

Analiza trajnosnih svojstava betona s recikliranim komponentama

Budić, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:157:270534>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-24**



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**

Matija Budić

Analiza trajnosnih svojstava betona s recikliranim komponentama

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo
Konstrukcije
Teorija i tehnologija betona**

**Matija Budić
JMBAG: 0114032346**

Analiza trajnosnih svojstava betona s recikliranim komponentama

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2023.

Fakultet: **Građevinski fakultet**
Predmet: **Teorija i tehnologija betona**
Grana: **2.15.03 materijali**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 57

Pristupnik: **Matija Budić (0114032346)**
Studij: **Građevinarstvo**
Modul: **Konstrukcije**

Zadatak: **Analiza trajnosnih svojstava betona s recikliranim komponentama**

Opis zadatka:

Rad treba sadržavati sljedeće:

- uvodna poglavlja o betonu s recikliranim komponentama te ekološkom aspektu betona
- pregled stanja područja s naglaskom na utjecaj zamjene komponenti betona recikliranim materijalima na VDP, plinopropusnost i otpornost na habanje
- razradu i tijek vlastitih eksperimentalnih ispitivanja
- analizu rezultata ispitivanja i usporedbu rezultata dobivenih za različite mješavine betona
- zaključak i ideje za daljnja ispitivanja

Zadatak uručen pristupniku: 8. ožujka 2023.

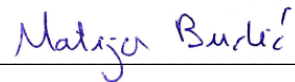
Rok za predaju rada: 13. rujna 2023.

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić

Komentor: Dr. sc. Ivan Zambon

IZJAVA

Diplomski rad izradio 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.



Matija Budić

U Rijeci, 11. rujna 2023.

IZJAVA O PRIPADNOSTI ZNANSTVENOM PROJEKTU

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta
**Razdvajanje uticaja parametara u inženjerskom modeliranju
s parametarskom identifikacijom (SEPAEMPI)**

| | |
|---------------------|-----------------------------|
| Voditelj projekta | prof. dr. sc. Ivica Kožar |
| Šifra projekta | IP-2019-04-7926 |
| Financijer projekta | Hrvatska zaklada za znanost |
| Pravna nadležnost | Republika Hrvatska |

U Rijeci, 11. rujna 2023.

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić

ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Silviji Mrakovčić, komentoru dr. sc. Ivanu Zambonu te doc. dr. sc. Nataliji Bede na vođenju kroz ovaj diplomski rad, stručnim savjetima i razumijevanju tijekom cjelokupnog trajanja studija.

Također zahvaljujem laborantu Dinu Juriševiću pri pomoći u laboratoriju i u provođenju različitih ispitivanja.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj potpori kroz sve godine studiranja, te prijateljima na druženju i svakidašnjem uljepšavanju boravka na studiju.

SAŽETAK

Beton je jedan od najkorištenijih materijala današnjice. Zbog svoje raznovrsne primjene njegova proizvodnja raste iz dana u dan. Prema tome postavlja se pitanje kako proizvodnja betona utječe na okoliš i održivi razvoj. Komponenta betona čija proizvodnja troši najviše energije i ostavlja veliki ugljični otisak je cement. Također, eksploatacija i proizvodnja prirodnog agregata kroz različite aktivnosti ostavlja značajan ugljični otisak. Iz tog razloga nastaje potreba korištenja alternativnih materijala kao zamjena cementa i prirodnog agregata kako bi se smanjio ugljični otisak prilikom proizvodnje betona.

Cilj ovog rada je analizirati utjecaj uporabe recikliranih komponenti u betonu na trajnosna svojstva samog betona. Utvrđeno je da proizvodnja cementa za beton ima najveći udio u stvaranju CO₂ pri proizvodnji betona, čak do 85%. Prema tome, značajniji utjecaj na čuvanje okoliša ima korištenje pucolanskih materijala kao zamjena cementu, nego upotreba recikliranog betonskog agregata. Napravljeni su uzorci tri različite betonske mješavine od recikliranih materijala pomoću kojih su provedena ispitivanja plinopropusnosti, dubine prodora vode pod tlakom te habanja. Reciklirani materijali korišteni u ovom istraživanju su metakaolin, reciklirani betonski agregat, vunena vlakna, reciklirana voda te PVC piljevina. Ispitivanja su provedena radi utvrđivanja kako upotreba recikliranih materijala u betonu utječe na njegova svojstva trajnosti. Rezultati ukazuju da se korištenjem recikliranih materijala u betonu postižu bolja svojstva trajnosti u pogledu nepropusnosti. Uzevši u obzir sva tri ispitivanja ocjenjuje se da beton RBA30+W koji sadrži 30% RBA i vunena vlakna ima najbolja svojstva trajnosti. To dovodi do zaključka da se korištenjem određenih recikliranih materijala u betonu mogu postići ista ili bolja trajnosna svojstva uz reduciranje štetnih plinova pri proizvodnji betona.

Ključne riječi: ugljični otisak, reciklirani betonski agregat, RBA, plinopropusnost, dubina prodora vode pod tlakom, otpornost na abraziju, Böhme test

ABSTRACT

Concrete is one of the most used materials today. Its production is growing perpetually due to its various applications. Therefore, the question arises whether concrete production affects the environment and sustainable development. Cement is a concrete component whose production consumes the most energy and leaves a large carbon footprint. Moreover, the exploitation and production of natural aggregate through various activities leaves a significant carbon footprint. For this reason, there is a need to use alternative materials to replace cement and natural aggregate to reduce the carbon footprint during concrete production.

The aim of this research was to analyze how the use of recycled components in concrete affects the durability of concrete itself. It was found that the production of cement has the largest share in the creation of CO₂ during concrete production; up to 85%. Therefore, the orientation towards the use of pozzolanic materials as a substitute for cement has lower environmental impact than the use of recycled concrete aggregate. To test this hypothesis, samples of four different concrete mixtures were made from recycled materials. They were tested for gas permeability, depth of water intrusion under pressure and wear. Recycled materials used in this research were metakaolin, recycled concrete aggregate, wool fibers, recycled water, and PVC sawdust. Tests were conducted to determine how recycled materials in concrete affect its durability properties. The results indicate that the use of recycled materials in concrete improves durability properties in terms of impermeability. Considering all three tests, it is estimated that concrete RCA30 + W containing 30% RCA and wool fibers has the best durability properties. This leads to the conclusion that using certain recycled materials in concrete can achieve the same or better durable properties while reducing discharge of harmful gases during concrete production.

Key words: carbon footprint, recycled concrete aggregate, RCA, gas permeability, water permeability, abrasion resistance, Böhme test

SADRŽAJ:

| | |
|---|----|
| POPIS SLIKA..... | 10 |
| POPIS TABLICA | 12 |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. EKOLOŠKI ASPEKT RECIKLIRANOG BETONA | 3 |
| 2.1. Problematika ugljičnog otiska materijala | 3 |
| 2.2. Utjecaj cementa i agregata na ugljični otisak betona | 4 |
| 2.2.1. Cement | 4 |
| 2.2.2. Agregat | 4 |
| 2.3. Ovisnost ugljičnog otiska betona o udjelu recikliranog agregata..... | 6 |
| 2.4. Metode smanjenja utjecaja betona na okoliš | 8 |
| 3. PREGLED STANJA PODRUČJA | 10 |
| 4. ISPITIVANJE SVOJSTAVA TRAJNOSTI BETONA | 19 |
| 4.1. Plinopropusnost betona..... | 19 |
| 4.2. Dubina prodora vode pod tlakom | 22 |
| 4.3. Otpornost na habanje betona – metoda Böhme | 24 |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA | 27 |
| 5.1. Uvod | 27 |
| 5.2. Projektiranje betonskih mješavina..... | 27 |
| 5.2.1. Cement | 28 |
| 5.2.2. Metakaolin..... | 29 |
| 5.2.3. Voda | 29 |
| 5.2.4. Superplastifikator | 29 |
| 5.2.5. Aerant | 30 |
| 5.2.6. Polipropilenska vlakna | 30 |

| | |
|--|----|
| 5.2.7. Vunena vlakna..... | 31 |
| 5.2.8. Prirodni agregat..... | 32 |
| 5.2.9. PVC piljevina..... | 32 |
| 5.2.10. Reciklirani betonski agregat..... | 32 |
| 5.2.11. Sastavi betonskih mješavina..... | 33 |
| 5.3. Ispitivanje agregata..... | 34 |
| 5.3.1. Granulometrijska krivulja recikliranog betonskog agregata..... | 34 |
| 5.3.2. Granulometrijska krivulja PVC piljevine..... | 37 |
| 5.3.3. Određivanje vlažnosti i apsorpcije vode agregata..... | 38 |
| 5.4. Izrada betonskih mješavina..... | 41 |
| 5.5. Ispitivanje svojstava svježeg betona..... | 41 |
| 5.5.1. Ispitivanje konzistencije svježeg betona..... | 41 |
| 5.6. Izrada uzoraka za ispitivanja..... | 43 |
| 5.7. Ispitivanje svojstava betona..... | 43 |
| 5.7.1. Ispitivanje plinopropusnosti betona..... | 44 |
| 5.7.2. Analiza rezultata ispitivanja plinopropusnosti..... | 47 |
| 5.7.3. Ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom..... | 48 |
| 5.7.4. Analiza rezultata ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom..... | 49 |
| 5.7.5. Ispitivanje betona na habanje – Böhme..... | 50 |
| 5.7.6. Analiza rezultata ispitivanja na habanje..... | 51 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 54 |
| LITERATURA..... | 56 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1: Zone sučeljaka recikliranog betonskog agregata (Baričević, Topić, 2016: 14) | 5 |
| Slika 2: Životni ciklus sustava proračuna emisije ugljičnog otiska za beton od RBA (Lei i sur., 2022: 3) | 7 |
| Slika 3: Koeficijent propusnosti ovisno o količini MK (Ahmad i sur., 2022: 14)..... | 11 |
| Slika 4: Utjecaj udjela vunenih vlakana na apsorpciju vode betona (Alyousef i sur., 2022) | 12 |
| Slika 5: Utjecaj udjela modificiranih vunenih vlakana na apsorpciju vode betona (Alyousef i sur., 2022) | 13 |
| Slika 6: Koeficijent propusnosti ispitan GWT aparatom (Adnan i sur., 2008: 53) | 14 |
| Slika 7: Dubina penetracije vode ispitan VDP uređajem (Adnan i sur., 2008: 53) | 14 |
| Slika 8: Otpornost na habanje ovisno o udjelu PE vlakana (Deng i sur., 2023: 9)..... | 16 |
| Slika 9: Otpornost na habanje ovisno o duljini PE vlakana (Deng i sur., 2023: 9) | 16 |
| Slika 10: Abrazija uzoraka ovisno o udjelu recikliranog agregata i broju rotacija (Krajnović, 2017: 50) | 17 |
| Slika 11: Aparatura za provođenje pokusa. a) Prazna zračna komora, gumena zračnica, poklopac i vijci b) Digitalni manometar, ventili i mjerači protoka (Autor: Matija Budić)..... | 20 |
| Slika 12: Punjenje gumica sapunastom tekućinom (Autor: Matija Budić) | 20 |
| Slika 13: Pripremljena aparatura i početak ispitivanja (Autor: Matija Budić)..... | 21 |
| Slika 14: Uređaj za ispitivanje dubine prodora vode u beton (Autor: Matija Budić)..... | 22 |
| Slika 15: Cijepanje uzoraka. a) Uređaj za ispitivanje čvrstoće b) Cijepani uzorak (Autor: Matija Budić) | 23 |
| Slika 16: Označavanje i mjerenje dubine prodora vode (Autor: Matija Budić)..... | 23 |
| Slika 17: Uređaj za ispitivanje na habanje (Autor: Matija Budić) | 24 |
| Slika 18: Raspoređeni kvarcni pijesak na rotacijskom stolu (Autor: Matija Budić) | 25 |
| Slika 19: Postavljanje uzorka u metalno kućište i pokretanje rotacija (Autor: Matija Budić) .. | 25 |
| Slika 20: Istrošeni uzorak uslijed habanja. a) Djelomično habanje nakon 8 ciklusa b) Potpuno habanje nakon 20 ciklusa (Autor: Matija Budić)..... | 26 |
| Slika 21: Tretiranje ovčje vune u moru. a) Postavljanje vreća ovčje vune u vršu b) Potapanje vrše s ovčjom vunom u more (Autor: Matija Budić)..... | 31 |
| Slika 22: Obrađena ovčja vuna (Autor: Matija Budić)..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Slika 23: Udio određene frakcije prirodnog agregata u ukupnom volumenu (Autor: Matija Budić)..... | 34 |
| Slika 24: Mehanički linijski razdjelnik. a) Žlijeb s deset otvora, dva spremnika b) Raspodijeljeni agregat u spremnike (Autor: Matija Budić)..... | 35 |
| Slika 25: Sita u uređaju za prosijavanje agregata (Autor: Matija Budić)..... | 35 |
| Slika 26: Granulometrijska krivulja recikliranog agregata (Autor: Matija Budić) | 36 |
| Slika 27: Granulometrijska krivulja PVC piljevine (Autor: Matija Budić)..... | 37 |
| Slika 28: Instrument za ispitivanje vlažnosti agregata (Autor: Matija Budić) | 38 |
| Slika 29: Određivanje EA prirodnog agregata. a) Uranjanje uzorka u vodu b) Brisanje površinske vlažnosti krpom c) Vaganje ZPS uzorka (Autor: Matija Budić)..... | 39 |
| Slika 30: : Djelomično osipanje uzorka agregata (Autor: Matija Budić)..... | 40 |
| Slika 31: Ispitivanje slijeganja betona. a) Mješavina RBA30+PP b) Mješavina REC30+W (Autor: Matija Budić)..... | 41 |
| Slika 32: Ispitivanje tečenja rasprostiranjem slijeganjem mješavine RBA30+W (Autor: Matija Budić)..... | 43 |
| Slika 33: Prikaz poroznosti uzoraka. a) Mješavina RBA30+W b) Mješavina REC30+W (Autor: Matija Budić)..... | 45 |
| Slika 34: Plinopropusnost betona za različite vrijednosti tlakova (Autor: Matija Budić)..... | 46 |
| Slika 35: Usporedba rezultata ispitivanja plinopropusnosti (Autor: Matija Budić) | 47 |
| Slika 36: Usporedba rezultata ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom (Autor: Matija Budić)..... | 48 |
| Slika 37: Razlika traga prodora vode. a) REC30+W b) RBA30+W (Autor: Matija Budić)..... | 49 |
| Slika 38: Usporedba rezultata ispitivanja otpornost na habanje (Autor: Matija Budić)..... | 51 |
| Slika 39: Usporedba srednjeg gubitka volumena uzorka uslijed habanja (Autor: Matija Budić)..... | 52 |
| Slika 40: Tijek trošenja materijala uzoraka (Autor: Matija Budić) | 52 |
| Slika 41: Zavisnost dubine prodora vode i habanja (Autor: Matija Budić)..... | 53 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1: Broj uzoraka za ispitivanje i potrebni volumen mješavine (Autor: Matija Budić)... | 28 |
| Tablica 2: Receptura za 1 m ³ mješavine betona (Autor: Matija Budić) | 33 |
| Tablica 3: Postotci prolaska recikliranog agregata kroz sita (Autor: Matija Budić) | 36 |
| Tablica 4: Postotci prolaska PVC piljevine kroz sita (Autor: Matija Budić) | 37 |
| Tablica 5: Izračun efektivne apsorpcije krupnog agregata (Autor: Matija Budić) | 39 |
| Tablica 6: Izračun efektivne apsorpcije sitnog agregata (Autor: Matija Budić)..... | 40 |
| Tablica 7: Razred konzistencije mješavina (Autor: Matija Budić)..... | 42 |
| Tablica 8: Rezultati ispitivanja na plinopropusnost dušika (Autor: Matija Budić) | 46 |
| Tablica 9: Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom (Autor: Matija Budić) | 48 |
| Tablica 10: Rezultati trošenja materijala uzoraka habanjem (Autor: Matija Budić) | 50 |
| Tablica 11: Proračun srednje otpornosti na habanje (Autor: Matija Budić)..... | 51 |

1. UVOD

Razvoj industrije građevnog materijala dovodi do povećane potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova. Najzastupljeniji materijal u građevinarstvu je beton, čime se troši izuzetno puno prirodnih resursa kao što su agregat i voda. Beton kao gotov materijal nema značajan negativan efekt na okoliš, međutim sam proces proizvodnje betona i njegovih komponenti uzrokuje zagađenje atmosfere stakleničkim plinovima. Zbog konstantnog prirasta proizvodnje betona potrebno je analizirati dugotrajan učinak na ekologiju. Shodno tome, potrebno je sagledati opću sliku ekološkog aspekta, koja faza pri proizvodnji betona ima najštetniji učinak na okoliš i kojom metodom je moguće smanjiti otisak ugljičnog dioksida (CO₂).

Osnovni problem pri razvoju nove tehnologije i sastava betona je nepostojanje alternativnih komponenti čija proizvodnja manje zagađuje okoliš, a da dobiveni beton i dalje ima zahtijevane karakteristike. Klasični materijali koji su sastavni dio betona su cement, voda, agregat, te kemijski i mineralni dodatci. Najveći otisak CO₂ pri proizvodnji betona sadrži proces proizvodnje cementa, glavnog vezivnog materijala betona. Otisak CO₂ koji čini eksploatacija i obrada agregata te upotreba vode ima značajno manje štetan učinak u odnosu na cement. Kako bi se smanjili troškovi materijala i otisak štetnih plinova na okoliš, moguće je koristiti reciklirane sastojke betona. Pritom je potrebno imati na umu da korištenje recikliranih materijala može rezultirati lošijim mehaničkim i trajnosnim svojstvima betona. Svojstvo trajnosti betona predstavlja sposobnost posjedovanja zahtijevane razine sigurnosti i uporabljivosti. Utjecaj okoline i agresivnih tvari ima negativan učinak na trajnost betona. Prema tome, propusnost betona je najznačajnije svojstvo o kojem direktno ovisi njegova trajnost. Ukoliko se odaberu nepogodni reciklirani sastojci betona, može doći do značajnog gubitka trajnosti, što dovodi do kraćeg vijeka konstrukcije te potrebe za rušenjem iste. Rezultat toga je potreba za izgradnjom nove konstrukcije čime se ponovno troše ograničeni prirodni resursi, te nastaje problematika zbrinjavanja otpada od rušenja.

Glavni cilj ovog istraživanja je utvrđivanje mogu li se koristiti reciklirani sastojci betona, tako da ne dođe do narušavanja svojstava trajnosti. Teži se za postignućem sastava betona od recikliranih materijala u svrhu manjeg zagađenja okoliša, uz uvjet da je gubitak u mehaničkim i trajnosnim svojstvima minimalan.

U ovom istraživanju napravljeni su betonski uzorci od tri različite mješavine, gdje svaku mješavinu karakterizira udio zamjene prirodnog materijala recikliranim. Korišteni reciklirani materijali su metakaolin (MK), reciklirani betonski agregat (RBA), reciklirana voda, PVC piljevina te ovčja vunena vlakna (W).

Na betonskim uzorcima provedena su ispitivanja plinopropusnosti prema preporuci Cembureau, dubine prodora vode pod tlakom te habanja prema Böhme metodi. Pomoću dobivenih mjerenja i rezultata došlo se do zaključaka ovisnosti trajnosnih svojstava betona o postojanju recikliranih materijala određenog udjela.

2. EKOLOŠKI ASPEKT RECIKLIRANOG BETONA

2.1. Problematika ugljičnog otiska materijala

Građevinarstvo je jedna od djelatnosti koja troši najveću količinu prirodnih resursa kao šta su agregat, voda, drvo te razne legure. Naime, zgrade su odgovorne za preko 40% emisija ugljikova dioksida na globalnoj razini uslijed proizvodnje materijala za gradnju, izvođenja, uporabe istih te odlaganja otpada nakon rušenja (Dokšanović i sur., 2012: 3). Također, rušenjem starih betonskih konstrukcija nastaje velika količina građevnog otpada. Beton kao gotov proizvod je ekološki čist, međutim proizvodnja njegovih komponenti ima veliki utjecaj na okoliš i emisiju CO₂ (Dokšanović i sur., 2012: 3, 5).

Cement je jedan od glavnih sastojaka u građevinarstvu, naročito pri proizvodnji betona. Međutim, pri njegovoj proizvodnji dolazi do velike potrošnje energije te stvaranja stakleničkog plina CO₂. Industrija cementa je odgovorna za otprilike 7% ukupne svjetske emisije CO₂. Problem globalnog zatopljenja jedan je od glavnih problema današnjice, čime nastaje potreba za razvojem novih tehnologija u građevinskoj struci koje će pridonesti smanjenju sadržaja CO₂ u atmosferi. Pri odabiru materijala za građenje potrebno je imati na umu njegov utjecaj na okoliš, tako da se procijeni utrošena energija pri njegovoj proizvodnji, kao i za vrijeme uporabnog vijeka konstrukcije. Pomoću recikliranja građevnog otpada i njegovom ponovnom uporabom smanjuje se potreba za eksploatacijom prirodnih resursa, te problem odlaganja i zauzimanja prostora (Štirmer, 2012: 293, 294).

