut).....	17
Slika 8: Vunena vlakna sa malom količinom nečistoće (Autor: Nikolina Edjut).....	18
Slika 9: Prirodni agregati (Autor: Nikolina Edjut)	19
Slika 10: Superplastifikator korišten u pripremanju betonskih mješavina (Autor: Nikolina Edjut).....	20
Slika 11: Betonska mješavina s polipropilenski vlaknima (Autor: Nikolina Edjut).....	22
Slika 12: Ugradnja betonske mješavine a) prije vibriranja, b) poslije vibriranja (Autor: Nikolina Edjut).....	23
Slika 13. Ugrađene betonske mješavine u kalupe (Autor: Nikolina Edjut)	23
Slika 14: Postupak ispitivanja betonskog uzorka na poroznost (Autor: Nikolina Edjut) .	24
Slika 15: Poroznost betonskih uzoraka (Autor: Nikolina Edjut)	27
Slika 16.: Uređaj za ispitivanje habanja Bohme metodom (Autor: Nikolina Edjut)	28
Slika 17: Brusni prah - aluminijev oksid (Autor: Nikolina Edjut).....	28
Slika 18.: Uzorak postavljen u kalup za vrijeme rada uređaja (Autor: Nikolina Edjut)...	29
Slika 19: Prikaz uzoraka nakon 16 ciklusa habanja (Autor: Nikolina Edjut).....	30
Slika 20: Usporedba rezultata ispitivanja otpornosti na habanje (Autor: Nikolina Edjut)	32
Slika 21: Dijagram tijeka trošenja uzoraka (Autor: Nikolina Edjut)	33
Slika 22: Prikaz postotka izgubljenih masa uzoraka (Autor: Nikolina Edjut).....	33
Slika 23. Ispiljeni uzorci spremni za ispitivanje (Autor: Nikolina Edjut)	34
Slika 24. Aparatura za ispitivanje plinopropusnosti: zračna komora, digitalni manometar, mjeraci protoka, sapunica i ventili (Autor: Nikolina Edjut).....	35
Slika 25. Postavljena zračnica unutar čelijske (Autor: Nikolina Edjut).....	35
Slika 26. Kompresor za tlačenje zraka (Autor: Nikolina Edjut).....	36
Slika 27.: Prikaz mjerodavnog mjehurića za ispitivanje (Autor: Nikolina Edjut).....	36

Slika 28: Grafički rezultati ispitivanja plinopropusnosti betona (Autor: Nikolina Edjut)	40
Slika 29: Usporedba srednjih koeficijenata plinopropusnosti (Autor: Nikolina Edjut)....	41
Slika 30: Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti metodom mjerenja dubine prodora vode (Autor: Nikolina Edjut).....	42
Slika 31: Uzorci opterećeni u uređaju za ispitivanje vodopropusnosti (Autor: Nikolina Edjut).....	43
Slika 32: Cijepanje uzoraka a) Uzorak opterećen prije ispitivanja, b) Uzorak poslije cijepanja (Autor: Nikolina Edjut)	44
Slika 33: Označena dubina prodora vode (Autor: Nikolina Edjut).....	44
Slika 34: Prikaz dubine prodora vode pod tlakom (Autor: Nikolina Edjut)	46
Slika 35: Dijagram vlačnih sila potrebnih za slom uzorka (Autor: Nikolina Edjut)	47
Slika 36: Prikaz natrijevog hidroksida i kalcijevog hidroksida u čvrstom stanju (Autor: Nikolina Edjut).....	49
Slika 37: Oprana vunena vlakna (Autor: Nikolina Edjut)	49
Slika 38: Otopine natrijevog hidroksida i uronjena oprana vunena vlakna (Autor: Nikolina Edjut).....	50
Slika 39: Otopina natrijevog hidroksida i uronjena ne oprana vunena vlakna (Autor: Nikolina Edjut).....	50
Slika 40: Otopine kalcijevog hidroksida i uronjena oprana vunena vlakna (Autor: Nikolina Edjut).....	51
Slika 41: Otopina kalcijevog hidroksida s ne opranim vunenim vlaknima (Autor: Nikolina Edjut).....	52
Slika 42: Prikaz pH metra (Autor: Nikolina Edjut)	52
Slika 43: Vunena vlakna NaOH nakon 56 dana (Autor: Nikolina Edjut).....	53
Slika 44: Vunena vlakna Ca(OH) ₂ nakon 56 dana (Autor: Nikolina Edjut)	54
Slika 45: Neočišćena vunena vlakna u otopini Ca(OH) ₂ nakon 56 dana (Autor: Nikolina Edjut).....	54
Slika 46: Mikroskop kojim se mjerila debljina vunenih niti (Autor: Nikolina Edjut)....	55
Slika 47: Uređaj za mjerenje vlačne sile (Autor: Nikolina Edjut)	55
Slika 48: Nit vunenog vlakna prije i poslije opterećenja (Autor: Nikolina Edjut)	56

POPIS TABLICA

Tablica 1: Potrebni volumen jedne mješavine i broj uzoraka.....	14
Tablica 2: Dobiveni podaci mjerenja poroznosti	25
Tablica 3: Rezultati habanja materijala uzoraka (Autor: Nikolina Edjut)	30
Tablica 4: Proračun srednje otpornosti na habanje (Autor: Nikolina Edjut)	31
Tablica 5: Rezultati ispitivanja plinopropusnosti	37
Tablica 6: Prikaz dobivenih rezultata protoka plina kroz betonski uzorak.....	39
Tablica 7: Numerički rezultati plinopropusnosti betonskih uzoraka	40
Tablica 8: Rezultati ispitivanja dubine prodora vode	45

1. UVOD

Cilj ovog diplomskog rada je, na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja, analizirati i zaključiti mogu li se određeni sastojci betona, pri miješanju betonske mješavine, zamijeniti recikliranim sastojcima, a da se pri tome ne naruše trajnosna svojstva samog betona.

Svakodnevnim razvojem industrijalizacije i povećanjem broja stanovništva dolazi do povećane potražnje za stambenim i poslovnim prostorima. To ukazuje da će se u budućnosti trebati izgraditi novi ili proširiti postojeći gradovi, a time dolazi i do potrebe korištenja velikih količina betona. U današnje vrijeme počinju se sve više graditi objekti od armiranog betona i drugih alternativnih građevinskih materijala, koji zamjenjuju izgradnju tradicionalnom opekom i tradicionalnom načinom izgradnje. Prednosti novijih tehnologija su smanjenje troškova i vremena izgradnje, a upravo to su dva faktora koja se najčešće uzimaju u razmatranje tijekom odabira načina gradnje objekta. Beton, gledajući kao materijal od kojeg je napravljen izgrađeni objekt, ne šteti previše samom okolišu, osim što narušava njegov estetski izgled. Međutim pri izradi same betonske mješavine, dolazi do pojave stakleničkih plinova, visokih temperatura zagrijavanja zraka, uporabe velikih količina cementa i do korištenja velikih količina pitke vode. Nove tehnologije pokušavaju se što više okrenuti razvoju „green technology“, čiji cilj je smanjenje ljudskog utjecaja na prirodni okoliš. U građevinskom sektoru to se može postići izradom objekata od biomaterijala, nisko energetske materijala ili recikliranih materijala, isto kao i izgradnjom pasivnih kuća ili zelenih zgrada. Neki od najčešće upotrebljivanih prirodnih materijala su: drvo, slama, blato, bambus, konoplja, pluto, opeka, zemljani blokovi ili reciklirani beton.

Drugi način na koji se može značajno pridonijeti umanjenju ljudskog utjecaja na okoliš je smanjenje korištenja vode za piće u svrhe građevinarstva, poput korištenja voda u svrhu miješanja betonskih mješavina. Tvrtke koje su već razvile tehnologije prerade otpadnih voda i kišnice te imaju visoki nivo ekološke svijesti nalaze se u industrijskim razvijenim regijama, poput Sjedinjenih Američkih Država, Njemačke, Nizozemske, Skandinavskih zemlja, Japana, Kine i Singapura. Prije odabira nekog od alternativnih materijala, treba provjeriti hoće li odabrani materijal biti pogodan odabir za traženu konstrukciju, a to se provodi nizom laboratorijskih ispitivanja kojima se dobivaju rezultati o potrebnim

komponentama materijala. Pri korištenju recikliranog betona ili betona s dodacima vlakana, važno je ispitati jesu li zadovoljena trajnosna i mehanička svojstva, kako bi objekt napravljen od recikliranog betona imao iste karakteristike kao i objekt od običnog betona bez dodataka vlakana, ako ne i poboljšana.

U ovom istraživanju napravljeni su i uspoređeni betonski uzorci od 5 različitih mješavina. Korišteni reciklirani materijal bila su ovčja vunena vlakna (W) te polipropilenska vlakna (PP) koja su industrijski proizvedena. Polipropilenska vlakna dodavana su betonskoj mješavini u različitim postocima, 0,5%, 1,0%, 1,5% i 2,0%, kako bi se utvrdilo koji najveći postotak dodanih PP vlakana ima zadovoljavajući utjecaj na svojstva betona. U mješavini s vunenim vlaknima njihov udio bio je 0,5%.

Spravljanje betonskih mješavina obavljeno je kroz 3 datuma miješanja 5. ožujka, 6. ožujka i 13. ožujka, međutim nakon što je utvrđeno da se zbog loše ugradnje uzorci ne mogu pravilno ispitati, ponovno su zamiješane mješavine 4. lipnja za udio PP vlakana 1.5% i 2.0%.

Na uzorcima betonskih mješavina starosti 28 dana, koji su prethodno njegovani u vodi 27 dana, provedena su: ispitivanje otpornosti na habanje prema metodi Böhme, ispitivanje plinopropusnost prema Cembureau, ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom te ispitivanje poroznosti betonskih uzoraka. Detaljan opis provedenih postupaka, normi i dobivenih rezultata prikazani su u nastavku ovog rada. Sva ispitivanja provedena su u skladu s propisanim normama.

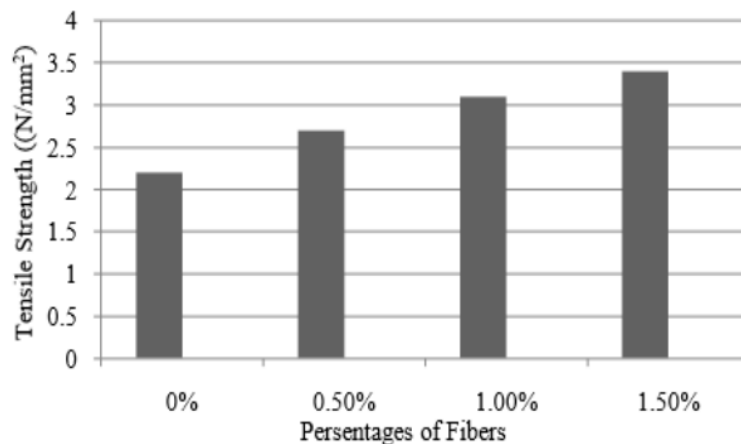
2. PREGLED STANJA PODRUČJA

U ovom radu fokus je na sljedeća trajnosna svojstva betona: poroznost, otpornost na habanje, plinopropusnost i vodopropusnost. Kako bi se dobiveni rezultati mogli pravilno interpretirati i analizirati potrebno je proučiti dosadašnja ispitivanja i njihove dobivene rezultate. Glavni razlog tome je što se dobiveni rezultati mogu međusobno razlikovati ako nisu provedeni pri istim uvjetima ili ako su se razlikovali sastojci betonskih mješavina.

Uporaba vunenih vlakana nije pretjerano raširena u svijetu, stoga se usporedba bude fokusirala većinom na vlakna prirodnog porijekla. Polipropilenska vlakna su industrijski proizvedena pa je njihova primjena više raširena i poznatija. D. Rocha i dr. tvrde da prirodna vlakna imaju značajniju prednost u odnosu na industrijska vlakna, kao što su na primjer staklena vlakna. Proizvodnja i prerada staklenih vlakana iziskuje veću potrošnju energije s obzirom na prirodna vlakna kod kojih je potrebna samo prerada istih. Prirodna vlakna su lako dostupna, netoksična, imaju nisku gustoću, nisku cijenu i veliku otpornost na koroziju i mehaničko oštećenje betona. Međutim, s vremenom može doći do degradacije vlakana, gubitka obradivosti i pojave heterogenosti materijala.

Vlakna su materijali poput niti čiji je cilj postići poboljšana kratkotrajna i dugotrajna svojstva betona. Vlakna prirodnog porijekla imaju veliku čvrstoću, ali nizak modul elastičnosti. Betoni u kojima su korišten ovaj tip vlakana mogu postići konačne čvrstoće jačine od 12 do 25 MPa, tvrde M. Shadheer Ahamed i dr. [1]

Na Slici 1 prikazana je ovisnost vlačne čvrstoće o različitom postotku dodanih prirodnih vlakana. Iz dijagrama se može očitati da vlačna čvrstoća raste s porastom dodanih prirodnih vlakana u beton.



Slika 1: Ovisnost vlačne čvrstoće o postotku dodanih vunениh vlakana [1]

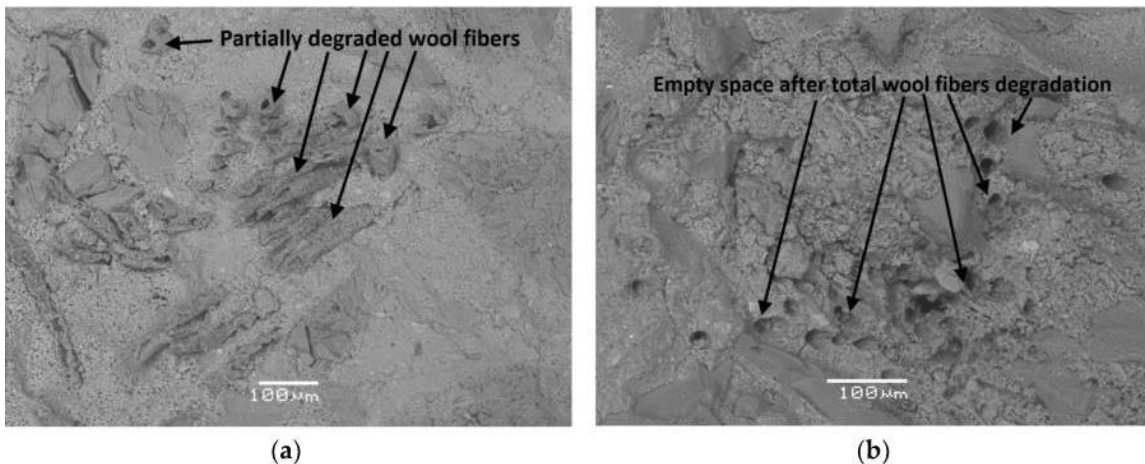
I. A. Wani i R. R. Kuman u svojem eksperimentalnom istraživanju uspješno su koristili vunena vlakna u betonu te proizveli ekološki prihvatljiv beton. Dokazali su da je toplinska vodljivost betona s dodatkom vlaknima bila zadovoljavajuća, jer je beton bio izoliran u usporedbi s betonom bez dodatka vunениh vlakana. Analizirajući rezultate ispitivanja došli su do zaključka da je beton s postotkom vunениh vlakana manjim od 5% imao manju kapilarnu apsorpciju i bolju obradivost nego beton s postotkom vlakana većim od 9%. Drugim riječima, beton s manjim postotkom dodatnih vunениh vlakana imao je manju vodopropusnost od betona s većim postotkom vunениh vlakna, gdje je vodopropusnost bila veća. [2]

