

Ekološki prihvatljivi betoni

Kirinčić, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:157:748479>

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

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



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

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



zir.nsk.hr



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Nikola Kirinčić

Ekološki prihvatljivi betoni

Diplomski rad

Rijeka, 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij
Urbano inženjerstvo
Teorija i tehnologija betona**

**Nikola Kirinčić
JMBAG: 0114027092**

Ekološki prihvatljivi betoni

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2020.

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**
Znanstveno područje: Tehničke znanosti
Znanstveno polje: Temeljne tehničke znanosti
Znanstvena grana: Materijali

Tema diplomskog rada
EKOLOŠKI PRIHVATLJIVI BETONI
ECOLOGICALLY ACCEPTABLE CONCRETES

Kandidat: **NIKOLA KIRINČIĆ**

Kolegij: **TEORIJA I TEHNOLOGIJA BETONA**

Diplomski rad broj: **UI-2020-27**

Zadatak:

Tema rada su Ekološki prihvatljivi betoni. Treba objasniti značenje pojma ekološki prihvatljivi beton, dati pregled upotrebe takvih betona u svijetu, analizirati recepture, fizička i mehanička svojstva, prednosti i nedostatke.

U praktičnom dijelu rada izraditi mješavine morta i betona s udjelom PVC piljevine te ispitati i analizirati parametre svježeg i očvrnulog betona.

Tema rada je uručena: 25. veljače 2020.

Komentorica:

doc. dr. sc. Natalija Bede,
dipl. ing. građ.

Mentorica:

doc. dr. sc. Silvija Mrakovčić,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Diplomski rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentoricom i komentoricom 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.

Nikola Kirinčić

U Rijeci, 14. rujna 2020.

Sažetak

Naslov rada: Ekološki prihvatljivi betoni

Student: Nikola Kirinčić

Mentorica: doc.dr.sc. Silvija Mrakovčić

Komentorica: doc. dr. sc. Natalija Bede

Studij: Sveučilišni diplomski studij

Kolegij: Teorija i tehnologija betona

Budući da je beton najčešće korišten umjetni materijal u svijetu, za njegovu proizvodnju potrebna je velika količina sastojaka. Upravo iz tog razloga, proizvodnja betona uvelike utječe na okoliš. Kako bi se zadovoljila proizvodnja agregata za beton, potrebno je znatno zadiranje u prirodu, čime se narušava estetika, uništavaju se prirodna staništa biljaka i životinja, stvara se velika količina buke i prašine. Uz proizvodnju agregata, veliki ekološki problem predstavlja i proizvodnja cementa, materijala koji služi kao vezivno sredstvo u betonu. Prilikom proizvodnje cementa stvaraju se velike količine CO₂ koje se ispuštaju u atmosferu.

Cilj ovog rada je pronaći moguće zamjene za osnovne komponente betona od materijala koji su već proizvedeni, a više se ne iskorištavaju. Osim što bi se time smanjila proizvodnja komponenti betona, također bi se smanjile i količine otpadnog materijala koji se inače odlaže u prirodi. U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja na uzorcima od cementnog morta i betona kod kojih je prirodni agregat u određenom postotku zamijenjen piljevinom od PVC-a, koja nastaje prilikom proizvodnje stolarije. Ispitivanja provedena na uzorcima od cementnog morta su ispitivanje konzistencije te ispitivanje vlačne i tlačne čvrstoće, a na betonskim uzorcima su provedena ispitivanja otpornosti na habanje, vodopropusnosti i vlačne čvrstoće cijepanjem.

Ključne riječi: beton, ekološki problem, otpadni materijal, PVC, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća

Abstract

Thesis title: Environmentally friendly concretes

Student: Nikola Kirinčić

Supervisor: Assist. prof. Silvija Mrakovčić

Co-supervisor: Assist. prof. Natalija Bede

Study: Graduate study of civil engineering

Course: Theory and Technology of concrete

Since concrete is the most commonly used artificial material in the world, its production requires a large amount of ingredients. It is for this reason that concrete production greatly affects the environment. In order to satisfy the production of concrete aggregates, it is necessary to significantly encroach on nature, which disturbs the aesthetics, destroys the natural habitats of plants and animals, and creates a large amount of noise and dust. In addition to the production of aggregates, a major environmental problem is the production of cement, a material that serves as a binder in concrete. During cement production, large amounts of CO₂ are released into the atmosphere.

The aim of this paper is to find possible replacements for the basic components of concrete from materials that have already been produced and are no longer used. In addition to reducing the production of concrete components, it would also reduce the amount of waste material that is otherwise disposed of in nature. In the experimental part of the work, tests were performed on samples of cement mortar and concrete in which the natural aggregate was replaced in a certain percentage by sawdust made of PVC, which is formed during the production of carpentry. The tests performed on the cement mortar samples are the consistency test and the tensile and compressive strength test, and on the concrete samples the wear resistance, water permeability and tensile strength tests.

Key words: concrete, environmental problem, waste material, PVC, compressive strength, tensile strength

Sadržaj

POPIS DIJAGRAMA.....	3
POPIS TABLICA.....	4
POPIS SLIKA	5
POPIS GRAFOVA.....	7
1. UVOD.....	8
2. KOMPONENTE ZA PROIZVODNJU BETONA	10
3. PODJELA EKOLOŠKI PRIHVATLJIVIH BETONA S OBZIROM NA KOMPONENTE.....	12
3.1. Betoni kod kojih se cement zamjenjuje otpadnim materijalom.....	12
3.1.1. Beton sa zamjenom dijela cementa letećim pepelom.....	12
3.1.2. Beton sa dodatkom karbidnog mulja.....	14
3.1.3. Beton s dodatkom mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda	16
3.2. Betoni kod kojih se agregat zamjenjuje određenim otpadnim materijalom	18
3.2.1. Beton sa agregatom od reciklirane automobilske gume.....	19
3.2.2. Beton sa recikliranom plastikom.....	22
3.2.3. Beton sa pepelom nastalim spaljivanjem mulja s UPOV-a.....	24
4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	27
4.1. Izrada cementnog morta.....	27
4.1.1. Ugradnja i njega svježeg morta	29
4.2. Ispitivanje svježeg morta	30
4.2.1. Ispitivanje konzistencije morta.....	30
4.3. Ispitivanje očvrslog morta.....	32
4.3.1. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem	32
4.3.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće	34
4.3.3. Rezultati ispitivanja	36
5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	41
5.1. Izrada svježeg betona.....	41
5.2. Ugradnja svježeg betona u kalupe	44
5.3. Ispitivanje očvrslog betona	46
5.3.1. Dubina prodora vode pod tlakom	46
5.3.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitnih uzoraka	48
5.3.3. Otpornost na habanje	51
6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA.....	58
6.1. Ispitivanje svježeg morta	58
6.1.1. Konzistencija morta.....	58
6.2. Ispitivanje očvrslog morta.....	59

6.2.1.	Vlačna čvrstoća morta	59
6.2.2.	Tlačna čvrstoća morta.....	61
6.3.	Ispitivanje očvrstlog betona	63
6.3.1.	Dubina prodora vode pod tlakom	63
6.3.2.	Vlačna čvrstoća cijepanjem	64
6.3.3.	Otpornost na habanje	64
7.	ZAKLJUČAK.....	66
8.	LITERATURA	68

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana s obzirom na % zamjene cementa s letećim pepelom [8]

Dijagram 2: Tlačna čvrstoća nakon 90 dana s obzirom na % zamjene cementa s letećim pepelom [8]

Dijagram 3: Tlačna čvrstoća morta starosti 1, 7 i 28 dana [10]

Dijagram 4: Tlačna čvrstoća betona starosti 1, 7 i 28 dana [10]

Dijagram 5: Dubina prodora vode u betonu [10]

Dijagram 6: Sastav ispitivanih mješavina [14]

Dijagram 7: Tlačna čvrstoća ispitanog betona [14]

Dijagram 8: Rezultati akustičnih ispitivanja [14]

Dijagram 9: Tlačna čvrstoća uzoraka [16]

Dijagram 10: Vlačna čvrstoća cijepanjem [17]

Dijagram 11: Rezultati ispitivanja na savijanje [16]

Dijagram 12: Razvoj tlačne čvrstoće betona [18]

Dijagram 13: Razvoj čvrstoće betona na savijanje [18]

Dijagram 14: Nanošenje opterećenja u vremenu, do trenutka sloma

POPIS TABLICA

Tablica 1: Sastav betonskih mješavina [9]

Tablica 2: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona [9]

Tablica 3: Rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode pod tlakom [9]

Tablica 4: Receptura betonskih mješavina [18]

Tablica 5: Mase komponenti za cementni mort

Tablica 6: Gustoća, temperatura i promjer rasprostiranja svježeg morta

Tablica 7: Vlačna čvrstoća nakon 7 dana

Tablica 8: vlačna čvrstoća nakon 28 dana, ispitivanje kontrolom sila

Tablica 9: Vlačna čvrstoća nakon 28 dana, ispitivanje kontrolom pomaka

Tablica 10: Tlačna čvrstoća nakon 7 dana

Tablica 11: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, nakon ispitivanja kontrolom sila

Tablica 12: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, nakon ispitivanja kontrolom pomaka

Tablica 13: Receptura za betonske mješavine

Tablica 14: Dubina prodora vode pod tlakom

Tablica 15: Vlačna čvrstoća cijepanjem

Tablica 16: Dimenzije, masa i gustoća uzorka

Tablica 17: Razred otpornosti na habanje

Tablica 18: Razred otpornosti uzorka REF_1

Tablica 19: Razred otpornosti uzorka REF_2

Tablica 20: Razred otpornosti uzorka REF_3

Tablica 21: Razred otpornosti uzorka PVC_1

Tablica 22: Razred otpornosti uzorka PVC_2

Tablica 23: Razred otpornosti uzorka PVC_3

POPIS SLIKA

Slika 1: Poprečni presjek inovativnog rješenja [14]

Slika 2: Gotovi RUCONBAR proizvod [15]

Slika 33: Plastika nakon mljevenja boca [16]

Slika 4: Sastojci za izradu cementnog morta

Slika 5: Ugradnja morta u kalup

Slika 6: Vibriranje morta

Slika 7: Cementni mort nakon ugradnje u kalup

Slika 8: Cementne prizmice potopljene u vodi

Slika 9: Uzorak morta za ispitivanje konzistencije

Slika 10: Mort nakon završetka ispitivanja

Slika 11: Pozicioniranje uzorka u uređaju za ispitivanje vlačne čvrstoće

Slika 12: Cementna prizmica u aparatu za ispitivanje vlačne čvrstoće

Slika 13: Uzorak nakon sloma

Slika 14: Uzorak u uređaju za ispitivanje tlačne čvrstoće

Slika 15: Uzorak nakon sloma

Slika 16: Cement i agregat nakon suhog miješanja

Slika 17: Referentni beton

Slika 18: Svježi beton sa 15% PVC-a

Slika 19: Beton ugrađen u kalupe

Slika 20: Njega uzoraka u vodi

Slika 21: Uzorci referentnog betona izloženi prodoru vode pod tlakom

Slika 22: Uzorci betona sa PVC-om izloženi prodoru vode pod tlakom

Slika 23: Postavljanje uzorka koji je bio izložen prodoru vode u uređaj za cijepanje

Slika 24: Uzorak nakon cijepanja

Slika 25: Trag prodora vode na referentnom betonu (gornja slika) i betonu sa 15% PVC-a (donja slika)

Slika 26: Uzorak postavljen u aparat za cijepanje

Slika 27: Uzorak ispitan na vlačnu čvrstoću

Slika 28: Abrazivni materijal

Slika 29: Mjerenje uzorka

Slika 30: Uzorak nakon što je završio jedan ciklus

Slika 31: Vaganje uzorka nakon završetka 4 ciklusa

POPIS GRAFOVA

Graf 1: promjer rasprostiranja cementnog morta

Graf 2: Vlačna čvrstoća uzorka nakon 7 dana, Holcim pijesak

Graf 3: Vlačna čvrstoća nakon 28 dana, kontrola sila, standardni pijesak

Graf 4: Vlačna čvrstoća nakon 28 dana, kontrola pomaka, standardni pijesak

Graf 5: Tlačna čvrstoća nakon 7 dana, Holcim pijesak

Graf 6: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, standardni pijesak, nakon ispitivanja kontrole sila

Graf 7: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, standardni pijesak, nakon ispitivanja kontrole sila

Graf 8: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, standardni pijesak, nakon ispitivanja kontrole pomaka

Graf 9: Prodor vode pod tlakom

Graf 10: Vlačna čvrstoća cijepanjem

Graf 11: promjena volumena u odnosu na površinu

1. UVOD

Beton je jedan od materijala koji se najviše koristi u svijetu te osnovni materijal koji se koristi u građevinarstvu, počevši od malih obiteljskih kuća, pa sve do izgradnje brana, mostova, vijadukata i ostalih inženjerski zahtjevnih građevina u kojima je nezamjenjiv. Prednost betona je ta što je njegovom ugradnjom u kalupe ili u oplatu vrlo lako postići željene oblike.