Jedan od razloga zašto je beton jedan od najzastupljenijih materijala u upotrebi je laka dostupnost njegovih sastojaka. U samoj proizvodnji betona i njegovih sastojaka potrebno je analizirati parametre utrošene energije, transporta, emisije štetnih tvari i utjecaja nastalog otpada prilikom proizvodnje (Štirmer, 2012: 297).

2.2. Utjecaj cementa i agregata na ugljični otisak betona

2.2.1. Cement

Proizvodnja portland cementa koji služi kao vezivo betona ima iznimno veliku emisiju CO₂ koja iznosi približno 1 kg po kilogramu cementa proizvedenog u uobičajenim postrojenjima, dok je utrošena energija 7,32 MJ/kg cementa. S pozitivne strane, cement čini približno tek 15% mase betona, što znači da ukoliko se predvidi način smanjenja emisije CO₂ može se ostvariti efektivan učinak u očuvanju okoliša (Štirmer, 2012: 298).

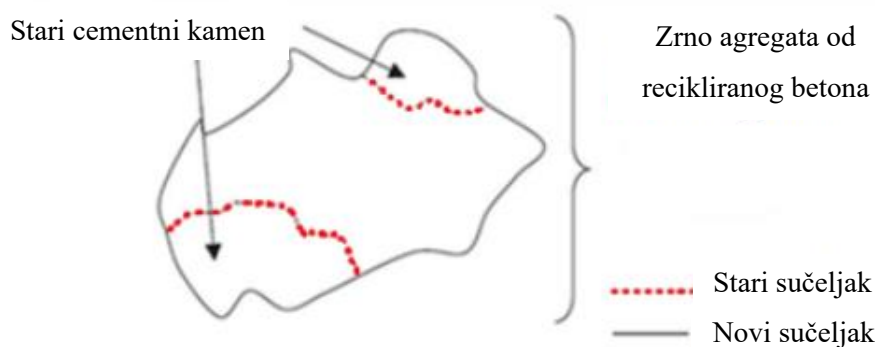
Jedan od načina za smanjenje emisije CO₂ pri proizvodnji cementa je korištenje otpadnih guma, ostataka drveta i otpada od petrolejskih proizvoda kao goriva u rotacijskim pećima. Također, moguće je smanjiti emisiju CO₂ pri proizvodnji cementa tako da se dio portland cementnog klinkera zamjenjuje nusproizvodima kao što su leteći pepeo nastao izgaranjem ugljena ili zgura koja se dobiva prilikom proizvodnje željeza. Također, moguća je primjena i drugih vezivnih materijala u betonu poput metakaolina koji zamjenjuje dio cementa. Metakaolin se dobiva preradom kaolina, vrste prirodne gline. Pečenjem kaolina na temperaturi 650 – 850°C dobiva se metakaolin koji se naknadno mrvri radi postizanja određene finoće (Milišić, 2022: 13).

2.2.2. Agregat

Proizvodnja agregata za beton obuhvaća različite aktivnosti koje troše energiju i stvaraju stakleničke plinove. Osnovne aktivnosti proizvodnje agregata su uklanjanje vegetacije i zemlje, bušenje, miniranje, transport od izvorišta do postrojenja za obradu, obrada agregata, drobljenje, ispiranje te transport do mjesta uporabe. Potrošnja energije i otisak CO₂ pri proizvodnji agregata najviše ovisi o veličini izvorišta, organizaciji postrojenja, vrsti stijene, iskustvu radnika, te vrsti i udaljenosti transporta. Najjednostavniji način smanjenja emisije CO₂ je upotreba lokalnog agregata radi manje udaljenosti transporta. Proizvodnjom krupnog agregata emitira se otprilike 45,9 kg CO₂ po toni proizvedenog krupnog agregata, dok se proizvodnjom sitnog agregata emitira 13,9 kg CO₂ po toni proizvedenog sitnog agregata (Štirmer, 2012: 301, 302).

Potrošnja prirodnog agregata može se smanjiti upotrebom alternativnih resursa kao što je reciklirani agregat nastao drobljenjem betonskih elemenata (RBA). RBA se sastoji od zrna prirodnog agregata obavijenog starim cementnim kamenom.

Upotreba RBA u betonu najčešće nepovoljno utječe na svojstva betona, naročito na tlačnu čvrstoću. Najslabija točka u strukturi betona je stara kontaktna zona između cementnog kamena i zrna agregata (Krajnović, 2017: 28). RBA sadrži više zona sučeljaka zbog postojanja zaostalog cementnog kamena (Slika 1).



Slika 1: Zone sučeljaka recikliranog betonskog agregata
(Baričević, Topić, 2016: 14)

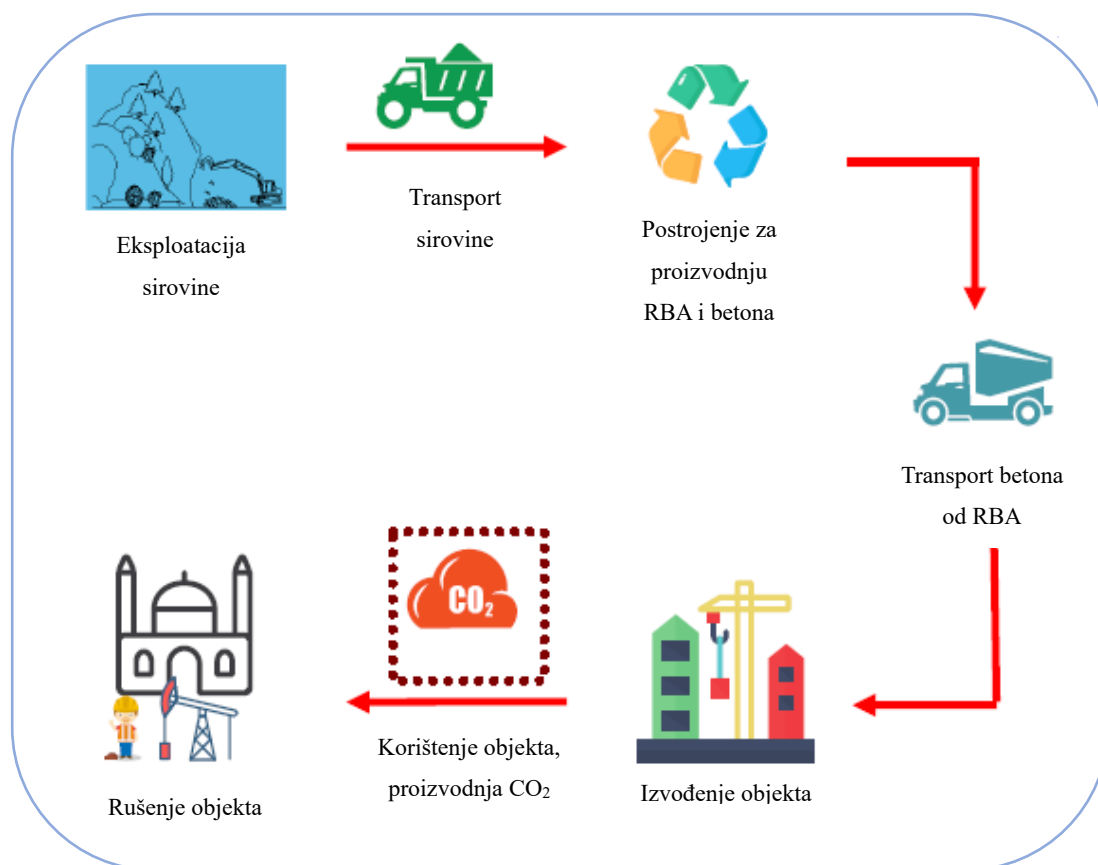
Agregat treba koristiti racionalno, za određene namjene gdje nije uvjetovana velika čvrstoća betona i trajnost može se koristiti agregat lošije kvalitete, čime se štedi na proizvodnji novog agregata. Reciklirani betonski agregat ima mnogobrojne prednosti. Smanjuje se eksploatacija prirodnih resursa koji su ograničeni, proces recikliranja se može odvijati na samom rušilištu pokretnim drobilicama čime se smanjuje emisija CO₂ uslijed reduciranog transporta. RBA je financijski prihvatljiviji od prirodnog agregata ako je proces recikliranja dobro organiziran. Najveći nedostatak primjene RBA je sadržaj onečišćenja u obliku ostataka drva, papira, žbuke, plastike, ulja i slično. Također, RBA ima veću apsorpciju od prirodnog agregata što uvelike utječe na trajnost betona (Štirmer, 2012: 304).

2.3. Ovisnost ugljičnog otiska betona o udjelu recikliranog agregata

Ugljični otisak je jedan od najčešće korištenih elemenata za opisivanje utjecaja proizvodnje betona i njegovih komponenti na okoliš i zagađenje ugljičnim dioksidom. U radu Jimenez i sur. (2018: 1) ugljični otisak predstavlja ekvivalent količine ugljikovog dioksida i drugih stakleničkih plinova nastali proizvodnjom betona, izražen kao CO₂-eq. Najčešće se izražava u kilogramima ili tonama po aktivnosti ili gotovom proizvodu koji se analizira. Analiza ugljičnog otiska proizvodnje betona provedena je prema LCA metodi (Life Cycle Assessment) koja se temelji na procjeni kako proizvodnja cementa te eksploatacija i proizvodnja agregata utječe na emisiju CO₂-eq (Jimenez i sur., 2018: 1).

Prema istraživanju koje su proveli Jimenez i sur. (2018: 3-5) utvrđeno je da reciklirani krupni agregat ima manji doprinos emisiji CO₂ od prirodnog krupnog agregata za 3%. Najveći utisak CO₂-eq pri proizvodnji betona ima cement (85%), što znači da vodocementni omjer betona direktno utječe na ekološki aspekt. Betonska mješavina s v/c omjerom od 0,5 ima ukupno 25% veću emisiju CO₂-eq od betonske mješavine s v/c omjerom 0,7. Kako udio RBA u betonu raste, ugljični otisak betona se blago smanjuje. Beton s v/c omjerom 0,5 i 0% RBA ima ugljični otisak od 350,7 kg/m³ betona, dok beton istog v/c omjera ali s 100% RBA ima ugljični otisak 347,4 kg/m³. Prema tome, čak ako se potpuno zamijeni prirodni agregat s RBA, ušteda na emisiji CO₂-eq iznosi samo 1%. To znači da korištenje RBA ima vrlo malen utjecaj na emisiju CO₂-eq pri proizvodnji betona.

Lei i sur. (2022: 1-15) su u svom istraživanju došli do sličnih zaključaka. Emisija CO₂-eq najviše ovisi o vodocementnom omjeru, zatim o udjelu RBA, te o udaljenosti transporta. Također je korištena LCA analiza koja se sastoji od šest faza (Slika 2): eksploatacija i obrada sirovine, transport do postrojenja za proizvodnju betona i RBA, proizvodnja betona od RBA, transport do gradilišta, izvođenje objekta i rušenje objekta.



Slika 2: Životni ciklus sustava proračuna emisije ugljičnog otiska za beton od RBA (Lei i sur., 2022: 3)

Lei i sur. (2022: 3) usvajaju otisak CO₂-eq RBA u iznosu 17,7 kg/t. Taj zaključak je donesen obradom 1 t otpadnog betona, čime se dobiva 650 kg krupnog RBA, 330 kg sitnog RBA i 20 kg otpada. Prema tome, za krupni RBA otisak CO₂-eq iznosi 11,51 kg/t, dok za sitni RBA iznosi 5,84 kg/t. Rezultati istraživanja Lei i sur. (2022: 9) ukazuju da 80 – 85% emisije CO₂-eq pri proizvodnji betona od RBA potječe od eksploatacije i obrade sirovine, uglavnom zbog proizvodnje cementa. To ukazuje da je otisak ugljika najzastupljeniji pri proizvodnji prirodnih komponenti za beton, iako isti sadrži reciklirani agregat.

Ispitivanjem koji su proveli Lei i sur. (2022: 10) dokazuje se da povećanjem udjela RBA, otisak CO₂-eq prilikom transporta prirodnog agregata je umanjeno sa 28,70 kg/t na 7,69 kg/t, odnosno za 73,21%. Razlog tome je znatno manja udaljenost transporta RBA od prirodnog agregata.

Također, zaključeno je da ukoliko udaljenost transporta RBA prelazi 331,7 km, otisak CO₂-eq betona od recikliranog agregata biti će veći od ekvivalentnog betona s prirodnim agregatom. Što je veći udio RBA, veća je promjena ovisnosti utiska CO₂-eq betona o udaljenosti transporta.

Tlačna čvrstoća betona od RBA opada s povećanjem udjela RBA. Za određeni udio RBA, prirast tlačne čvrstoće betona za 1 MPa rezultira povećanjem emisije CO₂-eq za 7,23 kg/m³. Dobiveni rezultat je i očekivan, iz razloga kako bi se dobio beton veće tlačne čvrstoće, vodocementni omjer je manji, što znači da ima više cementa u betonu, što u konačnici povećava emisiju CO₂-eq. Također, za istu tlačnu čvrstoću betona, emisija CO₂-eq raste za 0,42 kg za svaki 1% povećanja udjela RBA. To je iz razloga što povećanjem udjela RBA, potrebno je više cementa po volumenu betona kako bi se dobio isti razred tlačne čvrstoće. Prema tome, kada se promatra utjecaj emisije CO₂-eq pri proizvodnji betona, potrebno je uzeti u obzir i mehaničke karakteristike betona. Što je manji omjer CO₂-eq/čvrstoća, to je bolji utjecaj recikliranog betona na okoliš. Povećanjem udjela RBA od 0 – 100%, smanjuje se čvrstoća betona za 12 – 35%, dok je emisija CO₂-eq reducirana za 6 – 9%.

Konačno, za određeni vodocementni omjer, povećan udio RBA smanjuje emisiju CO₂-eq betona, ali povećava omjer CO₂-eq/čvrstoća. Što je veći udio RBA, to je emisija CO₂-eq betona više ovisna o promjeni udaljenosti transporta agregata.

2.4. Metode smanjenja utjecaja betona na okoliš

Učinkovitost u čuvanju okoliša može se postići i gradnjom betonskih konstrukcija veće trajnosti i dužeg projektnog života. Na taj način koristi se manje prirodnih resursa za izgradnju novih konstrukcija koje će ih zamijeniti. Korištenjem betona visokih performansi može se smanjiti količina cementa, agregata i vode u betonu. Takve betone karakterizira mali vodocementni omjer, sadržaj superplastifikatora i zamjena dijela cementa pucolanskim materijalima poput metakaolina. Prednost takvog betona je manji koeficijent poroznosti što povećava trajnost betona i produljuje uporabni vijek (Dokšanović i sur., 2012: 6).

Korištenje manje količine cementa u betonskoj mješavini moglo bi se postići na način da se odredba o nužnosti postizanja propisane čvrstoće betona promijeni sa trenutnih 28 dana na potrebnih 56 dana.

Takva odredba bi rezultirala mogućnošću većeg postotka zamjene portland cementa s cementnim industrijskim nusproduktima i pucolanskim materijalima, jer osnovnu prepreku zamjene većeg postotka portland cementa predstavlja sporiji prirast čvrstoće. Također, povoljne učinke cementnih dodataka moguće je maksimalno iskoristiti uz pravilnu njegu tijekom dužeg vremenskom perioda nego što se minimalno zahtijeva propisima. Najčešće korišteni industrijski nusprodukti koji služe kao zamjena cementu su leteći pepeo, zgura visokih peći, silikatna prašina, te prirodni pucolani kao što je metakaolin. Procijenjeno je kada bi se smanjio udio portland cementa u betonskoj mješavini za 30%, kompenzirao bi se prirast CO₂ uslijed kontinuiranog povećanja proizvodnje betona (Dokšanović i sur., 2012: 7).

Ograničenje koje značajno usporava rast upotrebe RBA je zahtjev za predvidivim svojstvima betona. Vrsta i količina štetnih sastojaka u RBA je nepoznata, stoga svojstva betona mogu varirati što može imati negativan učinak na čvrstoću i trajnost betona. Osim toga, korištenje sitnih frakcija RBA rezultira većom vodoupojnosti betona. Sastav betonske mješavine potrebno je prilagoditi kako bi se kompenzirao gubitak svojstava uslijed korištenja RBA. Pritom treba paziti da RBA ne sadrži tvari koje mogu negativno reagirati u kontaktu s cementom (Dokšanović i sur., 2012: 8).

3. PREGLED STANJA PODRUČJA

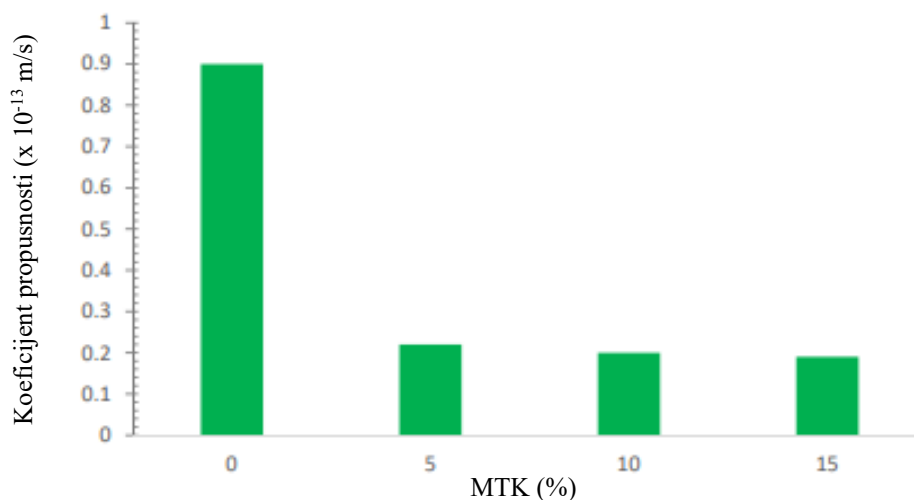
Trajnost se definira kao sposobnost materijala da se suprotstavi različitim djelovanjima iz okoliša u kojem je taj materijal izložen (Miličević, 2014: 32). Do kretanja raznih fluida kroz beton ne dolazi samo kroz poroznu strukturu betona, već i difuzivnim te kapilarnim djelovanjem. Prema tome, najvažnije svojstvo trajnosti je propusnost betona. Svi načini transporta fluida najviše ovise o strukturi hidratizirane cementne paste (Raju, Dharmar, 2017: 1032). Prodor supstanci kao što je voda, kloridi, kisik i sulfati mogu uzrokovati degradaciju betona. Trajnost betona ovisi o više parametara kao što su sastav i struktura materijala te utjecaj okoliša kojem je beton izložen. Osim propusnosti, važna svojstva koja utječu na trajnost betona su poroznost betona, apsorpcija vode, smrzavanje i odmrzavanje, otpornost na habanje, otpornost na požar i toplinska provodljivost te sadržaj pukotina betona (Miličević, 2014: 32).

U ovom istraživanju naglasak je na sljedeća svojstva trajnosti betona: dubina prodora vode pod tlakom, plinopropusnost i otpornost na habanje. Agresivne tvari iz okoliša mogu dospjeti u beton prilikom prodora vode ili plina, što rezultira korozijom armature u betonu i razaranjem betona. Mehaničko trošenje materijala uslijed habanja dovodi do promjene u volumenu betona i gubitka čvrstoće.

Kako bi se rezultati ispitivanja betona s recikliranim sastojcima uspješno usporedili i interpretirali, potrebno je prethodno proučiti dosadašnja istraživanja i ispitivanja. Razlog tome je što rezultati mogu varirati, čak biti i kontradiktorni, ovisno o mješavini betona ili načinu ispitivanja. Korištenje recikliranog agregata u betonu povećava poroznost betona. Smatra se da je vodoupojnost direktan pokazatelj propusnosti betona, što je ključno svojstvo trajnosti.

U svom radu Ahmad i sur. (2022: 14-15) zaključili su da udio metakaolina (MK) u betonu smanjuje koeficijent propusnosti vode očvrsnulog betona, ali smanjuje obradivost svježeg betona. Kako su čestice MK manje od čestica cementa, njihova reakcija s kalcijevim hidroksidom stvara dodatni C-S-H gel koji popunjava mikrostrukturu betona te poboljšava svojstva trajnosti u smislu manje poroznosti i propusnosti. Ispitani su uzorci betona s preporučenim optimalnim udjelom MK u vrijednosti 10 – 20% mase cementa. Rezultati ukazuju da uzorak s 10% MK ima najmanju apsorpciju, dok uzorak s 15% MK ima najmanju poroznost što implicira na najmanju propusnost.

Međutim, smatra se da se dogodila pogreška u ispitivanju, jer uzorak s 15% MK ima veću apsorpciju vode od uzorka s 10% MK koji ima veću poroznost. Pretpostavljeni razlozi pogreške su ljudski faktor te nefunkcionalnost tehnike. Provedeno je ispitivanje koeficijenta propusnosti, te je jasno vidljivo da je najmanji koeficijent dobiven za uzorak s 15% MK, što je vidljivo na dijagramu prikazanom na Slici 3.