Čvrstoću betona s dodatkom vunениh vlakana ispitivali su M. Murillo i dr. te tvrde da su dobili rezultate koji značajno mogu promijeniti mehanička svojstva betona. Rezultati pokazuju da prisustvo vunениh vlakana u armiranom betonu povećava čvrstoću na savijanje za 21,1%, a vlačnu čvrstoću cijepanja za 28,7%. Međutim, uočili su smanjenje mehaničkih svojstava dobivenog betona zbog smanjenja površinske adhezije. [3]

Sve većim interesom za korištenjem dodataka vunениh vlakana, javila se potreba ispitivanja svojstava vunениh vlakana. Upravo takvo ispitivanje proveli su Santos i dr. Uspoređivali su razliku između otopina NaOH i Ca(OH)₂ u koju su uronjena piassava vlakna. Piassava vlakna su vlakna prirodnog porijekla dobivena iz nekoliko vrsti palmi, poznata su po

svojoj izdržljivosti i otpornosti na vodu, zbog čega se najčešće koriste za krovne materijale ili izradu užadi. Tretman kalcijevim hidroksidom pokazao se manje agresivnim na površinu vlakna s obzirom na tretman vlakana natrijevim hidroksidom. [4]

D. Józwiak-Niedźwiedzka i A. P. Fantilli otkrili su da lužnatost cementa uvelike utječe na otpornost vunениh vlakana u cementnoj smjesi. Što je niža alkalnost cementne paste to je bolja otpornost vunениh vlakana. Dokazali su da betone s dodatkom vunениh vlakana karakterizira viša vrijednost vlačne i tlačne čvrstoće od običnih betona, što je i prikazano u više navrata u gore navedenim ispitivanjima. Također tvrde da dodatak vunениh vlakana uzrokuje potrebu za većom količinom vode kako bi se beton mogao pravilno obraditi. Razlog niske obradivosti pripisuje se velikoj specifičnoj površini i finoći vunениh vlakana. Ovaj negativan učinak mogao bi se minimizirati dodavanjem kemijskih dodavanja, čime bi se smanjila potreba za velikim količinama vode. Promatrani su mehanizmi razgradnje prirodnih vlakana u alkalnom okruženju bogatom mineralima i zaključili su da će vlakna propadati većom brzinom ako se duže nalaze u alkalnim otopinama većih Ph vrijednosti. Slika 2 prikazuje raspad vunениh vlakana u alkalnoj cementnoj smjesi nakon a) 3 dana i b) nakon 27 dana. Nakon 3 dana vlakana su djelomično razgrađena, a nakon 27 dana vidljiva je samo praznina u kojoj su se prije nalazila vunena vlakna. [5]



Slika 2: Prikaz raspada vunениh vlakana nakon 3 i 27 dana [2]

3. ISPITIVANJE SVOJSTAVA TRAJNOSTI BETONA

Trajnosna svojstva betona mogu se odrediti primjenom standardiziranih i nestandardiziranih metoda, kojih u današnje vrijeme ima vrlo mnogo na raspolaganju, a na temelju čijih rezultata se dobivaju parametri potrebni za ocjenjivanje trajnosti očvrsnulog betona.

U ovom diplomskom radu provedena su ispitivanja, na dostupnim uređajima u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. U nastavku su opisani postupci mjerenja i rada uređaja za provođenje željenih ispitivanja.

3.1. Poroznost

Poroznost betona se odnosi na prisutnost pora i šupljina unutar očvrsnulog betona. Beton je uvijek porozan materijal, bez obzira koliko se dobro vibrirao prilikom ugradnje, jer je nemoguće istisnuti sav zrak. Međutim, poroznost betona moguće je kontrolirati koristeći pravilno izrađenu mješavinu za koju su prethodno izračunate sve potrebne količine materijala pri čemu je pažnju potrebno pridati omjeru agregata i cementa, jer upravo pravilna gradacija navedenih sastojaka doprinosi boljoj popunjenosti praznina. [6]

Poroznost je najviše pod utjecajem veličine agregata, prirode agregata i samog oblika agregata. Pore se mogu podijeliti na tri vrste pora, a to su: zatvorene pore, otvorene pore i međusobno povezane pore.

- Povezane pore imaju najveći utjecaj na poroznost jer međusobno formiraju neprekinute trase kroz beton. One mogu biti mikroskopske pukotine ili kapilarne šupljine, koje lakše omogućavaju prolaz plinova i tekućina. Ako su u betonu formirane velike količine kapilarnih pukotina, može se pojaviti problem tijekom prodora vode, što dovodi do korozije armature i smanjenja dugovječnosti betona.

- Otvorene pore utječu ponajviše na čvrstoću očvrsnulog betona. To su šupljine koje međusobno nisu povezane unutar betona i/ili nemaju izlaz na površinu, a nastaju kao rezultat zarobljenog zraka tokom procesa miješanja i kasnijeg očvršćivanja betona. Otvorene pore stvaraju praznine kojima slabi struktura betona, što ga ujedno čini i podložnijim stvaranju novih pukotina, a time i smanjenju čvrstoće betona. Također utječu i na smanjenje gustoće betona čime se smanjuje sposobnost betona da izdrži visoke tlačne sile. [7]

Sa Slike 3 može se zaključiti da bi ovakav očvrsnuli beton imao jako izraženu poroznost, zbog toga što se u mješavini nalazio vrlo mali postotak sitno zrnatog materijala, prevladavao je krupno zrnati materijal, koji nema ulogu sprječavanja prodora vode. Kada bi ovakav betonski uzorak bio uronjen u vodu, očvrsnula mješavina ne bi upila mnogo vode, već bi većina samo prošla kroz uzorak zbog nedostatka zatvorenih pora te velike količine kapilarnih pora.



Slika 3.: Poroznost betonske mješavine (Autor: Nikolina Edjut)

3.2. Otpornost na habanje

Habanje betona je dugotrajna pojava, čiji utjecaji na beton u početku nisu vidljivi golim okom, međutim zbog kontinuiranog ponavljanja uzroka mogu dovesti do oštećenja betonske konstrukcije te do nepovratnih posljedica.

Oštećenja uslijed habanja se najčešće javljaju kod betonskih površina koje su izložene stalnom i intenzivnom trenju te vibracija i udarcima. To su najčešće industrijski podovi, mostovi, avionske piste, te betonske podloge koje imaju kontakt sa teškim vozilima i mašinama. Također, oštećenja betona uslijed habanja javljaju se i u područjima sa čestim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja isto kao i kod površina koje su izložene kiselinama ili solima. Redovitim održavanjima betonskih površina i uporabom visokokvalitetnih materijala brzina habanja i intenzitet habanja može se značajno smanjiti.

Faktori koji utječu na habanje su sljedeći:

- tvrdoća agregata,
- oblik agregata,
- odnos cementa i agregata,
- granulometrijski sastav,
- gustoća betona.

Čvršći agregati poput granita ili bazalta, pružaju bolju otpornost na habanje u usporedbi s nekim od mekših agregata poput lapora ili vapnenca. Tvrdoća agregata je od velike važnosti zbog toga što agregat čini veliku količinu betonske mješavine i direktno je izložen habanju. Kod agregata je važan i njegov oblik. Uglasti agregati imaju bolju međusobnu vezu u betonu, što povećava otpornost na habanje. Zaobljeni agregati, iako mogu poboljšati obradivost betona, isto tako mogu i smanjiti otpornost na habanje jer imaju slabiju vezu između čestica, a time i manje unutrašnje trenje. Gledajući granulometrijski sastav, važno je postići što bolju zastupljenost svih frakcija, jer se time omogućuje bolje slijeganje agregata i smanjenje praznina u betonu, što rezultira manjim postotkom cementne paste i poboljšanjem otpornosti na habanje. Kod odnosa cementa i agregata cilj je postići što veći udio agregata u betonskoj smjesi s obzirom na cementnu pastu, jer se cementna pasta brzo

troši prilikom habanja. Postizanjem što veće količine agregata, ujedno se povećava i njegova gustoća, a što se u betonu nalazi manje pora i šupljina to znači da je njegova struktura gušća i otpornija na habanje. [8] , [9]

3.3. Plinopropusnost

Plinopropusnost je sposobnost betona da propušta mjehuriće plina kroz pore uslijed djelovanja hidrauličkog gradijenta. Značajno može utjecati na čvrstoću betona, otpornost, prodor štetnih plinova i samu trajnost betona.

Faktori koji utječu na plinopropusnost su sljedeći:

- sastav betona,
- vodocementni omjer,
- uporaba aditiva,
- zbijenost betona,
- stupanj hidratacije,
- mineralni dodaci,
- mikrostruktura.

Sastav betona je jedan od glavnih faktora koji utječu na plinopropusnost betona. Ključni faktori koji utječu na sastav betona su : vodocementni omjer, količina cementa, vrsta i veličina agregata te aditivi. Korištenjem cementa s dodatkom pucolana ili letećeg pepela može se smanjiti plinopropusnost jer reagiraju s kalcijevim hidroksidom. Takva reakcija rezultira stvaranjem C-S-H, koji dodatno popunjava pore. Količina cementa je od velikog značaja, jer veće količine dodanog cementa pri uvjetima nižeg vodocementnog omjera mogu povećati gustoću betona, a time i smanjiti plinopropusnost. Od velike je važnosti i dobra graduacija agregata. Pravilno proračunata količina frakcija agregata dovodi do smanjenja praznih šupljina između čestica, čime se direktno utječe na mikrostruktruru betona. Ako se želi smanjiti plinopropusnost treba koristiti sitniji agregat koji će popuniti šupljine. Vibriranje je mehanički način kojim se istiskuje prazan zrak iz mješavine, time se smanjuje postotak pora i njihova međusobna povezanost. Pravilna i glatko obrađena

površina betona ima manju površinsku poroznost, što onemogućuje ulazak plinova. Stoga proces smanjenja plinopropusnosti ne staje s završetkom miješanja betonske mješavine, već se nastavlja i tokom ugradnje betona. Uporabom određenih dodataka može se smanjiti ili povećati količina pora i njihova povezanost. Dodatkom superplastifikatora i zgušnjivača smanjuje se potrebna količina vode, što omogućuje niži vodocementni omjer, a time i smanjenu plinopropusnost. Hidratacija betona je proces od velike važnosti za razvoj čvrstoće i trajnosti betona. Shvaćanje ovog procesa može pomoći pri proizvodnji visokokvalitetnog betona i pri rješavanju problema koji mogu nastati prilikom gradnje. Hidratacija betona je kemijski proces koji se odvija kada se cement pomiješa s vodom. Najvažniji proizvodi hidratacije su kalcijev hidroksid (CH) i kalcij-silikat-hidrat (C-S-H). Kalcijev hidroksid doprinosi alkalnoj prirodi betona, a C-S-H je odgovoran za većinu čvrstoće betona. Hidratacija betona odvija se u nekoliko faza. Početna faza javlja se odmah nakon miješanja cementa i vode te tada dolazi do brzog porasta temperature i stvaranja paste koja prekriva agregate. Iduća faza je faza postupnog ojačanja. Ona se javlja tijekom prvih par sati do par dana od zamiješane betonske mješavine, tada se pasta cementa stvrdnjava i počinje razvijati čvrstoću. Konačna faza je faza dugotrajnog ojačanja, to je faza koja se nastavlja tjednima ili čak i mjesecima nakon ugradnje, ovisno o vrsti i uvjetima cementa, rezultira dodatnim povećanjem čvrstoće i otpornosti betona. Neki od faktora koji dodatno utječu na hidrataciju betona su temperatura i vlažnost. Visoke temperature ubrzavaju hidrataciju, a niske temperature usporavaju ili nekad dovode čak i do zaustavljanja samog procesa. Zbog toga se beton nakon ugradnje treba pravilno njegovati u ekstremnim uvjetima, ponekad je potrebno hlađenje betona za vrijeme toplijih mjeseci, dok je tijekom zimskih mjeseci potrebno zagrijavanje betona. Dovoljna količina vlage od neophodnog je značaja za proces hidratacije, jer sušenje površine betona prije nego dovoljno očvrstne, može dovesti do pucanja betona i do smanjenja čvrstoće. Većim stupnjem hidratacije cementa smanjuje se poroznost betona a time i plinopropusnost. [10], [11]

Važno je kontrolirati plinopropusnost kako bi se osigurala funkcionalnost i trajnost betona. Smanjena propusnost plinova smanjuje i ulazak vlage i kisika koji su potrebni za koroziju čelične armature, što je vrlo važno ako će se betonska struktura nalaziti okružna prostorom visokog stupnja vlage, kao npr. blizina jezera i mora.

Neki od plinova koji uzrokuju koroziju betona osim kisika su slijedeći:

- ugljični dioksid (CO_2),
- sumpor dioksid (SO_2),
- klorovodik (HCl),
- amonijak (NH_3).

Ugljični dioksid reagira s kalcijevim hidroksidom (Ca(OH)_2) iz betona i stvaraju kalcijev karbonat (CaCO_3). Ovakav proces smanjuje pH vrijednost betona što može dovesti do korozije čelične armature unutar betona. Sumpor dioksid u prisustvu vode formira sumporastu (H_2SO_3) ili sumpornu kiselinu (H_2SO_4). Ove kiseline također reagiraju sa kalcijevim hidroksidom (Ca(OH)_2) iz betona te stvaraju kalcijev sulfat (CaSO_4), poznatiji kao gips. Njegovim nastankom dolazi do širenja i pucanja betona, procesa koji se naziva sulfatna korozija. Formiranje klorovodika izaziva stvaranje klorida u prisustvu vode. Kloridi ubrzavaju proces korozije čelične armature unutar betona, a time dolazi do slabljenja strukture betona. Amonijak u prisustvu vlage može reagirati sa cementnom pastom, stvarajući amonijakov hidroksid (NH_4OH), ovakav proces dovodi do formiranja ekspanzirajućih soli, koje izazivaju degradaciju i pucanje betona. [12]

3.4. Vodopropusnost (Prodor vode pod tlakom)

Vodootpornost betonske mješavine ključna je karakteristika kojom se određuje sposobnost betona da se odupre prodiranju vode u beton i štetnih tvari koje voda nosi sa sobom. Vodopropusnost je od velike važnosti za konstrukcije koje su konstantno ili povremeno izložene ili vodi ili visokoj vlažnosti poput hidrotehničkih građevina, podruma, mostova, industrijskih postrojenja i spremnika za vodu.

Faktori koji utječu na vodootpornost betona:

- vrsta i kvaliteta cementa,
- vodocementni omjer,
- aditivi i mineralni dodaci,
- zbijenost betona,
- mikrostruktura betona.

Faktori koji utječu na vodopropusnost gotovo su isti kao i faktori koji utječu na plinopropusnost. U oba slučaja faktori su usko vezani za količinu pora u betonu i za međusobni način povezivanja pora i šupljina. Određeni tipovi cementa, kao što su cementi s dodacima pucolana ili silicijske prašine, mogu značajno poboljšati vodootpornost isto kao i dodaci različitih aditiva poput raznih hidroizolacijskih aditiva isto kao i kod već prije spomenute plinopropusnosti zbog toga što dolazi do reakcije s kalcijevim hidroksidom, što rezultira stvaranjem C-S-H, koji dodatno popunjava pore. Vodocementni omjer je od velikog značaja, veće količine dodanog cementa pri uvjetima nižeg vodocementnog omjera mogu povećati gustoću betona, a time i smanjiti vodopropusnost. Dodavanjem aditiva može se smanjiti ili povećati veličina pora i njihova povezanost. Također, što je finija mikrostruktura betona to je manje propusna na vodu, što je vrlo slično svojstvo kao i zbijenost betona, kod koje jača zbijenost betona utječe na veću povezanost i manju veličinu pora, čime se umanjuje prodiranje vode. [13]

Mjerenja vodootpornosti mogu se provesti na više načina prateći različite norme, a u ovom diplomskom radu, određivanje parametara vodopropusnosti provedeno je metodom prodiranja vode pod tlakom.