U proizvodnji ekološki prihvatljivih betona koriste se materijali koji bi inače bili odbačeni, odnosno koji nastaju kao nusprodukt u raznim industrijama, a mogu zamijeniti dio osnovnih komponenti. Svrha upotrebe ekološki prihvatljivih betona je smanjenje proizvodnje osnovnih komponenti betona čime se smanjuje emisija CO₂, manje se iskorištavaju prirodni resursi, smanjuje se broj odlagališta građevinskog otpada, otpada koji nastaje prilikom pročišćavanja otpadnih voda, ponovno se iskorištavaju razni gumeni i plastični materijali koji nisu biorazgradivi čime se značajno štiti okoliš. Također, kao mjera zaštite okoliša, ističe se ponovno korištenje vode koja je već bila u određenom tehnološkom procesu, a time se smanjuje iskorištavanje pitke vode.

Primjeri ekološki prihvatljivih betona:

- RUCONBAR – visoko apsorbirajuća barijera za zaštitu od buke; sastoji se od nosivog sloja te apsorbirajućeg sloja u koji se ugrađuje 40 % gumenih granula dobivenih recikliranjem starih automobilskih guma [1]
- beton s rižinim ljuskama – korištenjem pepela rižinih ljuski umjesto dijela cementa poboljšava se obradivost, smanjuje toplina hidratacije, povećava čvrstoća, smanjuje skupljanje [2]
- Beton s muljem s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda – koristi se pepeo nastao spaljivanjem mulja, a njegova količina ovisi o sirovini koja se spaljuje, tipu peći, temperaturi spaljivanja, vremenu zadržavanja mulja u peći [3] Ferrock – beton koji nastaje miješanjem čelične prašine koja je nusprodukt proizvodnje čelika sa silicijskom prašinom koja nastaje brušenjem stakla [4]
- Cement s letećim pepelom – upotrebom letećeg pepela u mješavini, smanjuje se potrebna količina cementa te se iskorištava leteći pepeo koji je inače potrebno deponirati [5]

- Drvobetonski blokovi – za proizvodnju se koristi kombinacija drvene piljevine i cementa, a prednosti ovih blokova su mala težina, otpornost na požar, niska toplina vodljivosti, visoka otpornost na smrzavanje, piljevina u sebi apsorbira CO₂ [6]
- Beton sa plastikom – provode se razna ispitivanja vezana uz zamjenu agregata ovim materijalom. Također, nije svaka vrsta plastike pogodna za zamjenu agregata. Do sada su se provodila ispitivanja sa PVC-om, PET-om u obliku granula i u obliku vlakna [7]

2. KOMPONENTE ZA PROIZVODNJU BETONA

Komponente od kojih se proizvodi beton su cement, agregat, voda i dodaci koji služe za poboljšavanje određenih svojstva betona. Cement spada u hidraulična veziva, odnosno veziva koja stvrđavaju na zraku i pod vodom, a dijele se na portland cimente i posebne cimente. Portland cementi dobivaju se mljevenjem klinkera koji se sastoji od vapnene i glinene komponente te korekcijskih sastojaka koji se dodaju mješavini ukoliko u mješavini navedenih komponenti nedostaje neki sastojak. U posebne vrste cementa ubrajaju se pucolanski cementi, cementi sa zgurom, ekspanzivni cementi, bijeli i obojeni cementi. Jedan od vodećih problema u proizvodnji cementa je proizvodnja CO₂, čija količina dostiže 8% globalne emisije u atmosferu, odnosno na jedan kilogram proizvedenog cementa proizvede se i jedan kilogram ugljikova dioksida. Cilj korištenja raznih nusprodukata industrije umjesto cementa je smanjenje proizvodnje cementa, a time i smanjenje emisije CO₂.

Agregati se dijele na prirodne, umjetne i reciklirane. Prirodni agregati mogu biti drobljeni ili riječni. Umjetni agregati su otpadni materijali iz industrija te specijalni proizvodi, a u reciklirane se agregate ubrajaju betonski i opekarski lom, staklo, guma, plastika. Agregat zauzima oko 70% volumena betona. Utjecaj eksploatacije prirodnog kamena na okoliš je štetan jer se narušava estetski izgled, utječe na promjene biljnog i životinjskog svijeta, stvara se buka i velika količina prašine koja se širi prilikom miniranja, drobljenja, te deponiranja i utovara gotovog materijala. Također, jedan od velikih problema predstavlja i mogućnost razlijevanja masti, ulja i goriva u slučaju havarije. Stoga je cilj korištenja različitih zamjena za prirodni agregat smanjenje eksploatacije prirodnih resursa.

Osnovna uloga vode u sastavu svježeg betona je pokretanje kemijskih reakcija cementa, odnosno hidratacija cementa čime cement postaje vezivno sredstvo. Osim ove uloge, voda je također bitna i kod prijevoza i ugradnje betona te njege betona. Voda mora biti kvalitetna zbog miješanja betona, njege betona i kontakta s betonom, a ta kvaliteta se mora dokazati kemijskom analizom. Ukoliko voda nije odgovarajuće kvalitete, može doći do proizvodnje betona koji neće imati projektiranu čvrstoću, a to bitno utječe na nosivost elemenata koji se proizvode. Osim upotrebe pitke vode, u proizvodnji betona se također mogu koristiti i povratne vode iz procesa industrije betona (najčešće su to vode od pranja miksera i ostale opreme za svježiji beton), površinske vode, vode iz podzemlja i

industrijske otpadne vode. U slučaju primjene takvih voda potrebno je obaviti ispitivanja kako bi se dokazala kvaliteta vode [2].

3. PODJELA EKOLOŠKI PRIHVATLJIVIH BETONA S OBZIROM NA KOMPONENTE

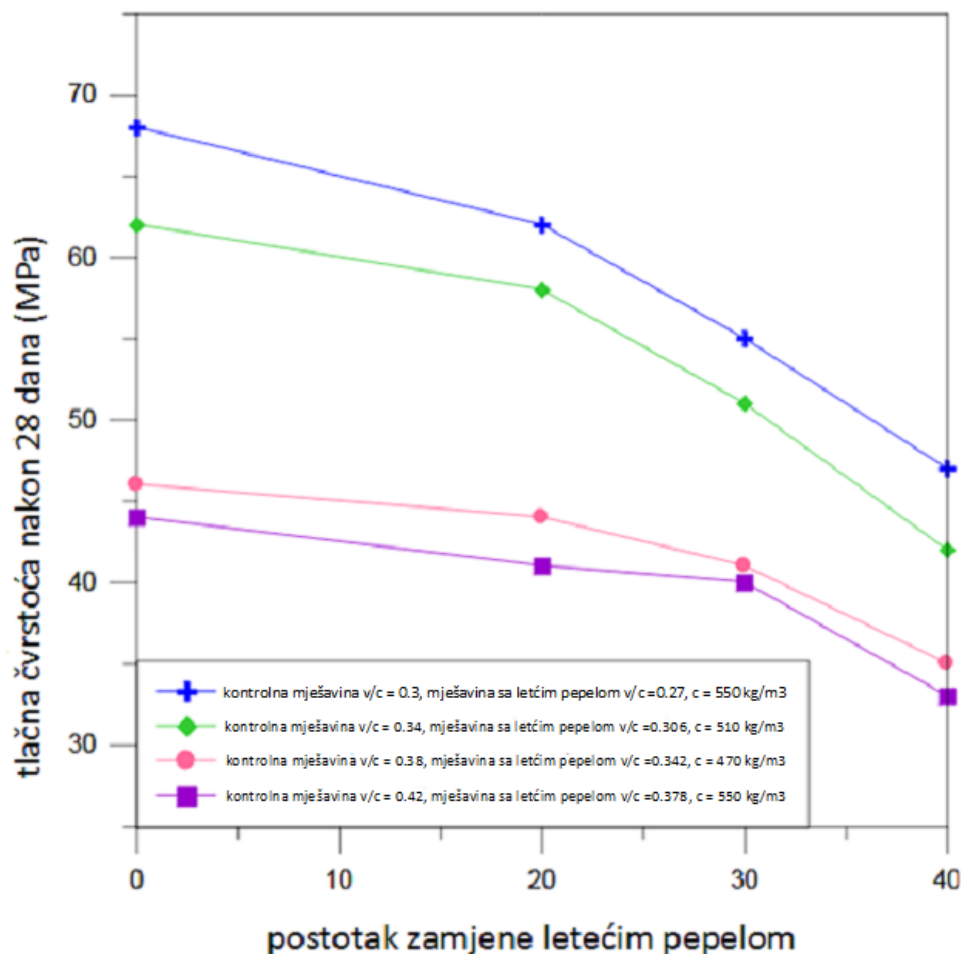
3.1. Betoni kod kojih se cement zamjenjuje otpadnim materijalom

Cement koji u betonu služi za vezanje agregata moguće je u određenom postotku zamijeniti nekim otpadnim materijalima, a da se pritom ne utječe u velikoj mjeri na svojstva očvrstlog betona. U svrhu toga provedena su različita ispitivanja kod kojih se cement zamijenio letećim pepelom, karbidnim muljem i prahom, muljem sa uređaja za pročišćavanje otpadni voda. Kod zamjene cementa sa letećim pepelom utvrđeno je da količine letećeg pepela koje i dalje daju beton visoke čvrstoće nakon 28 dana variraju između 0 i 30% [8]. Primjenom karbidnog praha umjesto dijela cementa ne postižu se zadovoljavajući rezultati što se tiče tlačne čvrstoće. U betonu kod kojeg je cement zamijenjen sa količinom karbidnog mulja u iznosu do 20% utvrđen je porast tlačne čvrstoće [9]. Kod zamjene cementa sa pepelom koji je nastao spaljivanjem mulja sa UPOV-a zaključeno je da do 20% zamjene zadovoljava zahtjeve za čvrstoćom betona [10].

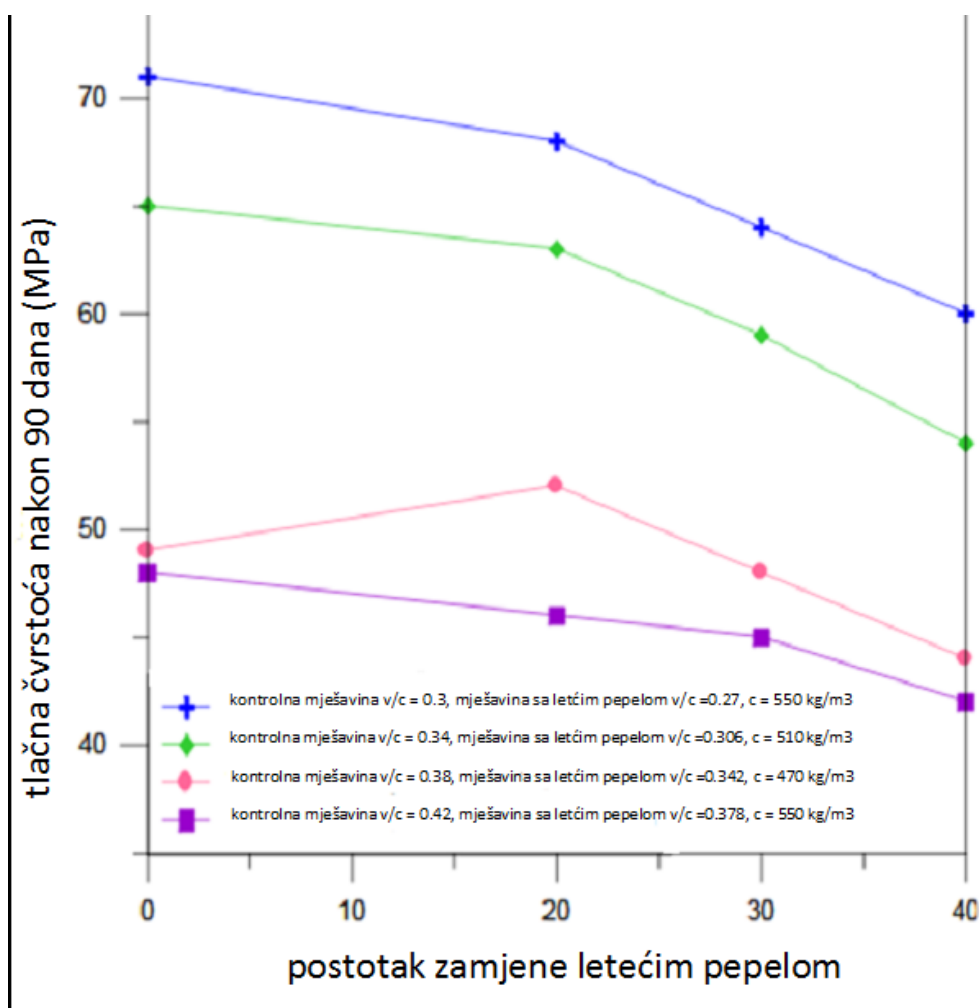
3.1.1. Beton sa zamjenom dijela cementa letećim pepelom

U ovoj vrsti betona kao zamjena dijela portland cementa koristi se leteći pepeo. Leteći pepeo nastaje kao otpad u termoelektranama, a sakuplja se pomoću filtera iz otpadnih plinova. Prednost kod uporabe ovog materijala je smanjenje proizvodnje portland klinkera, a time se smanjuje i stvaranje CO₂ čija količina dostiže 8% globalne emisije u atmosferu. Najčešće se ovaj dodatak koristi kod izrade betona za izvođenje masivnih betonskih konstrukcija kao što su npr. brane, a razlog tome je taj što leteći pepeo ima manju toplinu hidratacije u odnosu na običan cement. Također, korištenjem letećeg pepela smanjuje se potreba vode za miješanje betona, izdvajanje vode, poboljšava se obradljivost te smanjuje se propusnost betona. Korištenje ovog materijala može imati negativne utjecaje na kvalitetu betona zbog toga što pepeo ima neujednačen utjecaj na hidrataciju cementa, ovisno o kemijskom sastavu, koji ovisi o vrsti goriva i o tehnološkim procesima spaljivanja.