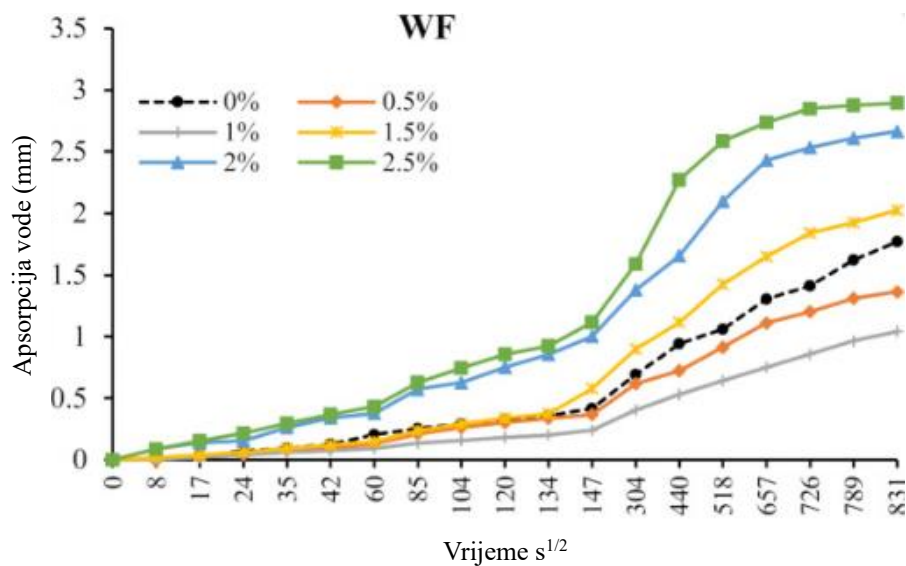


Slika 3: Koeficijent propusnosti ovisno o količini MK (Ahmad i sur., 2022: 14)

Istraživanja mogućnosti uporabe MK u betonu provodili su i Vaishali i Ghorpade (2011: 1618), gdje su dio cementa zamijenili s MK u iznosu, 10%, 20% i 30%, specifične težine $\sim 2,5$ g/cm³. Time su potvrdili optimalni udio MK u betonu čija vrijednost iznosi 10 – 20% mase cementa, te pozitivno utječe na svojstva propusnosti vode.

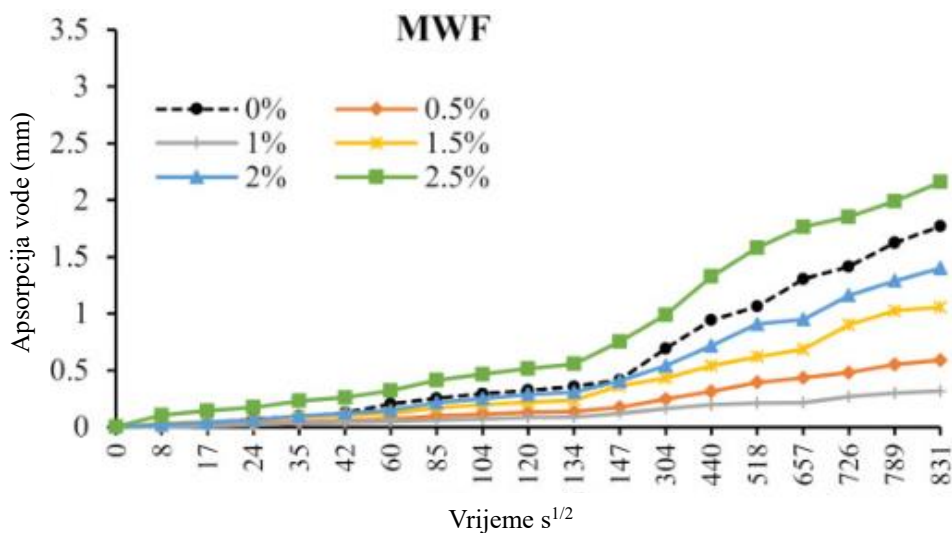
Apsorpciju vode ispitivali su i Kannan i Raja Priya (2020: 3-7) gdje su analizirali utjecaj različitog udjela MK u betonu na svojstvo apsorpcije. Apsorpcija četiri uzorka kocke brida 150 mm, s udjelom MK 10%, 20%, 30% i 40%, uspoređena je s apsorpcijom referentne mješavine u kojoj je korišten samo portland cement. Sve mješavine, uključujući i referentnu, imaju vodocementni omjer 0,37 te udio superplastifikatora 2% mase veziva. Pokazalo se da najmanju vodoupojnost ima uzorak s 20% MK u iznosu od 3,2%. Udio MK od 40% rezultira apsorpcijom vode od 4,2%, što je više od referentne mješavine (3,9%). Time se dokazuje da veći udio MK od optimalnog može rezultirati nepovoljnim svojstvima.

Što se tiče utjecaja vunenih vlakana na porozitet i propusnost betona, istraživanja su proveli Alyousef i sur. (2022). Izrađeno je pet uzoraka betona s vunenim vlaknima (WF) s 0,5 – 2,5% volumnog udjela mješavine, duljine 70 mm. Zbog utjecaja lužnatosti cementne matrice moguće je ograničenje trajnosti betona zbog gubitka čvrstoće vlakana i gubitka sposobnosti premošćivanja preko pukotina. Iz tog razloga korištena su i modificirana vunena vlakna (MWF) kako bi se smanjio taj rizik. Modificirana vunena vlakna dobivaju se uranjanjem ovčje vune na 24 sata u plastični spremnik ispunjen slanom vodom sobne temperature. Na taj način se povećava površinsko trenje vlakana i osigurava se dobra prionjivost s cementnom matricom. Tekućina u koju se uranja ovčja vuna sastoji se od slatke vode i 35% soli. Ispitivanjima je dokazano, da ukoliko se koriste obična vunena vlakna, poboljšana svojstva poroznosti i propusnosti se postižu udjelom do 1% volumena mješavine, u odnosu na referentni uzorak bez vlakana (Slika 4).



Slika 4: Utjecaj udjela vunenih vlakana na apsorpciju vode betona (Alyousef i sur., 2022)

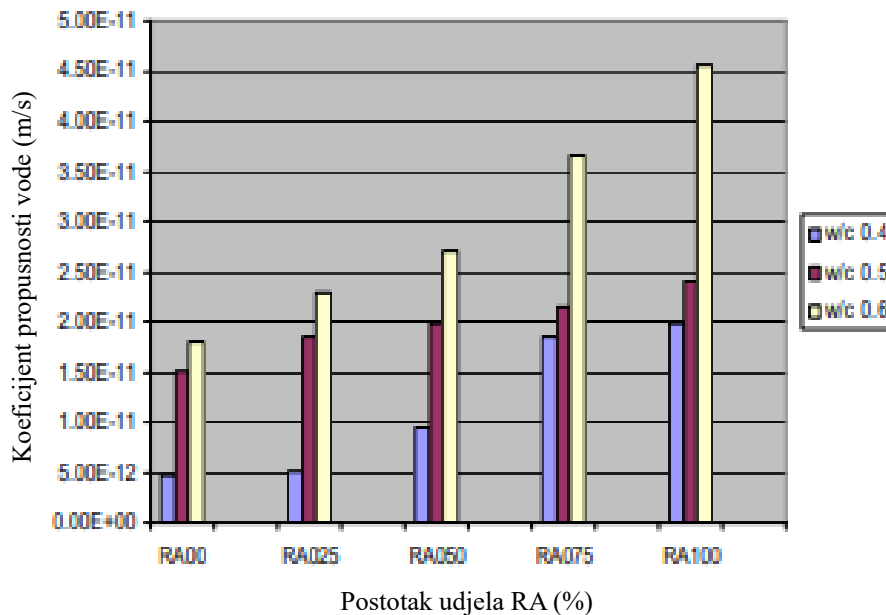
Međutim, ako se koriste modificirana vlakna, udio se može povećati i do 2% volumena mješavine kako bi se dodatno smanjila propusnost i do četiri puta (Slika 5). Veći udio od 2,5% ima štetan utjecaj na svojstva zbog neravnomjerne raspoređenosti vlakana.



Slika 5: Utjecaj udjela modificiranih vunenih vlakana na apsorpciju vode betona (Alyousef i sur., 2022)

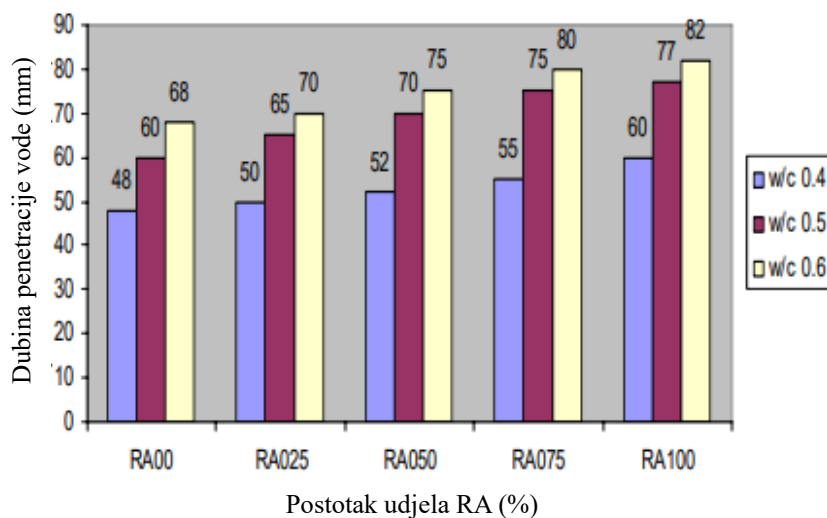
Ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom u beton s recikliranim agregatom provodili su Adnan i sur. (2008: 53-54). Prirodni krupni agregat zamijenjen je recikliranim agregatom (RA) u iznosu od 25%, 50%, 75% te 100%. Također, sve mješavine su napravljene s tri različita v/c omjera u iznosu 0,4, 0,5 i 0,6. Najveće zrno RA ograničeno je na 20 mm. Pretpostavljeno je da veći udio RA rezultira većom vodopropusnosti uzorka.

Uzorci su betonske kocke brida 100 mm, ispitivane pomoću GWT aparata i VDP uređaja. Na Slici 6 prikazan je dijagram rezultata ispitivanja dobiven pomoću GWT aparata, čime je potvrđena prethodna pretpostavka.



Slika 6: Koeficijent propusnosti ispitan GWT aparatom (Adnan i sur., 2008: 53)

Ispitivanje na VDP uređaju pokazalo je jednak trend, što je veći udio RA, to je penetracija vode veća (Slika 7). Također, uočljivo je da se većim v/c omjerom dobiva veća penetracija vode.



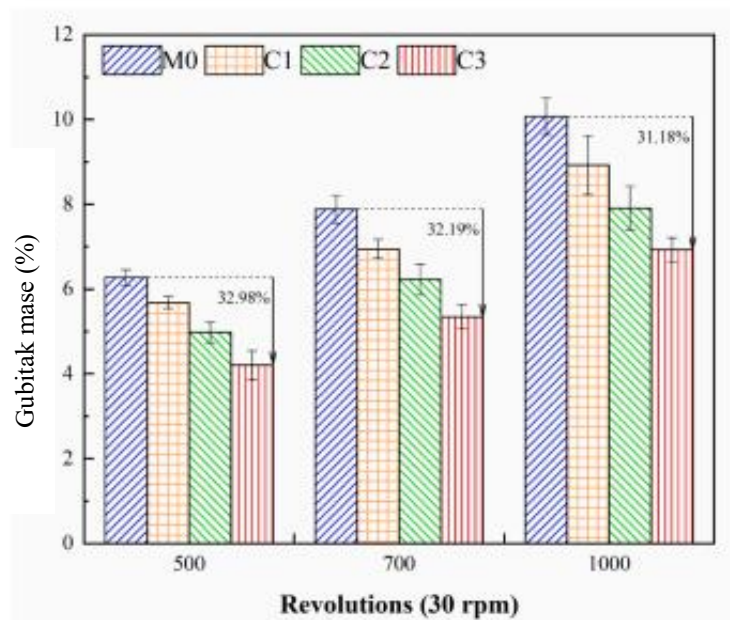
Slika 7: Dubina penetracije vode ispitan VDP uređajem (Adnan i sur., 2008: 53)

Slični ishod ispitivanja dobili su i Gomez-Soberon i sur. (2001: 3-15), gdje su također prirodni agregat zamijenili RA u udjelima 15%, 30%, 60% i 100% u odnosu na volumen betona. Iako su uzorci valjkastog oblika, te njegovani, sušeni i ispitani po drugačijim smjernicama, rezultat ispitivanja je potvrdio da se povećanjem udjela RA povećava i vodopropusnost. Točnije, maksimalan prodor vode je kod uzorka s 100% RA, a razlika u odnosu na uzorak s 0% RA je 37%.

Istraživanje utjecaja mineralnih dodataka na svojstva betona s recikliranim agregatom proveli su Kubissa i sur. (2016: 584-588). Iako je dokazano da dodavanje RA betonu smanjuje otpornost na prodor raznih štetnih tvari, korištenjem mineralnih dodataka kao što su metakaolin ili leteći pepeo moguće je povratiti željena svojstva nepropusnosti. Uspoređena je vodonepropusnost betonskog uzorka s 50% letećeg pepela i 10% MK (oznaka IV), te uzorka s istim udjelom veziva, ali sa 100% zamijenjenim krupnim prirodnim agregatom s recikliranim (oznaka IV R). Vodocementni omjeri za obje mješavine bili su jednaki. Test dubine prodora vode pod tlakom proveden je na uzorku kocke brida 150 mm, uz konstantan tlak od 0,5 MPa u vremenskom periodu 72 h. Prodor vode u uzorak IV bio je 20,6 mm, a vrijednost prodiranja u uzorak IV R doseže 32,6 mm. Zaključeno je da se vodopropusnost povećava s dodavanjem RA i to za 58%. Prodor vode u uzorak običnog betona bez RA i cementnih dodataka doseže 37,3 mm. Prema tome vidljivo je da MK i leteći pepeo znatno smanjuju vodopropusnost, dok je RA povećava. U ovom slučaju uzorak IV R ima manju propusnost od referentnog za 14%. Konačni zaključak je da se uporabom RA može postići manja propusnost od običnog betona, ali samo ako mješavina sadrži i mineralne dodatke.

Što se tiče otpornosti na habanje, istraživanje su proveli Deng i sur. (2023: 4-10). Cilj istraživanja je bilo utvrditi kako različita vlakna i njihove kombinacije utječu na abrazivnu otpornost betona. Ispitivanja su provedena prema Los Angeles postupku, a pokazalo se da se otpornost na habanje povećava s većim udjelom vlakana i povećanjem duljine vlakana. Koristila su se polietilenska vlakna (PE) udjela do 0,3% mase cementa i duljine manje od 18 mm. Stopa habanja linearno raste s povećanjem broja okretaja na LA aparatu, što znači da je utjecaj PE vlakana konstantan i stabilan. Napominje se da LA test uzrokuje veće habanje i deformaciju uzoraka nego ostala ispitivanja.

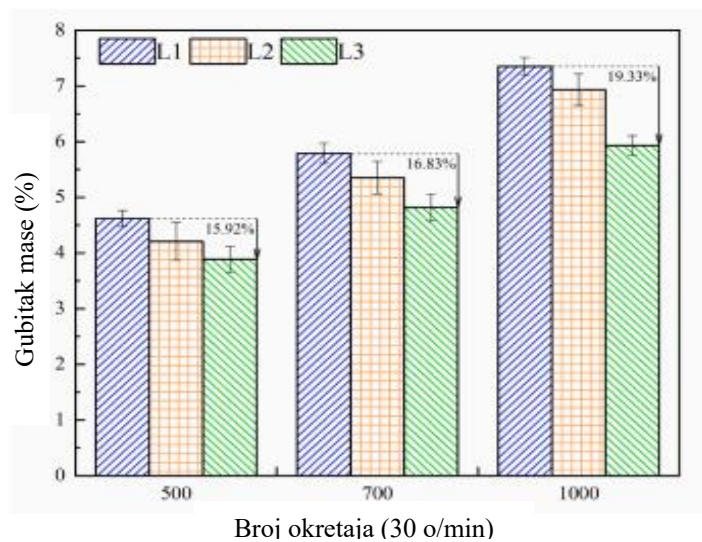
Na Slici 8 prikazan je dijagram postotka gubitka mase uzorka pri različitom broju okretaja i količini PE vlakana. MO predstavlja uzorak bez vlakana, C1 uzorak s 0,1% vlakana, C2 s 0,2%, a C3 s 0,3% vlakana. Sva vlakna su duljine 12 mm.



Broj okretaja (30 o/min)

Slika 8: Otpornost na habanje ovisno o udjelu PE vlakana (Deng i sur., 2023: 9)

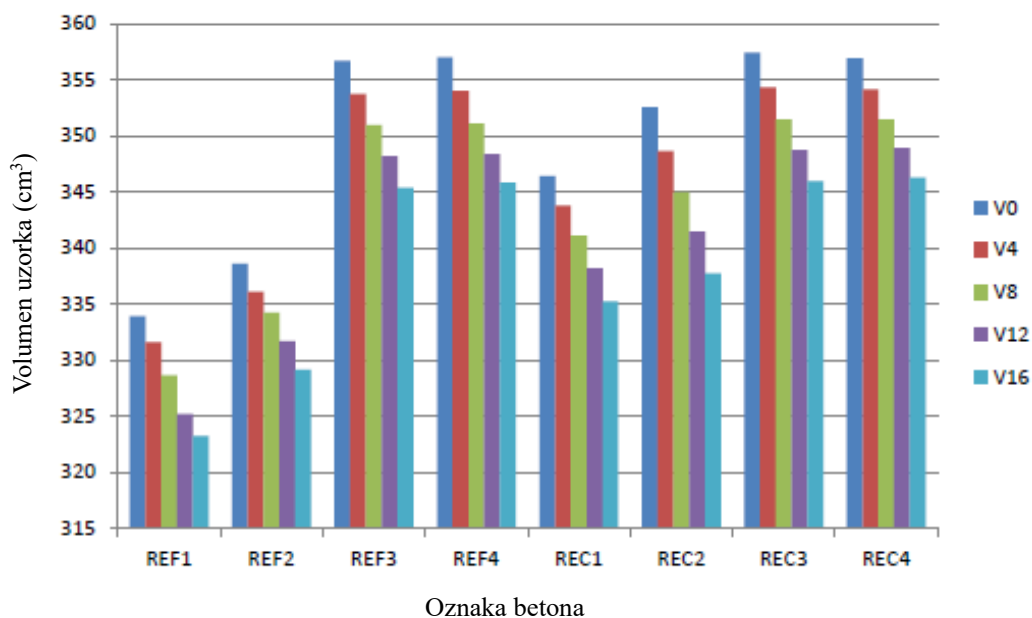
Na Slici 9 prikazan je dijagram postotka gubitka mase uzorka pri različitom broju okretaja i duljinama PE vlakana. L1 predstavlja uzorak s vlaknima duljine 6 mm, L2 duljine 12 mm, a L3 duljine vlakana 18 mm. Svaki uzorak ima jednak udio PE vlakana od 0,3%.



Slika 9: Otpornost na habanje ovisno o duljini PE vlakana (Deng i sur., 2023: 9)

Istraživanjem (Krajnović, 2017: 35-51) analizirano je kako RA utječe na abrazivna svojstva. Ispitivanje je provedeno na 8 uzoraka kocke brida 7 cm, gdje su uzorci REF1 – REF4 s prirodnim agregatom, a uzorci REC1 – REC4 s recikliranim agregatom u iznosu 70%. Otpornost na abraziju je ispitana s pomoću Böhme uređaja.

Prema dijagramu na Slici 10 može se zaključiti da je abrazivna otpornost uzoraka s RA jednaka ili malo povoljnija s obzirom na uzorke s prirodnim agregatom. Također vidljiv je linearni abrazivni učinak smanjenja volumena u odnosu na povećanje broja rotacija.



Slika 10: Abrazija uzoraka ovisno o udjelu recikliranog agregata i broju rotacija (Krajnović, 2017: 50)

Zaključno, prema (Macan, 2013: 65) otpornost na habanje je vrlo važno svojstvo trajnosti betona, naročito u primjeni kod prometnica, pješačkih staza i sličnih konstrukcija gdje je izražena abrazija. Beton s RA ima dobru, u nekim slučajevima čak i bolju otpornost na habanje u odnosu na običan beton. Razlog tome je bolja prionjivost cementne paste i recikliranog agregata.

U istraživanju (Pimentel i sur., 2020: 6, 11) provedena su ispitivanja svojstva plinopropusnosti betona T 30 ARCO koji sadrži 30% recikliranog betonskog agregata, v/c omjer 0,6 i tlačnu čvrstoću od 30 MPa. Nakon 210 dana, uzorci su ispitani pomoću uređaja Poroscope na propusnost zraka.