4. EKSPERIMENTALNI DIO RAD

4.1. Uvod

Eksperimentalan dio ovog diplomskog rada kao što je i ranije već spomenuto, proveden je u laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Prilikom izvođenja ispitivanja pazilo se da se poštuju sve potrebne norme, kako bi rezultati bili što točniji te kako bi se mogli usporediti sa sličnim provedenim eksperimentima.

Cilj istraživanja je ispitivanje trajnosnih svojstava betonskih mješavina. Zamiješano je pet betonskih mješavina koje se međusobno razlikuju po postotku dodanih recikliranih sastojaka. Četiri mješavina zamiješano je s dodatkom polipropilenskih vlakana, a jedna betonska mješavina zamiješana je s dodatkom vunenih vlakana. Kako bi se rezultati ispitivanja mogli usporediti, sve betonske mješavine spravljene su s istim vodocementnim omjerom, granulometrijskim sastavom prirodnog i recikliranog agregata te promjerom najvećeg zrna 16 mm. Na takav se način osiguralo da prilikom ispitivanja, trajnosna svojstva ovisе isključivo o postotcima dodanih recikliranih materijala, a ne o tipu vodovezivnog omjera. U slučaju da se u svakoj mješavini mijenjaju i neka od drugih svojstva, interpretacija rezultat imala bi više varijabli koje se mijenjaju, a time bi analiza bila kompleksnija i pojavila bi se veća šansa za javljanje pogrešaka.

4.2. Projektiranje betonskih mješavina

Za projektiranje betonskih mješavina korišteni su sljedeći sastojci: prirodni agregat, cement, voda, metakaolin, superplastifikator i aerant (od sastojaka koji su se dodavali svakoj betonskoj mješavini), a vunena vlakna i polipropilenska vlakna dodavala su se u različitim postocima s obzirom na željenu mješavinu. Vodocementni omjer koji se koristio kod svih mješavina iznosio je 0,45. Takav omjer omogućava zadovoljavanje uvjeta trajnosti, čvrstoće i obradivosti očvrstnulog betona. Ukoliko nije pravilno proračunat vodocementni omjer, može doći do problema s hidratacijom i obradivosti betona isto kao i do povećane propusnosti i povećanog skupljanja i pucanja betona. Kako bi se osigurao

dovoljni volumen zamiješane betonske mješavine, prije samog proračuna potrebno je bilo odrediti količine uzoraka koje su potrebne za svako od pojedinih ispitivanja. Preporuča se da se dobivena količina betonske mješavine uveća za određeni sigurnosni faktor, kojim se osigurava dovoljna količina mješavine za ugradnju i u slučaju da dođe do gubitka uslijed miješanja ili ugradnje. Za potrebe ovog diplomskog rada sigurnosni faktor za koji se uvećavala betonska mješavina iznosio je 1,12.

Broj uzoraka potrebnih za svako ispitivanje može se vidjeti nastavku u Tablici 1.

Tablica 1: Potrebni volumen jedne mješavine i broj uzoraka

POTREBNI VOLUMEN MJEŠAVINE			
UZORAK	VOLUMEN (dm ³)	ISPITIVANJE	BR.UZORAKA
KOCKICA	0,343	HABANJE	3
KOCKA	3,375	POROZNOST	3
PRIZMA	4	VODOPROPUSNOST	3
VALJAK	5,301	PLINOPROPUSNOST	1
UKUPNI VOLUMEN MJEŠAVINE (L)		31,87	

Također, kod miješanja betonskih mješavina u miješalici, vrlo je važno da se pravilno dodaju svi potrebni sastojci isto kao što treba paziti i na pravilan način ugradnje. Prilikom stavljanja sastojaka u miješalicu prvo se dodaju suhi sastojci te se poklopac miješalice zatvori i miješalica se vrti 30 sekundi, a nakon toga se dodaju mokri sastojci, poput smjese vode i superplastifikatora. Sve betonske mješavine su nakon ugradnje u potrebne kalupe njegovane u vodi 28 dana. Nakon toga izvađene su iz bazena i stavljene na sušenje u za to predviđenu peć na $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ trajanja 24 sata, a onda podvrgnute hlađenju na temperaturi zraka u laboratoriju što iznosi $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Slike bazena i peći za sušenje uzoraka prikazane su na Slici 4 i Slici 5.



Slika 4: Bazen za njegu uzoraka [3]



Slika 5: Komora za sušenje uzoraka [3]

4.2.1. Cement

Cement je građevinski materijal koji se dobiva usitnjavanjem i pečenjem lapora i vapnenca do dobivanja finog praha. Postoji više vrsta cementa ovisno o kemijskom sastavu, a cement koji se koristio u ovim betonskim mješavinama bio je portland cement CEM II/B-LL 42,5N tvrtke Holcim prikazan na Slici 6.



Slika 6: Portland cement CEM II/B-LL 42,5N (Autor: Nikolina Edjut)

Holcim navodi da se ovaj tip cementa preporuča za proizvodnju pumpanih i transportnih betona, izgradnju nosivih betonskih konstrukcija, za radove u cestogradnji i pri izvođenju industrijskih objekata viših razreda završne tlačne čvrstoće. Neka od svojstava ovog cementa su da ima optimalno vrijeme vezanja cementa, vrlo umjeren razvoj topline hidracije te dobru otpornost na umjereno agresivne utjecaje zbog toga što ima dodatke silicijskog letećeg pepela i granulirane zgure.

4.2.2. Voda

Voda korištena u svim betonskim mješavinama bila je voda iz vodovoda, iako se prema normama preporuča korištenje destilirane vode ili ionizirane vode. Navedeni tipovi vode u sebi sadrže manje količine štetnih tvari koje bi mogle štetno djelovati na trajnosna, mehanička i kemijska svojstva očvršnulog betona. Međutim, kako praksa korištenja destilirane vode nije održiva na gradilištima, pošto se tamo javlja potreba za korištenjem velikih količina, praksa korištenja nije ustaljena niti u laboratorijima. Jedino gdje se koristila deionizirana voda bila je u procesu ispitivanja vunениh vlakana.

4.2.3. Polipropilenska vlakna

Dodavanjem polipropilenskih vlakana očvrsnuli beton dobiva na čvrstoći i na trajnosti samog betona. PP vlakna koja su se koristila duljine su 18 mm proizvođača BONAR Ltd. Većina PP su kružnog oblika kao bi se osiguralo da se ne bi stvarale grudice i nakupine vlakana samo na jednom mjestu u mješavini. Njihova glavna namjena je sprječavanje nastanka mikropukotina u betonu. Preporučeno doziranje uvijek piše na vreći pakiranja, a u ovom slučaju iznosilo je 900 g / m³ betona. Skladištenje vlakana je također bitno, stoga se treba čuvati na čistoj površini, u suhim uvjetima i u zatvorenom prostoru ne duže od dvije godine. Korištena polipropilenska vlakna prikazana su na Slici 7.



Slika 7: Polipropilenska vlakna (Autor: Nikolina Edjut)

4.2.4. Vunena vlakna

Vunena vlakna korištena u ovom istraživanju dobivena su tretiranjem ovčje vune te služe kao zamjena polipropilenskih vlakana (PP). Prvobitno je bilo važno da se ovčja vuna dobro ispere od prljavštine i prašine. Vuna i nakon procesa čišćenja može u sebi sadržavati male nečistoće (Slika 8.), zbog toga što ju je teško isprati, a još teže detaljno očistiti ako se ne koriste posebne četke za raščešljavanje takvih materijala. Međutim mala količina prljavštine nakon pranja nije uvelike relevantna za ispitivanje.



Slika 8: Vunena vlakna sa malom količinom nečistoće (Autor: Nikolina Edjut)

Nakon procesa čišćenja slijedio je korak sušenja vunenih vlakana kod kojeg je važno da se mokra vuna ravnomjerno rasprostire na ravnoj podlozi kako bi se cjelokupno posušila te da ne bi došlo do pojave pljesni na mjestima kojima nisu dobro osušena.

4.2.5. Prirodni agregat

Pri spravljanju ove mješavine korištene su tri različite frakcije prirodnog agregata. Frakcije 0 - 4 mm, 4 - 8 mm i 8 - 16 mm. Sav agregat je marke Holcim, nabavljen u vrećama od 25 kilograma. Količina potrebnog agregata unaprijed je proračunata uzimajući u obzir vlažnost agregata i apsorpciju agregata. Na Slici 9. prikazani su korišteni prirodni agregati separirani po frakcijama.

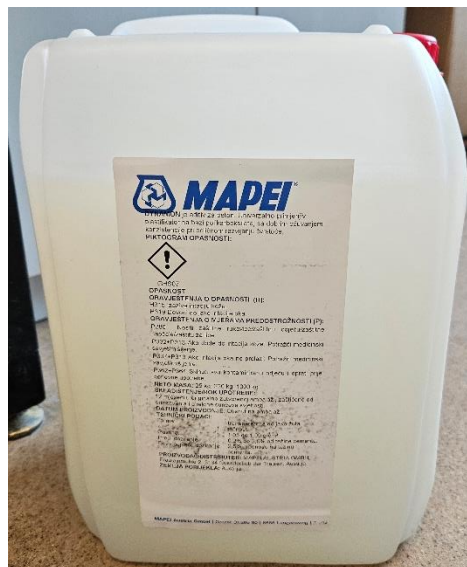


Slika 9: Prirodni agregati (Autor: Nikolina Edjut)

4.2.6. Superplastifikatori

Superplastifikatori su kemijski spojevi koji omogućuju proizvodnju betona sa približno 30 % manjim udjelom vode. Njihovo dodavanje omogućuje smanjenje vodocementnog omjera. Superplastifikatori se koriste kada se želi usporiti vezivanje i stvrdnjavanje betona, što je najčešći slučaj pri ekstremno visokim ili niskim temperaturama zraka. [14]

Superplastifikator koji se koristio u pripremi mješavina za potrebe ovog rada bio je MAPEI DYNAMON SF 16 S, vidljiv na Slici 10. Dynamon je aditiv za beton koji je univerzalno primjenjiv na bazi polikarboksilata, te ima odlično očuvanje konzistencije pri razvijanju čvrstoće. Čvrstoća se povećava kada je omjer vode i cementa manji, zbog toga što rezultira nižom poroznošću očvrstnalog betona, a time i boljom otpornošću na tlak. Proizvođač superplastifikatora preporučuje skladištenje u originalno zatvorenoj ambalaži zaštićenoj od sunčeve svjetlosti najviše 12 mjeseci od otvaranja. Doziranje koje se preporuča je od 0,2% do 2,0% težine cementa, a maksimalno dopušteno doziranje iznosi 2,5 % u odnosu na težinu proračunatog cementa.



Slika 10: Superplastifikator korišten u pripremanju betonskih mješavina (Autor: Nikolina Edjut)

4.3. Sastavi betonskih mješavina

Svi sastavi betonskih mješavina moraju se unaprijed točno proračunati, kako bi se postigla što točnija i ispravnija trajnosna i mehanička svojstva očvrstnulo betona. Sve granulacije agregata i postoci zastupljenih polipropilenskih vlakana uzimali su se u proračun s obzirom na to koja se betonska mješavina pripremala. Proces pripreme mješavina razlikuje se samo po tome dodaju li se polipropilenska vlakana ili se dodaju vunena vlakna.

Prvi korak u pripremi za miješanje betonskih mješavina je proces razvrstavanja agregata po frakcijama, ako već unaprijed nije podijeljeno. Tada slijedi precizno vaganje svih potrebnih agregata na vagi. Nakon što su agregati izvagani, kreće mjerenje vode te dodavanje potrebnih superplastifikatora.

Procedura miješanja referentnih mješavina

Prilikom miješanja referentnih mješavina važno je pratiti korake miješanja kako bi bilo pravilno zamiješano. U miješalicu se prvo dodaju svi suhi sastojci, cement i agregat te se pali miješalica i kreće miješanje od jedne minute. Nakon toga dodaje se voda s aditivima, s time da se svi aditivi prije trebaju rastopiti u pola litre vode. Slijedi miješanje od dodatne dvije minute uz postupno dodavanje polipropilenskih vlakana kroz rešetku na poklopcu miješalice.

Procedura miješanja mješavine s vlaknima

Prilikom miješanja mješavine s vlaknima prvi korak je bio stavljanje agregata u miješalicu, nakon toga se dodalo pola litre vode te se pokrenula miješalica na trideset sekundi. Sljedeći korak je bio dodavanje cementa i ostatka vode, s time da su u vodi prije otopljeni aditivi u omjeru 1:4. Kao završni korak pokrenuta je miješalica trajanja dvije minute te su postupno dodavala vunenih vlakana kroz rešetku na poklopcu miješalice.

Na Slici 11. prikazana je mješavina s dodatkom 2,0% polipropilenskih vlakana, direktno izvađena iz miješalice prije postupka ugradnje u kalupe i vibriranja na vibro stolu.



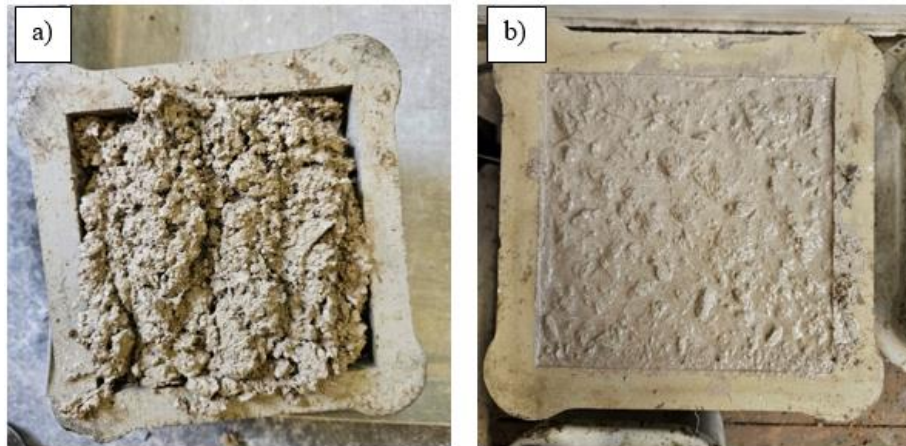
Slika 11: Betonska mješavina s polipropilenski vlaknima (Autor: Nikolina Edjut)

Nakon što je zamiješana mješavina, slijedila je ugradnja iste u za to predviđene kalupe. Kalupi su se prije umetanja betonske mješavine morali namazati uljem, kako bi se očvrsnuli betonski uzorci mogli lakše izvaditi iz kalupa.

Idući korak nakon ugradnje betonske mješavine bilo je postavljanje punih uzoraka na vibro stol te pokretanje istog. Vibro stol služi za vibriranje betonske mješavine kako bi se uklonile sve nepotrebne šupljine i pore iz mješavine, te kako bi mješavina dobila što veću gustoću sa što manje praznog prostora ispunjenog zrakom. Pojava velike količine praznog prostora utječe na svojstva betona tako da povećava poroznost i dovodi do većih temperaturnih razlika unutar betona, pošto se praznine pri visokim temperaturama zagrijavaju, a tijekom niskih temperatura hlade, dolazi do skupljanja i širenja betona te do pucanja istog.