U svom radu, Saha, Pan i Pan (2014) proveli su istraživanje kojim je ispitana mogućnost korištenja letećeg pepela kao zamjene za cement u proizvodnji betona visoke čvrstoće. Korišten je v/c omjer od 0,27 do 0,42, cementni materijal je zamijenjen u rasponu 0 % - 40%, a količina cementa je varirala između 430 i 550 kg/m³. Čvrstoća betona ispitana je na uzorcima starosti 7, 28 i 90 dana (dijagram 1 i dijagram 2). Ukupno je napravljeno 16 uzoraka od kojih su 4 kontrolna, bez letećeg pepela, te 12 sa letećim pepelom, a razlikuju se po količini letećeg pepela i v/c omjeru. Vodocementni omjer u betonima s pepelom smanjen je za 10% u odnosu na beton bez letećeg pepela. Betonom visoke čvrstoće smatra se beton čija je tlačna čvrstoća ≥ 40 MPa. Nakon provedenih ispitivanja pokazalo se da nakon 28 dana starosti samo dvije mješavine ne zadovoljavaju potrebnu čvrstoću od 40 MPa, a to su mješavine sa udjelom od 40% letećeg pepela čiji su v/c omjeri 0,378 i 0,342. Nakon 90 dana starosti sve su mješavine zadovoljavale zahtijevanu čvrstoću betona visoke čvrstoće.



Dijagram 32: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana s obzirom na % zamjene cementa s letećim pepelom [8]



Dijagram 33: Tlačna čvrstoća nakon 90 dana s obzirom na % zamjene cementa s letećim pepelom [8]

3.1.2. Beton sa dodatkom karbidnog mulja

Karbidni mulj nastaje u procesu proizvodnje acetilena. Acetilen je plin koji se u kombinaciji s kisikom koristi za razne obrade metala, kao što su zavarivanje, rezanje, tvrdo lemljenje, ravnjanje i drugo. Po svojoj kemijskoj formuli karbidni mulj je gašeno vapno, CaOH_2 , a to je jedan od glavnih produkata hidratacije cementa. Imajući na umu ovaj podatak, ideja je da se ova vrsta otpadnog materijala sve više iskorištava kako bi smanjila proizvodnja cementa te kako bi se smanjile količine mulja koji se mora deponirati.

U diplomskom radu Klobučar, M. (2016.) provela je istraživanje kako karbidni mulj utječe na svojstva očvrstlog betona. Za potrebe tog istraživanja napravljeno je ukupno sedam

receptura samozbijajućeg betona, od čega je jedna referentna mješavina te po tri mješavine kod kojih se cement zamjenjuje sa 10%, 20% ili 30% karbidnog praha, odnosno karbidnog mulja (tablica 1). Vodocementni omjer je kod svih mješavina 0,4 [9].

Tablica 24: Sastav betonskih mješavina [9]

Sastavne komponente	Referentni [kg/m ³]	Karbidni prah [kg/m ³]			Karbidni mulj [kg/m ³]		
	REF	PA	PB	PC	MA	MB	MC
Cement	340	300	260	220	300	260	220
Silicijska prašina	60	60	60	60	60	60	60
Voda	179	180	180	180	155	109	64
Superplastifikator	7	9	9	9	9	10	12
Stabilizator	5	5	5	5	5	5	5
Karbidni prah	0	40	80	120	0	0	0
Karbidni mulj	0	0	0	0	85	171	256
Filer	120	120	120	120	120	120	120
Agregat 0-4 mm	701	693	688	683	671	664	655
Agregat 4-8 mm	350	346	344	341	345	342	338
Agregat 8-16 mm	350	346	344	341	345	342	338
Vodovezivni omjer	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Provođenjem ispitivanja betona na tlačnu čvrstoću zaključeno je da se povećavanjem količine karbidnog praha smanjuje tlačna čvrstoća betona (tablica 2). Uspoređivanjem rezultata tlačne čvrstoće referentnog betona sa betonima s muljem i prahom utvrđeno je da kod betona sa prahom niti jedna mješavina nema čvrstoću kao referentni beton, a kod betona sa 10% i 20% mulja tlačna čvrstoća je veća od tlačne čvrstoće referentnog betona za 18%, odnosno 3%.

Tablica 25: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona [9]

Oznaka uzorka	Tlačna čvrstoća betona [MPa]						
	REF	PA	PB	PC	MA	MB	MC
1	56,5	50,71	37,18	33,16	64,47	58,15	46,67
2	59,7	48,82	36,19	33,19	66,29	59,08	44,59
3	56,0	50,2	38,22	34,66	64,9	54,88	47,01
4	56,1	50,09	36,31	34,09	63,82	53,81	45,74
5	55,0	48,99	35,94	34,2	63,89	56,82	47,76
6	44,8	51,15	38,1	31,59	65,47	55,73	48,66
Sr	54,7	50,0	37,0	33,5	64,8	56,4	46,7
Sdev	5,11	0,93	1,00	1,10	0,96	1,99	1,44

Osim ispitivanja tlačne čvrstoće provedeno je i ispitivanje vodopropusnosti betona pod tlakom. Ovo ispitivanje provedeno je na kockama duljine stranica 15 cm. Rezultatima ispitivanja je utvrđeno da se povećanjem količine karbidnog mulja ili praha značajno povećava vodopropusnost betona. Kod svih uzoraka je propusnost veća od propusnosti referentnog betona bez mulja i praha (tablica 3).

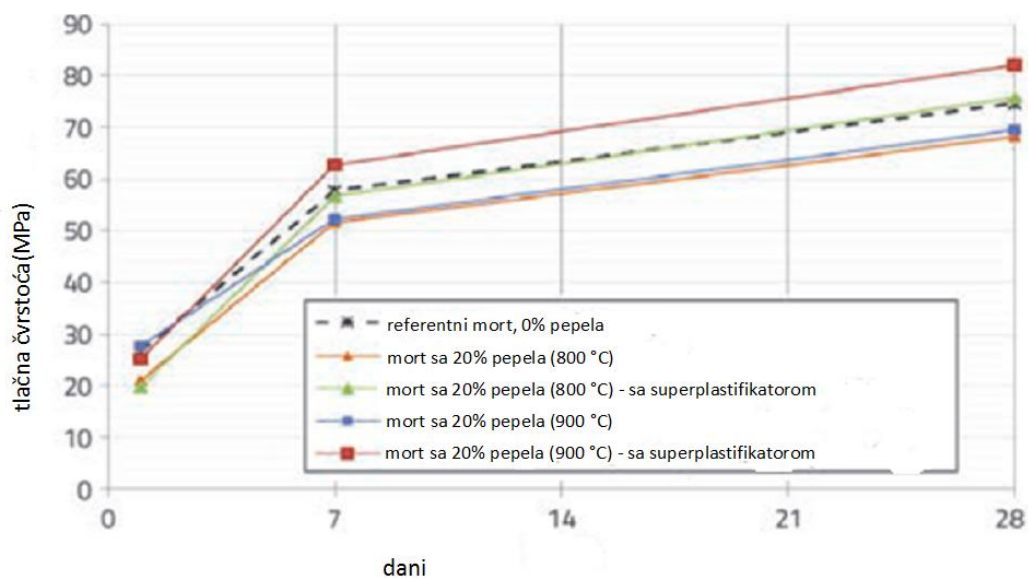
Tablica 26: Rezultati ispitivanja dubine prodiranja vode pod tlakom [9]

Oznaka uzorka	Dubina prodiranja vode [mm]						
	REF	PA	PB	PC	MA	MB	MC
1	0	6	8	12	5	7	11
2	0	6	7	8	0	10	12
3	1	5	8	12	5	5	21
4	2	0	7	14	0	3	19
5	0	0	4	9	0	12	15
6	1	3	9	11	0	7	16
Sr	0,7	3,3	7,2	11,0	1,7	7,3	15,7
Sdev	0,8	2,8	1,7	2,2	2,6	3,3	3,9

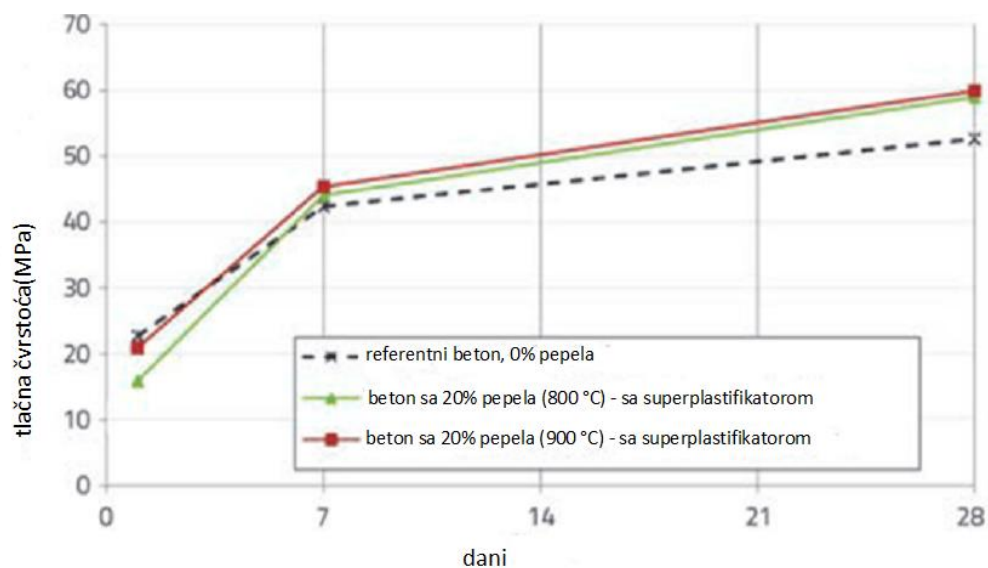
3.1.3. Beton s dodatkom mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

Raznim strategijama upravljanja vodama pokušava se u što većoj mjeri smanjiti količinu otpadnog materijala koji se deponira ili koji se nekontrolirano ispušta u prirodu. Jedan od problema kod pročišćavanja otpadnih voda je velika količina mulja koji ostaje nakon procesa taloženja. Najčešće se taj mulj pohranjuje na deponijima, dio se koristi u poljoprivredi, a u novije vrijeme mulj se spaljuje te se dobiveni pepeo koristi u građevinarstvu, u betonskoj industriji. Veličina čestica pepela je između 1 i 100 μm , a srednja veličina je 26 μm . Osnovni elementi koje nalazimo u portland cementu su silicij, aluminij, kalcij i željezo, a ujedno su to elementi koji zauzimaju veliki udio u pepelu koji nastaje spaljivanjem mulja. Kod korištenja pepela kao zamjenskog materijala za cement, u procesu proizvodnje betona potrebna je veća količina vode zbog nepravilne morfologije, porozne strukture i velike specifične površine. Zbog različite prirode otpadnih voda, potrebno je stalno provoditi ispitivanja kemijskog sastava pepela kako bi se znalo da li se može koristiti u proizvodnji betona i u kojoj količini [11].