Na površinu uzorka vršio se tlak zraka od 55 kPa, zatim je provedeno mjerenje koliko sekundi je potrebno da tlak padne na 50 kPa. Propusnost zraka utvrđena je na temelju potrebnog vremena da zrak prođe kroz pore betona, tako da uzrokuje pad ulaznog tlaka na površini uzorka. Rezultat mjerenja potrebnog vremena prolaznosti zraka kroz pore betona iznosi 55,5 s za referentni beton T REF, te 21,5 s za beton T 30 ARCO. Nakon provedenog ispitivanja utvrđeno je da beton T 30 ARCO ima gotovo 3 puta veću propusnost zraka u odnosu na beton T REF koji ne sadrži reciklirani agregat.

Slično ispitivanje je provedeno u radu (Wang i sur., 2016) gdje je korišten beton RAC s recikliranim betonskim agregatom 25% mase prirodnog agregata, fosfornom zgurom (PHS) 10% mase cementa, mljevenom granuliranom zgurom visokih peći (GGBS) 10% mase cementa te superplastifikatorom 1,5% mase veziva. Uzorci betona su ispitani na propusnost zraka pomoću uređaja Autoclam. Tlak zraka u uređaju je podešen na nešto više od 0,5 bara (50 kPa), zatim je u narednih 15 minuta svaku 1 minutu zabilježen pad tlaka zraka. Rezultat propusnosti zraka predstavlja koeficijent izračunat prema srednjoj vrijednosti linearnog pada tlaka između 5 i 15 minuta. Koeficijent propusnosti betona RAC iznosi 0,0240 bara/minuti, dok za običan referentni beton NAC iznosi 0,0476 bara/minuti. Prema dobivenim rezultatima zaključuje se da dodatna hidratacija pucolanskih materijala smanjuje propusnost betona unatoč korištenju RBA. U ovom slučaju, dodatna produkcija C-S-H gela rezultirala je smanjenjem propusnosti zraka betona RAC za 50% u odnosu na beton NAC.

Ispitivanje propusnosti zraka betona proveli su i Cantero i sur. (2021). Izrađeni su betonski uzorci različite recepture. Kao vezivo korišten je obični portland cement (OPC), te mljeveni reciklirani beton GRC udjela 10 ili 25% mase cementa. GRC je dobiven drobljenjem i mljevenjem laboratorijskih betonskih uzoraka. Uz prirodni agregat korišten je i miješani reciklirani agregat (MRA) u iznosu od 50%. MRA sastoji se od recikliranog betona i morta, prirodnog kamena, gline, stakla, bitumenskih materijala, gipsa, metala i lebdećih čestica. Propusnost kisika različitih betonskih uzoraka starosti 28 i 90 dana ispitana je prema Cembureau metodi. Rezultati ukazuju da uzorci stari 90 dana imaju manju propusnost kisika od uzoraka starosti 28 dana, neovisno o sadržaju GRC i MRA. Međutim, veći udio GRC i MRA rezultira porastom propusnosti betona zbog veće poroznosti cementnih matrica uslijed prisutnosti nereaktivnih čestica GRC i veće poroznosti MRA od prirodnog agregata.

4. ISPITIVANJE SVOJTAVA TRAJNOSTI BETONA

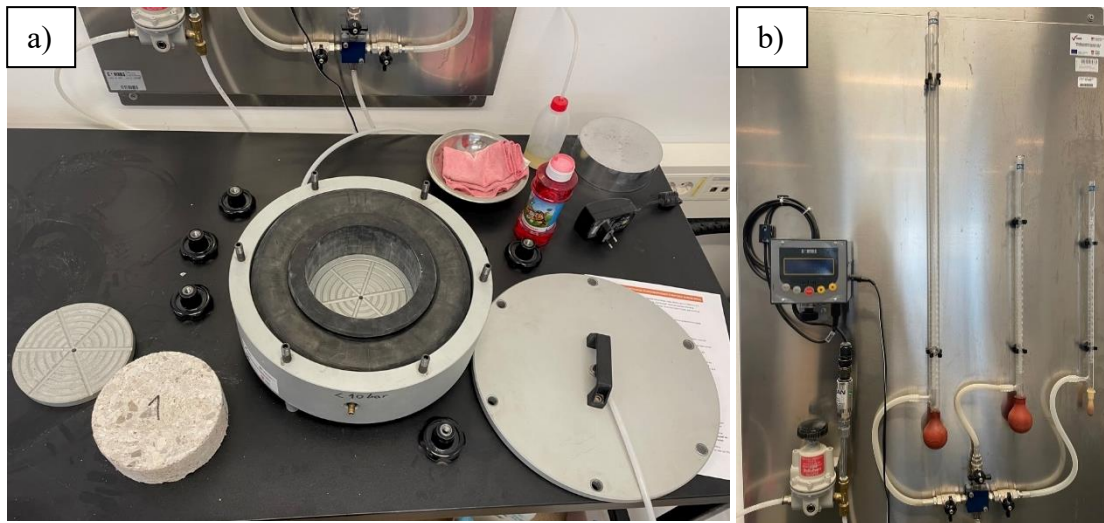
Trajnost betona je moguće ocijeniti ispitivanjem različitih parametara pomoću raznih uređaja. U ovom radu provedena su ispitivanja dubine prodora vode u beton, plinopropusnosti betona i njegove otpornost na habanje. U nastavku je opisan postupak mjerenja i aparature za provođenje ispitivanja.

4.1. Plinopropusnost betona

Ispitivanje betonskih uzoraka na plinopropusnost provedeno je prema preporuci europske udruge za cement Cembureau (UNI 58-E0031). Sve do danas nije definirana norma kojom se navodi konkretan postupak ispitivanja plinopropusnosti, međutim pomoću Cembureau metode dobivaju se pouzdani rezultati koji direktno ukazuju na svojstvo plinopropusnosti. Ispitivanje se temelji na mjerenju vremena protoka mjehurića plina kroz uzorak od betona, uslijed izlaganja uzorka tlaku plina.

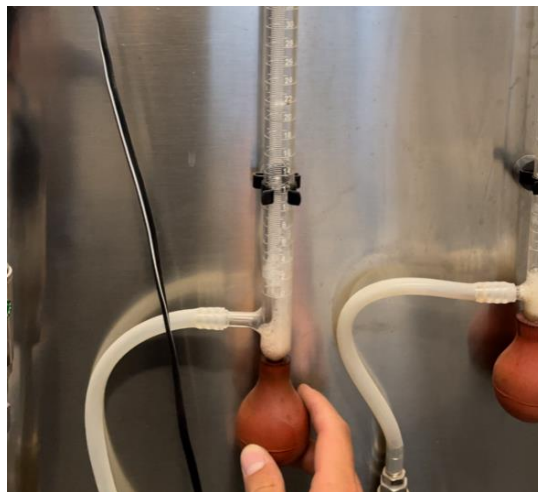
Kako bi ispitivanje bilo precizno i pouzdano, potrebno je kvalitetno izraditi uzorke betona. Ukoliko je uzorak saturiran, napuknut ili je vidljiva segregacija, rezultati ispitivanja neće biti mjerodavni. Za ovu metodu ispitivanja betonska mješavina se izlijeva u kalup valjkastog oblika. Nakon primjerenog njegovanja betonski valjak se pili kako bi se dobili uzorci promjera 150 mm i visine 50 mm, uz dozvoljeno odstupanje $\pm 0,5$ mm. Radi homogenosti uzoraka, maksimalno zrno agregata je ograničeno na 20 mm, odnosno $2/5$ debljine uzorka.

Uređaj za ispitivanje sastoji se od aluminijskog kućišta u koje se stavlja testni uzorak, gumene zračnice kojom se sprječava propusnost plina kroz bočne stranice uzoraka, zidnog panela koji sadrži tri epruvete volumena 10, 25 i 100 ml pomoću kojih se mjeri protok plina, digitalnog manometra za podešavanje tlaka u uzorku, ventila za protok ulaznog tlaka i ventila koji kontroliraju protok prema određenoj epruveti (Slika 11). Prema Cembureau preporučuje se kisik kao plin za provedbu ispitivanja.



Slika 11: Aparatura za provođenje pokusa. a) Prazna zračna komora, gumena zračnica, poklopac i vijci b) Digitalni manometar, ventili i mjeraci protoka (Autor: Matija Budić)

Njegovan i ispiljen uzorak stavlja se u zračnu komoru uređaja tako da su aluminijski diskovi s gornje i donje strane okrenuti urezanim površinom prema uzorku. Njihova uloga je ravnomjerna distribucija plina po površini uzorka. U zračnoj komori uzorak je obavijen gumenom zračnicom koja je napuhana na 0,1 bar kako bi se uzorak mogao dobro utisnuti u nju. Zračna komora se zatvara poklopcem koji se križno i ujednačeno pričvršćuje vijcima. Zatim se gumeni obruč napuše tlakom zraka između 6 i 7 bara. Otvara se dotok plina do digitalnog manometra, pri čemu se mora paziti da je tlak iz plinske boce reduciran na maksimalno 10 bara. Gumice na dnu epruveta pune se sapunastom tekućinom kako bi se mogli stvoriti mjehurići za mjerenje protoka plina (Slika 12).



Slika 12: Punjenje gumica sapunastom tekućinom (Autor: Matija Budić)

Ispitivanje se provodi u uvjetima temperature $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Potrebno je poznavati i atmosferski tlak koji je potreban za izračun plinopropusnosti uz točnost 5×10^2 Pa. Samo ispitivanje započinje podešavanjem tlaka u ćeliji na 1,5 bar, te otvaranjem ventila na cijevi određene epruvete. Odabir epruvete koja će se koristiti u ispitivanju temelji se na pravilu da je vrijeme protoka mjehurića zraka kroz građuirani dio epruvete između 20 i 60 s. Kreće se od najmanje epruvete prema većoj ako ima potrebe za time. Ukoliko je mjehuriću zraka potrebno manje od 20 s do vrha građuiranog dijela, odabrana epruveta je premala i potrebno je preusmjeriti tlak ventilom prema većoj. Ukoliko je mjehuriću potrebno više od 60 s, tlak treba regulirati prema manjoj epruveti. Stiskanjem gumice na dnu epruvete stvaraju se mjehurići zraka te se pomoću mjerača mjeri vrijeme potrebno da isti prijeđe građuirani dio epruvete (Slika 13).



Slika 13: Pripremljena aparatura i početak ispitivanja
(Autor: Matija Budić)

Očitanje se bilježi sve dok razlika između dva uzastopna mjerenja nije veća od 3%. U tom slučaju protok se može smatrati stacionarnim. Potrebno je napraviti barem dva očitavanja za određeni tlak kako bi se izračunala srednja vrijednost protoka plina. Za jedan uzorak potrebno je obaviti mjerenja za tlak od 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 bara.

4.2. Dubina prodora vode pod tlakom

Ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom betona provodi se prema normi HRN EN 12390 – 8, a zasniva se na određivanju dubine prodora vode pod zadanim tlakom. Mjerenja se provode na prizmatičnim uzorcima visine do 200 mm, te cilindričnim uzorcima visine do 300 mm koji su ukliješteni između čeličnog okvira s gornje strane i vodonepropusne gumene brtve s donje strane. Površina uzorka koja je u kontaktu s vodom mora biti prethodno ohrapavljena pomoću čelične četke, a zatim se kontrolirano nanosi voda pod tlakom. Površina uzorka koja je zaglađena u kalupu prilikom izrade ne smije biti podvrgnuta tlaku vode. Ispitivanje se provodi nakon njegovanja uzoraka u vodi 28 dana na temperaturi 20 ± 2 °C.

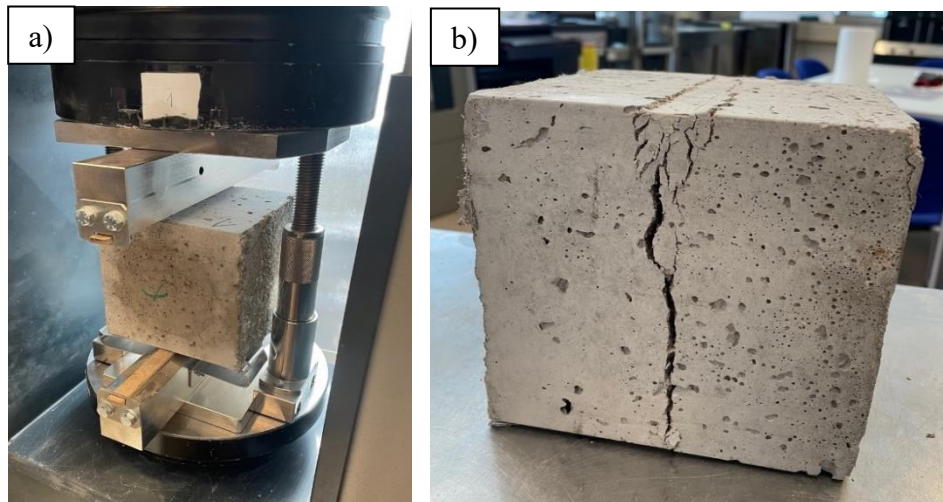
Uređaj za ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom sastoji se od čeličnog okvira koji pomoću navoja steže uzorak s gornje strane, vodonepropusne gumene brtve, ventila, mjerača za kontrolu tlaka vode te prozirnih graduiranih bireta koje omogućavaju uvid u propuštenu količinu vode (Slika 14).



Slika 14: Uređaj za ispitivanje dubine prodora vode u beton (Autor: Matija Budić)

Uzorci se u uređaju izlažu tlaku vode od 500 ± 50 kPa u vremenskom periodu 72 ± 2 h. Važno je tijekom ispitivanja kontrolirati pojavu vode na površini uzoraka kako bi se pravovremeno uočila. Ukoliko se zapazi curenje na nekoj od površina uzorka koja nije izložena tlaku vode, potrebno je zabilježiti vrijeme zapažanja curenja te ponoviti ispitivanje na drugom uzorku u svrhu dobivanja relevantnih rezultata.

Nakon vremenskog perioda tlačenja uzoraka vodom, uzorci se vade iz uređaja, površina koja je bila izložena tlaku se čisti od površinskog filma vode i mogućih oštećenja. Uzorci se potom cijepaju na uređaju za ispitivanje čvrstoće na način da se cijepa okomito na plohu koja je bila podvrgnuta tlaku, tako da se ta ploha postavi okrenuta prema dolje (Slika 15).



Slika 15: Cijepanje uzoraka. a) Uređaj za ispitivanje čvrstoće b) Cijepani uzorak
(Autor: Matija Budić)

Nakon cijepanja potrebno je što prije zabilježiti markerom uočenu dubinu prodora vode, jer se rascijepano lice brzo suši i onemogućava precizno mjerenje. Na Slici 16 prikazano je obilježavanje prodora vode u uzorak.



Slika 16: Označavanje i mjerenje dubine prodora vode
(Autor: Matija Budić)

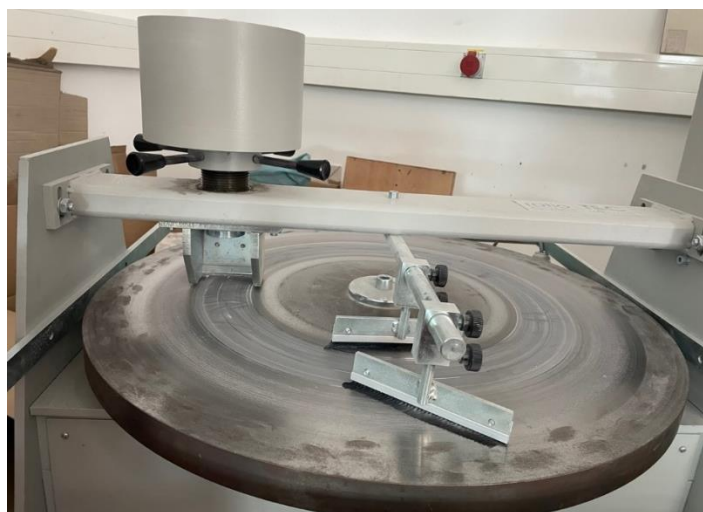
Mjerodavnu veličinu predstavlja maksimalna dubina prodora u mm, zabilježena na bilo kojoj polovici rascijepanog uzorka. U rezultate se osim dubine prodora vode može zapisati i datum početka testa, smjer tlačenja vode u odnosu na smjer oblikovanja, te pojava curenja ukoliko je prisutna.

4.3. Otpornost na habanje betona – metoda Böhme

Ispitivanje betonskih uzoraka na habanje provodilo se prema Böhme metodi (HRN EN 13892-3). Princip ispitivanja se bazira na izlaganju uzorka rotacijskom metalnom stolu koji svojim ciklusima izaziva trošenje površine uzorka.

Za ispitivanje je potrebno izraditi uzorke oblika kocke brida $71 \pm 1,5$ mm. Betonskom mješavinom se pune kalupi za izradu uzoraka, prilikom čega treba paziti na točnost i pravilnost dimenzija kako bi uzorci stali u uređaj za ispitivanje. Uzorci se njeguju 28 dana u vodi, te se suše na temperaturi $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ do konstantne mase, a zatim hlade na sobnoj temperaturi $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Prije početka eksperimenta i mjerenja mase uzoraka potrebno je provjeriti stane li uzorak u metalni držač aparata. Ukoliko ne stane, a radi se o sitnim nepravilnostima, moguće je izvršiti manje preinake u smislu poravnjanja površine uzorka.

Uređaj za ispitivanje sastoji se od rotacijskog metalnog stola približnog promjera 750 mm, držača uzorka, dijela za nanošenje opterećenja te ekrana koji pokazuje broj okretaja i ciklusa (Slika 17).



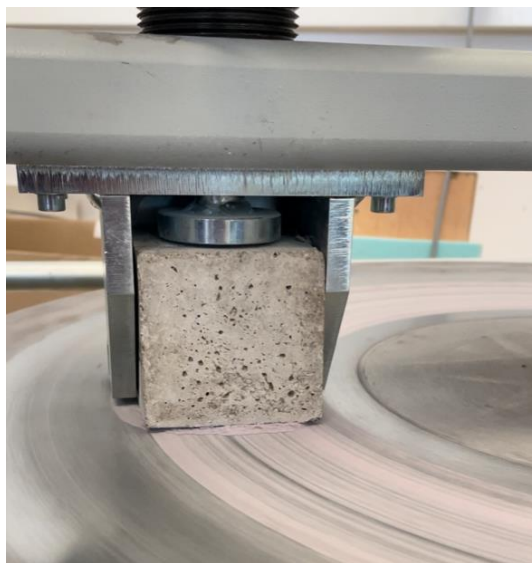
Slika 17: Uređaj za ispitivanje na habanje (Autor: Matija Budić)

Prethodno ispitivanju potrebno je izvagati svaki uzorak. Na rotacijski metalni stol pravilno se raspoređi 20 g abrazivnog pijeska po cijelom opsegu ohrapavljenog dijela kružnog pojasa (Slika 18).



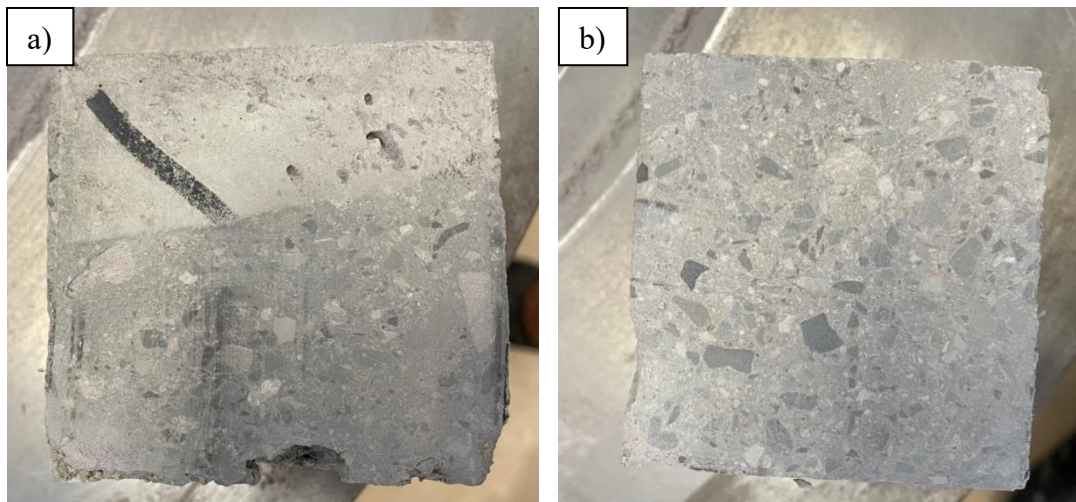
Slika 18: Raspoređeni kvarcni pijesak na rotacijskom stolu
(Autor: Matija Budić)

Potom se uzorak stavlja u metalni držač te se nanosi opterećenje od 294 ± 3 N na gornju plohu uzorka. Zatim se uređaj stavi u pogon te se metalni stol počinje rotirati brzinom od 30 ± 1 rotacije/minuti dok uzorak stoji na mjestu, što uz djelovanje kvarcnog pijeska rezultira gubitkom mase uzorka (Slika 19).