Kao zadnji korak nakon ugradnje i vibriranja, uzorci su se ostavile na zraku 24h nakon čega su postavljene u bazene za naknadno očvršćivanje.

Na Slici 12 prikazane su ugrađene betonske mješavine u kalupe dimenzija 150*150*150mm. Na lijevoj strani pod a) nalazi se ugrađena betonska mješavina na kojoj nije provedeno vibriranje, a na desnoj b) strani nalazi se betonska mješavina nakon vibriranja na vibro stolu, gdje su istisnute sve nepotrebne šupljine i pore.



Slika 12: Ugradnja betonske mješavine a) prije vibriranja, b) poslije vibriranja (Autor: Nikolina Edjut)

Na Slici 13. prikazani su svi ispunjeni kalupi, za potrebe dvije betonske mješavine, koji služe za ispitivanje trajnosnih svojstava betona.

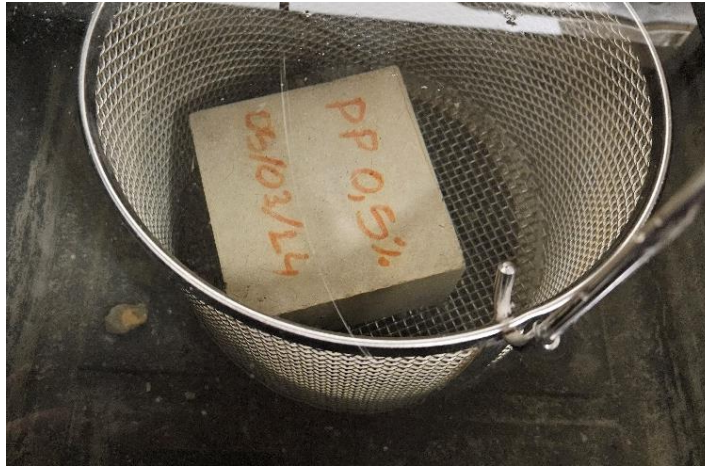


Slika 13. Ugrađene betonske mješavine u kalupe (Autor: Nikolina Edjut)

4.4. Ispitivanje svojstava betona

4.4.1. Ispitivanje poroznosti betona

Prije samog početka ispitivanja, betonski uzorci sušeni su u peći 24h na $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Uzorci su dimenzija $10*10*10$ cm uz dopušteno minimalno odstupanje od ± 1 mm. Potrebno je prvo izvagati potpuno suhe betonske uzorke, dokumentirati mase te ih uroniti u posudu pod vodom. Rešetkasta posuda u koju se uronja uzorak vidljiva je na Slici 14. Nakon što je uzorak postavljen u rešetkastu posudu, treba očitati masu potopljenog uzorka, a upravo to je masa uzorka nakon što su ispunjene sve pore uzorka. Izračun poroznosti zasniva se na omjeru mase uzorka prije uranjanja u vodu, tj. suhog uzorka i mase uzorka nakon uranjanja u vodu. Masa uzorka uronjenog u vodu je uvijek manja naspram suhe mase zbog djelovanja sile uzgona.



Slika 14: Postupak ispitivanja betonskog uzorka na poroznost (Autor: Nikolina Edjut)

4.4.2. Analiza ispitivanja poroznosti betona

Nakon pravilne ugradnje i njege betonskih uzoraka, slijedi ispitivanje poroznosti. Ukupno je ispitano 15 uzoraka (3 uzorka po 5 mješavina). Na temelju rezultata zaključiti će se koja će betonska mješavina imati najveću poroznost, s obzirom na postotke dodanih vlakana. Dobiveni podaci mjerenja uzoraka prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2: Dobiveni podaci mjerenja poroznosti

Postotak dodanih vlakana (%)	Oznaka uzorka	Masa prije sušenja m_{zps} (g)	Masa uronjena u vodu m_w (g)	Masa poslije sušenja m_d (g)	Dimenzije (mm)
0,5%	1	2274,8	1325,22	2206,90	100,14*100,25*97,90
	2	2372,4	1365,06	2273,70	100,57*100,18*101,35
	3	2281,4	1342,66	2206,31	99,98*100,33*100,72
1,0%	1	2352,3	1349,70	2282,30	100,18*101,10*103,46
	2	2387,4	1371,55	2312,60	99,72*99,77*103,27
	3	2278,0	1301,67	2207,50	99,89*100,34*103,1
1,50%	1	2354,3	1252,83	2229,33	100,32*100,58*100,64
	2	2384,5	1260,72	2259,09	100,11*99,98*101,1
	3	2374,3	1251,83	2240,95	100,14*100,38*100,4
2,0%	1	2294,2	1238,15	2196,31	100,93*101,04*100,79
	2	2442,3	1303,22	2301,08	100,79*99,98*103,03
	3	2467,3	1325,69	2349,46	102,82*102,53*101,02
0,5% W	1	2301,6	1534,2	2248	100,0*98,1*101,2
	2	2357,6	1602,3	2299,8	98,1*99,0*101,5
	3	2289,1	1531,4	2239,1	90,5*100,5*97,6

Poroznost betonskih uzoraka računa se preko izraza (1):

$$P = \frac{V_{pora}}{V_{ukupno}} \quad (1)$$

gdje je:

P = poroznost uzorka

V_{pora} = volumen pora uzorka

V_{ukupno} = ukupni volumen uzorka

Volumen pora računa se kao omjer mase pora i gustoće vode, prema izrazu (2):

$$V_{pora} = \frac{m_{zps} - m_d}{\rho_{vode}} \quad (2)$$

gdje je:

V_{pora} = volumen pora

m_{zps} = masa zasićena površinsko suho

m_d = suha masa uzorka

ρ_{vode} = gustoća vode (1 g/cm³)

Ukupni volumen se računa prema izrazu (3):

$$V_{ukupni} = \frac{m_d}{\rho_{betona}} \quad (3)$$

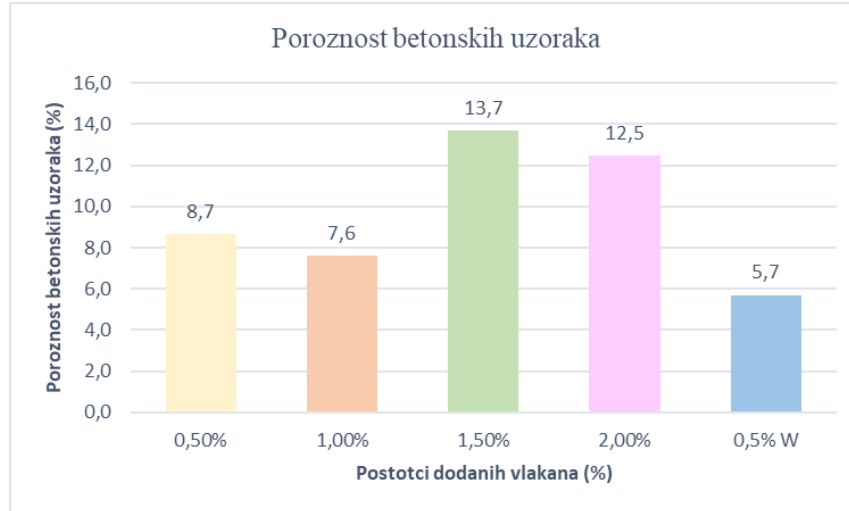
gdje je:

V_{ukupni} = ukupni volumen uzorka

m_d = suha masa uzorka

ρ_{betona} = gustoća betona ($\rho = 2,4$ g/cm³)

Iz dijagrama na Slici 15. očitava se da najmanju poroznost ima betonska mješavina s dodatkom vunenih vlakana 0,5% W, iznosi 5,7%, dok najveću poroznost ima mješavina PP 1,5% iznosa 13,7%. Mješavina 0,5% W je za 41,60% manja od mješavine PP 1,5%, a mješavina 0,5% W je za 65,5% manja od mješavine PP 0,5%. Rezultati su prema očekivanjima, zbog toga što mješavina s vunenim vlaknima ima najveću gustoću, a time i manji postotak zarobljenih pora i šupljina.



Slika 15: Poroznost betonskih uzoraka (Autor: Nikolina Edjut)

4.4.3. Ispitivanje otpornosti betona na habanje - metoda Böhme

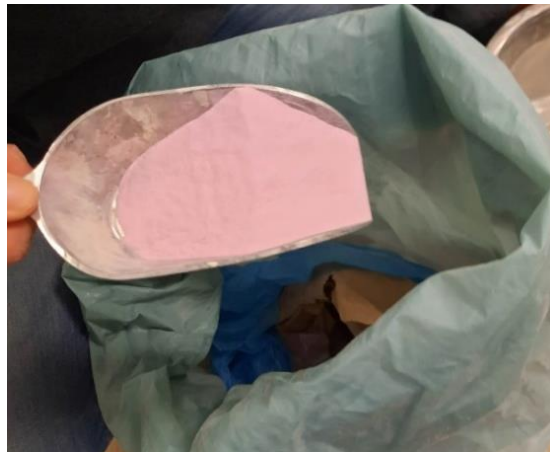
Ispitivanje otpornosti betonskih uzoraka na habanje provedeno je prema metodi Böhme prateći normu HRN EN 13892- 3. Ispitivanje se zasniva na principu postavljanja uzoraka na metalni rotacijski stol, koji svojim određenim brojem ciklusa izaziva trošenje uzoraka te dovodi do smanjenja volumena i mase istog. Prije početka ispitivanja svakom uzorku potrebno detaljno izmjeriti dimenzije stranica jer se krajnji rezultat habanja pokazuje ili kao promjena volumena betona prije i nakon provedenih 20 ciklusa (4 početna + 16 normiranih) ili kao gubitak mase uzoraka prije i nakon provedenih ciklusa

Uređaj se sastoji od rotacijskog metalnog stola, držača uzorka, utega za nanošenje opterećenja te metalnog kućišta koji sadrži ekran na kojem se prikazuje broj ciklusa i okretaja te gumb za paljenje i gašenje. Svi dijelovi prikazani su na Slici 16.



Slika 16.: Uređaj za ispitivanje habanja Bohme metodom (Autor: Nikolina Edjut)

Ispitivanje se provodi tako da se na rotacijski metalni stol, tj. na rotacijsku brusnu ploču ravnomjerno posipa 20g abrazivnog pijeska. Pri ispitivanju za potrebe ovog rada korišten je aluminijev oksid roza boje vidljiv na Slici 17., koji omogućuje habanje uzoraka.



Slika 17: Brusni prah - aluminijev oksid (Autor: Nikolina Edjut)

Uređaj je prije pokretanja potrebno kalibrirati na 22 okretaja. U predviđeni okvir postavlja se kocka, kao što je prikazano na Slici 18, koju se potrebno zategnuti držačem tako da se poluga okrene u smjeru kazaljke na satu. Nakon što su odrađeni svi koraci potrebni za

pravilan rad uređaja, uređaj se pokreće pritiskom gumba, te se sam automatski zaustavlja nakon što je odrađen 1 ciklus.

Polugu je tada potrebno okrenuti u smjeru obrnutom od kazaljke na satu kako bi se uzorak mogao izvaditi i očistiti nakon čega mu se mjeri gubitak mase.



Slika 18.: Uzorak postavljen u kalup za vrijeme rada uređaja (Autor: Nikolina Edjut)

Za potrebe ovog diplomskog rada napravljeno je po tri uzorka od svake mješavine, što je i minimalan broj uzoraka od kojih se sastoji jedna serija uzoraka potrebnih za ispitivanje.

Prema normi dimenzija uzoraka je $71 \pm 1,5$ mm. Radi istrošenosti kalupa za ugradnju, sve kocke nisu bile istih dimenzija. Budući da je definirano dopušteno odstupanje dimenzija, uzorke je trebalo izbrusiti kako bi stali u držač za ispitivanje na rotacijskom stolu.

Svaki uzorak je haban kroz 16 ciklusa rotacije. Poslije svakog ciklusa, uzorak je bilo potrebno očistiti i izvagati, kako bi se na kraju mogao vidjeti ukupni izgubljeni volumen, tj. ukupna izgubljena masa pojedinog uzorka.

Pijesak korišten u prethodnom ciklusu bilo je potrebno usisati te se nanosao novi kako bi bili sigurni da u njemu nema mikro ostataka betona koji ispada uslijed habanja. Svaki idući uzorak bio je postavljen u okvir, ali zarotiran za 90° , tako da donja strana uzorka uvijek ostaje na rotacijskoj brusnoj ploči na čijoj je strani najbolje vidljivo habanje prikazano na Slici 19.



Slika 19: Prikaz uzoraka nakon 16 ciklusa habanja (Autor: Nikolina Edjut)

4.4.4. Analiza rezultata ispitivanja betona na habanje

Nakon provedenih 16 ciklusa habanja, izmjerene su i zabilježene konačne mase kockica uzoraka. Ukupno je ispitano 15 uzoraka, po 3 uzorka od svake betonske mješavine (5 betonskih mješavina). Masa izgubljena tijekom procesa habanja računa se tako da se početnoj masi uzorka oduzme konačna masa uzorka. U Tablici 3 prikazan je gubitak mase svakog od uzoraka kroz procese ciklusa. Neke od uzoraka nije bilo moguće ispitati i nakon provedene obrade površine ploha, zbog lošeg površinskog stanja kockice. Takvi uzorci su u budućim tablicama označeni sa oznakom “/” te se ne budu uzimali u razmatranja pri proračunu dobivenih rezultata ispitivanja.

Tablica 3: Rezultati habanja materijala uzoraka (Autor: Nikolina Edjut)

Broj uzoraka	Masa prije sušenja m_{zps} (g)	Masa poslije sušenja m_d (g)	4 ciklus (g)	8 ciklus (g)	12 ciklus (g)	16 ciklus (g)	Dimenzije (mm)	Postotak dodanih vlakana
1	911,0	880,5	/	/	/	/	73,05*73,69*74,11	0,5%
2	889,5	859,9	857,0	854,2	852,3	848,2	68,30*75,47*74,09	
3	880,1	851,0	849,8	848,7	846,0	841,9	72,84*75,72*73,25	
1	802,5	770,3	/	/	/	/	71,84*73,33*73,12	1,0%
2	843,6	812,8	807,3	803,2	799,6	794,4	72,66*71,04*73,75	
3	866,0	833,9	829,4	826,0	824,1	821,3	72,36*78,49*74,23	
1	847,8	819,8	815,2	814,7	812,9	811,0	79,34*72,48*74,30	1,50%
2	895,5	860,9	854,8	851,9	849,5	846,9	72,72*71,12*82,83	
3	885,7	852,5	852,3	852,1	850,1	849,9	65,69*74,84*81,15	
1	857,8	817,6	815,4	811,7	809,4	806,5	72,52*73,51*72,56	2,0%
2	931,1	898,1	896,2	894,5	893,4	892,4	72,69*68,82*72,95	
3	843,5	809,1	808,4	805,4	803,7	802,1	72,19*73,49*73,80	
1	938,7	889,5	881	879,1	877,1	876,4	74,13*71,52*72,36	0,5% W
2	851,1	806,7	804,1	801,4	799,6	798,6	67,2*74,20*71,32	
3	905,9	858,6	853,8	849,5	846	844,9	73,21*68,96*73,45	

Otpornost na habanje računa se prema formuli u izrazu (4), kao srednja vrijednost gubitka volumena ΔV :

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

gdje je:

A - otpornost na habanje ($\text{cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$),

Δm - gubitak mase nakon 16 provedenih ciklusa (g),

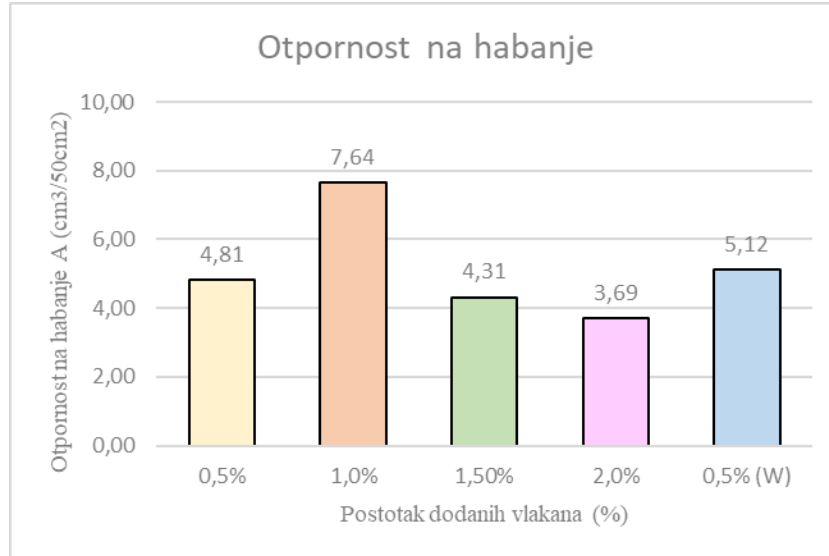
ρ - gustoća uzorka (g / cm^3)

U Tablici 4 prikazana je proračunata srednja otpornost na habanje betona svake mješavine. Svi proračuni provedeni su u Excelu.