U svom radu Nakić, D. i suradnici (2018) ispitali su mogućnost zamjene dijela cementa pepelom koji nastaje kao nusprodukt spaljivanja mulja sa uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Ispitivanja su provedena na mortu i betonu. Za ispitivanje morta ukupno je napravljeno 5 mješavina, a to su referentna mješavina, dvije mješavine sa 20% zamjene sa pepelom koji je nastao spaljivanjem na 800°C i dvije mješavine sa 20% zamjene sa pepelom koji je nastao spaljivanjem na 900°C. Kod ovih mješavina, jedna je napravljena sa superplastifikatorom, a druga bez. Za potrebe ispitivanja betona napravljene su 3 mješavine, a to su referentna te po jedna sa pepelom nastalim na 800°C i 900°C sa superplastifikatorom. Ispitivanja očvrslih uzoraka napravljena su na uzorcima starosti od 1, 7 i 28 dana. Prema rezultatima ispitivanja tlačne čvrstoće morta (dijagram 3) vidljivo je da je čvrstoća kod morta bez superplastifikatora slabija u odnosu na referentni mort i mort sa superplastifikatorom. Kao uzrok tome navedena je slaba obradivost morta, a posljedica toga je teška ugradnja u kalupe. Mort sa superplastifikatorom pokazao je slabija svojstva od referentnog morta pri starosti od jednog dana dok je kod starosti od 28 dana pokazao povećanje tlačne čvrstoće. Slični rezultati dobiveni su i ispitivanjem betona (dijagram 4). Pri starosti od 1 dana tlačna čvrstoća betona sa pepelom je manja u odnosu na referentni beton, a kako je beton stario, pokazana su povećanja tlačne čvrstoće u odnosu na referentni beton. Povećanje čvrstoće pri 28 dana starosti je približno 12% u odnosu na referentni beton.

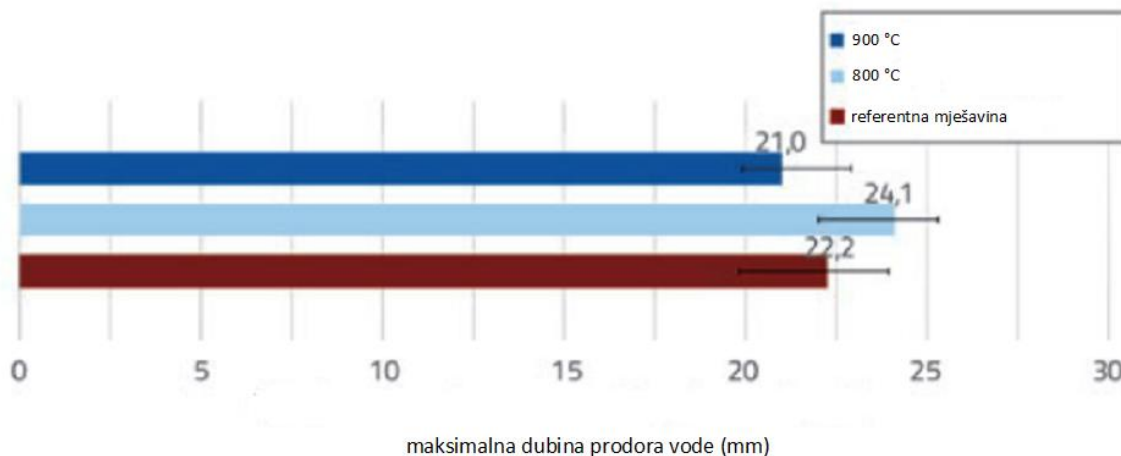


Dijagram 3: Tlačna čvrstoća morta starosti 1, 7 i 28 dana [10]



Dijagram 4: Tlačna čvrstoća betona starosti 1, 7 i 28 dana [10]

Rezultati ispitivanja vodopropsnosti betona (dijagram 5) pokazali su da je dubina prodora vode kod betona sa pepelom dobivenim na 800°C veća za 7% u odnosu na referentni beton, a kod betona sa pepelom dobivenim na 900°C dubina prodora vode je smanjena za 13%.



Dijagram 5: Dubina prodora vode u betonu [10]

3.2. Betoni kod kojih se agregat zamjenjuje određenim otpadnim materijalom

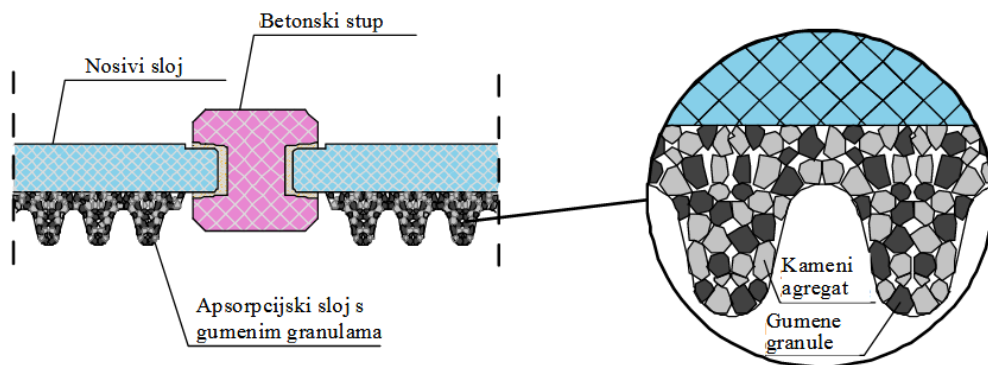
Sve više se ispituju zamjene prirodnog agregata kao materijala koji zauzima najveći volumen u betonu. Kao zamjena za prirodni agregat koriste se opekarski lom, reciklirani betonski agregat, drvena piljevina, plastika, staklo.

3.2.1. Beton sa agregatom od reciklirane automobilske gume

Direktivom 1999/31/EC koja je startala početkom 2006. godine zabranjeno je bilo kakvo odlaganje automobilskih guma u okoliš. Kao rezultat te direktive došlo je do velikog povećanja otpadnih guma koje je potrebno nekako zbrinuti. Takav trend porasta otpadnih guma potaknuo je inženjere na recikliranje guma te korištenje recikliranih materijala u nove svrhe. Tako se recikliranjem automobilskih guma dobivaju tri sirovine, a to su gumene granule te čelična i tekstilna vlakna.

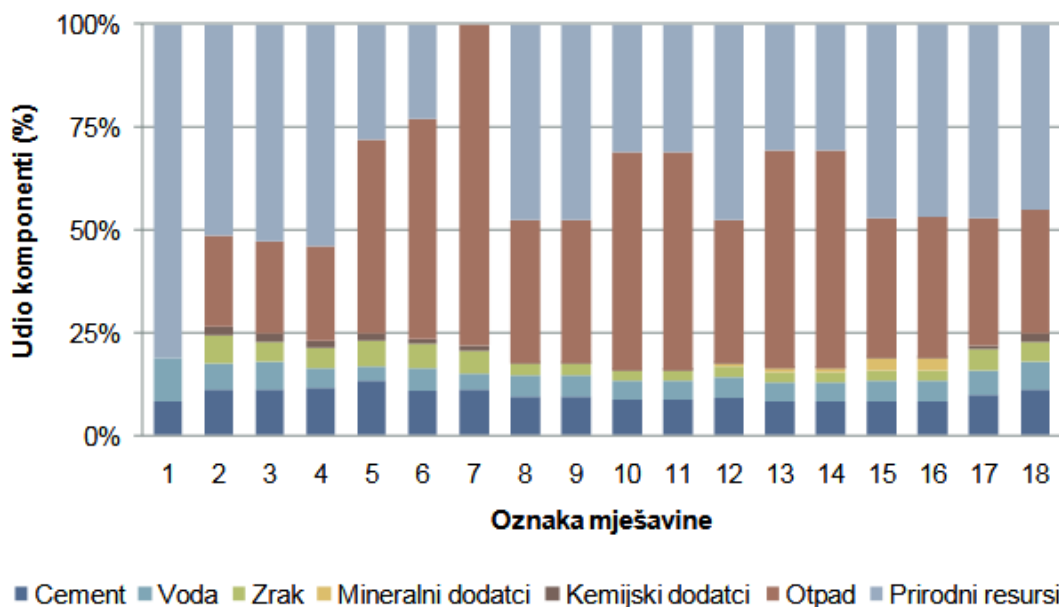
Osnovna svojstva recikliranih gumenih granulata su nizak modul elastičnosti, niska specifična težina, izolacijska svojstva, apsorpcija energije koja je nastala djelovanjem opterećenja, otpornost na smrzavanje i odmrzavanje. Primjer za upotrebu recikliranih granulata je panel za zaštitu od buke, RUCONBAR, koji se koristi na prometnicama. Apsorbirajući sloj kod ovih panela izvodi se od laganog betona s dodatkom recikliranih granulata u iznosu od 40 %. Osim dobrih svojstva apsorpcije buke, ove barijere imaju i svojstva vatrootpornosti te su otporne na smrzavanje. Uz iskorištavanje otpadnog materijala od automobilskih guma, još jedna prednost ovih barijera je i ta što se smanjila količina proizvodnje ekspandirane gline koja se koristila u proizvodnji barijera za zaštitu od buke. Smanjenjem proizvodnje ekspandirane gline, smanjilo se uništavanje okoliša, a zbog manje proizvodnje smanjena je i emisija stakleničkih plinova [13].

U svom radu Lakušić, Haladin i Baričević (2011.) ispitali su 18 različitih mješavina kako bi se utvrdilo u kojem postotku je optimalno zamijeniti prirodni agregat recikliranom gumom da bi se postigla zadovoljavajuća svojstva betona. Agregati koji su se koristili u apsorbirajućem sloju bili su drvena vlakna i ekspandirana glina, a to se htjelo promijeniti kako bi se smanjila eksploatacija prirodnog agregata te kako bi se pomoglo u gospodarenju otpadnim gumama. Ova vrsta barijera sastoji se od nosivog sloja, apsorpcijskog sloja s gumenim granulama i betonskog stupa (Slika 1).



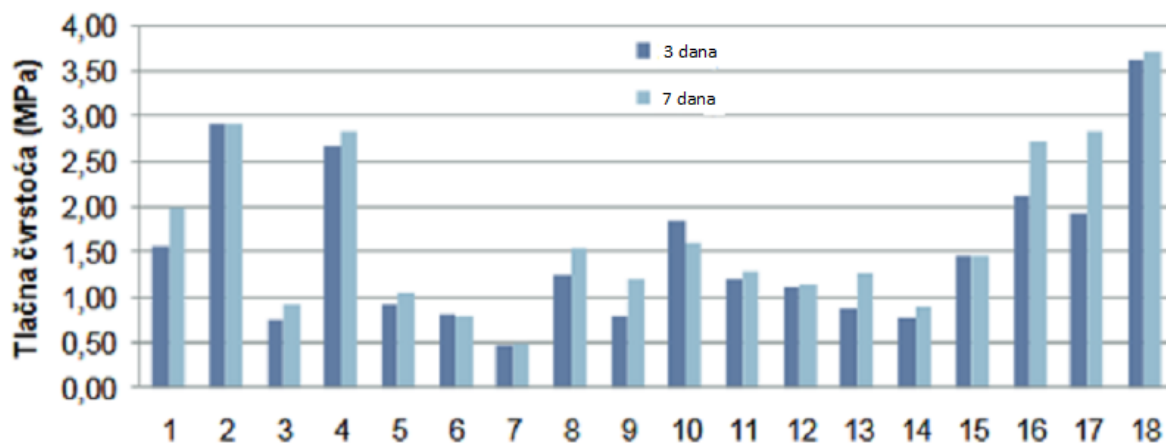
Slika 1: Poprečni presjek inovativnog rješenja [14]

Kako bi se odredila optimalna mješavina betona napravljeno je 18 uzoraka betona sa raznim udjelima prirodnih materijala, otpadnog materijala, mineralnih i kemijskih dodataka (dijagram 6).

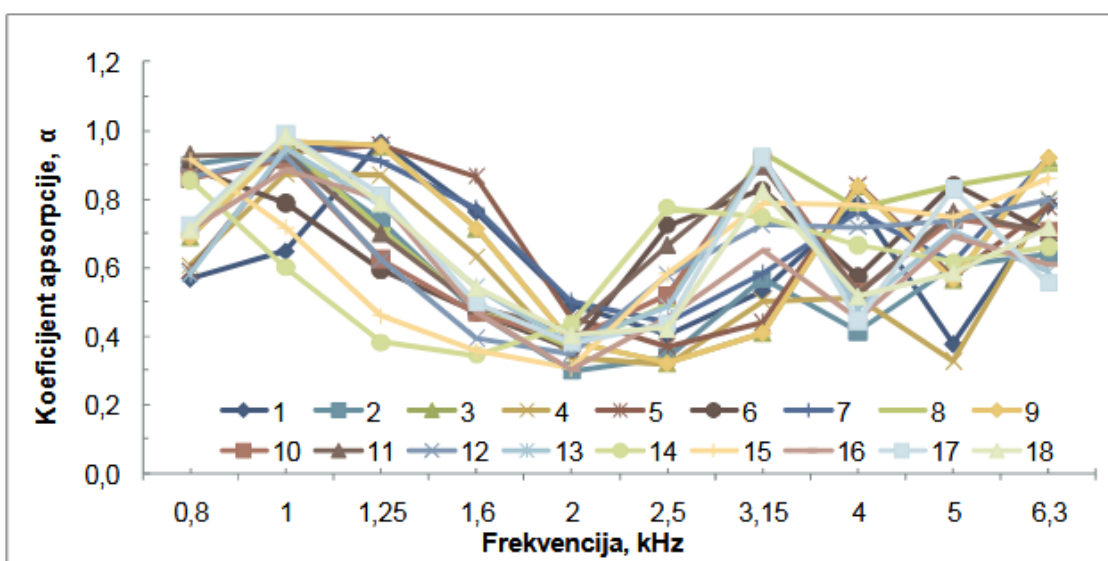


Dijagram 6: Sastav ispitivanih mješavina [14]

Provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće (dijagram 7) i akustičnih svojstava na malim laboratorijskim uzorcima u Kundtovoju cijevi (dijagram 8) na temelju kojih se odabrala optimalna mješavina betona. Nakon odabira mješavine napravljeno su uzorci čija je površina 10 m², te su ispitani u ječnoj prostoriji. Prvi put su ove ploče postavljene na dionici autoceste Zagreb-Sisak kako bi se ispitala njena učinkovitost u stvarnim uvjetima. Ovako proizvedene barijere pokazale su zadovoljavajuća svojstva u laboratorijskim i stvarnim uvjetima te je nastavljena proizvodnja u sklopu projekta RUCONBAR (slika 2) [15].