Slika 19: Postavljanje uzorka u metalno kućište i
pokretanje rotacija (Autor: Matija Budić)

Prethodno ispitivanju svaki uzorak treba proći 4 ciklusa rotacije u svrhu izjednačavanja sitnih površinskih nedostataka. Svaki uzorak se izlaže habanju od 16 ciklusa po 22 okretaja. Prije svakog novog ciklusa potrebno je ukloniti uzorak, usisati sav pijesak na stolu te nanijeti novi sloj abrazivnog pijeska od 20 g. Uzorak se zatim postavlja u kućište na istu plohu koja je prethodno bila izložena habanju, ali zarotiran za 90° u jednom smjeru. Na taj način je ista ploha uzorka izložena habanju s oba okomita smjera. Na Slici 20 prikazan je izgled istrošene plohe uzorka nakon habanja.



Slika 20: Istrošeni uzorak uslijed habanja. a) Djelomično habanje nakon 8 ciklusa
b) Potpuno habanje nakon 20 ciklusa (Autor: Matija Budić)

Nakon svaka četiri ciklusa zapisuje se masa uzorka kako bi se dobila procjena o brzini trošenja betona. Konačni rezultat ispitivanja na habanje se dobiva mjerenjem mase uzorka nakon izvršena ukupno 20 ciklusa (4 pripremna + 16 normirana). Rezultat se iskazuje kao promjena u volumenu betona prije i nakon ispitivanja.

5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

5.1. Uvod

Cilj ovog istraživanja je ispitivanje svojstava trajnosti betona kojima je dio sastojaka zamijenjen recikliranim materijalima. Napravljene su tri betonske mješavine koje se razlikuju prema sadržaju recikliranih sastojaka, te je provedena usporedba rezultata ispitivanja kako bi se utvrdilo koji reciklirani sastojak ima najveći utjecaj na pojedina svojstva trajnosti. Kako bi ispitivanje bilo što relevantnije, u svim mješavinama je jednak vodovezivni omjer, promjer najvećeg zrna agregata od 16 mm, te granulometrijski sastav prirodnog i recikliranog agregata. Na taj način svojstva trajnosti različitih mješavina isključivo ovise o postojanju recikliranih sastojaka i njihovim udjelima. Ukoliko bi se upotrebljavao prirodni i reciklirani agregat drugačije kvalitete za svaku pojedinu mješavinu, ili kada bi se varirao vodovezivni omjer, ne bi bila jasna interpretacija rezultata iz razloga što svojstva trajnosti tada ovise o kvaliteti i udjelima recikliranih sastojaka. Sva ispitivanja su provedena u prostoru laboratorija Građevinskog fakulteta u Rijeci.

5.2. Projektiranje betonskih mješavina

Za zahtijevani razred tlačne čvrstoće C25/30, te razred slijeganja S4 (160 – 210 mm) izrađene su tri mješavine betona. U ovom istraživanju ispitani beton namijenjen je za konstrukcijske elemente kao šta su armirani temelji, zidovi, ploče i stupovi. Razred izloženosti prema HRN EN 206-1:2006 je XC3 što označava umjereno vlažnu okolinu. Za izradu betonskih mješavina korišteni su sljedeći sastojci, ovisno o mješavini u različitim udjelima: cement, metakaolin, voda, reciklirana voda, superplastifikator, aerant, polipropilenska vlakna, vunena vlakna, prirodni agregat, PVC piljevina te reciklirani betonski agregat (RBA). Odabrani vodovezivni omjer iznosi 0,45 kako bi se zadovoljili uvjeti čvrstoće i trajnosti. Približna količina vode za 1 m³ betonske mješavine odabrana je obzirom na najveće zrno agregata ($D_{\max} = 16$ mm) i odabrani razred konzistencije slijeganjem S4. Izračunat je potreban broj uzoraka za ispitivanje na mehanička i trajnosna svojstva. Iako mehanička svojstva nisu predmet ovog istraživanja, uzorci za ispitivanje istih su uračunati u potrebni volumen mješavine radi drugih istraživanja.

Potrebni volumen je uvećan koeficijentom 1,12 radi predviđenih gubitaka uslijed miješanja i ispitivanja svježeg betona. Ukupni volumen pojedine mješavine iznosi 68 l. Broj uzoraka za pojedino ispitivanje i potrebni volumen mješavine prikazan je u Tablici 1.

*Tablica 1: Broj uzoraka za ispitivanje i potrebni volumen mješavine
(Autor: Matija Budić)*

| POTREBNI VOLUMEN MJEŠAVINE | | | |
|------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------|
| Uzorak | Volumen (dm ³) | Ispitivanje | Br. uzoraka |
| Kocka | 3,375 | VDP, tlačna čvrstoća | 9 |
| Valjak | 5,301 | Plinopropusnost | 1 |
| Prizma | 4 | Savijanje | 6 |
| Kockica | 0,343 | Habanje | 3 |
| Ukupni volumen mješavine (l) | | | 68,0 |

5.2.1. Cement

Cement je hidrauličko vezivo, odnosno fino mljeveni anorganski materijal koji reagira u kontaktu s vodom, te nastupa proces hidratacije kojim se stvara cementno vezivo koje veže komponente betona. Izbor vrste cementa ovisi o zahtijevanim svojstvima čvrstoće, brzine rasta čvrstoće, topline hidratacije te kemijske otpornosti (Klobučar, 2016: 19). U ovom istraživanju korišten je cement CEM II/B-LL 42,5 N proizvođača Holcim (Hrvatska) d.o.o. Prema tehničkim specifikacijama proizvođača Holcim, to je portlandski cement s dodatkom vapnenca koji se sastoji od 65 – 79% portlandskog cementnog klinkera, 21 – 35% vapnenca (LL), do 5% filtarske prašine iz procesa proizvodnje portlandskog cementnog klinkera i industrijskog gipsa, koja služi kao regulator vezanja. Razred čvrstoće cementa je 42,5 MPa, uz običnu brzinu rasta čvrstoće. Svojstva ovog cementa su mali do umjeren zahtjev za vodom, mali gubitak optimalne početne konzistencije, optimalno vrijeme vezivanja, umjeren razvoj topline hidratacije te dobra obradivost.

5.2.2. Metakaolin

Korišten metakaolin je Metaver M proizvođača Newchem. To je pucolanski dodatak za stvrdnjavanje cementnih građevinskih materijala, nastao termičkom obradom čistog kaolina. Metaver M je blago crvenkaste boje, te reagira s kalcijevim hidroksidom čime se stvara novi C-S-H gel. Prema tehničkom listu proizvođača glavni kemijski sastav čini silicijev dioksid i aluminijski oksid. Specifična gustoća je $2,6 \text{ g/cm}^3$, a veličina čestica se kreće od $3,8 - 15 \text{ }\mu\text{m}$. Zbog svoje veličine čestica ne dolazi do velikog povećanja potrebne količine vode u mješavini. Prema proizvođaču najveće prednosti korištenja MK je povećanje čvrstoće i gustoće betona. Preporučena doza proizvođača je $5 - 15\%$ zamjene mase cementa.

5.2.3. Voda

Ovisno o mješavini, korištena je obična voda iz gradskog vodovoda ili reciklirana voda dobivena ispiranjem miješalica u pogonu betonare GP Krk d.d. Proračunata je korigirana masa vode u betonskoj mješavini na temelju parametara efektivne apsorpcije i vlažnosti agregata.

5.2.4. Superplastifikator

Superplastifikatori (SP) su kemijski dodatci betonu koji smanjuju potrebu za vodom uz zadržavanje iste konzistencije betona. Time se smanjuje vodocementni omjer što rezultira povećanjem čvrstoće, smanjenjem propusnosti i boljim trajnosnim svojstvima. Također, korištenjem superplastifikatora moguće je zadržati isti vodocementni omjer uz postizanje bolje obradivosti (Klobučar, 2016: 25). Za potrebe ovog istraživanja korišten je superplastifikator MasterGlenium SKY 8320 proizvođača Sika, koji spada u novu generaciju SP na osnovi polikarboksilnih etera polimera (PCE). Tehničkim specifikacijama proizvođača navodi se da korišteni SP ne sadrži kloride i da je kompatibilan sa svim cementima koji odgovaraju međunarodnom standardu. Također, proizvođač preporučuje korištenje ovog SP za povećanje obradivosti i trajnosti betona, velike transporte betona, te betoniranje u vrućim vremenskim uvjetima ili kod korištenja pumpe za beton. Moguće je postizanje veće tlačne čvrstoće betona, uz smanjenje propusnosti, skupljanja i puzanja betona.

Prema uputama proizvođača, preporuča se doziranje 800 – 2000 ml na 100 kg cementa. Može se koristiti i druga doza ovisno o specifičnim uvjetima rada, a optimalan udio se usvaja prema probnim mješavinama.

5.2.5. Aerant

Aerant je kemijski dodatak betonskoj mješavini koji stvara zatvorene mjehuriće zraka, jednoliko raspoređene u cementnoj pasti. Nastali mjehurići su većih dimenzija od kapilara, te onemogućuju kapilarno kretanje vode kroz beton. Obzirom da veći udio pora u betonu smanjuje njegovu čvrstoću, povoljnije je da aerant uvlači sitnije mjehuriće zraka. Prema najvećoj frakciji agregata i dodatku aeranta pretpostavljena količina uvučenog zraka je 5%. U ovom istraživanju korišten je aerant Luftporenbildner LPS A-94 proizvođača Sika. U tehničkom listu navode se prednosti korištenja aeranta LPS A-94, a to je formiranje najmanjih, jednoliko raspoređenih zračnih pora čak i u najtežim uvjetima, mogućnost ekspanzije vode koja se smrzava, smanjenje kapilarnog upijanja te zamjena sitnih čestica agregata. Neke karakteristike aeranta LPS A-94 su smeđa boja tekućine pH vrijednosti 7, ukupan sadržaj iona klorida $\leq 0,10\%$ i ekvivalent natrijevog oksida $\leq 0,50\%$. Proizvođač preporuča doziranje 0,2 – 0,8% mase cementa, dodavanje u mješavinu simultano s vodom ili kao posljednji dodatak zasebno. Vrijeme miješanja nakon dodavanja mora iznositi barem 60 s.

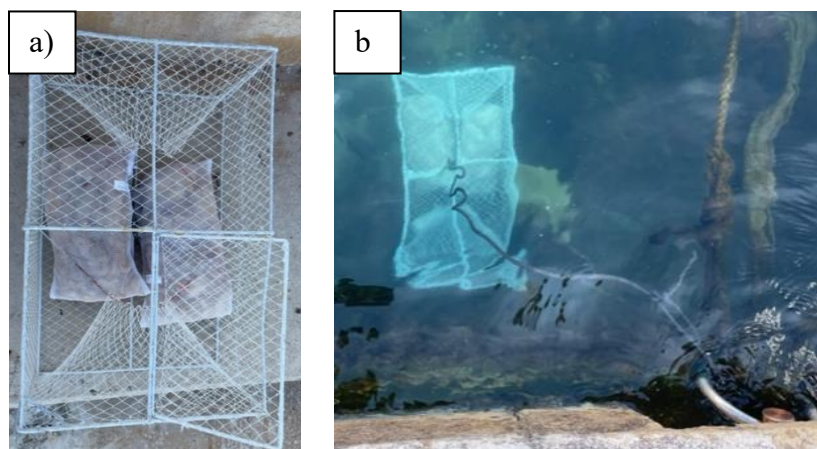
5.2.6. Polipropilenska vlakna

Korištena polipropilenska (PP) vlakna su Multifils duljine 19 mm proizvođača VFA (Verstaerkung fiber association). Multifils su stopostotna polipropilenska vlakna kružnog poprečnog presjeka posebno odabranog promjera kako se ne bi stvarale grudice vlakana. Multifils vlakna nisu površinski tretirana uljima koja mogu utjecati na betonsku mješavinu, te imaju veliku otpornost na otopine cementnih lužina i kiselina. Njihova glavna karakteristika je povećanje vlačne otpornosti betona i otpornosti na habanje. Vlakna imaju vlačnu čvrstoću 28 – 77 kN/mm² i ne apsorbiraju vodu. Proizvođač preporuča doziranje u mješavinu prije dodavanja vode, u količini 0,6 – 1 kg/m³ betona. Prosječno vrijeme miješanja vlakana u mješavini iznosi 1 minutu.

Tehničkim listom napominje se da duže miješanje od preporučenog nema značajan utjecaj na raspodjelu vlakana u mješavini. Radi postizanja bolje obradivosti betona proizvođač predlaže korištenje superplastifikatora.

5.2.7. Vunena vlakna

U ovom istraživanju korištena su i vunena (W) vlakna kojima su se zamijenila PP vlakna. W vlakna su dobivena obradom ovčje vune. Nakon uklanjanja raznih nečistoća iz ovčje vune, ista je uronjena u more na 28 dana (Slika 21). Tretiranje ovčje vune u moru povećava hrapavost površine kako bi vlakna bolje prijanjala za beton. Istovremeno se uništavaju organske tvari koje mogu štetiti betonu.



Slika 21: Tretiranje ovčje vune u moru. a) Postavljanje vreća ovčje vune u vršu
b) Potapanje vrše s ovčjom vunom u more (Autor: Matija Budić)

Nakon isteka vremenskog perioda tretiranja u moru, vuna je isprana slatkom vodom, osušena i narezana na dužine vlakna otprilike 19 mm (Slika 22).



Slika 22: Obradena ovčja vuna (Autor: Matija Budić)

5.2.8. Prirodni agregat

Za agregat frakcije 0 – 4 mm koristio se Holcim Majstor pijesak s dodatkom fino mljevenog vapnenca, dok je za frakcije 4 – 8 mm i 8 – 16 mm korišten Holcim Majstor drobljenac. Proizvođač Holcim (Hrvatska) d.o.o. navodi da se korištenjem spomenutih agregata produljuje vrijeme dobre obradivosti čime se olakšava rad i priprema veće količine betona. Svježi beton se lakše ugrađuje u oplatu, smanjuje se mogućnost stvaranja pukotina i poboljšava se vodonepropusnost, jer vapnenac zatvara pore u cementnoj pasti što povećava gustoću betona. Izračunata je korekcija mase prirodnog agregata u mješavini betona prema efektivnoj apsorpciji i vlažnosti istog.

5.2.9. PVC piljevina

Za potrebe ovog istraživanja korištena je otpadna PVC piljevina kao djelomična zamjena sitnog agregata u betonu. PVC piljevina je preuzeta iz tvornice stolarije ŽE-MA d.o.o. (Hrvatska) koja za svoje proizvode koristi aluplast profile. Proizvodnjom PVC stolarije nastaju velike količine otpada u obliku piljevine, čije zbrinjavanje u RH nije adekvatno riješeno. Prema tome, uporaba otpadne PVC piljevine pri proizvodnji betona može povoljno utjecati na ekološki aspekt. PVC piljevina korištena u ovom istraživanju istog je podrijetla kao i ona u istraživanju koje su proveli Cukarić i sur. (2021). Njihovim istraživanjem je utvrđeno da granulometrijski sastav PVC piljevine pretežno čine čestice maksimalne veličine do 4 mm (Cukarić i sur., 2021: 37).

5.2.10. Reciklirani betonski agregat

Reciklirani betonski agregat (RBA) dobiven je drobljenjem ispitanih betonskih uzoraka različitih čvrstoća i sastava. Sastoji se od prirodnog zrna agregata koje je djelomično obavijeno starom cementnom pastom. Također, zrno RBA sadrži i dodatke betonu kao čelična i PP vlakna, ovisno o recepturi uzoraka koji su se drobili. Izračunata je korekcija mase RBA u mješavini betona prema efektivnoj apsorpciji i vlažnosti istog.

5.2.11. Sastavi betonskih mješavina

U Tablici 2 prikazana je receptura za 1 m³ mješavine betona.

Tablica 2: Receptura za 1 m³ mješavine betona (Autor: Matija Budić)

| RECEPTURA ZA 1 m ³ MJEŠAVINE BETONA | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|--------|
| Materijal | Masa (kg) | | | |
| | RBA30 + PP | RBA30 + W | REC30 + W | |
| Cement | 430,49 | 430,49 | 365,92 | |
| Metakaolin | - | - | 64,57 | |
| Voda | 192,00 | 192,00 | - | |
| REC voda | - | - | 192,00 | |
| SP | 4,30 | 4,30 | 4,30 | |
| Aerant | 0,22 | 0,22 | 0,22 | |
| PP vlakna | 9,10 | - | - | |
| W vlakna | - | 1,70 | 1,70 | |
| Agregat | 0-4 mm | 538,03 | 538,03 | 456,76 |
| | REC 0-4 mm | 229,73 | 229,73 | 227,53 |
| | PVC piljevina | - | - | 28,30 |
| | 4-8 mm | 124,67 | 124,67 | 123,48 |
| | REC 4-8 mm | 53,04 | 53,04 | 52,53 |
| | 8-16 mm | 462,99 | 462,99 | 458,56 |
| | REC 8-16 mm | 197,69 | 197,69 | 195,80 |
| Ukupno za 1m³ betona | 2242,26 | 2234,86 | 2171,67 | |

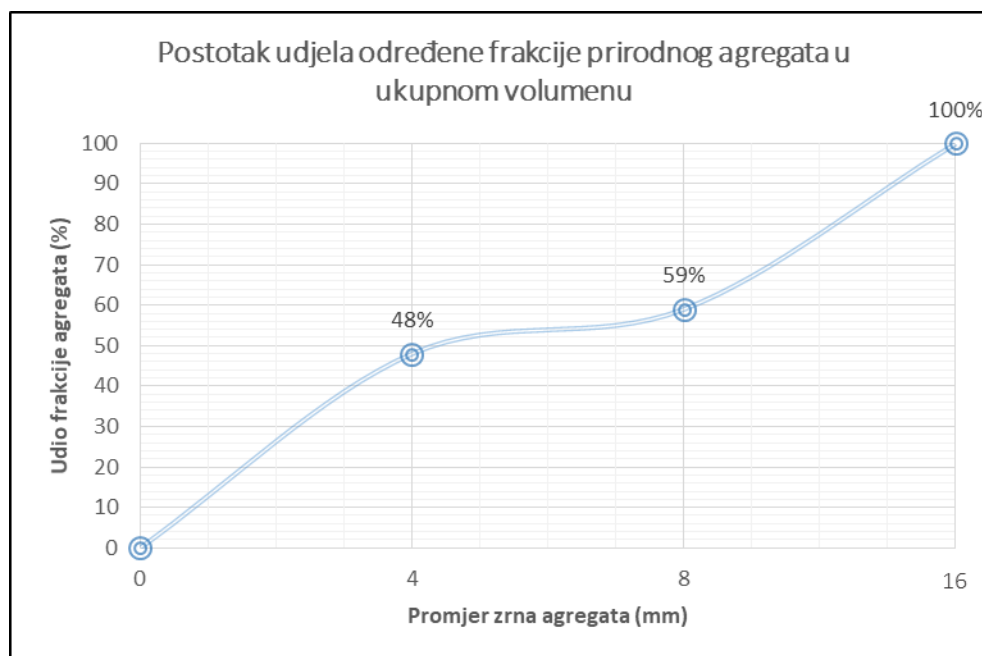
U mješavini RBA30+PP zamijenjen je prirodni agregat svih frakcija sa recikliranim u iznosu od 30%. Ova mješavina predstavlja referentni beton koji od recikliranih materijala sadrži samo RBA.

U mješavinu RBA30+W stavljena su vlakna od ovčje vune, dok je udio RBA ostao 30% za sve frakcije. Zamjena PP vlakana s W vlaknima predstavlja jedinu razliku obzirom na prethodnu mješavinu, čime se direktno može ocijeniti njezin utjecaj.

U mješavini REC30+W korišteni su isti udjeli RBA i W vlakana uz zamjenu cementa metakaolinom 15%, zamjenu sitnog agregata PVC piljevinom 10% te korištenje reciklirane vode.

5.3. Ispitivanje agregata

Na Slici 23 prikazan je dijagram koji predstavlja granulometrijsku krivulju prirodnog agregata u smislu postotka udjela različitih frakcija u odnosu na njegov ukupni volumen. Iz dijagrama je jasno vidljivo da frakcija 4 – 8 mm ima najmanji udio u volumenu prirodnog agregata (11%).