Tablica 4: Proračun srednje otpornosti na habanje (Autor: Nikolina Edjut)

Broj uzoraka	Postotak dodanih vlakana	Početa masa (g)	Konačna masa (g)	Gubitak mase Δm (g)	Gustoća uzorka (g/cm^3)	Otpornost na habanje A ($\text{cm}^3/50\text{cm}^2$)
1	0,5%	880,5	/	/	/	4,81
2		859,9	848,2	11,7	2,22	
3		851,0	841,9	9,1	2,09	
1	1,0%	770,3	/	/	/	7,64
2		812,8	794,4	18,4	2,09	
3		833,9	821,3	12,6	1,95	
1	1,50%	819,8	811,0	8,8	1,90	4,31
2		860,9	846,9	14,0	1,98	
3		852,5	849,9	2,6	2,12	
1	2,0%	817,6	806,5	11,1	2,08	3,69
2		898,1	892,4	5,7	2,44	
3		809,1	802,1	7,0	2,05	
1	0,5% (W)	889,5	876,4	13,1	2,28	5,12
2		806,7	798,6	8,1	2,25	
3		858,6	844,9	13,7	2,28	

Na grafu na Slici 20 prikazana je usporedba rezultata ispitivanja otpornosti na habanje za betone s različitim postocima dodanih polipropilenskih i vunenih vlakana. Najmanju srednju otpornost na habanje ima beton s najvišim postotkom PP od 2,0 %. U ovom slučaju najveću srednju otpornost na habanje ima beton s dodatkom PP 1,0 %, zbog toga što su kockice prilikom ugradnje lošije ugrađene te je stoga betonska mješavina nakon sušenja imala velike količine rastresitog materijala koji je znatno ispadao tijekom habanja Böhme metodom.



Slika 20: Usporedba rezultata ispitivanja otpornosti na habanje (Autor: Nikolina Edjut)

Dijagram na Slici 21 prikazuje tijek trošenja uzoraka tijekom procesa habanja. Za svaku od mješavina izračunata je srednja masa te su međusobno uspoređene. Svaka od mješavina ovisno o postotku PP označena je sa drugom bojom radi lakšeg praćenja. Iz dijagrama se može očitati da mješavina PP 1,0 % ima znatno manju srednju težinu od ostalih mješavina. Sve su mješavine masu gubile približno linearno uz manja odstupanja. Najveći gubitak mase javio se kod mješavine PP 1,0 %, gdje je izgubljeno 11,6 g ili 1,9 % početne mase, dok je najmanji gubitak ostvareno u betonskoj mješavini PP 2,0 %, gdje je izgubljeno 7,9 g ili 0,95 % početne mase. Mješavina s dodatkom vlakana izgubila je više mase od mješavine s dodatkom polipropilenskih vlakana. Usporedba gubitka srednje vrijednosti mase uzorka za svaku vrstu betonske mješavine s dodatkom različitih postotaka polipropilenskih i vunenih vlakana prikazana je na Slici 22.

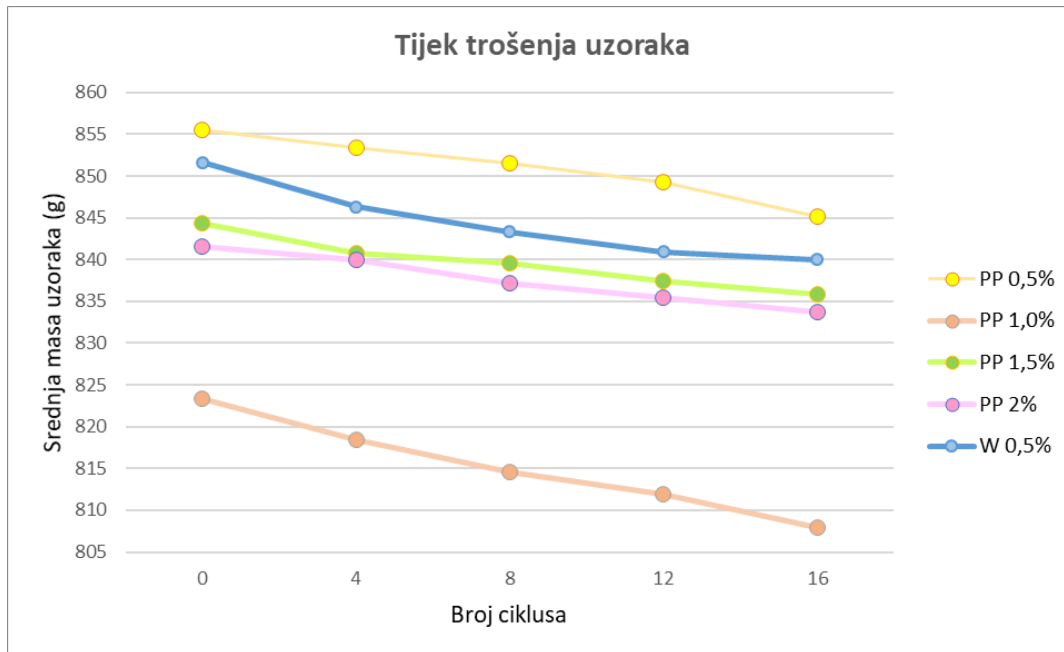
Postotak izgubljene mase uzorka računao se tako da se srednji gubitak mase podijelio sa srednjom masom uzorka, prema izrazu (5):

$$m (\%) = \frac{\Delta m_{gubitak, sr}}{\Delta m_{sr}} \quad (5)$$

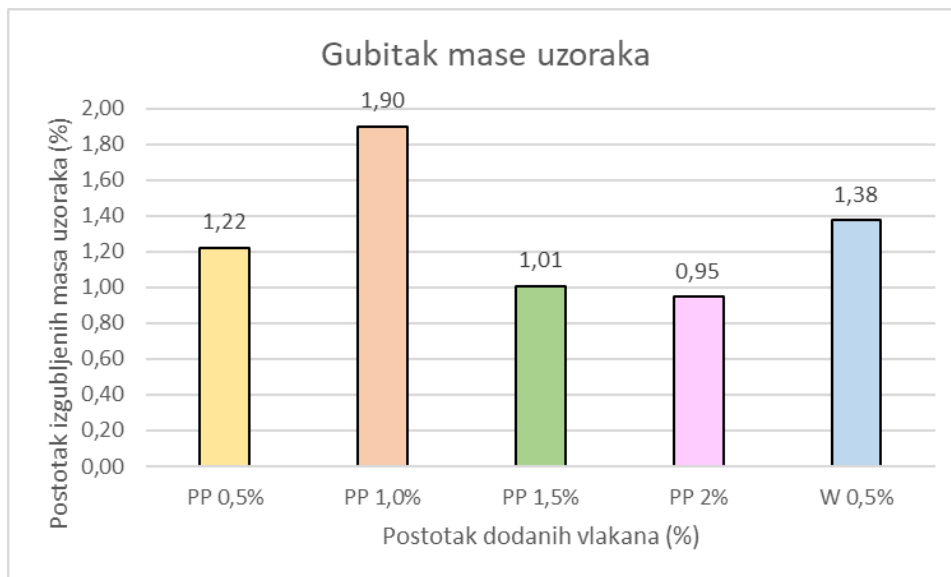
gdje je:

$m (\%)$ = postotak izgubljene mase

$\Delta m_{gubitak, sr}$ = srednji gubitak mase

Δm_{sr} = srednji gubitak mase

Slika 21: Dijagram tijeka trošenja uzoraka (Autor: Nikolina Edjut)



Slika 22: Prikaz postotka izgubljenih masa uzoraka (Autor: Nikolina Edjut)

4.4.5. Ispitivanje plinopropusnosti betona

Ispitivanje plinopropusnosti betonskih uzoraka provedeno je prema Cembureau metodi prateći normu UNI 58-E0031. Kod ispitivanja važno je pratiti i mjeriti vrijeme protoka mjehurića plina kroz uzorak betona dok je plin stlačen pod određenim tlakom.

Da bi rezultati bili pouzdani i precizni potrebno je kvalitetno i pravilno izraditi uzorke betona, jer ukoliko je uzorak napuknut, loše ugrađen ili je vidljiva segregacija, rezultati nisu mjerodavni. Uslijed loše pripreme betonskog uzorka neće se moći mjeriti vrijeme prolaska mjehurića jer će zrak pod tlakom samo proći kroz uzorak.

Za potrebe ispitivanja izrađen je betonski valjak visine 300 mm i promjera 150mm. Uzorak starosti 28 dana njegovan je u vodi temperature 20 ± 2 °C, 27 dana, nakon čega je izvađen i osušen, kako pore ne bi bile ispunjene vodom i narušavale protok plina kroz uzorak. Betonski valjak ispilio se je na tri djela kako bi se dobili uzorci promjera 150 mm i visine 50 mm, prikazano na Slici 23.



Slika 23. Ispiljeni uzorci spremni za ispitivanje (Autor: Nikolina Edjut)

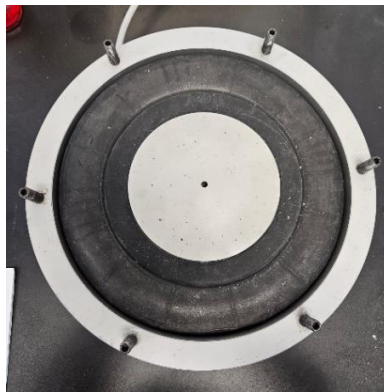
Instrument za ispitivanje sastoji se od standardizirane zatvorene ćelije u koju se umeće uzorak, zračnica, aparatura za prijenos i kontrolu tlaka fluida te 3 epruvete sa aspiratorima. Također, za pravilno izvođenje mjerenja potrebni su još: sapunica, štoperica, kompresor i boca s plinom. Zbog sigurnosnih razloga, za provođenje ispitivanja u laboratoriju na Građevinskom fakultetu koristio se dušik umjesto kisika, zbog toga što ima manju inerciju,

a time dolazi i do manje vjerojatnosti za pojavom nesreće. Aparatura za provedbu ispitivanja prikazana je na Slici 24.



Slika 24. Aparatura za ispitivanje plinopropusnosti: zračna komora, digitalni manometar, mjeraci protoka, sapunica i ventili (Autor: Nikolina Edjut)

Zračnicu je potrebno napuhati na 0,1 bar kako bi dobila pravilan oblik u koji se može utisnuti betonski uzorak. Kada se uzorak utisne, zračnica se stavi u ćeliju tako da ventil zračnice viri van iz kalupa. Postavi se poklopac i ćelija se ujednačeno pričvrsti sa 6 vijaka. Pravilno postavljena zračnica vidi se na Slici 25. Zračnicu treba napuhati tlakom između 6 i 7 bara. Kompresor potreban za tlačenje zraka prikazan je na Slici 26.



Slika 25. Postavljena zračnica unutar ćelije (Autor: Nikolina Edjut)



Slika 26. Kompresor za tlačenje zraka (Autor: Nikolina Edjut)

Nakon što je zračnica napuhana otvara se dotok plina pri čemu treba paziti da je tlak iz boce smanjen na maksimalno 10 bara te treba upaliti digitalan tlakomjer koji se nalazi na zidu. Epruvete se pune sapunicom, odabrani ventil se otvori. što znamo tako što je položaj ventila paralelan sa cjevčicom te se nakon toga stiskanjem aspiratora na dnu odabrane epruvete stvaraju mjehurići potrebni za mjerenje protoka plina (Slika 27). Kada se ugleda nastali mjehurić potrebno je pokrenuti mjerenje vremena na štoperici, te pratiti put mjehurića sve dok ne prođe zadnju baždarenu oznaku.



Slika 27.: Prikaz mjeroдавnog mjehurića za ispitivanje (Autor: Nikolina Edjut)

Ako je vrijeme prolaska mjehurića do najgornje baždarene oznake manje od 20s treba ponoviti ispitivanje na epruveti većeg volumena, a ako je vrijeme duže od 60s mjerenje treba ponoviti na epruveti manjeg volumena. Potrebno je napraviti dva uzastopna mjerenja jednom kada se pronađe veličina epruvete koja odgovara vremenu prolaska mjehurića. Ukoliko se dva uzastopna mjerenja ne razlikuju međusobno jedan od drugog za više od 3% tada se to vrijeme uzima kao mjerodavno s kojim se onda provode daljnji proračuni.

Za jedan uzorak obavljena su mjerenja za tlak od 1.5, 2 2.5, 3 i 3.5 bara koristeći istu proceduru.

4.4.6. Analiza ispitivanja plinopropusnosti betona

Plinopropusnost betona ispitana je na 15 uzoraka, 3 uzoraka za po 5 mješavina. Uzorci za ispitivanje dobiveni su nakon što se valjak visine 300 mm ispilio na 3 djela. Većina uzoraka zadovoljavala je ispitivanje plinopropusnosti svojim rezultatima, međutim par uzoraka nije davalo mjerodavne podatke mjerenja plinopropusnosti, zbog toga što je uzorak imao preveliku poroznost te je plin samo prošao kroz betonski uzorak. Uzorci koje nije bilo moguće pravilno ispitati zabilježeni su u Tablici 5 sa oznakom „ / “. Pravilno provedena ispitivanja smatraju se onima u kojima je mjehurić zraka putovao epruetom trajanja od 20 s do 60 s.

U Tablici 5 prikazani su svi dobiveni rezultati ispitivanja plinopropusnosti na betonskim uzorcima.