Dijagram 7: Tlačna čvrstoća ispitnog betona [14]



Dijagram 8: Rezultati akustičnih ispitivanja [14]



Slika 2: Gotovi RUCONBAR proizvod [15]

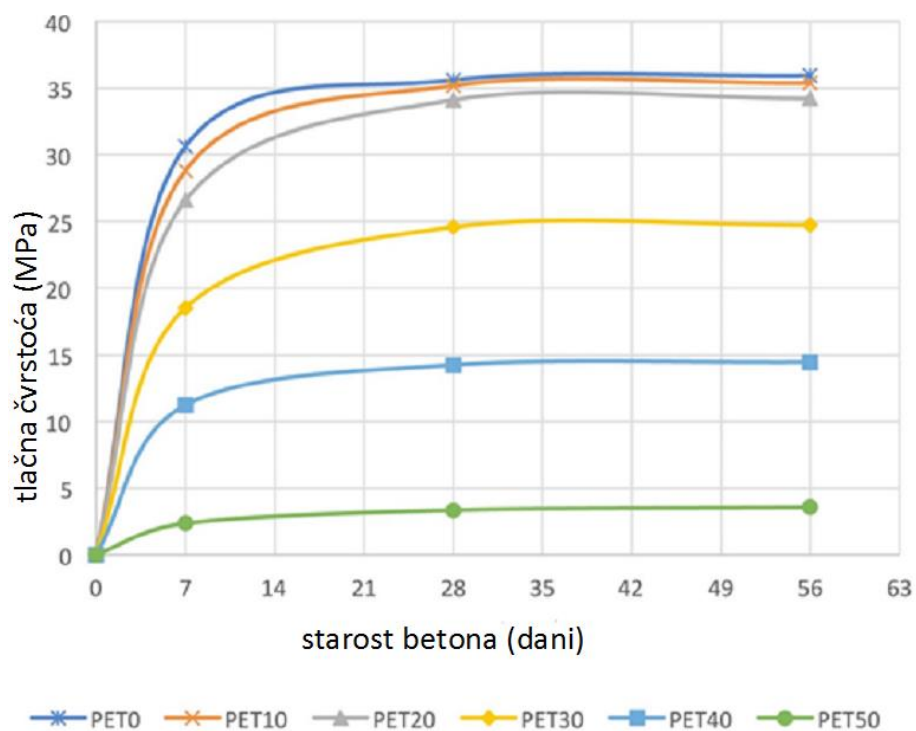
3.2.2. Beton sa recikliranom plastikom

U radu Almeshal i ostali (2020.) ispitali su mogućnost zamjene dijela agregata recikliranom PET (polietilen tereftalat) plastikom koja koristi u proizvodnji ambalaže za pića. Boce koje su korištene imaju stijenke debljine 1 - 1,5 mm, a mljevene su na veličinu od 0,0075 do 4 mm (slika 3) . Prije mljevenja, boce su oprane kako bi se uklonile moguće nečistoće, koje bi mogle negativno utjecati na svojstva betona. Za ispitivanje utjecaja plastike na svojstva betona napravljeno je 6 mješavina, od čega jedna bez PET plastike, a ostale su sa zamjenom plastike u iznosu od 10%, 20%, 30%, 40% i 50%.



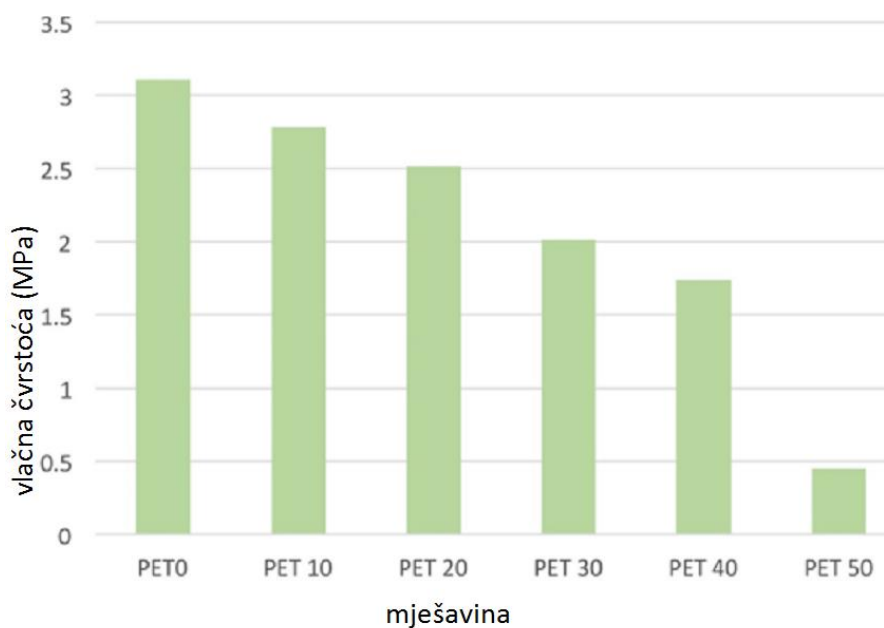
Slika 343: Plastika nakon mljevenja boca [16]

Tlačna čvrstoća betona ispitana je na uzorcima starosti 7, 28 i 56 dana. Na uzorcima s plastikom u iznosu od 10% i 20% primijećen je blagi pad tlačne čvrstoće, dok je kod uzoraka sa 30%, 40% i 50% primijećen značajan pad tlačne čvrstoće koji raste sa porastom količine plastike u betonu (dijagram 9).



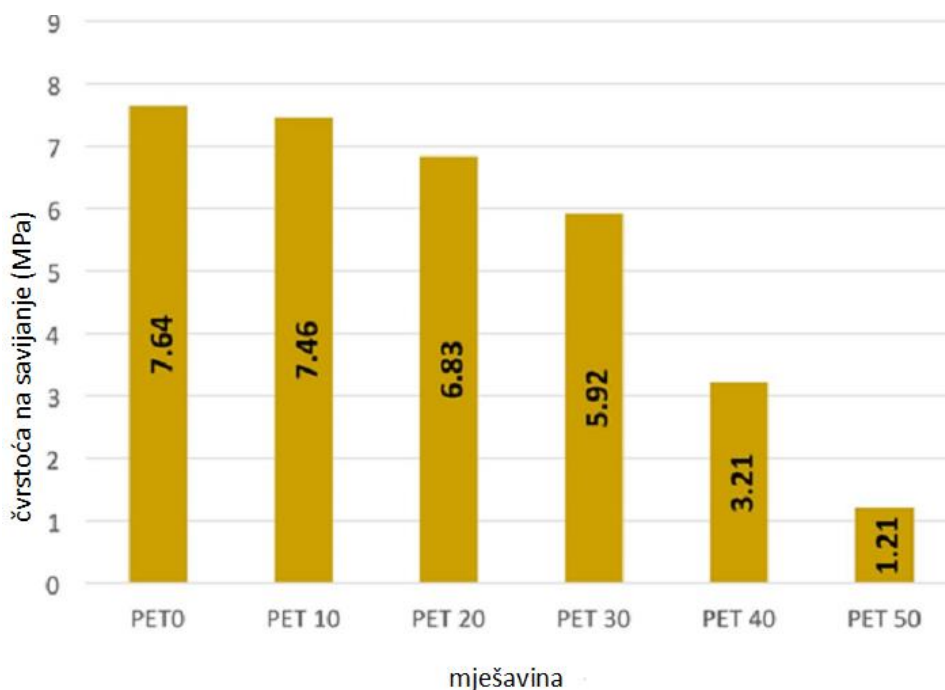
Dijagram 9: Tlačna čvrstoća uzoraka [16]

Također, ispitana je i vlačna čvrstoća cijepanjem na uzorcima starosti 28 dana. I kod ovog ispitivanja vidi se pad čvrstoće sa porastom količine plastike. Kod uzorka sa 50% plastike primijećen je nagli pad u odnosu na referenti beton. Rezultati ispitivanja su dani na dijagramu 10.



Dijagram 10: Vlačna čvrstoća cijepanjem [17]

Ispitivanje čvrstoće na savijanje provedeno nakon 28 dana pokazalo je slične postotke smanjenja čvrstoće kao i kod ispitivanja na tlačnu čvrstoću. Do zamjene agregata u iznosu od 30% pad vlačne čvrstoće je blag, a nakon toga vidi se značajan pad u čvrstoći. Kod zamjene sa 40% pad u odnosu na referentni beton iznosi 58%, a kod betona sa 50% PET-a pad čvrstoće iznosi 84,2%. Rezultati ispitivanja dani su na dijagramu 11.



Dijagram 11: Rezultati ispitivanja na savijanje [16]

3.2.3. Beton sa pepelom nastalim spaljivanjem mulja s UPOV-a

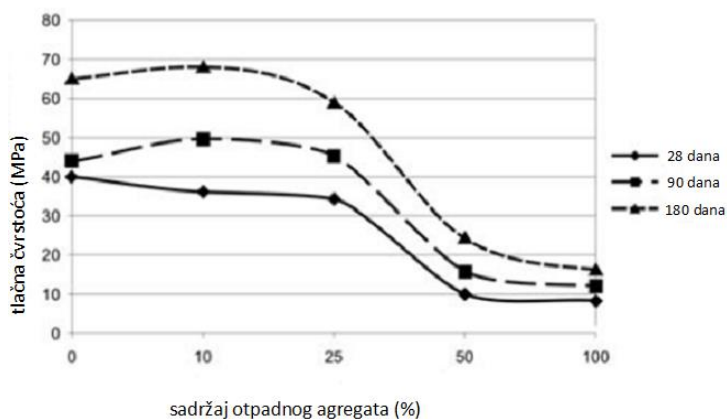
Osim u zamjeni dijela cementa u betonu, postoji i mogućnost zamjene dijela sitnog agregata ovim materijalom. Ponašanje betona u ovom slučaju ispitala je u svom radu M. Kosior-Kazberuk. Ispitivanje je provedeno na mješavinama sa 10%, 25%, 50% i 100% zamijene agregata veličine od 0 do 4 mm pepelom. Zbog velike apsorpcije vode kod betona sa 50% i 100% pepela radi bolje obradivosti povećana je količina vode, a to se vidi u recepturama betona (tablica 4). Svojstva betona ispitivana su na prizmama starosti 28, 90 i 180 dana.