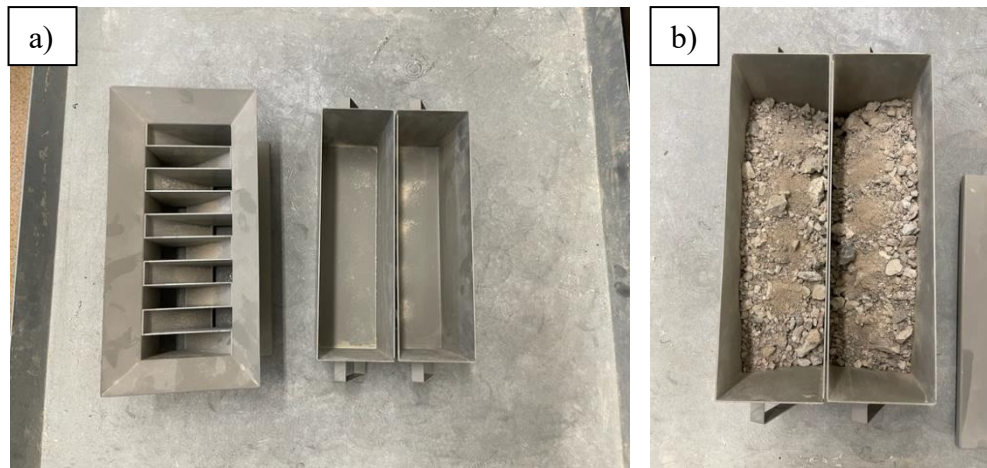


Slika 23: Udio određene frakcije prirodnog agregata u ukupnom volumenu
(Autor: Matija Budić)

5.3.1. Granulometrijska krivulja recikliranog betonskog agregata

Agregat zauzima 70 - 80% volumena betona, što znači da njegova svojstva uvelike utječu na svojstva svježeg i očvrnulog betona. Agregat također utječe na cijenu betona i na otisak ugljičnog dioksida. Oblik zrna, tekstura, a naročito granulometrijski sastav direktno utječu na obradivost, fizička i mehanička svojstva te svojstva trajnosti (Bjegović, Štirmer, 2022: 51). Zbog toga je određen granulometrijski sastav RBA. Agregat je pravilno uzorkovan, odnosno određen je reprezentativni uzorak koji opisuje cjelovitost materijala. Shodno tome, odgovarajuća metoda smanjenja uzorka s terena ovisi uglavnom o najvećem promjeru zrna agregata i raspoloživoj opremi. U ovom istraživanju, reprezentativni uzorak RBA je određen pomoću razdjelnika za uzorkovanje (Slika 24). Najmanja masa uzorka je određena prema normi HRN EN 933-1:2012.

Za korišteni agregat kojemu je promjer najvećeg zrna 16 mm, najmanja potrebna masa iznosi 2,6 kg. Postupkom četvrtanja provodi se smanjenje količine uzorka RBA do približne mase 6,5 kg. Dobivena masa uzorka se potom stavlja u razdjelnik, kako bi odabrana polovica spremnika sadržavala minimalno 2,6 kg RBA za postupak prosijavanja.



Slika 24: Mehanički linijski razdjelnik. a) Žlijeb s deset otvora, dva spremnika
b) Raspodijeljeni agregat u spremnike (Autor: Matija Budić)

Granulometrijska krivulja se određuje prosijavanjem na sitima određenih dimenzija kvadratnih otvora prema normi HRN EN 933 - 1. Sita se postavljaju na vibrirajuće postolje, jedno iznad drugoga tako da se na dno postavi posuda, na nju sito najmanjeg otvora, a na vrh sito najvećeg otvora (Slika 25). Veličine otvora korištenih sita iznose 0,063; 0,125; 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 8; 16 mm.

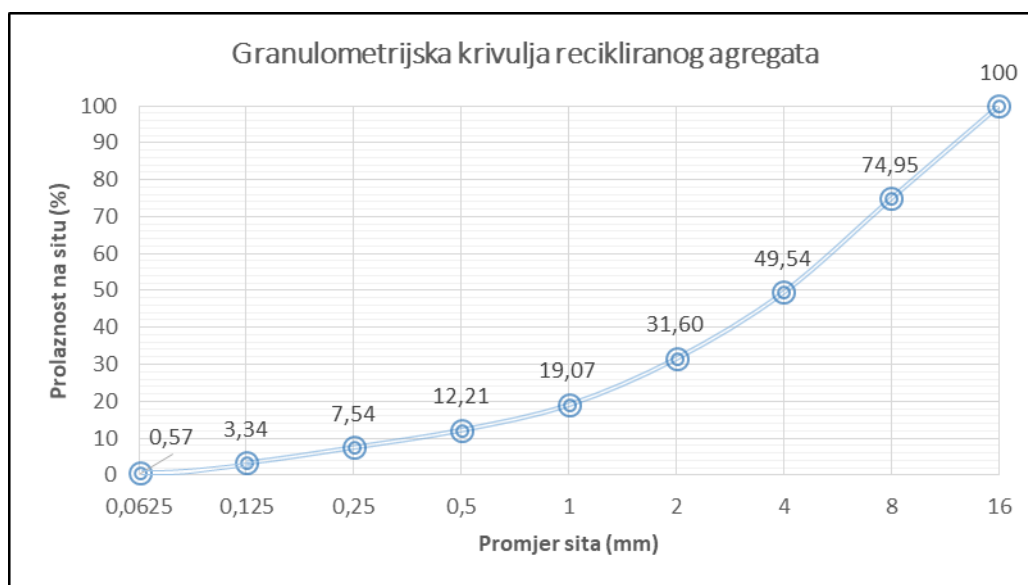


Slika 25: Sita u uređaju za prosijavanje agregata (Autor: Matija Budić)

Nakon prosijavanja ostaci na sitima se važu. Postupak prosijavanja se ponavlja tri puta kako bi se izračunao prosjek prolaska kroz svako sito, čime se dobivaju rezultati koji vjerodostojnije predstavljaju granulometriju. Prolazi se iskazuju u postotku prolaza na svakom situ, a rezultat se prikazuje u obliku dijagrama. Dobivena krivulja naziva se granulometrijska krivulja uzorka agregata (Bjegović, Štirmer, 2022: 51). U Tablici 3 su prikazane mase agregata na svakom pojedinom situ, kao i izračunati postotci prolaska. Dijagram na Slici 26 predstavlja srednju granulometrijsku krivulju recikliranog agregata.

Tablica 3: Postotci prolaska recikliranog agregata kroz sita (Autor: Matija Budić)

| Granulometrijska krivulja recikliranog agregata | | | |
|---|---------------------|---------------------|----------------------|
| Otvor sita (mm) | Ostatak na situ (g) | Ostatak na situ (%) | Prolaz kroz sito (%) |
| 16 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 729 | 25,05 | 74,95 |
| 4 | 739 | 25,40 | 49,54 |
| 2 | 522 | 17,95 | 31,60 |
| 1 | 365 | 12,53 | 19,07 |
| 0,5 | 200 | 6,86 | 12,21 |
| 0,25 | 136 | 4,67 | 7,54 |
| 0,125 | 122 | 4,19 | 3,34 |
| 0,063 | 81 | 2,77 | 0,57 |
| 0 | 17 | 0,57 | 0,00 |
| UKUPNO | 2911 | 100,00 | |



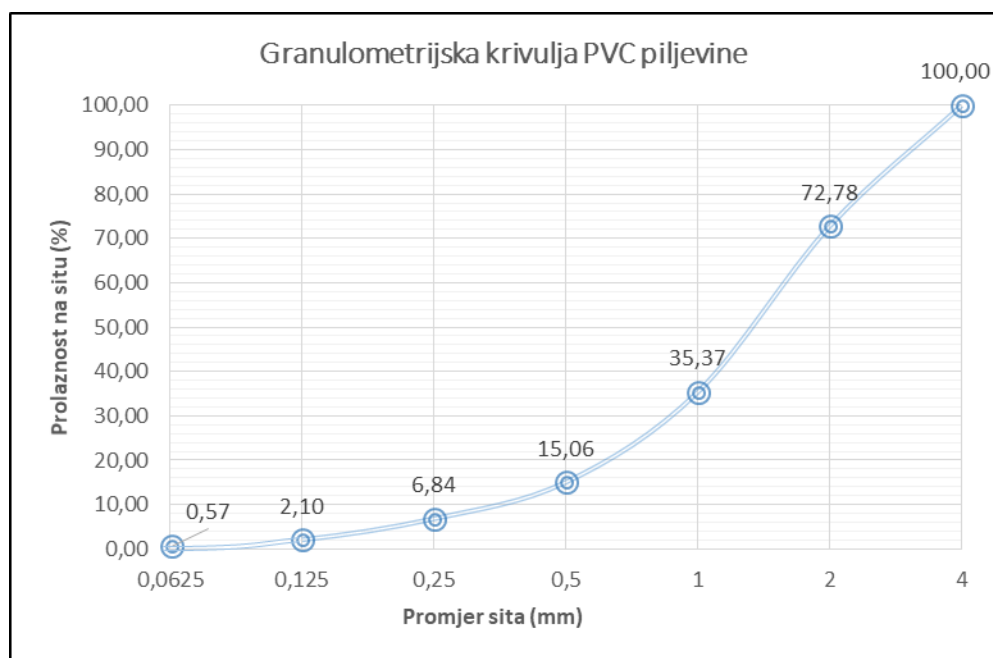
Slika 26: Granulometrijska krivulja recikliranog agregata (Autor: Matija Budić)

5.3.2. Granulometrijska krivulja PVC piljevine

Potrebno je odrediti granulometrijski sastav PVC piljevine kako bi se dobio uvid u sadržaj sitnih čestica. Postupak prosijavanja je isti kao i kod RBA, razlika je u minimalnoj masi uzorka koja prema HRN EN 933-1:2012 iznosi 200 g za najveću veličinu piljevine od 4 mm. Usvojena je minimalna masa uzorka od 200 g, proces prosijavanja je ponovljen šest puta, te je izračunata srednja granulometrijska krivulja. U Tablici 4 su prikazane mase PVC piljevine na svakom pojedinom situ, kao i izračunati postotci prolaska. Dijagram prikazan na Slici 27 predstavlja srednju granulometrijsku krivulju PVC piljevine.

Tablica 4: Postotci prolaska PVC piljevine kroz sita (Autor: Matija Budić)

| Granulometrijska krivulja PVC piljevine | | | |
|---|---------------------|---------------------|----------------------|
| Otvor sita (mm) | Ostatak na situ (g) | Ostatak na situ (%) | Prolaz kroz sito (%) |
| 4 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 2 | 53,2 | 27,22 | 72,78 |
| 1 | 73,2 | 37,41 | 35,37 |
| 0,5 | 39,7 | 20,31 | 15,06 |
| 0,25 | 16,1 | 8,22 | 6,84 |
| 0,125 | 9,3 | 4,74 | 2,10 |
| 0,063 | 3,0 | 1,53 | 0,57 |
| 0 | 1,1 | 0,57 | 0,00 |
| UKUPNO | 195,55 | 100,00 | |



Slika 27: Granulometrijska krivulja PVC piljevine (Autor: Matija Budić)

5.3.3. *Određivanje vlažnosti i apsorpcije vode agregata*

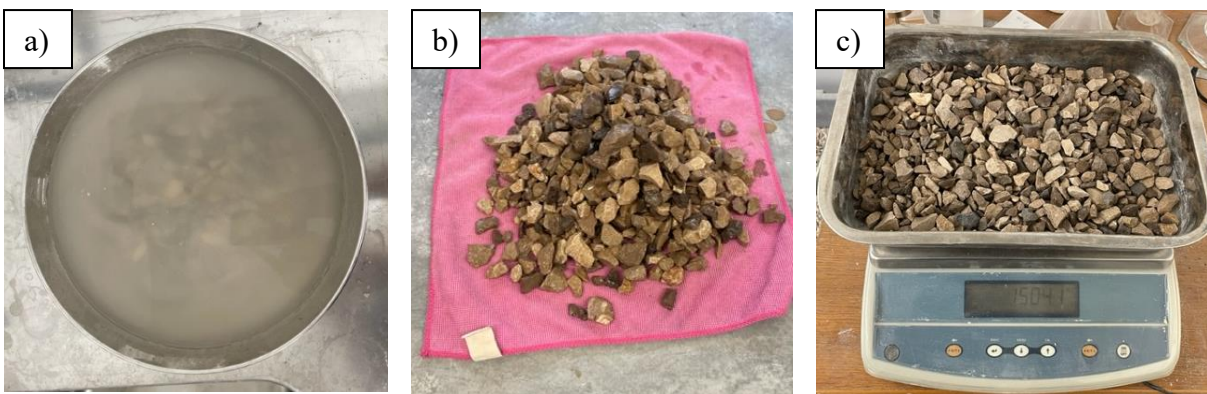
Određena je vlažnost i apsorpcija agregata kako bi se mogla korigirati količina vode za potrebe izrade betonskih mješavina u svrhu dobivanja zahtijevane konzistencije svježeg betona. Vlažnost prirodnog i recikliranog agregata je utvrđena za sve frakcije pomoću štapnog instrumenta za mjerenje vlažnosti agregata prikazanog na Slici 28. Instrument se ručno zabija u uzorak agregata na 3 različita mjesta kako bi se utvrdila prosječna vlažnost cijelog uzorka.



Slika 28: Instrument za ispitivanje vlažnosti agregata
(Autor: Matija Budić)

U ovom istraživanju ispitana je efektivna apsorpcija RBA za frakcije 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm, te prirodnog agregata za frakciju 8-16 mm. Efektivna apsorpcija (EA) predstavlja količinu vode koja je potrebna da nezasićen površinski suh agregat prijeđe u stanje zasićenog površinski suhog u 30 minuta. Postupak određivanja efektivne apsorpcije se razlikuje za krupni i sitni agregat.

Za krupni agregat EA se određuje na način da se određena masa suhog agregata uroni u vodu na 30 minuta, nakon čega se obriše krpom kako bi se uklonila površinska vlažnost (Slika 29).



Slika 29: Određivanje EA prirodnog agregata. a) Uranjanje uzorka u vodu b) Brisanje površinske vlažnosti krpom c) Vaganje ZPS uzorka (Autor: Matija Budić)

Tako zasićen površinski suh agregat se ponovno važe, a razlika masa ukazuje na količinu apsorbirane vode.

Efektivna apsorpcija izražena u postotcima računa se prema izrazu (1):

$$A = \frac{m_{ZPS} - m_d}{m_d} \times 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

Gdje je A efektivna apsorpcija agregata (%), m_{ZPS} masa zasićenog površinski suhog uzorka (g), m_d masa suhog uzorka (g).

U Tablici 5 prikazani su rezultati određivanja efektivne apsorpcije prirodnog i recikliranog krupnog agregata.

Tablica 5: Izračun efektivne apsorpcije krupnog agregata (Autor: Matija Budić)

| Efektivna apsorpcija agregata | | | |
|-------------------------------|-----------|---------------|--------|
| Prirodni agregat | | | |
| Frakcija | m_d (g) | m_{ZPS} (g) | EA (%) |
| 8-16 mm | 1500,3 | 1504,1 | 0,25 |
| Reciklirani agregat | | | |
| Frakcija | m_d (g) | m_{ZPS} (g) | EA (%) |
| 4-8 mm | 1500,1 | 1537 | 2,4 |
| 8-16 mm | 1500,8 | 1520,4 | 1,3 |

Ispitivanje EA sitnog agregata započinje uranjanjem poznate suhe mase uzorka u vodu na 30 minuta. Zatim se uzorak položi na ravnu metalnu površinu koja ne apsorbira vodu i suši se električnim puhalom do zasićenog površinski suhog stanja.

Za vrijeme sušenja uzorak je potrebno konstantno miješati dok se vizualno ne ocijeni da je površinski suh. Pritom se mora paziti da puhanje ne otkloni dio čestica agregata. Tada se metalni kalup oblika krnjeg stošca postavi širom bazom na podlogu, puni se agregatom do vrha te nabija s 25 udaraca šipkom. Ako nakon uklanjanja kalupa uzorak zadrži oblik stošca, to znači da je uzorak još površinski vlažan. Ukoliko se uzorak u potpunosti osipa, znači da je previše posušen. Ispitivanje i sušenje treba provoditi sve dok se zbijeni uzorak nakon podizanja kalupa djelomično ne osipa (Slika 30). U tom trenutku se usvaja da je uzorak zasićen površinski suh, te se mjeri njegova masa.



Slika 30: : Djelomično osipanje uzorka agregata (Autor: Matija Budić)

U Tablici 6 prikazani su rezultati određivanja efektivne apsorpcije recikliranog sitnog agregata koja je proračunata prema izrazu (1).

Tablica 6: Izračun efektivne apsorpcije sitnog agregata (Autor: Matija Budić)

| Efektivna apsorpcija agregata | | | |
|-------------------------------|-----------|---------------|--------|
| Reciklirani agregat | | | |
| Frakcija | m_d (g) | m_{ZPS} (g) | EA (%) |
| 0-4 mm | 507,4 | 537,1 | 5,85 |

5.4. Izrada betonskih mješavina

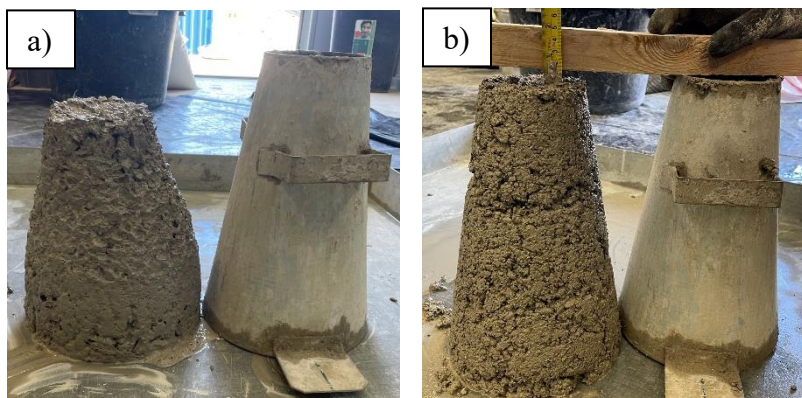
Nakon definiranja točnog volumena i sastava betona, započeta je izrada betonskih mješavina. Nakon preciznog vaganja i doziranja sastojaka betona započet je postupak miješanja. Miješanje betona provodilo se prema TSMA metodi (Two – Stage Mixing Approach) u horizontalnoj protustrujnoj miješalici volumena 150 l na sljedeći način:

- miješanje agregata i vlakana 30 s
- dodavanje $\frac{1}{2}$ mase vode
- miješanje 30 s
- dodavanje cementa, $\frac{1}{4}$ mase vode s aerantom i $\frac{1}{4}$ mase vode sa SP
- miješanje 5 min

5.5. Ispitivanje svojstava svježeg betona

5.5.1. Ispitivanje konzistencije svježeg betona

Konzistencija svježeg betona ispitana je metodom slijeganja prema normi HRN EN 12350-2:2019. Prethodno ispitivanju potrebno je pomoću spužve navlažiti unutarnji plašt stošca i metalno postolje kako se beton ne bi zalijepio. Kalup oblika krnjeg stošca visine 30 cm puni se betonom u tri sloja, pri čemu se svaki sloj zbija čeličnom šipkom 25 puta. Prije podizanja kalupa neophodno je očistiti podlogu oko kalupa od suvišnog betona. Nakon uklanjanja kalupa mjeri se slijeganje h između visine kalupa i najviše točke slegnutog betona u mm (Slika 31).



Slika 31: Ispitivanje slijeganja betona. a) Mješavina RBA30+PP b) Mješavina REC30+W
(Autor: Matija Budić)

Pomoću opisanog postupka određen je razred konzistencije za mješavine RBA30+PP i REC30+W (Tablica 7). Temperatura svake betonske mješavine iznosi 22 °C. Niti jedna mješavina nije zadovoljila zahtijevani razred konzistencije S4.

*Tablica 7: Razred konzistencije mješavina
(Autor: Matija Budić)*

| Mješavina | Slijeganje | Razred |
|------------|------------|--------|
| RBA30 + PP | 60 mm | S2 |
| REC30 + W | 10 mm | S1 |

Konzistencija mješavine RBA30+W provodi se prema metodi za samoslijegajuće betone. Provodi se ispitivanje tečenja rasprostiranjem slijeganjem i vrijednosti t_{500} prema normi HRN EN 12350-8:2019. Rezultati ispitivanja su rasprostiranje slijeganjem (SF) i vrijeme t_{500} koji služe za procjenu sposobnosti tečenja i viskoznosti betona bez prisutnosti prepreka. Stožac koji je položen na ravnu ploču puni se betonom do vrha. Prethodno se pomoću spužve navlaže površine stošca i ploče koje su u kontaktu s betonom kako ne bi došlo do lijepljenja betona.

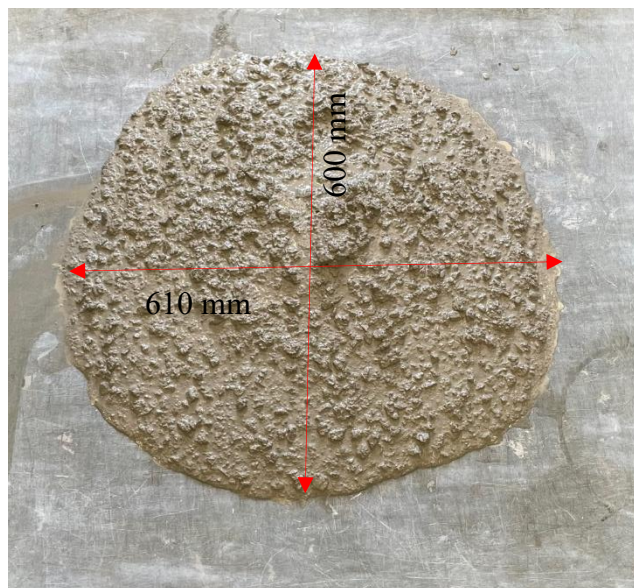
Nakon šta se stožac napuni betonom, povuče se prema gore tako da se beton slobodno razlije po ploči. Pritom se mjeri vrijeme od podizanja stošca do rasprostiranja betona po ploči do promjera 500 mm. Kada beton prestane teći, izmjeri se najveći promjer te promjer okomit na njega. Rasprostiranje slijeganjem SF se proračunava prema izrazu (2):

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2)$$

Gdje je SF rasprostiranje slijeganjem (mm), d_1 najveći promjer rasprostiranja betona (mm), d_2 promjer okomit na d_1 (mm).