Tablica 5: Rezultati ispitivanja plinopropusnosti

		TLAK				
		1,5	2	2,5	3	3,5
0,5%	volumen (m ³)	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	/	/
	vrijeme (s)	42	31	24	/	/
0,5%	volumen (m ³)	1,00E-05	2,50E-05	2,50E-05	2,50E-05	1,00E-04
	vrijeme (s)	23	37	27	21	50
0,5%	volumen (m ³)	2,50E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
	vrijeme (s)	21	53	36	24	17
1,0%	volumen (m ³)	1,00E-05	2,50E-05	2,50E-05	1,00E-04	/
	vrijeme (s)	20	31	19	40	35
1,0%	volumen (m ³)	1,00E-05	/	/	/	/
	vrijeme (s)	5	/	/	/	/
1,0%	volumen (m ³)	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	/
	vrijeme (s)	56	35	29	15	/
1,5%	volumen (m ³)	1,00E-05	2,50E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
	vrijeme (s)	15	20	70	54	44
1,5%	volumen (m ³)	2,50E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
	vrijeme (s)	21	66	46	48	25
1,5%	volumen (m ³)	2,50E-05	1,00E-04	1,00E-04	/	/
	vrijeme (s)	21	68	48	40	28
2,0%	volumen (m ³)	2,50E-05	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
	vrijeme (s)	22	90	66	44	34
2,0%	volumen (m ³)	2,50E-05	2,50E-05	2,50E-05	1,00E-04	1,00E-04
	vrijeme (s)	32	25	21	74	48
2,0%	volumen (m ³)	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
	vrijeme (s)	84	58	42	28	22
0,5% W	volumen (m ³)	1,00E-05	1,00E-05	2,50E-05	2,50E-05	1,00E-04
	vrijeme (s)	41	24	30	21	67
0,5% W	volumen (m ³)	1,00E-05	2,50E-05	2,50E-05	1,00E-04	1,00E-04
	vrijeme (s)	25	29	21	72	45
0,5% W	volumen (m ³)	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	2,50E-05	2,50E-05
	vrijeme (s)	34	28	23	29	24

U Tablici 6. prikazani su rezultati protoka plina dobiveni proračunom, koji se koriste za utvrđivanje vrijednosti protoka fluida, a proračun je proveden pomoću izraza (6):

$$Q_f = \frac{V_f}{(T_{0-1})} \quad (6)$$

gdje je:

Q_f = protok plina (m³/s),

V_f = volumen epruete kojim se provodilo mjerenje,

T_{0-1} = vrijeme potrebno da mjehurić prođe od dna do vrha epruete.

Tablica 6: Prikaz dobivenih rezultata protoka plina kroz betonski uzorak

Oznaka uzorka	Postotak dodanih vlakana		1,5 bara	2 bara	2,5 bara	3 bara	3,5 bara
1	0,5%	PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	2,38E-06	3,23E-06	4,17E-06	/	/
2		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	4,35E-07	6,76E-07	9,26E-07	1,19E-06	2,00E-06
3		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	1,19E-06	1,89E-06	2,78E-06	4,17E-06	5,88E-06
1	1,0%	PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	5,00E-07	8,06E-07	1,32E-06	2,50E-06	/
2		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	2,00E-06	/	/	/	/
3		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	1,79E-06	2,86E-06	3,45E-06	6,67E-06	/
1	1,5%	PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	6,67E-07	1,25E-06	1,43E-06	1,85E-06	2,27E-06
2		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	1,19E-06	1,52E-06	2,17E-06	2,08E-06	4,00E-06
3		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	1,19E-06	1,47E-06	2,08E-06	/	/
1	2,0%	PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	1,14E-06	1,11E-06	1,52E-06	2,27E-06	2,94E-06
2		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	7,81E-07	1,00E-06	1,19E-06	1,35E-06	2,08E-06
3		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	1,19E-06	1,72E-06	2,38E-06	3,57E-06	4,55E-06
1	0,5% W	PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	2,44E-07	4,17E-07	8,33E-07	1,19E-06	1,49E-06
2		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	4,00E-07	8,62E-07	1,19E-06	1,39E-06	2,22E-06
3		PROTOK FLUIDA Q_f (m^3/s)	2,94E-07	3,57E-07	4,35E-07	8,62E-07	1,04E-06

Koeficijent plinopropusnosti za svaki od tlakova (1,5 bara, 2,0 bara, 2,5 bara, 3,0 bara i 3,5 bara) dobiven je pomoću gore izračunatog protoka plina prema izrazu (7):

$$K_f = \frac{2 * Q_f * p_0 * H * \eta}{A * (p^2 - p_a^2)} \quad (7)$$

gdje je:

Q_f = protok plina (m^3/s),

H = visina uzorka (m),

A = površina poprečnog presjeka betonskog uzorka (m^2),

p = apsolutni ulazni tlak (Pa),

p_a i p_0 = atmosferski tlak (Pa),

η = dinamička viskoznost fluida (za dušik $1,75 * 10^{-5} N/m^2$).

U Tablici 7. numerički su prikazani rezultati koeficijenata plinopropusnosti dušika, a njihov grafički prikaz vidi se na dijagramu na Slici 28, gdje su prikazani prosječni koeficijenti plinopropusnosti koji su se dobili po izrazu (8):

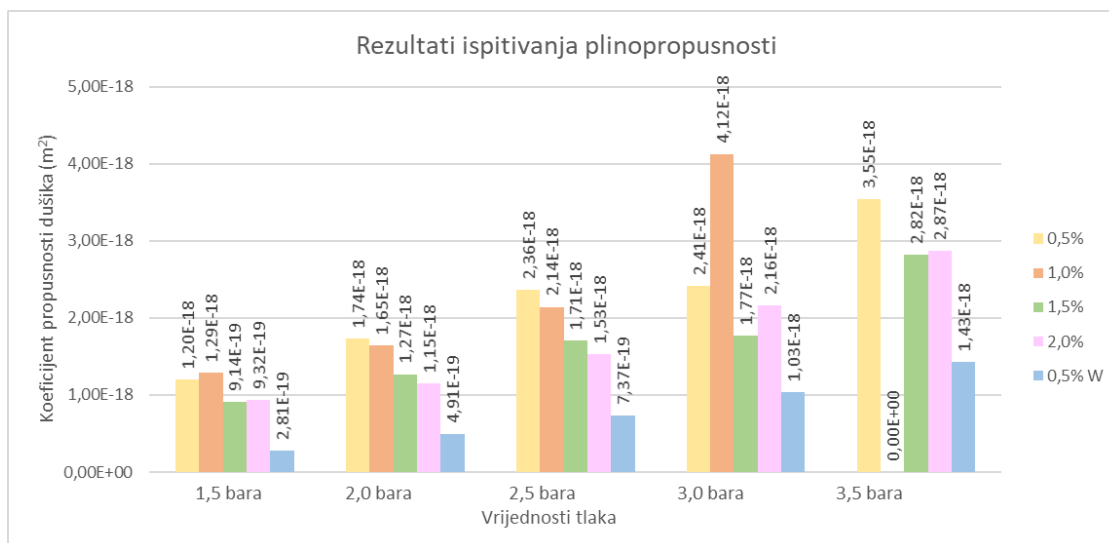
$$K = \frac{K_{1,5} + K_{2,0} + K_{2,5} + K_{3,0} + K_{3,5}}{5} \quad (8)$$

gdje su:

$K_{1,5}$, $K_{2,0}$, $K_{2,5}$, $K_{3,0}$ i $K_{3,5}$ = koeficijenti propusnosti za zadane tlakove.

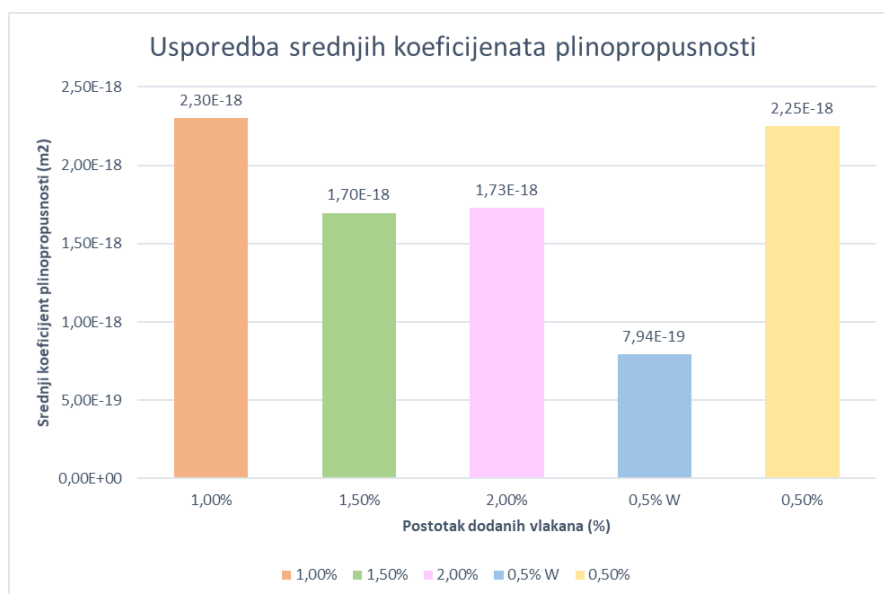
Tablica 7: Numerički rezultati plinopropusnosti betonskih uzoraka

Oznaka uzorka	Postotak dodanih vlakana		1,5 bara	2 bara	2,5 bara	3 bara	3,5 bara
1	0,5%	KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	2,14E-18	2,90E-18	3,75E-18	/	/
2		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	3,91E-19	6,08E-19	8,33E-19	1,07E-18	1,80E-18
3		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	1,07E-18	1,70E-18	2,50E-18	3,75E-18	5,29E-18
1	1,0%	KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	4,50E-19	7,26E-19	1,18E-18	2,25E-18	/
2		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	1,80E-18	/	/	/	/
3		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	1,61E-18	2,57E-18	3,10E-18	6,00E-18	/
1	1,5%	KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	6,00E-19	1,12E-18	1,29E-18	1,67E-18	2,04E-18
2		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	1,07E-18	1,36E-18	1,96E-18	1,87E-18	3,60E-18
3		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	1,07E-18	1,32E-18	1,87E-18	/	/
1	2,0%	KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	1,02E-18	1,00E-18	1,36E-18	2,04E-18	2,65E-18
2		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	7,03E-19	9,00E-19	1,07E-18	1,22E-18	1,87E-18
3		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	1,07E-18	1,55E-18	2,14E-18	3,21E-18	4,09E-18
1	0,5% W	KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	2,19E-19	3,75E-19	7,50E-19	1,07E-18	1,34E-18
2		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	3,60E-19	7,76E-19	1,07E-18	1,25E-18	2,00E-18
3		KOEF. PLINOPROPUSNOSTI K_f (m^3/s)	2,65E-19	3,21E-19	3,91E-19	7,76E-19	9,37E-19



Slika 28: Grafički rezultati ispitivanja plinopropusnosti betona (Autor: Nikolina Edjut)

Srednja vrijednost koeficijenta K plinopropusnosti usvaja se kao konačan rezultat ispitivanja plinopropusnosti za svaku pojedinu betonsku mješavinu. Vrijednosti su prikazane na Slici 29. Prema tome, iz dijagrama se zaključuje da je betonska mješavina sa najvećim koeficijentom plinopropusnosti PP 1,0% dodanih vlakana vrijednosti $2,0E-18$, dok je mješavina s najmanjom plinopropusnosti bila s dodatkom vunenih vlakana 0,5% vrijednosti $7,94E-19$. Dobivenim rezultatom dokazuje se da betonska mješavina s dodatkom vunenih vlakana ima najmanju plinopropusnost s obzirom na sve druge mješavine, ne ovisno o količini puštenog plina. Najveća razlika javlja se pri tlaku od 1,5 bara kada mješavina PP 1,0% ima 4,59 puta veću plinopropusnost od betona W 0,5%.



Slika 29: Usporedba srednjih koeficijenata plinopropusnosti (Autor: Nikolina Edjut)

4.4.7. Ispitivanje vodopropusnosti betona

Ispitivanje prodora vode pod tlakom provedeno je prateći normu HRN EN 12390-8. Ispitivanje se radi na principu prodora vode kroz betonski uzorak pod određenim tlakom. Uređaj za ispitivanje sastoji se od čeličnog postolja i okvira, na kojima se nalaze navoji pomoću kojih se postavljen uzorak pritisne s gornje strane, a s donje strane se nalaze gumene brtve koje osiguravaju da voda pod tlakom može prodrijeti u uzorak u smjeru obrnutom od sile gravitacije. Također, na postolju se nalaze ventili, mjerac tlaka vode i prozirne birete koje su graduirane, na kojima se može vidjeti količina vode koja je propuštena, koje služe za drugu metodu mjerenja prodora vode pod tlakom (Slika 30).



Slika 30: Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti metodom mjerenja dubine prodora vode (Autor: Nikolina Edjut)

Ispitivanje se provodi na betonskim uzorcima dimenzija 150*150*150 mm, uz dopuštena minimalna odstupanja od ± 2 mm. Uzorak je njegovan 27 dana u vodi na temperaturi 20 ± 2 °C, a ispitan je pri starosti od 28 dana. Prvi korak je postavljanje gumenih brtvi na postolje te puštanje vode iz vodovoda dok se postolje ne ispuni. Nakon toga postavljaju se

kocke na postolje pri čemu treba paziti da strana smjera ugradnje betona u betonske uzorke ne bude izložena tlaku vode.

Preporuča se također da se strana koja bude izložena tlaku vode malo ohrapavi čeličnom četkom kako bi se umanjile nepravilnosti na površini te zatezanje istih okretanjem navoja. Jednom kada su kocke pravilno postavljene okreće se navoj, čime započinje proces prodora vode kroz betonski uzorak.

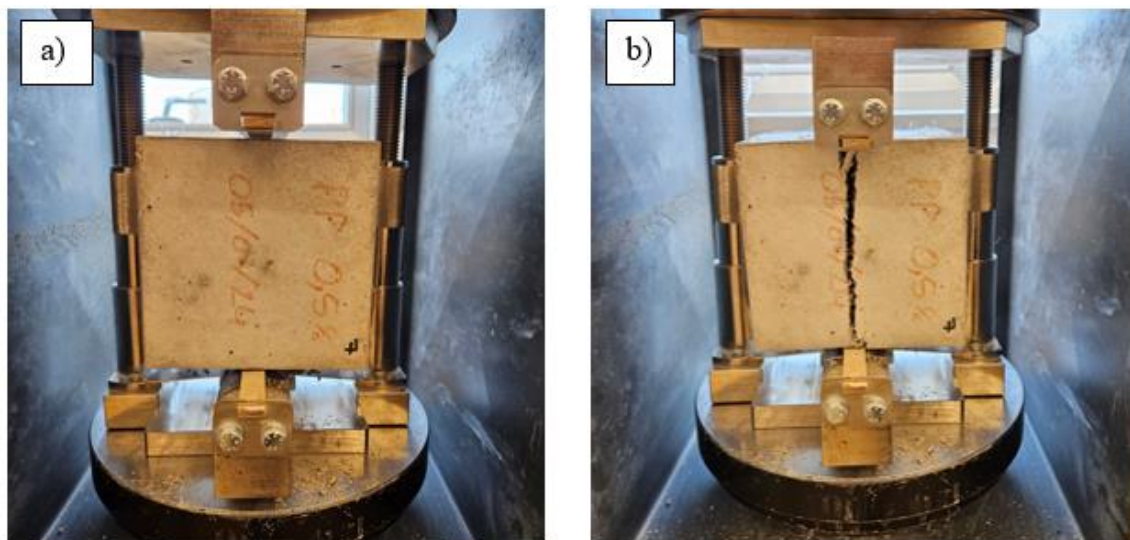
Uzorak treba biti opterećen tlakom vode od 500 ± 50 kPa za vrijeme trajanja vremenskog perioda 72 ± 2 h. Opterećeni uzorci prikazani su na Slici 31.



Slika 31: Uzorci opterećeni u uređaju za ispitivanje vodopropusnosti (Autor: Nikolina Edjut)

Nakon toga uzorak je jedan po jedan odbrtvljen te je počišćena podloga koja je bila izložena vodi kako bi se skinuo tanki film vode. Nakon toga uzorak se cijepa u preši za ispitivanje čvrstoće.