Tablica 27: Receptura betonskih mješavina [18]

sastojci	sadržaj otpadnog agregata u betonskoj mješavini (%)				
	0	10	25	50	100
cement (kg)	300	300	300	300	300
voda (kg)	150	150	150	170	200
pijesak 0/2 (kg)	798	718	599	399	0
prirodni agregat 2/4 (kg)	499	449	374	250	0
prirodni agregat 4/8 (kg)	699	699	699	699	699
volumna količina otpadnog agregata	0	0,10 V_k	0,25 V_k	0,50 V_k	1 V_k
otpadni agregat (kg)	0	73	182,5	365	730
fizikalna svojstva očvrstlog betona					
nasipna gustoća (kg/m ³)	2277	2216	2179	1900	1652
upijanje vode (%)	4,43	4,73	5,37	8,72	14,87

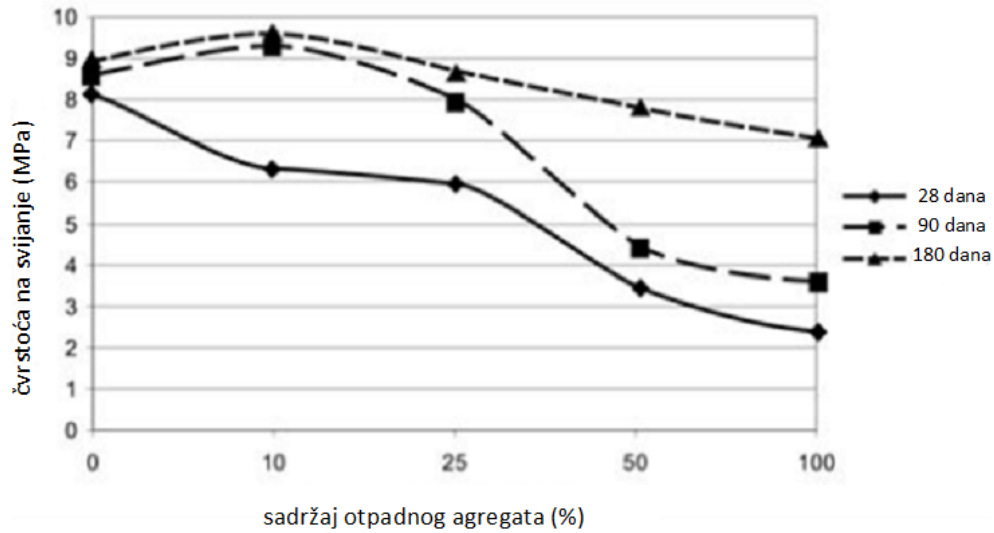
V_k - ukupni volumen pijeska (0/2 mm) i agregata 2/4 mm

Prema rezultatima ispitivanja tlačne čvrstoće (dijagram 12) vidi se da kod betona starosti 28 dana referentni beton ima najveću čvrstoću, te da sa povećanjem količine pepela čvrstoća opada. Kod betona starosti 90 dana mješavine sa 10% i 25% čak postižu bolje rezultate od referentnog betona, dok je u slučaju starosti betona od 180 dana samo beton sa 10% pepela pokazao veću čvrstoću. Betoni sa 50% i 100% pepela imaju značajno smanjenje tlačne čvrstoće u odnosu na referentni beton. Zaključeno je da bi se betoni sa 10% i 25% pepela mogli koristiti u nosivim konstrukcijama jer njihova čvrstoća zadovoljava uvjet tlačne čvrstoće od 30 MPa.



Dijagram 12: Razvoj tlačne čvrstoće betona [18]

U rezultatima ispitivanja čvrstoće na savijanje (dijagram 13) vidljivi su slični rezultati kao na prethodnom ispitivanju. Beton sa 10% pepela pokazao je povećanje čvrstoće nakon 90 i 180 dana u odnosu na referentni beton, dok je beton sa 20% pepela pokazao mali gubitak čvrstoće u odnosu na referentni beton.



Dijagram 13: Razvoj čvrstoće betona na savijanje [18]

4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Za potrebe diplomskog rada izrađeni su uzorci od cementnog morta i betona. Od cementnog morta izrađen je 21 uzorak, po 3 uzorka za svaku mješavinu, ukupno 7 mješavina, na kojima su ispitane tlačna i vlačna čvrstoća savijanjem. Od betona je napravljeno 63 uzorka, po 21 uzorak za svaku mješavinu betona, ukupno 3 mješavine, na kojima su provedena ispitivanja tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće savijanjem i cijepanjem, otpornosti na habanje i vodopropusnosti.

4.1. Izrada cementnog morta

Mješavina cementnog morta izrađena je prema normi HRN EN 196-1_2005. Omjer cementa, agregata i vode u cementnom mortu bio je 1:3:0,5.

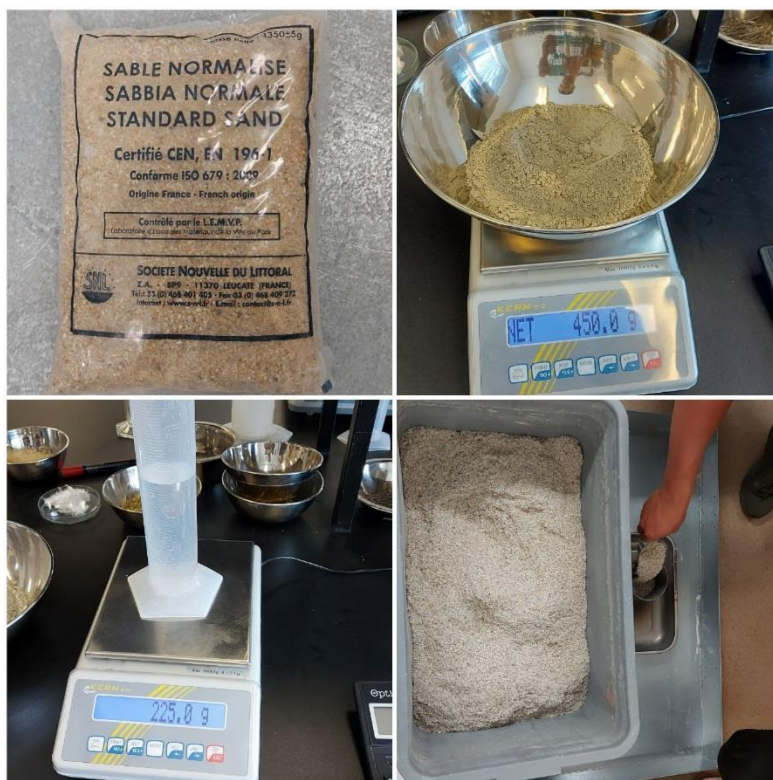
Miješanje morta provedeno je na sljedeći način:

- Miješanje cementa i vode u sporijem načinu rada u vremenu od 30 s
- Dodavanje pijeska u vremenu od 30 s
- Miješanje sastojaka u bržem načinu rada u vremenu od 30 s
- Isključivanje aparata u vremenu od 90 s
- U prvih 30 s ručno miješanje morta kako bi se odvojio preostali dio morta koji je ostao zalijepljen za stijenke posude na način da je postavljen u sredinu posude
- Miješanje sastojaka u bržem načinu rada u vremenu od 60 s

Kod izrade mješavine sa PVC-om, pijesak i PVC su najprije pomiješani te se dodavani u posudu za miješanje kao jedna komponenta.

Sastojci za izradu cementnog morta (slika 4):

- Holcim Lumen CEM II / A-LL 42,5 R gustoće $2,95 \text{ g/cm}^3$
- Standardni pijesak – pak $1350 \pm 5 \text{ g}$ nasipne gustoće $1,64 \text{ g/cm}^3$
- Voda
- PVC piljevina nasipne gustoće $0,0989 \text{ g/cm}^3$



Slika 35: Sastojci za izradu cementnog morta

Ukupno je izrađeno 7 mješavina cementnog morta, od čega je jedna referentna mješavina sa standardnim pijeskom te po 3 mješavine morta sa 15 % i 30 % PVC-a. Za svaki mort sa PVC-om napravljena je jedna mješavina s Holcim pijeskom te po dvije mješavine sa standardnim pijeskom. Kod mješavina s Holcim pijeskom koristile su se frakcije 0,063 – 0,5; 0,5 – 1; 1 – 2 u količini od 1/3 od ukupne mase pijeska.

Masa pojedinih sastojaka za izradu morta dana je u tablici 5:

Tablica 28: Mase komponenti za cementni mort

OZNAKA	cement (g)	pijesak (g)	voda (g)	PVC (g)
CM - REF	450	1350	225	0
CM - PVC 15	450	1337,8	225	12,23
CM - PVC 30	450	1325,5	225	24,47

4.1.1. Ugradnja i njega svježeg morta

Za ispitivanje uzoraka od cementnog morta izrađene su prizmice dimenzija 40x40x160 mm. Prizmice su napravljene tako da je mort ugrađen u kalupe koji su prethodno namazani uljem kako bi se očvrsnuli mort lakše izvadio iz kalupa. Ugradnja je provedena u dva sloja, prvi sloj je vibriran 10 s, nakon čega je ugrađen drugi sloj koji je vibriran 5 s (slika 5 i slika 6). Nakon što je mort ugrađen, kalupi su pokriveni staklenim pločicama koje su prethodno premazane uljem (slika 7). Tako pripremljene prizmice ostavljene su jedan dan u prostoriji relativne vlažnosti veće od 90% i temperature $20\pm 1^{\circ}\text{C}$, nakon čega su izvađene iz kalupa i uronjene u vodu temperature $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ do trenutka ispitivanja. Ovisno o ispitivanju, prizmice su bile u vodi 6, odnosno 27 dana (slika 8).



Slika 36: Ugradnja morta u kalup



Slika 37: Vibriranje morta



Slika 38: Cementni mort nakon ugradnje u kalup



Slika 39: Cementne prizme potopljene u vodi

4.2. Ispitivanje svježeg morta

4.2.1. Ispitivanje konzistencije morta

Ispitivanje konzistencije cementnog morta provedeno je metodom rasprostiranja prema normi EN 1015-3:1999 odmah nakon što je završeno miješanje morta. Ispitivanje je provedeno na stoliću za rasprostiranje. Za potrebe ispitivanja, najprije su stolić i kalup premazani uljem kako bi se spriječilo lijepljenje materijala za stijenke. Tako pripremljen

kalup oblika krnjeg stošca napunjen je mortom u dva sloja, te je svaki sloj nabijan metalnim štapom po 10 puta. Kada je kalup napunjen, pažljivo je skinut (slika 9), te je započeto ispitivanje tako da je uključen aparat koji je prema normi namješten na 15 udaraca. Nakon isteka 15 udaraca izmjerena su dva međusobno okomita promjera kako bi se vidjelo koliko je rasprostiranje, a mjerodavna je srednja vrijednost (slika 10).



Slika 40: Uzorak morta za ispitivanje konzistencije



Slika 41: Mort nakon završetka ispitivanja

Rezultati ispitivanja dani su u tablici 6:

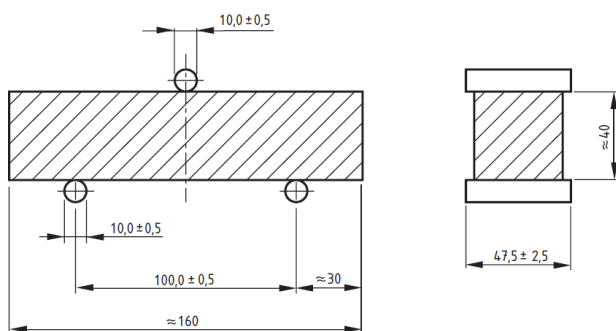
Tablica 29: Gustoća, temperatura i promjer rasprostiranja svježeg morta

OZNAKA	gustoća (kg/dm ³)	temperatura (°C)	promjer rasprostiranja (mm)
CM-REF	2,27	22,5	189,5
CM-PVC 15-HOLCIM		23,7	133,5
CM-PVC 15_1	2,2	23,6	145
CM-PVC 15_2	2,17	24,3	155
CM-PVC 30-HOLCIM	2,15	23,5	177
CM-PVC 30_1	2,17	23,5	124
CM-PVC 30_2	2,12	23,9	119,5

4.3. Ispitivanje očvrslog morta

4.3.1. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem

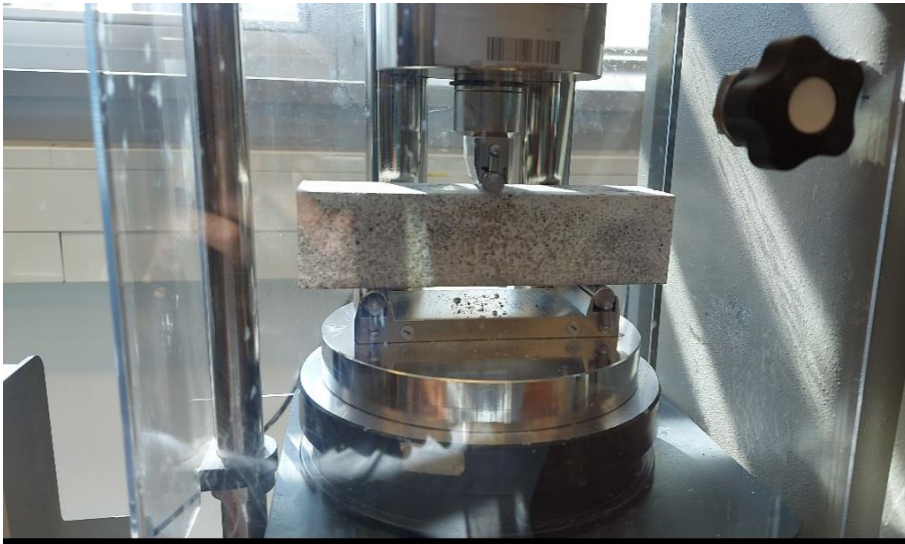
Ispitivanje vlačne čvrstoće cementnog morta provedeno je prema normi HRN EN 196-1_2005 savijanjem na uređaju na kojemu se opterećenje na uzorak prenosi u tri točke. Dvije točke služe kao oslonci, a na gornju točku se nanosi opterećenje (slika 11).