Pri ispitivanju mješavine RBA30+W izmjereno je vrijeme $t_{500} = 5,85$ s, dok je najveći promjer rasprostranjenog betona $d_1 = 610$ mm, a promjer okomit na njega $d_2 = 600$ mm. Pomoću izraza (2) izračunat je $SF = 605$ mm.

Na Slici 32 je prikazan rasprostrti beton na podlozi.



Slika 32: Ispitivanje tečenja rasprostiranjem slijeganjem mješavine RBA30+W (Autor: Matija Budić)

Prema dobivenom rezultatu SF, beton spada u razred konzistencije SF1, što znači da je beton primjenjiv za nearmirane i lagano armirane elemente te elemente koji ne zahtijevaju veliku fluidnost betona. Pošto je vrijeme $t_{500} = 5,85 \text{ s} > 2 \text{ s}$, beton spada u razred viskoznosti VS2, što upućuje da je beton prikladan za većinu elemenata kao što su zidovi i stupovi.

5.6. Izrada uzoraka za ispitivanja

Nakon ispitivanja svježih betonskih mješavina, od svake mješavine su izrađena tri uzorka kocke 15x15x15 cm za ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom, jedan valjka promjera 15 cm i visine 30 cm za ispitivanje na plinopropusnost, te tri kockice 7x7 cm za ispitivanje na habanje. Uzorci su njegovani u vodi 28 dana nakon čega su provedena ispitivanja na trajnosna svojstva.

5.7. Ispitivanje svojstava betona

Nakon projektiranja, ugradnje u kalupe i njege betona uzorci su ispitani na svojstva trajnosti. Ispitana su svojstva plinopropusnosti, dubine prodora vode pod tlakom i habanja.

5.7.1. Ispitivanje plinopropusnosti betona

Betonski uzorci su njegovani u vodi 28 dana, sušeni na temperaturi od $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, zatim hlađeni na sobnoj temperaturi $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Za mjerenje je umjesto kisika korišten dušik zbog lakše dostupnosti te sigurnosnih razloga (nije inertan kao kisik). Nakon mjerenja protoka mjehurića zraka kroz epruvete volumena 10, 25 i 100 ml, tablično su prikazani rezultati dobiveni proračunom protoka plina kojim se utvrđuje vrijednost koeficijenta plinopropusnosti dušika (Klobučar, 2016: 64). Protok plina pojedinog tlaka izračunat je pomoću izraza (3):

$$Q_f = \frac{V_f}{(T_{fin} - T_{init})} \quad (3)$$

Gdje je Q_f protok plina (m^3/s), V_f volumen epruvete kojom se vršilo mjerenje (m^3), $T_{fin} - T_{init}$ potrebno vrijeme da promatrani mjehurić prijeđe graduirani dio epruvete (s). Koeficijent plinopropusnosti za određeni tlak f računa se pomoću dobivenog protoka plina pomoću izraza (4):

$$K_f = \frac{2 * Q_f * p_0 * H * \eta}{A * (p^2 - p_a^2)} \quad (4)$$

Gdje je Q protok plina (m^3/s), H visina uzorka (m), η dinamička viskoznost fluida ($1,75 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ za dušik, N_2 , pri sobnoj temperaturi $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), A površina poprečnog presjeka uzorka (m^2), p vrijednost tlaka dušika (Pa), p_a vrijednost atmosferskog tlaka (Pa).

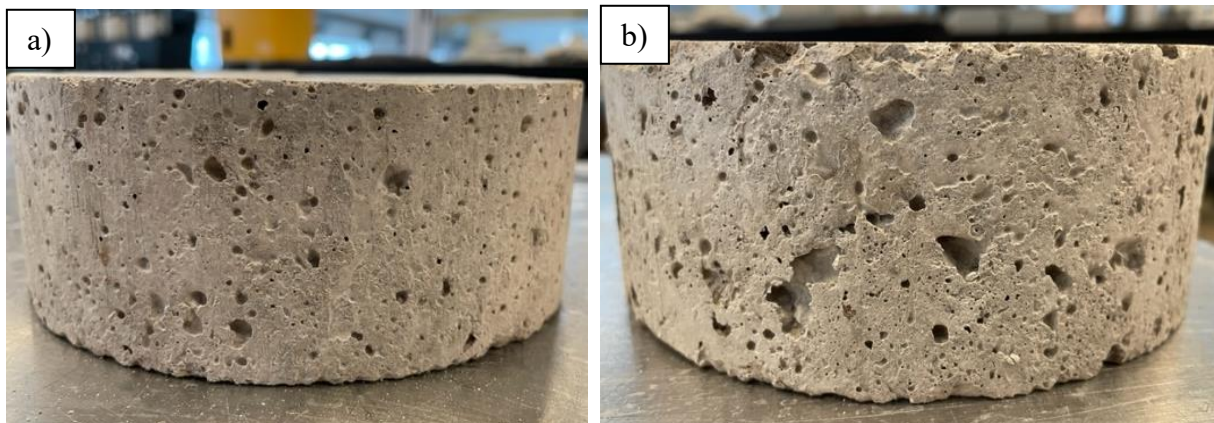
U konačnici, prosječni specifični koeficijent prolaska dušika K izražen u m^2 dobiva se prema izrazu (5):

$$K = \frac{K_{1.5} + K_2 + K_{2.5} + K_3 + K_{3.5}}{5} \quad (5)$$

Gdje su $K_{1.5}$, K_2 , $K_{2.5}$, K_3 i $K_{3.5}$ koeficijenti propusnosti za tlakove 1,5; 2; 2,5; 3 te 3,5 bara.

Ispitano je ukupno 9 uzoraka, 3 od svake mješavine. Zapaženo je da uzorci mješavine REC30+W imaju izrazito poroznu strukturu u odnosu na druge dvije mješavine. Pokus je pokazao da su svi uzorci te mješavine toliko porozni da nije moguće provesti adekvatno ispitivanje.

Pri najmanjem tlaku od 1,5 bar, mjehurić zraka bi prošao graduirani dio epruvete volumena 100 ml u 3 s što dovodi do zaključka da su uzorci te mješavine potpuno plinopropusni. Na Slici 33 je prikazana vizualna usporedba poroznosti uzorka RBA30+W na kojem je uspješno proveden pokus, te REC30+W koji nije moguće ispitati.



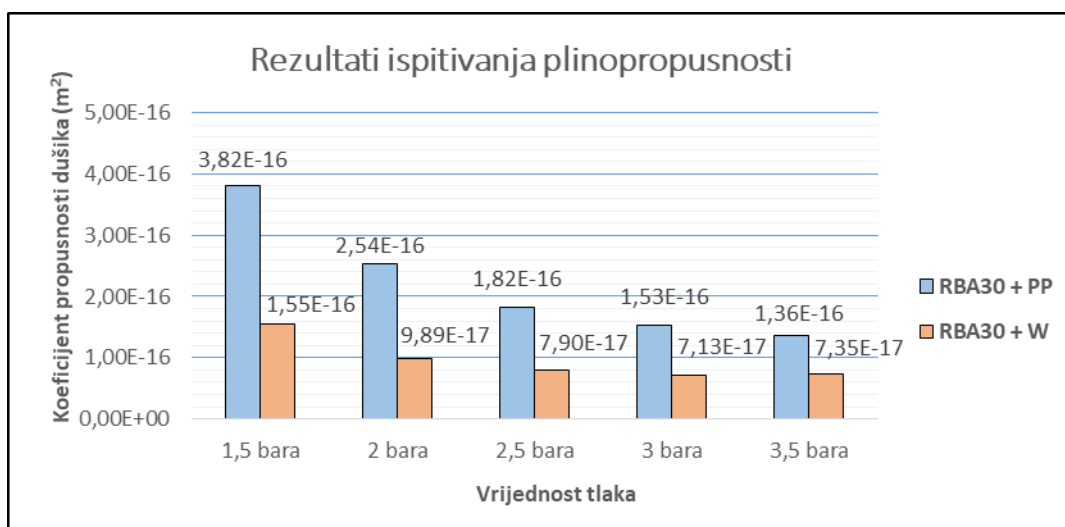
Slika 33: Prikaz poroznosti uzoraka. a) Mješavina RBA30+W b) Mješavina REC30+W
(Autor: Matija Budić)

Pri mjerenju protoka pod tlakom od 2,5 bara u epruveti 100 ml, vrijednosti su veće od 60 s što znači da se mora koristiti epruveta manjeg volumena. Međutim, korištenjem epruvete od 25 ml vrijednosti padnu ispod preporučenih 20 s. Kako dostupna aparatura laboratorija za materijale ne posjeduje mjerne epruvete volumena između 25 i 100 ml, u proračun se uvela linearna interpolacija kako bi se dobili rezultati mjerenja u preporučenim granicama za volumen epruvete od 75 ml za isti tlak. Opisani postupak interpolacije je korišten u sličnim situacijama ukoliko je bilo potrebe za time.

Izračunati rezultati su prikazani u Tablici 8 koja sadrži proračun plinopropusnosti različitih mješavina betona, te dijagramima na Slici 34 koji prikazuju koeficijent plinopropusnosti za različite tlakove

Tablica 8: Rezultati ispitivanja na plinopropusnost dušika (Autor: Matija Budić)

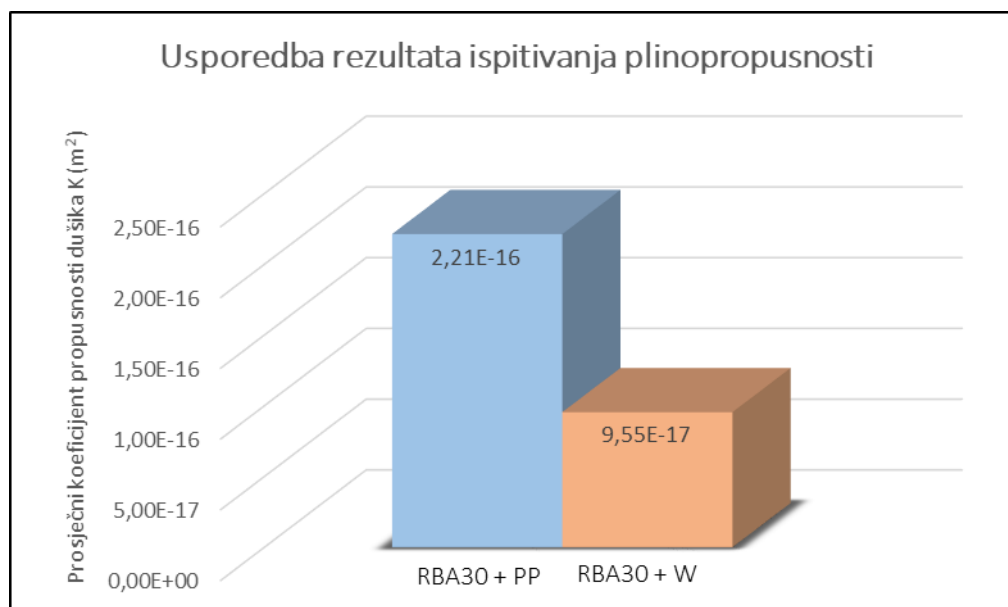
| REZULTATI ISPITIVANJA PLINOPROPUSNOSTI | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tlak | 1,5 bara | 2 bara | 2,5 bara | 3 bara | 3,5 bara |
| Protok fluida Q_f (m^3/s) | | | | | |
| RBA30+PP | 4,82E-07 | 7,69E-07 | 9,64E-07 | 1,24E-06 | 1,54E-06 |
| RBA30+W | 1,95E-07 | 3,00E-07 | 4,19E-07 | 5,75E-07 | 8,35E-07 |
| Koficijent propusnosti dušika K_f (m^2) | | | | | |
| RBA30+PP | 3,82E-16 | 2,54E-16 | 1,82E-16 | 1,53E-16 | 1,36E-16 |
| RBA30+W | 1,55E-16 | 9,89E-17 | 7,90E-17 | 7,13E-17 | 7,35E-17 |
| Prosječni koficijent propusnosti dušika K (m^2) | | | | | |
| RBA30+PP | 2,21E-16 | | | | |
| RBA30+W | 9,55E-17 | | | | |



Slika 34: Plinopropusnost betona za različite vrijednosti tlakova (Autor: Matija Budić)

5.7.2. Analiza rezultata ispitivanja plinopropusnosti

Na dijagramu na Slici 35 prikazana je usporedba rezultata ispitivanja plinopropusnosti.



Slika 35: Usporedba rezultata ispitivanja plinopropusnosti (Autor: Matija Budić)

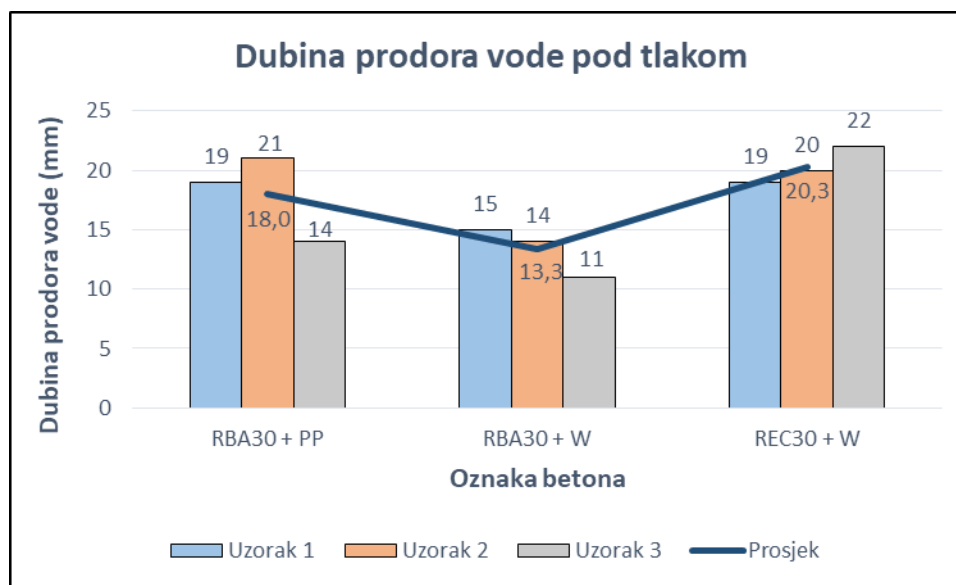
Proračunom srednje vrijednosti koeficijenta K za sva tri uzorka dobiven je ukupni koeficijent propusnosti koji se može usvojiti za cijelu mješavinu. Ta vrijednost predstavlja konačni rezultat ovog ispitivanja. Prema tome, ukupni koeficijent plinopropusnosti betona RBA30+PP iznosi $2,21 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, dok za beton RBA30+W iznosi $9,55 \times 10^{-17} \text{ m}^2$. Zaključuje se da beton RBA30+PP s polipropilenskim vlaknima ima 2,31 puta veću plinopropusnost od betona RBA30+W koji sadrži vunena vlakna. Obje mješavine sadrže reciklirani agregat svih frakcija 30%, te jedina razlika je vrsta vlakana. Dobiveni rezultat dokazuje da se upotrebom prirodnih vunениh vlakana ne pogoršava svojstvo plinopropusnosti betona. Naime, u ovom istraživanju upotrebom vunениh vlakana postignuto je smanjenje plinopropusnosti za 55,5% u odnosu na beton s polipropilenskim vlaknima, što može rezultirati većom trajnosti betona.

5.7.3. Ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom

Nakon izrade i adekvatnog njegovanja uzoraka, isti su postavljeni u uređaj za mjerenje prodora vode pod tlakom koji ima šest ispitnih mjesta te ispitani prema normi HRN EN 12390-8. Ispitano je ukupno 9 uzoraka, istovremeno šest, po tri uzorka od svake mješavine. Uzorci kocke su bili podvrgnuti tlačanju vode 72 h pod pritiskom od 5,5 bara, nakon čega su izvađeni iz VDP uređaja te su rascijepani u uređaju za ispitivanje čvrstoće. Opterećenje uzorka vršilo se konstantnim prirastom naprezanja od 0,06 MPa/s. Na rascijepanim uzorcima markerom se obilježava trag prodiranja vode i mjeri se najveća dubina prodora. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 9 i na dijagramu na Slici 36.

Tablica 9: Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom
(Autor: Matija Budić)

| Oznaka uzorka | Dubina prodora vode (mm) | | |
|----------------|--------------------------|-------------|-------------|
| | RBA30 + PP | RBA30 + W | REC30 + W |
| 1 | 19 | 15 | 19 |
| 2 | 21 | 14 | 20 |
| 3 | 14 | 11 | 22 |
| Prosjek | 18 | 13,3 | 20,3 |



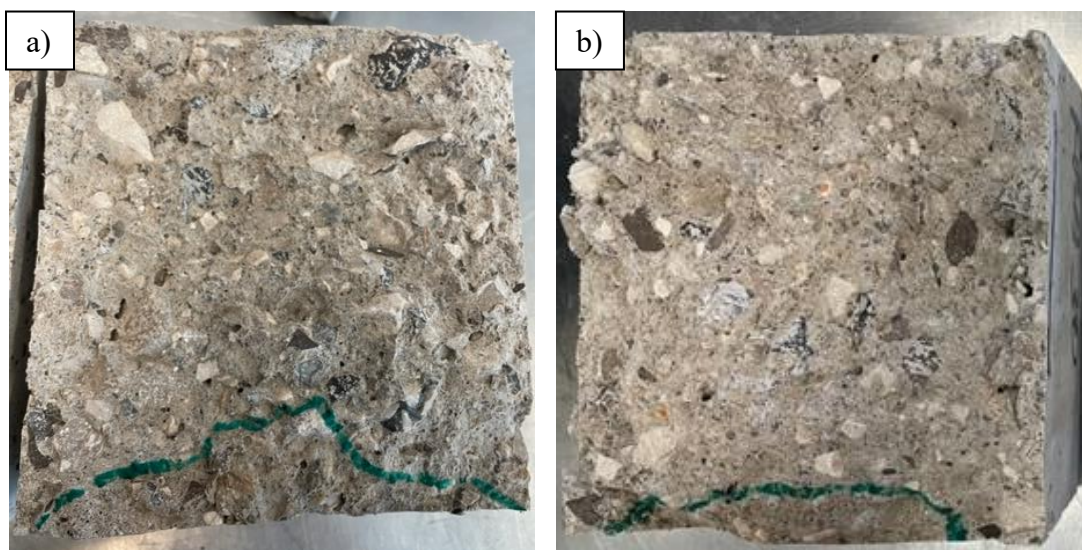
Slika 36: Usporedba rezultata ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom
(Autor: Matija Budić)

5.7.4. Analiza rezultata ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom

U dijagramu na Slici 36 može se uočiti da najmanji prodor vode ima beton RBA30+W u kojem je prosječni prodor vode 13,3 mm. Postignuto je reduciranje prodora vode čak 34,48% u odnosu na beton REC30+W te 26,11% u odnosu na beton RBA30+PP. Rezultati ukazuju na to da se korištenjem vunениh vlakana umjesto PP vlakana poboljšava vodonepropusnost betona. Mogući razlog dobivanja boljih svojstava je prethodno tretiranje vune u moru, čime se ohrapvljuje površina vlakna i omogućuje bolje prijanjanje za beton. Također, čimbenik koji može doprinijeti manjoj dubini prodora vode je mala gustoća vunениh vlakana. Gustoća W vlakana je 5,35 puta manja od gustoće PP vlakana. Prema tome, za isti udio vlakana od 1% volumena mješavine, W vlakana ima brojčano više od PP vlakana. Veći broj vlakana u mješavini rezultira gušćom raspodjelom, što dovodi do smanjenja vodopropusnosti betona.

Najveći prodor vode ima beton REC30+W koji sadrži najveći udio recikliranih sastojaka. Iako ova mješavina sadrži 15% metakaolina koji popunjava mikrostrukturu betona i teoretski smanjuje poroznost, te W vlakna koja iz priloženog smanjuju vodopropusnost, nisu postignuti najbolji rezultati u smislu vodonepropusnosti. Razlog tome može biti korištenje reciklirane vode i zamjena sitnog agregata PVC piljevinom 10%.

Na Slici 37 prikazana je usporedba traga prodora vode betona REC30+W i RBA30+W.



Slika 37: Razlika traga prodora vode. a) REC30+W b) RBA30+W
(Autor: Matija Budić)

5.7.5. Ispitivanje betona na habanje – Böhme

Ispitano je ukupno 9 uzoraka, po 3 uzorka od svake mješavine. Nakon izlaganja uzorka habanju 16 ciklusa mjeri se njegova konačna masa. Razlikom početne i konačne mase izračunava se masa koja je izgubljena trošenjem uslijed habanja. U Tablici 10 prikazani su izmjereni podatci gubitka mase svakog pojedinog uzorka ovisno o broju ciklusa.