Uzorak se cijepa okomito na stranu koja je bila izložena tlaku vode, tako da je ta strana okrenuta prema dolje (Slika 32).



Slika 32: Cijepanje uzoraka a) Uzorak opterećen prije ispitivanja, b) Uzorak poslije cijepanja
(Autor: Nikolina Edjut)

Nakon cijepanja uzorka markerom je potrebno zabilježiti razina prodora vode i to što prije, jer se uzorak izložen zraku vrlo brzo suši i nakon 5 minuta trag vode više nije vidljiv. Označena razina prodora vode u uzorak prikazana je na Slici 33.



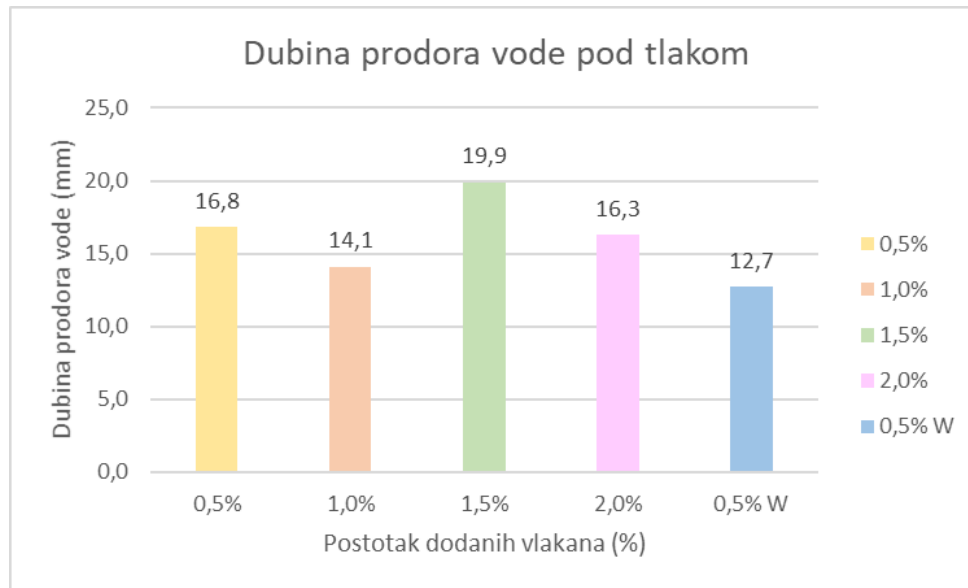
Slika 33: Označena dubina prodora vode (Autor: Nikolina Edjut)

4.4.8. Analiza ispitivanja vodopropusnosti betona

Nakon pravilne ugradnje i njegovanja, uzorci se stavljaju u uređaj za mjerenje prodora vode pod tlakom te se ostavljaju podvrgnuti tlačenju vode 72 sata. Tlak kojim su se tlačile kocke bio je pritiskom 5,5 bara. Ispitivanje se provelo sve ukupno na 15 uzoraka. Pri završetku procesa tlačenja, uzorci se jedan po jedan cijepaju u uređaju za ispitivanje čvrstoće. Opterećenje uzorka nanosilo se brzinom od 0,06 MPa/s. Ispitivanje se provodi sve dok uzorak ne pukne, nakon čega se treba markerom zabilježiti najveća dubina vode koja je prodjela u kocku i sila konačna sila pri kojoj je došlo do cijepanja uzorka. Rezultati dobiveni ispitivanjem, numerički su prikazani u Tablici 8, a grafički su prikazani na dijagramu na Slici 34.

Tablica 8: Rezultati ispitivanja dubine prodora vode

	Dubina prodora (mm)	Vlačna sila (kN)	
1	23,4	119,2	0,5%
2	15,4	102,6	
3	11,6	104,4	
1	12,4	99,41	1,0%
2	12,6	134,1	
3	17,3	117,4	
1	21,9	108,8	1,5%
2	17,5	126,1	
3	20,3	130,1	
1	16,4	100,1	2,0%
2	16,3	126,9	
3	16,1	120,4	
1	/	87,6	0,5% W
2	18,1	109,1	
3	7,36	82,3	

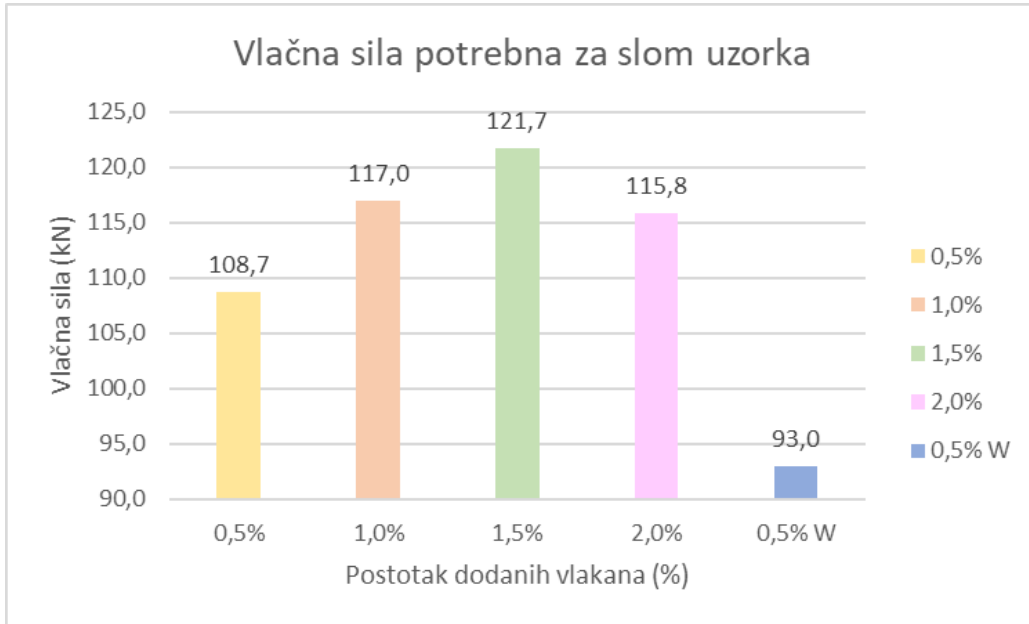


Slika 34: Prikaz dubine prodora vode pod tlakom (Autor: Nikolina Edjut)

Iz dijagrama na Slici 34 vidi se da je najveći prodor vode zabilježen kod betonske mješavine PP 1,5% gdje prosječna dubina prodora vode iznosi 19,9 mm. Suprotno tome, najmanji prodor vode javlja se kod PP 0,5% s dodatkom vunenih vlakana s prosječnom vrijednosti od 12,7 mm. U prosjeku mješavina s dodatkom vunenih vlakana je prodjela u uzorak za 4,1 mm manje nego mješavina s dodatkom polipropilenskih vlakana.

Iz rezultata se zaključuje da se dodatkom vunenih vlakana poboljšava vodonepropusnost betona. Mogući razlog tome je to što vunena vlakna imaju znatno hrapaviju površinu vlakna od polipropilenskih vlakana, čime vlakna i beton bolje prijanjaju jedan za drugog. Također, mogući razlog je to što vunenih vlakana u 1% volumena mješavine ima mnogo više nego 1% polipropilenskih vlakana, čime se ujedno povećava i gustoća betonske mješavine, a time i smanjuje vodopropusnost betona, tj. prodor vode u betonsku mješavinu. Na dijagramu na Slici 35. prikazani su rezultati vlačnih sila u čijem trenutku je došlo do loma uzorka kocke. Najveća sila za slom uzorka bila je potrebna betonskoj mješavini PP 1,5%, dok je najmanja sila bila potrebna za mješavinu s vunenim vlaknima W 0,5%. Na temelju provedenih ispitivanja zaključuje se da vunena vlakna pridonose vodonepropusnosti betona, međutim za slom uzorka potrebna je najmanja sila među

ispitanim, srednje vrijednosti 93,0 kN. Najveću dubinu prodora i najveću silu potrebnu za slom uzorka imala je betonska mješavina PP 1,5%.



Slika 35: Dijagram vlačnih sila potrebnih za slom uzorka (Autor: Nikolina Edjut)

4.5. Ispitivanje vunenih vlakana

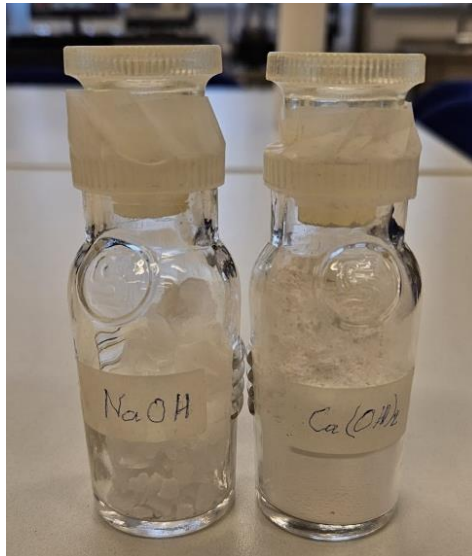
Cilj ovog ispitivanja bio je ispitati ponašanje vunenih vlakana u lužnatom okruženju kao ono što je u betonu. Svježe pripremljen beton ima pH vrijednost između 12 i 13,5. Visoki pH čini beton alkalnim i omogućuje bolju zaštitu od korozije, formirajući pasivni sloj na površni čelika.

pH vrijednost betona ovisi o:

- sastavu betona,
- vodocementnom omjeru,
- poroznosti,
- karbonatizaciji,
- vremenskom faktoru.

Sastav betona je od značajne važnosti kada se govori o pH betona, točnije vrsta cementa koja se dodaje u betonsku mješavinu. Cement koji se dodaje sadrži spojeve poput kalcijevog oksida, koji se hidratizira u kalcijev hidroksid i doprinosi visokom pH betona. Cementi s višim udjelom kalcijevog hidroksida rezultiraju i višim početnim pH. Dodatkom letećeg pepela se može utjecati na pH betona tako da se smanjuje zbog svojih pucolanskih svojstava. Niži vodocementni omjer smanjuje poroznost, čime dolazi i do manjeg izlučivanja kalcijevog hidroksida, što pomaže u održavanju visokog pH. Suprotno tome, visoki vodocementni omjer povećava poroznost betona, omogućuje brži prolaz CO₂ i drugih kiselina što dovodi do brže karbonatizacije i sniženja pH. Karbonatizacija je proces kojim ugljični dioksid iz zraka reagira sa kalcijevim hidroksidom iz betona i kao produkt nastaje kalcijev karbonat. Ova reakcija smanjuje pH betona sa 12-13,5 na vrijednost oko 9. S vremenom karbonatizacija može prodjeti u beton te sniziti pH betonske mase.

Lužnate otopine koje su se koristile za potrebe ovog ispitivanja su natrijev hidroksid (NaOH) i kalcijev hidroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), prikazano na Slici 36, a Slika 37 prikazuje oprana vunena vlakna koja su bila ispitivana u gore navedenim lužinama.



Slika 36: Prikaz natrijevog hidroksida i kalcijevog hidroksida u čvrstom stanju (Autor: Nikolina Edjut)



Slika 37: Oprana vunena vlakna (Autor: Nikolina Edjut)

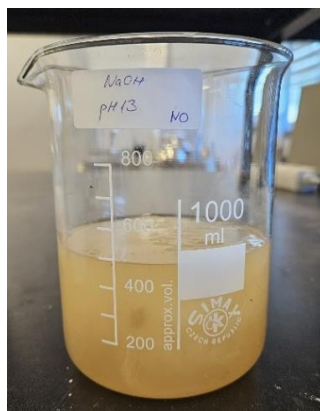
4.5.1. Priprema natrijeve lužine

Kako bi se dobila natrijeva lužina pH 13, najprije je 4,3 grama NaOH otopljeno u 1 L deionizirane, odnosno destilirane vode. Oba tipa vode, očišćena su od onečišćenja poput žive, nitrata, fosfata, mangana i pesticida. Kako bi smanjili lužnatost na pH 12, menzutom je odmjereno 100 mL otopine NaOH pH 13 i dodano u 900 mL destilirane vode. Dodatno smanjivanje lužnatost na pH 11 postignuto je tako da je 100 mL otopine NaOH pH vrijednosti 12 i dodano se u 900 mL destilirane vode. Zamiješane otopine i u njih postavljena oprana vunena vlakna vidljiva su na Slici 38.



Slika 38: Otopine natrijevog hidroksida i uronjena oprana vunena vlakna (Autor: Nikolina Edjut)

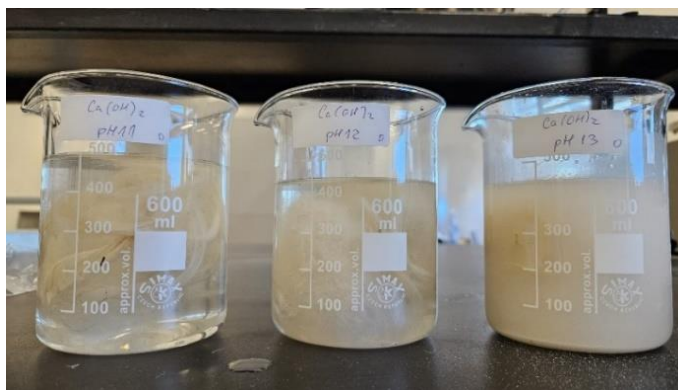
Također, za potrebe istraživanja ovog diplomskog rada, napravljena je i jedna dodatna otopina natrijevog hidroksida pH vrijednosti 13 u koju su uronjena neoprana vunena vlakna (Slika 39).



Slika 39: Otopina natrijevog hidroksida i uronjena ne oprana vunena vlakna (Autor: Nikolina Edjut)

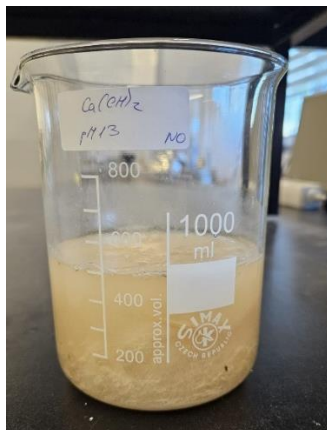
4.5.2. Priprema kalcijeve lužine

Za dobivanje kalcijeve lužine pH 13, postupak je isti kao i kod natrijeve lužine samo što je rastopljen kalcijev hidroksid. Najprije je otopljeno 5,1g Ca(OH)_2 u destiliranoj odnosno deioniziranoj vodi. Kako bi se smanjila lužnatost na pH 12, menzurom je odmjereno 100mL otopine Ca(OH)_2 pH 13 i dodano u 900 mL destilirane vode, a kako bi još dodatno smanjili lužnatost na pH 11 postupak je isti samo što je menzurom odmjereno 100 mL otopine Ca(OH)_2 pH vrijednosti 12 i dodano se u 900 mL destilirane vode. Na Slici 40. vidljive su zamještane lužnate otopine kalcijevog hidroksida i u njih uronjena oprana vunena vlakna.



Slika 40: Otopine kalcijevog hidroksida i uronjena oprana vunena vlakna (Autor: Nikolina Edjut)

Isto kao i u prethodnom slučaju, i kod otopine kalcijevog hidroksida napravljena je dodatna otopina pH vrijednosti 13 u koju su uronjena ne oprana vunena vlakna, što se vidi na Slici 41.