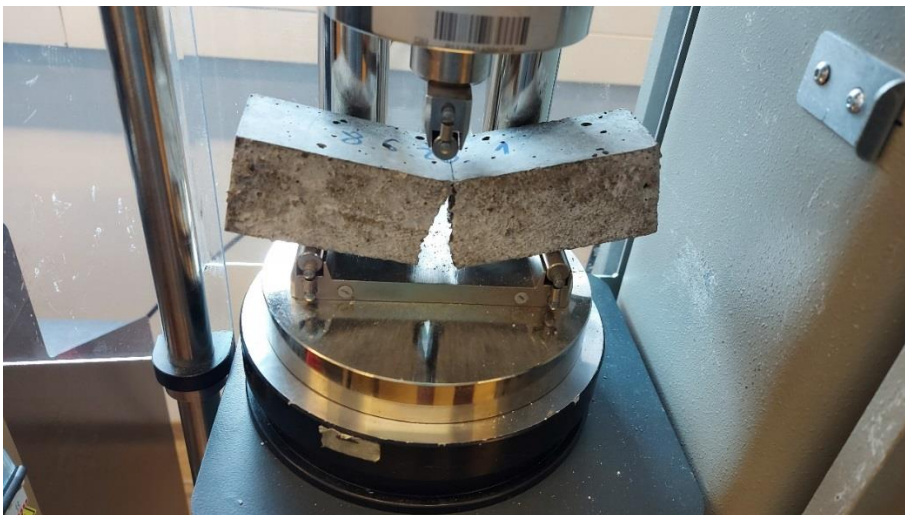
Slika 42: Pozicioniranje uzorka u uređaju za ispitivanje vlačne čvrstoće

(Metode ispitivanja cementa - 1. dio: određivanje čvrstoće (EN 196-1:2005))

Nakon što je uzorak postavljen u uređaj na način da je nanošenje opterećenja bilo okomito na smjer ugradnje morta, pristupilo se nanošenju opterećenja (slika 12). Opterećenje se nanosilo sa konstantnim prirastom sile brzinom od 50 ± 10 N/s do trenutka sloma (slika 13). U trenutku sloma zabilježena je sila uslijed koje je došlo do sloma te se prema njoj izračunala vlačna čvrstoća savijanjem.



Slika 43: Cementna prizmica u aparatu za ispitivanje vlačne čvrstoće



Slika 44: Uzorak nakon sloma

Vlačna čvrstoća računa se prema formuli (1):

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * l}{b^3} \quad (1)$$

gdje je:

R_f – vlačna čvrstoća, izražena u MPa

b – strana kvadratnog presjeka prizme, izražena u mm

F_f – sila koja je djelovala na prizmu u trenutku sloma, izražena u N

l – udaljenost između oslonaca, izražena u mm

4.3.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Ispitivanje tlačne čvrstoće cementnog morta provedeno je prema normi HRN EN 196-1_2005 na polovicama prizma koje su ostale nakon ispitivanja cementa na savijanje. Prizme su u aparat za ispitivanje postavljene s točnošću $\pm 0,5$ mm po širini te tako da su po dužini barem 10 mm bile izvan ploča za nanošenje opterećenja (slika 14). Kada je uzorak postavljen u aparat pristupilo se ispitivanju uz konstantno povećanje opterećenja u iznosu od 2400 ± 200 N/s do trenutka loma (slika 15). U trenutku loma zabilježeno je maksimalno opterećenje s kojim je izračunata tlačna čvrstoća.



Slika 45: Uzorak u uređaju za ispitivanje tlačne čvrstoće



Slika 46: Uzorak nakon sloma

Tlačna čvrstoća računa se prema formuli (2):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2)$$

gdje je:

R_c – tlačna čvrstoća, izražena u MPa

F_c – maksimalno opterećenje u trenutku loma, izraženo u N

1600 – površina ploča preko kojih se nanosi opterećenje (40x40 mm), izražena u mm²

Tlačna čvrstoća može se ispitivati na prizmama starosti:

- 24 h ± 15 min
- 48 h ± 30 min
- 72 h ± 45 min
- 7 d ± 2 h
- ≥28 d ± 8 h

U okviru ovoga rada ispitivanja su provedena na uzorcima starosti 7 dana i 28 dana. Ispitivanje tlačne čvrstoće nakon 7 dana provedeno je na dvije mješavine cementnog morta, a to su uzorci sa Holcim pijeskom sa udjelom PVC-a od 15% i 30 % (tablica 7). Nakon 28 dana provedena su se ispitivanja nakon kontrole sila na referentnom uzorku, te

na uzorcima sa standardnim pijeskom koji sadrže 15% i 30% PVC-a (tablica 8) te ispitivanja nakon kontrole pomaka na uzorcima sa 15% i 30% PVC-a (tablica 9).

4.3.3. Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće nakon 7 dana dani su u tablici 7:

Tablica 30: Vlačna čvrstoća nakon 7 dana

OZNAKA	dimenzije (š * l * v) (mm)	masa (g)	gustoća (g/cm ³)	silna sloma (N)	vlačna čvrstoća (MPa)
CM-PVC 15-HOLCIM_1	41,3 * 160,95 * 40,09	582,5	2,19	3180	6,77
CM-PVC 15-HOLCIM_2	41,34 * 160,36 * 40,11	591,4	2,22	3304	7,01
CM-PVC 15-HOLCIM_3	41,44 * 160,13 * 40,11	586,1	2,20	3117	6,57
CM-PVC 30-HOLCIM_1	40,74 * 159,95 * 40,00	549,5	2,11	2857	6,34
CM-PVC 30-HOLCIM_2	40,54 * 159,99 * 39,99	552,1	2,13	3094	6,97
CM-PVC 30-HOLCIM_3	41,15 * 160,25 * 40,01	561,3	2,13	3054	6,57

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće nakon 28 dana dani su u tablici 8 i tablici 9:

Tablica 31: Vlačna čvrstoća nakon 28 dana, ispitivanje kontrolom sila

OZNAKA	dimenzije (š * l * v) (mm)	masa (g)	gustoća (g/cm ³)	sila sloma (N)	vlačna čvrstoća (MPa)
CM-REF_1	40,6 * 160,37 * 40,11	572,8	2,19	2943	6,60
CM-REF_2	41,11 * 160,37 * 40,21	583,2	2,20	2921	6,31
CM-REF_3	40,74 * 160,2 * 40,09	584,1	2,23	3066	6,80
CM-PVC 15-1_1	40,69 * 160,54 * 40,09	567,2	2,17	2592	5,77
CM-PVC 15-1_2	40,34 * 160,87 * 40,11	566,3	2,18	2722	6,22
CM-PVC 15-1_3	40,79 * 160,91 * 40,08	567,5	2,16	2755	6,09
CM-PVC 30-1_1	40,37 * 159,89 * 40,08	555,7	2,15	2718	6,20
CM-PVC 30-1_1	40,64 * 160,01 * 40,03	564,9	2,17	2751	6,15
CM-PVC 30-1_1	41,22 * 159,96 * 40,16	553,3	2,09	2752	5,89

Tablica 32: Vlačna čvrstoća nakon 28 dana, ispitivanje kontrolom pomaka

OZNAKA	dimenzije (š * l * v) (mm)	masa (g)	gustoća (g/cm ³)	sila sloma (N)	vlačna čvrstoća (MPa)
CM-PVC 15-2_1	40,30 * 160,41 * 40,21	555,0	2,14	2540	5,82
CM-PVC 15-2_2	40,90 * 160,40 * 40,08	558,4	2,12	2390	5,56
CM-PVC 15-2_3	40,66 * 160,46 * 40,16	560,2	2,14	2310	5,15
CM-PVC 30-2_1	39,95 * 160,87 * 40,11	548,0	2,13	2540	5,98
CM-PVC 30-2_2	40,18 * 160,22 * 40,13	540,1	2,09	2300	5,32
CM-PVC 30-2_3	40,70 * 160,33 * 40,16	551,6	2,10	2340	5,21

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 7 dana prikazani su u tablici 10:

Tablica 33: Tlačna čvrstoća nakon 7 dana

OZNAKA	površina za nanošenje opterećenja (mm ²)	sila sloma (N)	tlačna čvrstoća (MPa)	srednja vrijednost (MPa)
CM-PVC 15-HOLCIM_1_1	1600	65430	40,89	40,47
CM-PVC 15-HOLCIM_1_2	1600	64070	40,04	
CM-PVC 15-HOLCIM_2_1	1600	72090	45,06	44,41
CM-PVC 15-HOLCIM_2_2	1600	70030	43,77	
CM-PVC 15-HOLCIM_3_1	1600	66840	41,78	42,54
CM-PVC 15-HOLCIM_3_2	1600	69290	43,31	
CM-PVC 30-HOLCIM_1_1	1600	52170	32,61	32,76
CM-PVC 30-HOLCIM_1_2	1600	52670	32,92	
CM-PVC 30-HOLCIM_2_1	1600	57530	35,96	36,11
CM-PVC 30-HOLCIM_2_2	1600	58030	36,27	
CM-PVC 30-HOLCIM_3_1	1600	58310	36,44	35,75
CM-PVC 30-HOLCIM_3_2	1600	56100	35,06	

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 28 dana prikazani su u tablici 11 i tablici 12:

Tablica 34: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, nakon ispitivanja kontrolom sila

OZNAKA	površina za nanošenje opterećenja (mm ²)	sila sloma (N)	tlačna čvrstoća (MPa)	srednja vrijednost (MPa)
CM-REF_1_1	1600	73400	45,88	45,88
CM-REF_1_2	1600	73400	45,88	
CM-REF_2_1	1600	75350	47,09	47,25
CM-REF_2_2	1600	75850	47,41	
CM-REF_3_1	1600	77050	48,16	47,55
CM-REF_3_2	1600	75110	46,94	
CM-PVC 15-1_1_1	1600	64570	40,36	41,06
CM-PVC 15-1_1_2	1600	66820	41,76	
CM-PVC 15-1_2_1	1600	64510	40,32	40,52
CM-PVC 15-1_2_2	1600	65140	40,71	
CM-PVC 15-1_3_1	1600	64870	40,54	40,25
CM-PVC 15-1_3_2	1600	63940	39,96	
CM-PVC 30-1_1_1	1600	62920	39,33	37,95
CM-PVC 30-1_1_2	1600	58530	36,58	
CM-PVC 30-1_2_1	1600	70100	43,81	41,19
CM-PVC 30-1_2_2	1600	61700	38,56	
CM-PVC 30-1_3_1	1600	60450	37,78	36,74
CM-PVC 30-1_3_2	1600	57110	35,69	

Tablica 35: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, nakon ispitivanja kontrolom pomaka

OZNAKA	površina za nanošenje opterećenja (mm ²)	sila sloma (N)	tlačna čvrstoća (MPa)	srednja vrijednost (MPa)
CM-PVC 15-2_1_1	1600	65600	41,00	40,47
CM-PVC 15-2_1_2	1600	63890	39,93	
CM-PVC 15-2_2_1	1600	60980	38,11	39,42
CM-PVC 15-2_2_2	1600	65160	40,73	
CM-PVC 15-2_3_1	1600	37830	23,64	26,06
CM-PVC 15-2_3_2	1600	45560	28,48	
CM-PVC 30-2_1_1	1600	52320	32,70	33,33
CM-PVC 30-2_1_2	1600	54320	33,95	
CM-PVC 30-2_2_1	1600	33990	21,24	27,38
CM-PVC 30-2_2_2	1600	53640	33,53	
CM-PVC 30-2_3_1	1600	64390	40,24	38,97
CM-PVC 30-2_3_2	1600	60300	37,69	

5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

5.1. Izrada svježeg betona

Za potrebe ispitivanja bilo je planirano napraviti 3 mješavine betona, a to su referentni beton te dvije mješavine betona sa 15% i 30% PVC piljevine. Sastojci koji su korišteni za izradu betona su voda iz gradskog vodovoda, Holcim Prirodni agregat Kamenolom Šumber, cement Holcim Lumen CEM II / A-LL 42,5 R i PVC piljevina koja nastaje prilikom proizvodnje stolarije. Recepture prema kojima su izrađene betonske mješavine dane su u tablici 13.