Tablica 10: Rezultati trošenja materijala uzoraka habanjem (Autor: Matija Budić)

| Oznaka betona | Uzorak | Početna masa (g) | Masa nakon 4 ciklusa (g) | Masa nakon 8 ciklusa (g) | Masa nakon 12 ciklusa (g) | Masa nakon 16 ciklusa (g) |
|---------------|--------|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| RBA30 + PP | 1 | 751,3 | 746,9 | 744,2 | 741,4 | 738,6 |
| | 2 | 759,7 | 756,9 | 754,5 | 752,2 | 750,1 |
| | 3 | 795,8 | 792,8 | 790,3 | 788,5 | 786,6 |
| RBA30 + W | 1 | 792,5 | 790,0 | 787,3 | 784,7 | 782,2 |
| | 2 | 762,2 | 759,5 | 756,0 | 752,2 | 748,9 |
| | 3 | 735,0 | 732,1 | 728,6 | 725,5 | 722,6 |
| REC30 + W | 1 | 755,6 | 752,9 | 749,8 | 746,8 | 744,2 |
| | 2 | 753,6 | 752,1 | 749,6 | 747,2 | 745,1 |
| | 3 | 784,6 | 782,6 | 780,7 | 778,4 | 776,6 |

Otpornost na habanje računa se kao srednja vrijednost gubitka volumena ΔV prema izrazu (6):

$$A = \Delta V = \frac{\Delta m}{\rho r} \quad (6)$$

Gdje je A otpornost na habanje ($\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$), Δm gubitak mase nakon 16 ciklusa (g), ρr gustoća uzorka (g/cm^3).

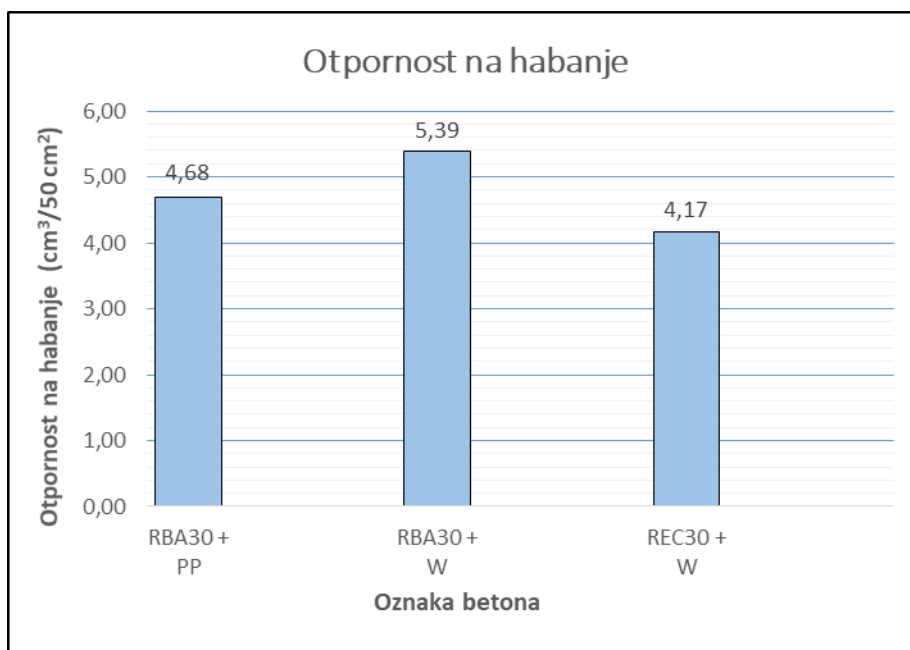
U Tablici 11 prikazana je izračunata srednja otpornost na habanje betona svake mješavine.

Tablica 11: Proračun srednje otpornosti na habanje (Autor: Matija Budić)

| Oznaka betona | Uzorak | Početna masa (g) | Konačna masa (g) | Gubitak mase Δm (g) | Gustoća uzorka pr (g/cm ³) | Otp. na habanje A (cm ³ /50 cm ²) |
|---------------|--------|------------------|------------------|-----------------------------|--|--|
| RBA30 + PP | 1 | 751,3 | 738,6 | 12,7 | 2,19 | 4,68 |
| | 2 | 759,7 | 750,1 | 9,6 | 2,21 | |
| | 3 | 795,8 | 786,6 | 9,2 | 2,32 | |
| RBA30 + W | 1 | 792,5 | 782,2 | 10,3 | 2,31 | 5,39 |
| | 2 | 762,2 | 748,9 | 13,3 | 2,22 | |
| | 3 | 735,0 | 722,6 | 12,4 | 2,14 | |
| REC30 + W | 1 | 755,6 | 744,2 | 11,4 | 2,20 | 4,17 |
| | 2 | 753,6 | 745,1 | 8,5 | 2,20 | |
| | 3 | 784,6 | 776,6 | 8,0 | 2,29 | |

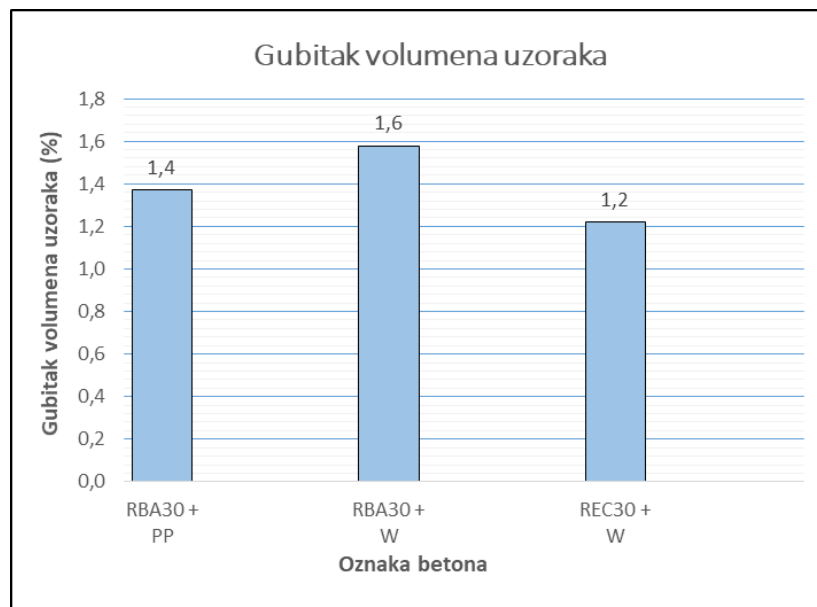
5.7.6. Analiza rezultata ispitivanja na habanje

U dijagramu na Slici 38 prikazana je usporedba rezultata ispitivanja na habanje za različite vrste betona. Najmanju srednju otpornost na habanje ima beton RB30 + W, dok najbolju srednju otpornost ima beton REC30+W koji sadrži najveći udio recikliranih sastojaka. Razlika u otpornosti između ta dva betona iznosi 22,63%.



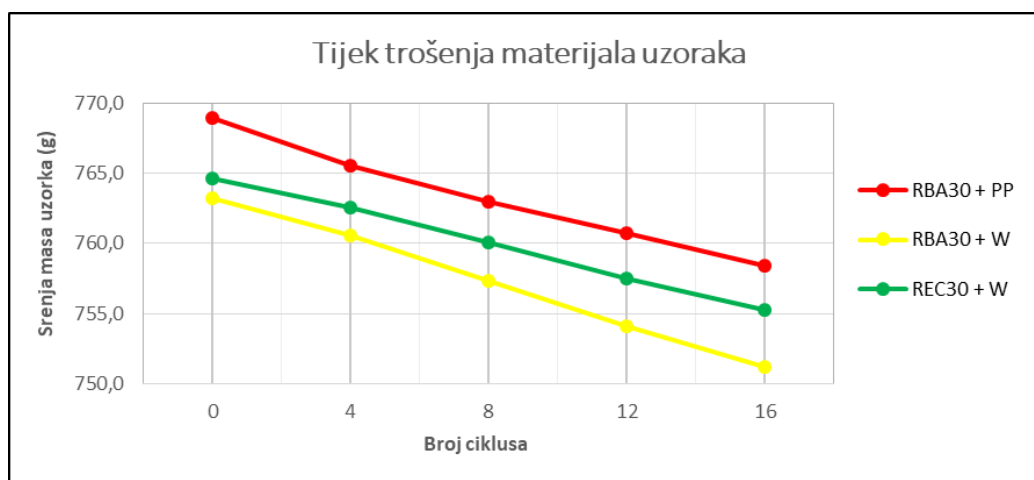
Slika 38: Usporedba rezultata ispitivanja otpornost na habanje (Autor: Matija Budić)

U dijagramu na Slici 39 prikazana je usporedba srednjeg gubitka volumena uzorka za svaku vrstu betona.



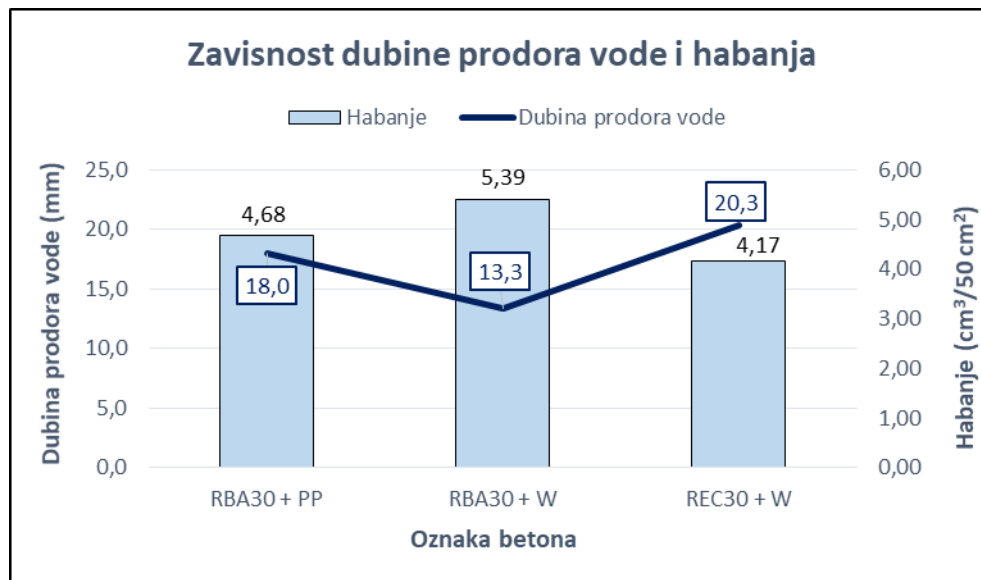
Slika 39: Usporedba srednjeg gubitka volumena uzorka uslijed habanja (Autor: Matija Budić)

Dijagram na Slici 40 prikazuje tijek trošenja materijala uzorka. Za svaku vrstu betona proračunata je srednja vrijednost početne mase uzorka te mase nakon svaka četiri ciklusa. Vidljivo je da svaka vrsta betona otprilike prati linearni trend trošenja. Najveće odstupanje od linearnosti trošenja imaju uzorci betona RBA30+PP nakon prva četiri ciklusa trošenja.



Slika 40: Tijek trošenja materijala uzorka (Autor: Matija Budić)

Slika 41 prikazuje zavisnost dubine prodora vode i habanja. Zaključuje se da najmanjoj otpornosti prodora vode u beton odgovara najveća otpornost na habanje.



Slika 41: Zavisnost dubine prodora vode i habanja (Autor: Matija Budić)

6. ZAKLJUČAK

Pomoću interpretacije dobivenih rezultata ispitivanja zaključuje se da je moguće postignuti povoljna trajnosnih svojstava betona ukoliko se koriste određene reciklirane komponente. Pokazalo se da beton REC30+W ima poroznu strukturu te nije bilo moguće provesti ispitivanje na plinopropusnost. Prema istraženju literaturi dosadašnjih provedenih ispitivanja, udio MK 15% značajno smanjuje poroznost betona što dovodi do manjeg prodora vode i plina, ali je mješavina manje obradiva. Rezultati ispitivanja u ovom radu su kontradikcija pretpostavljenim zaključcima. Unatoč sadržaju MK 15%, beton REC30+W je izrazito porozan. Razlog tome može biti sadržaj reciklirane vode i PVC piljevine 10% sitnog agregata što uz MK smanjuje obradivost betona i formira poroznu strukturu. Prosječan koeficijent plinopropusnosti betona RBA30+W iznosi $9,55 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ što je duplo manje od betona RBA30+PP ($2,21 \times 10^{-16} \text{ m}^2$). Jedina razlika u recepturi ta dva betona je vrsta vlakana, što potvrđuje da se korištenjem W vlakana u betonu postiže manja plinopropusnost od PP vlakana.

Rezultati ispitivanja na dubinu prodora vode pod tlakom dovode do sličnog zaključka. Najmanji prosječni prodor vode je zabilježen na betonu RBA30+W (13,3 mm), što dokazuje da W vlakna poboljšavaju svojstvo vodonepropusnosti. Dobiveni rezultat je i očekivan jer je ovom mješavinom postignuto svojstvo samoslijegajućeg betona kojeg karakterizira mala poroznost i propusnost. Najveća prosječna dubina prodora vode je zabilježena u betonu REC30+W (20,3 mm). Taj rezultat je također kontradiktoran iz razloga što sadrži W vlakna te MK 15%, što bi dodatno trebalo smanjiti prodor vode u odnosu na beton RBA30+W. Međutim, sadržaj reciklirane vode i PVC piljevine poništava smanjenje prodora vode koje je postignuto uporabom W vlakana i MK. Time se zaključuje da beton REC30+W ima najnepovoljnija svojstva propusnosti, dok beton RBA30+W ima najpovoljnija.

Ispitivanje otpornosti na habanje je pokazalo da beton REC30+W s najlošijim svojstvom propusnosti ima najveću otpornost na habanje koja iznosi $4,17 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$. Shodno tome, beton RBA30+W ima najmanju otpornost na habanje ($5,39 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$) unatoč najmanjoj propusnosti. Beton RBA30+PP je u ispitivanju svakog svojstva trajnosti pokazao srednje rezultate u odnosu na ostale betone. Sve vrste betona imaju otprilike linearan trend trošenja materijala uslijed habanja što je poželjno ponašanje koje ukazuje na homogenost betona.

Konačno, sadržaj određenih recikliranih materijala u betonu može poboljšati svojstva trajnosti istog, ovisno koje je trajnosno svojstvo najrelevantnije. Na taj način može se reducirati otisak CO₂ pri proizvodnji betona uz zadržavanje ili poboljšanje trajnosnih svojstava. Prema provedenim istraživanjima najveći doprinos poboljšanju svojstava trajnosti imaju vunena vlakna. Problem predstavlja nepostojeća industrija za obradu ovčje vune u svrhu proizvodnje vlakana za mikroarmiranje betona. Također, zamjena PP vlakana W vlaknima ne pridonosi značajnoj redukciji otiska CO₂ pri proizvodnji betona. Veći utjecaj na redukciju otiska CO₂ bi imala zamjena cementa prirodnim pucolanom poput metakaolina. Otisak CO₂ najviše ovisi o vodocementnom omjeru betona, zatim o udjelu RBA, te o udaljenosti transporta.

Problem ekološkog zagađenja dobiva na sve većoj važnosti iz dana u dan. U svim granama industrije, pa tako i u građevinarstvu raste interes za razvojem tehnologija i materijala kojima će se omogućiti dobra funkcionalnost proizvoda uz reducirano zagađenje okoliša. Kako bi se taj cilj ostvario potrebno je provoditi razna istraživanja kako bi se utvrdilo najoptimalnije rješenje. Kontinuirano povećanje proizvodnje betona zahtijeva daljnja istraživanja upotrebe recikliranih sastojaka u betonu kako bi se ograničilo onečišćenje okoliša na prihvatljivu razinu.

LITERATURA

Adnan, S.H., Loon, L.Y., Rahman, I.A., Saman, H.M., Soejoso, M.W.: *Water Permeability of Recycled Aggregate Concrete*, Konferencija o tehnologiji i inovacijama za održivi razvoj, Tehnički fakultet, Sveučilište Khon Kaen, Tajland, 28.-29. Siječanj, 2008.

Ahmad, J., Majdi, A., Arbili, M.M., Deifalla, A.F., Naqash, M.T.: *Mechanical, Durability and Microstructure Analysis Overview of Concrete Made with Metakaolin (MTK)*, <https://doi.org/10.3390/buildings12091401> , pristup: 10.09.2023.

Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Ebid, A.A.K., Alabduljabbar, H.: *An Integrated Approach to Using Sheep Wool as a Fibrous Material for Enhancing Strength and Transport Properties of Concrete Composites*, <https://doi.org/10.3390/ma15051638> , pristup 10.09.2023.

Baričević, M., Topić P., *Eksperimentalno određivanje parametara modela dinamičkog higrotermalnog ponašanja betona s recikliranim agregatom*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2016.

Bjegović, D., Štirmer, N., *Teorija i tehnologija betona; Mjerne metode*, udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2022.

Cantero B., Bravo M., Brito J., Del Bosque I. F.: *Assessment of the permeability to aggressive agents of concrete with recycled cement and mixed recycled aggregate*, <https://doi.org/10.3390/app11093856> , pristup 18.08.2023.

Cukarić, M., Bede, N., Mrakovčić, S., *Primjena industrijske otpadne PVC piljevine u mortu i betonu*, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, Zbornik radova: svezak 24, Rijeka, 2021.

Deng, Q., Zhang, R., Liu, C., Duan, Z., Xiao, J.: *Influence of fiber properties on abrasion resistance of recycled aggregate concrete: Length, volume fraction, and types of fibers*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129750> , pristup 31.03.2023.

Dokšanović, T., Farkaš, M., Njegovanović, N., *Materijali i mogućnosti smanjenja utjecaja na okoliš*, Tržišna prihvatljivost građevinskog materijala s malim udjelom ugljika, Osijek, 2012.

Gomez-Soberon, J.M., Agullo, L., Vazquez, E.: *Repercussions on Concrete Permeability Due to Recycled Concrete Aggregate*, <http://hdl.handle.net/2117/2561> , pristup 31.03.2023.

Holcim d.o.o. Hrvatska: <https://www.holcim.hr/>, pristup 10.09.2023.

HRN EN 206-1: *Beton – 1. dio: Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost*, 2006.

HRN EN 12390-8: *Ispitivanje očvrsluloga betona – 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom*, 2009.

HRN EN 13892-3: *Metode ispitivanja za materijale za in situ podove (estrihe) – 3. dio: Određivanje otpornosti na habanje – Böhme*, 2015.

Jimenez, L.F., Dominguez, J.A., Vega-Azamar, R.E., *Carbon footprint of recycled aggregate concrete*, <https://doi.org/10.1155/2018/7949741>, pristup 10.09.2023.

Kannan, V., Raja Priya, P.: *Evaluation of the permeability of high strength concrete using metakaolin and wood ash as partial replacement for cement*, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04024-y>, pristup 28.03.2023.

Klobučar, M., *Analiza svojstava samozbijajućeg betona s dodatkom karbidnog mulja*, diplomski rad, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2016.

Krajnović, N., *Analiza svojstava betona s recikliranim agregatom*, diplomski rad, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2017.

Kubissa, W., Jaskulski, R., Brodnan, M.: *Influence of SCM on the Permeability of Concrete with Recycled Aggregate* <https://doi.org/10.3311/PPci.8614>, pristup 31.03.2023

Lei, B., Yu, L., Chen, Z., Yang, W., Deng, C., Tang, Z., *Carbon emission evaluation of recycled fine aggregate concrete based on life cycle assessment*, Sustainability, China, 2022.

Macan, K., *Beton s recikliranim betonskim agregatom spravljen TSMA metodom*, diplomski rad, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2013.

Miličević, I., *Požarna otpornost betona s opekarskim lomom kao agregatom*, doktorska disertacija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, 2014.

Milišić, K., *Utjecaj dodataka na svojstva betona izloženog habanju*, diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2022.

Newchem: <https://www.newchem.info/Austria>, pristup 12.09.2023.

Pimentel L. L., Rizzo G. F., Jacintho A. E., Fontanini P. S.: *Concrete produced with recycled aggregate: a durability analysis for structural use*, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000600013>, pristup 18.08.2023.

Raju, S., Dharmar, B., *Karakteristike trajnosti betona s bakrenom zgurom i s dodatkom letećeg pepela*, Građevinar 69, Indija, 2017.

Sika: <https://mbcc.sika.com/en-asiapacific>, pristup 12.09.2023.

Štirmer, N., *Utjecaj građevinskog materijala na okoliš*, Radovi Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Požegi, Požega, 2012.

UNI 58-E0031: *Ispitivanje plinopropusnosti betona (Cambureau)*

Vaishali, Ghorpade, G.: *Chloride ion permeability studies of metakaolin based high performance concrete*, International Journal of Engineering Science and Technology, Odjel za građevinarstvo, Tehnički fakultet JNTU, Anantapur, 2011.

Verstaerkung Fiber Association (VFA): <https://www.vfasrl.com/>, pristup 12.09.2023.

Wang H., Sun X., Wang J., Monteiro J. M. P.: *Permeability of concrete with recycled concrete aggregate and pozzolanic materials under stress*, <https://doi.org/10.3390/ma9040252>, pristup 18.08.2023.

Žuža, T., *Betoni s recikliranim betonskim agregatom*, diplomski rad, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2013.