Slika 41: Otopina kalcijevog hidroksida s ne opranim vunenim vlaknima (Autor: Nikolina Edjut)

Kod gašenog vapna, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tvar bolje disocira kod nižih koncentracija, stoga je potrebno provjeriti pH vrijednost otopina pH metrom radi fine korekcije ako je ista potrebna. pH-metar se može vidjeti na Slici 42. pH metar je prije korištenja potrebno kalibrirati u za to predviđenoj otopini koja se dobije uz uređaj. U svim ispitivanjima, zamiješane otopine zadovoljavale su predviđene pH vrijednosti.



Slika 42: Prikaz pH metra (Autor: Nikolina Edjut)

4.5.3. Proces ispitivanja vlačne čvrstoće vunениh vlakana

Za potrebe ovog diplomskog rada vunena vlakna uronjena u otopine raznih pH vrijednosti, promatrale su se nakon 28 dana i ispitivale nakon 56 dana. 28 dana nakon postavljanja očišćenih i neočišćenih vlakana u potrebne otopine, golim okom nije se primijetila razlika u boji vune niti u smanjenju razine otopina. Međutim, 56 dana od postavljanja vunениh vlakana u otopine, došlo je do značajnih promjena. Boja vlakana se promijenila u otopinama pH vrijednosti 12 i 13, dok je otopina pH vrijednosti 11 zadržala prvobitnu boju. Također je važno napomenuti da je razina otopina svedena na minimum ili više nije bila prisutna. Otopine NaOH pH vrijednosti 11, 12 i 13 (očišćena vlakna i neočišćena vlakna) nisu sadržavale otopljene otopine, nego su isparile. Slika 43. prikazuje navedena vunena vlakna nakon 56 dana u uvjetima kada je otopina u potpunosti isparila, vlakanca su bila na suhom.

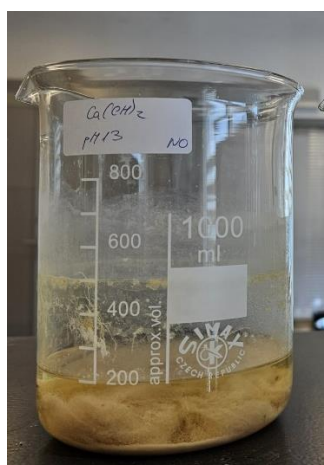


Slika 43: Vunena vlakana NaOH nakon 56 dana (Autor: Nikolina Edjut)

Otopine $\text{Ca}(\text{OH})_2$ su se slično ponašale kao i NaOH. Otopine su u potpunosti isparile, ali je važno navesti da se u jednoj staklenci nalazila tekućina, a to je otopina pH vrijednosti 13 u koju su uronjena vlakna neočišćena vunena vlakna. Slika 44. prikazuje otopine $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pH vrijednosti 11, 12 i 13 nakon 56 dana, a Slika 45. prikazuje otopinu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vrijednosti pH 13 s uronjenim neočišćenim vunениm vlaknima isto nakon 56 dana u prisutnosti tekućine.

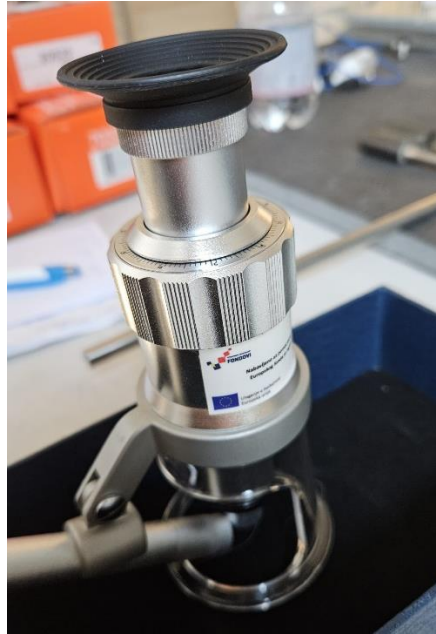


Slika 44: Vunena vlakna $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nakon 56 dana (Autor: Nikolina Edjut)



Slika 45: Neočišćena vunena vlakna u otopini $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nakon 56 dana (Autor: Nikolina Edjut)

Kako bi se saznala promjena svojstava vunenih vlakana nakon što su postavljena u otopine, proveo se test vlačne čvrstoće. Od svakog od uzoraka uzeta je po jedna nit vunenog vlakna i stavljena pod mikroskop za određivanje širine pukotina u betonu, koji je vidljiv na Slici 46. Prije upotrebe mikroskopa važno je prvo upaliti svijetlo, kako bi se svijetla nit vlakna uspjela lakše uočiti na crnoj podlozi.



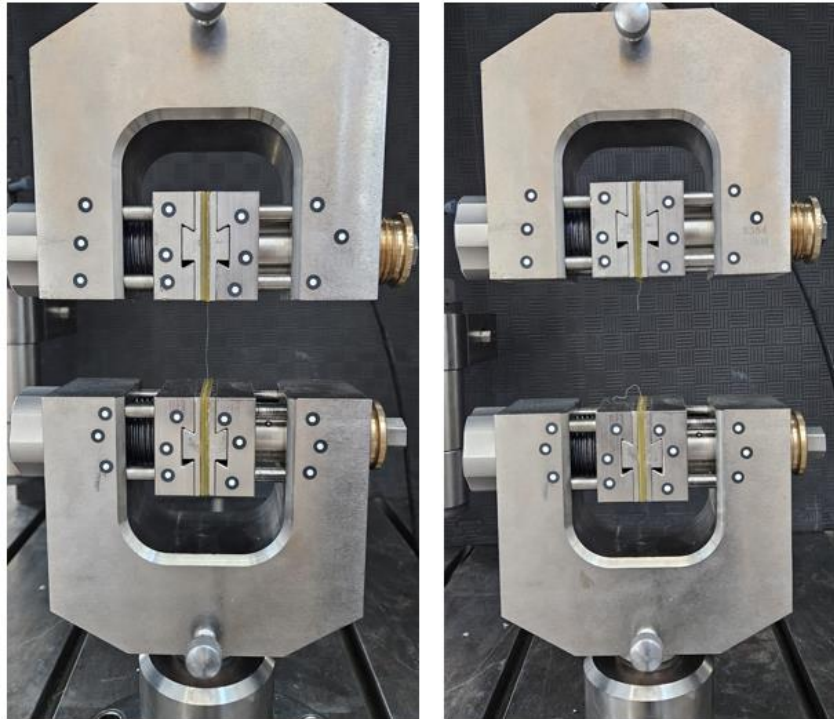
Slika 46: Mikroskop kojim se mjerila debljina vunenih niti (Autor: Nikolina Edjut)

Mikroskopom je promatrana nit vlakna te je očitana širina niti, koja je u prosjeku iznosila 0,1 mm. Nakon što su izmjerene širine mjerodavnih vunenih vlakana, ista su postavljena u uređaj za mjerenje vlačne sile, mehaničku kidalicu, prikazanu na Slici 47.



Slika 47: Uređaj za mjerenje vlačne sile (Autor: Nikolina Edjut)

Nit je osigurana u uređaj tako da je prvo postavljena u gornji utor koji se zategnuo vijkom tako da je nit vlakna bila stabilna, a onda se drugi kraj vlakna stavio u donji utor koji se također zategnuo. Tako osigurano vlakno pritisnuto u utoru s gumenom površinom osigurano je od prijevremenog pucanja i klizanja po y osi. Kada se vlakno postavilo u uređaj, pokrenut je proces ispitivanja. Brzina nanošenja opterećenja iznosila je $v = 20$ mm/min. Postavljena vlakna pH vrijednosti 11 i 12 su se rastegnula otprilike 15-25 mm. S obzirom da uređaj za ispitivanje vlačne sile spojen na kompjuter očitava podatke od 50 - 200 kN, a sile dobivene na uzorcima niti vunenih vlakna iznosila su 0,01 N, zaključeno je da dobiveni podaci nisu mjerodavni i važeći pošto preciznost kidalice nije dovoljno točna kako bi se ispitivanje pravilno provelo. Na Slici 48 s lijeve strane prikazana je nit vunenog vlakna opterećena u kidalici, a s desne strane je prikazana nit u kidalici nakon procesa opterećenja kada je već došlo do pucanja istog.



Slika 48: Nit vunenog vlakna prije i poslije opterećenja (Autor: Nikolina Edjut)

5. ZAKLJUČAK

Iz dobivenih rezultata ispitivanja zaključuje se da je moguće ostvariti kvalitetna trajnosna svojstva betona, ukoliko se dodaju određene komponente recikliranih i prirodnih vlakana. Dokazalo se da beton W 0,5% ima najmanju poroznost među ostalim mješavinama i iznosila je 5,7%. Najveću poroznost imala je mješavina PP 1,5% iznosa 15,7%. Rezultati ispitivanja poroznosti slažu se sa literaturom do sad provedenih istraživanja, koja također potvrđuju da se dodavanjem vunenih vlakana smanjuje poroznost betona te povećava masa i gustoća s obzirom na beton bez dodatka vlakana.

Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje pokazali su da je najveću otpornost na habanje ima mješavina PP 1 % gdje je izgubljeno 1,90% prvobitne mase, dok je najmanju otpornost na habanje imala mješavina PP 2 % koja je izgubila samo 0,95 % početne mase kockice. Uzorak s dodatkom vunenih vlakana, unatoč tome što je imao najmanju poroznost, prema rezultatima provedenog ispitivanja smjestio se tek u sredinu sa izgubljenom masom od 1,38 %. Sve betonske mješavine imale su otprilike linearan trend trošenja materijala uslijed habanja, što se smatra pogodnim ponašanjem materijala jer ukazuje na homogenost betonskih mješavina.

Prateći dobivene rezultate za plinopropusnost i vodopropusnost, zaključuje se da je dodatak vunenih vlakana značajno pridonio poboljšanju svojstava istih. Naime, gledajući rezultate plinopropusnosti, najmanji srednji koeficijent plinopropusnosti imala je mješavina s vunenim dodacima W 0,5 % iznosa $7,94E-19$, dok je najveći koeficijent imala mješavina PP 0,5 % iznosa $2,25E-18$. Dodatak vunenih vlakana postigao je očekivani ishod i kod ispitivanja vodopropusnosti, gdje je s istim postignuta najmanja dubina prodora vode u beton od 12,7 mm i najmanja vlačna sila potrebna za slom uzorka veličine 93,0 kN. Najveću dubinu prodora vode u uzorak ostvarena je mješavinom PP 1,5 % kod koje se voda infiltrirala 19,9 mm u beton te je ujedno ostvarila i najveću potrebnu silu za slom uzorka veličine 121,7 kN ispitanu u kidalici.

Konačno, kao zaključak ovog rada, može se sa sigurnošću reći da dodaci vlakana, recikliranih ili prirodnih, značajno doprinose trajnosnim svojstvima betona. Vunena vlakna

se tu ponajviše ističu naspram polipropilenskih vlakana, neovisno o postotku dodanih vlakana. Naime, vunena vlakna su u ovom ispitivanju doprinijela poboljšanju poroznosti, vodopropusnosti i plinopropusnosti, dok ni rezultat habanja nije bio ne zadovoljavajući. Postoji mogućnost da bi mješavina s vunenim vlaknima postigla i bolje rezultate s obzirom na rezultate polipropilenskih vlakana kada je u pitanju habanje, međutim zbog lošijih uvjeta ugradnje mješavine i lošijih kalupa za kockice, rezultati su mjerodavni i zadovoljavajući.

Stoga, gledajući na sve rezultate i analize ovoga rada, javlja se potreba za korištenjem vlakana u betonima kako bi im se poboljšala trajnosna svojstva, a i kao bi se našla svrha za ponovnu uporabu recikliranih i prirodnih materijala. Recikliranih dodataka u današnje vrijeme postaje sve više vrsta, ovisno o potrebnoj namjeni. Korištenje vunenih vlakana još nije značajno zastupljeno u svijetu, a kako bi u Hrvatskoj postalo više raširenije i prihvatljivije potrebno je početi ulagati u proizvodnju industrije koja je zaslužna za prikupljanje i obradu ovčje vune te njihovu daljnju obradu i preradu. Kako problem zagađenja okoliša svakodnevno raste, velike promjene su od neupitne važnosti. Većina grana industrija pokazuje interes za promjenom načina poslovanja, okreću se načinu poslovanja koji postaje prihvatljiviji za okoliš i radnu snagu. Takav cilj ostvariv je jedino ako se provode razna istraživanja kojima se dolazi do najoptimalnijeg rezultata. Razvojem industrije javljaju se nove i modernije tehnologije koje omogućavaju razvoj novih tehnika građenja. U budućnosti se nedvojbeno očekuju neki od zadivljujućih rezultata ispitivanja koji će revolucionirati građevinarstvo kao granu industrije, upravo kao što su i rezultati ovog diplomskog rada doprinijeli novim pogledom na korištenje vunenih vlakna u betonskim mješavinama.

LITERATURA

- [1] M. Shadeer Ahmed, Natural Fibers in Concrete – A Review, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1055/1/012038/pdf>, pristup 8.9.2024.
- [2] I. A. Wan ii R. R. Kumar, Experimental investigation on using sheep wool as fiber reinforcement in concrete giving increment in overall strength, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320396140#:~:text=Sheep%20wool%20enhances%20overall%20strength,a%20days%20in%20construction%20areas.>, pristup 8.9.2024.
- [3] M. Murillo, Use of animal fiber-reinforcement in construction materials: A review, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523009932#bib150>, pristup 8.9.2024.
- [4] D. L. Rocha, A Review of the Use of Natural Fibers in Cement Composites: Concepts, Applications and Brazilian History, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9144559/>, pristup 8.9.2024.
- [5] D. Jóźwiak-Niedźwiedzka, Wool-Reinforced Cement Based Composites, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7475810/>, pristup 8.9.2024.
- [6] Scispace, What's the porosity of concrete?, <https://typeset.io/questions/what-s-the-porosity-of-concrete-x3gmiy86wt>, pristup 8.9.2024.
- [7] S. Mrakovčić, Skripta predavanja Fizikalna svojstva materijala, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2022.
- [8] F. B. Witzke, Abrasive wear of concrete measured by different accelerated tests and natural exposure, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164823000388>, pristup 8.9.2024.
- [9] M-Kvadrat, Faktori koji utječu na otpornost betona na abraziju, <https://m-kvadrat.ba/faktori-koji-utjecu-na-otpornost-betona-na-abraziju/>, pristup 8.9.2024.
- [10] Cemex, Što je njegovanje betona?, <https://www.cemex.hr/njegovanje-betona>, pristup 8.9.2024.

- [11] T. Lamouchi, About Gas Permeability and Diffusion through Concrete, <https://www.mdpi.com/2673-4605/13/1/42>, pristup 8.9.2024.
- [12] D. Zhang , Concrete gas permeability from different methods: Correlation analysis, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095894651930441X>, pristup 8.9.2024.
- [13] Neville, A.M. : Properties of Concrete
- [14] Wikipedia, Superplasticizer, <https://en.wikipedia.org/wiki/Superplasticizer>, pristup 8.9.2024.

LITERATURA SLIKA

- [1] M. Shadeer Ahmed, Natural Fibers in Concrete – A Review, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1055/1/012038/pdf>, pristup 8.9.2024.
- [2] D. Józwiak-Niedźwiedzka, Wool-Reinforced Cement Based Composites, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7475810/>, pristup 8.9.2024.
- [3] Građevinski fakultet, Katalog laboratorijske i terenske opreme, <https://laboratoriji.gradri.uniri.hr/materijali/oprema-laboratorija/> , pristup 8.9.2024.