Tablica 36: Receptura za betonske mješavine

MJEŠAVINA	SASTOJCI					
	voda (kg)	cement (kg)	agregat (kg)			PVC (kg)
			0-4	4-8	8-16	
referentni beton	11,6	22,6	47,6	20,9	36,9	0
beton sa 15% PVC-a	11,7	22,9	41,1	21,3	37,5	3,5

Miješanje betona provedeno je na slijedeći način:

- miješanje suhih sastojaka u vremenu od 30 s (slika 16)
- dodavanje vode
- miješanje u vremenu od 90 s (slika 17)

Kod izrade betona s PVC-om miješanje je provedeno tako da su cement, agregat i PVC miješani u suhom stanju, nakon čega je dodana voda te je miješanje nastavljeno. Prilikom ugradnje betona s 15% PVC-a zaključeno je da se beton teško ugrađuje u kalupe, odnosno da je jako suh. Upravo iz toga razloga odustalo se od izrade betona s 30% PVC-a te je odlučeno da će se napraviti još jedan uzorak betona sa 15% PVC-a, ali ovoga puta

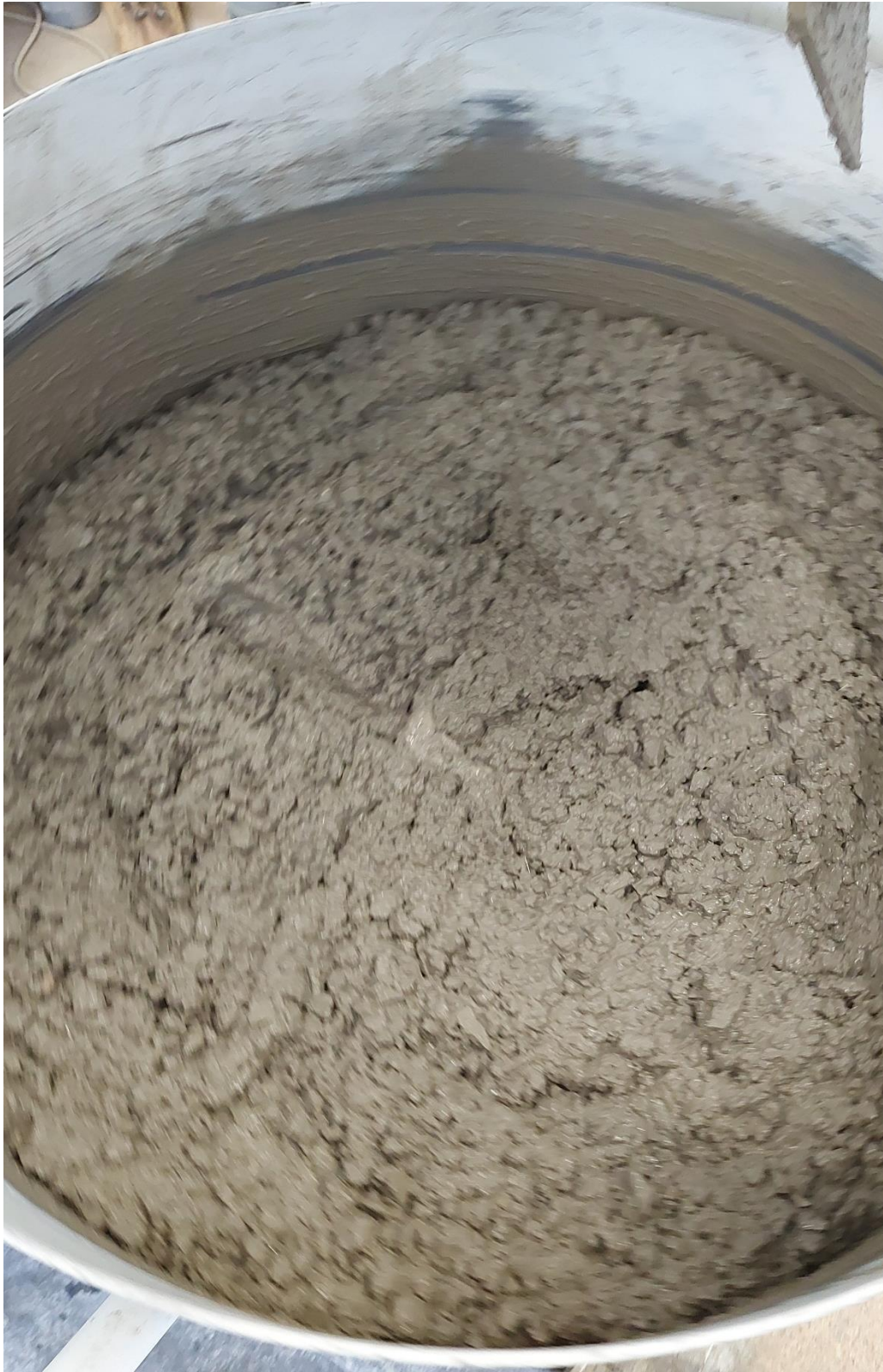
drugačijim redoslijedom miješanja i dodavanja sastojaka. Miješanje ovoga betona je provedeno na slijedeći način:

- miješanje cementa i pijeska u suhom stanju 30 s
- dodavanje vode
- miješanje u vremenu od 90 s
- dodavanje PVC-a
- miješanje u vremenu od 30 s (slika 18)

Ovako pripremljen beton imao je zanemarivo poboljšanje konzistencije te je iz tog razloga odlučeno da se ova mješavina neće ispitivati.



Slika 47: Cement i agregat nakon suhog miješanja



Slika 48: Referentni beton



Slika 49: Svježi beton sa 15% PVC-a

5.2. Ugradnja svježeg betona u kalupe

Nakon izrade svježeg betona pristupilo se ugrađivanju betona u kalupe. Ugađivanje je provedeno tako da su kalupi punjeni u dva sloja, na način da je prvi sloj nakon ugradnje vibriran 10 s, a drugi sloj 5 s, a vibriranje je provedeno na vibrostolu. Od svake mješavine betona napravljani su sljedeći uzorci (slika 19):

- 3 kocke duljine stranica 15 cm za ispitivanje tlačne čvrstoće
- 6 prizmi dimenzija 10x10x40 cm za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem
- 3 valjka promjera 15 cm i visine 30 cm za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem
- 3 valjka promjera 10 cm i visine 20 cm za ispitivanje vodopropusnosti te 6 uzoraka kocki duljine stranica 7 cm, od kojih su 3 za ispitivanje habanja

5.3. Ispitivanje očvrslag betona

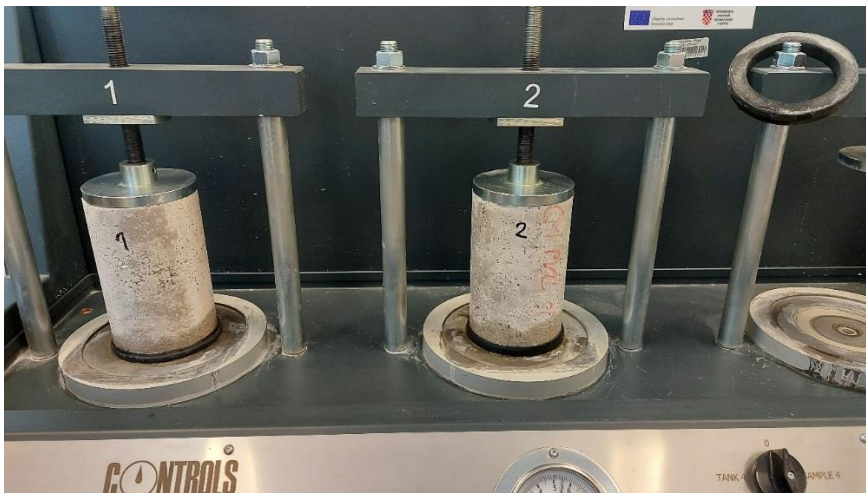
Kod ispitivanja očvrslag betona provedeno je pet ispitivanja, a to su ispitivanje tlačne čvrstoće, ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem s dvije sile, ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom, ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem i habanje. Sva ispitivanja su provedena na betonu starosti 28 dana.

5.3.1. Dubina prodora vode pod tlakom

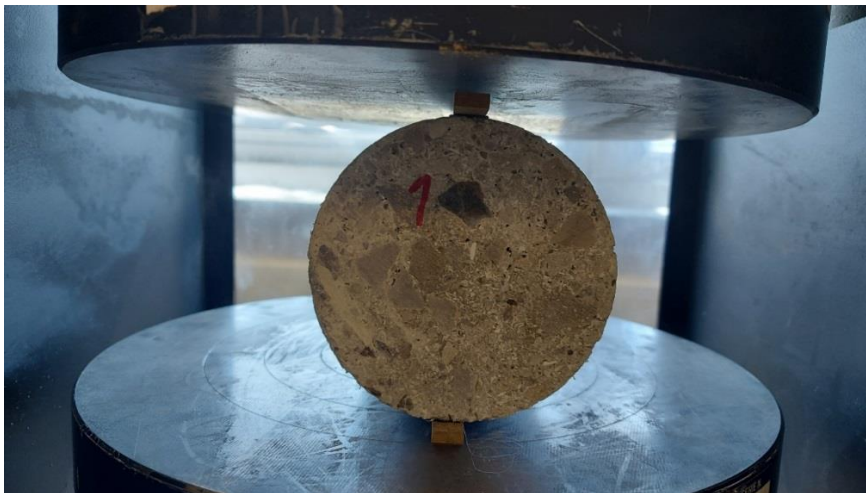
Dubina prodora vode pod tlakom ispituje se prema normi HRN EN 12390-8. Ispitivanje je provedeno na uzorcima oblika valjka promjera 100 mm te visine 200 mm. Prije ispitivanja s uzoraka je obrisana površinska voda. Zbog nemogućnosti ugradnje uzorka u aparat visina uzorka je smanjena sa 200 mm na 150 mm na način da su uzorci ispiljeni sa gornje strane koja nije izložena prodoru vode. Tako pripremljeni izloženi su tlaku od $5 \pm 0,5$ bara u trajanju od 72 ± 2 sata (slika 21 i slika 22). Jedan od uzorka betona s PVC-om nije bilo moguće izložiti prodiranju vode zbog prevelike količine pora kroz koje je voda izlazila van što je pripisano pogrešnoj ugradnji svježeg betona. Nakon 72 sata uzorci su skinuti s aparata za izlaganje prodoru vode pod tlakom te su cijepani u aparatu za ispitivanje tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem (slika 23 i slika 24). Na svakom uzorku izmjerena je dubina prodora vode (slika 25) u milimetrima, a mjerodavan je najveći prodor (tablica 14).



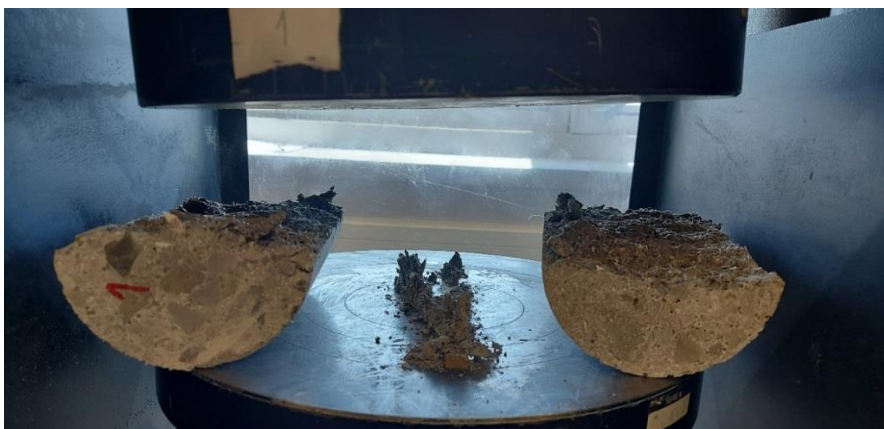
Slika 52: Uzorci referentnog betona izloženi prodoru vode pod tlakom



Slika 53: Uzorci betona sa PVC-om izloženi prodoru vode pod tlakom



Slika 54: Postavljanje uzorka koji je bio izložen prodoru vode u uređaj za cijepanje



Slika 55: Uzorak nakon cijepanja



Slika 56: Trag prodora vode na referentnom betonu (gornja slika) i betonu sa 15% PVC-a (donja slika)

Tablica 37: Dubina prodora vode pod tlakom

ispitivanje	OZNAKA					
	REF_1	REF_2	REF_3	PVC_1	PVC_2	PVC_3
prodor vode (mm)	22	24	23	40	33	0

5.3.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitnih uzoraka

Vlačna čvrstoća betona cijepanjem ispitana je prema normi HRN EN 12390-6:2009 na uzorcima oblika valjka čiji je promjer 150 mm, a visina iznosi 300 mm. Opterećenje je prilikom ispitivanja nanoseno po dužini uzorka koji je polegnut u uređaju za ispitivanje

vlačne čvrstoće cijepanjem (slika 26). Prema normi ispitivanje se provodi uz konstantan prirast sile u granicama od 0,04 MPa/s do 0,06 MPa/s. Za provedbu ispitivanja korišten je prirast sile od 0,06 MPa/s. Za izračun vlačne čvrstoće potrebna je maksimalna sila koja je djelovala na uzorak u trenutku sloma (slika 27).

Vlačna čvrstoća cijepanjem se dobiva prema formuli (3) preuzetoj iz norme HRN EN 12390-6:2009 :

$$f_{ct} = \frac{2 * F}{\pi * L * d} \quad (3)$$

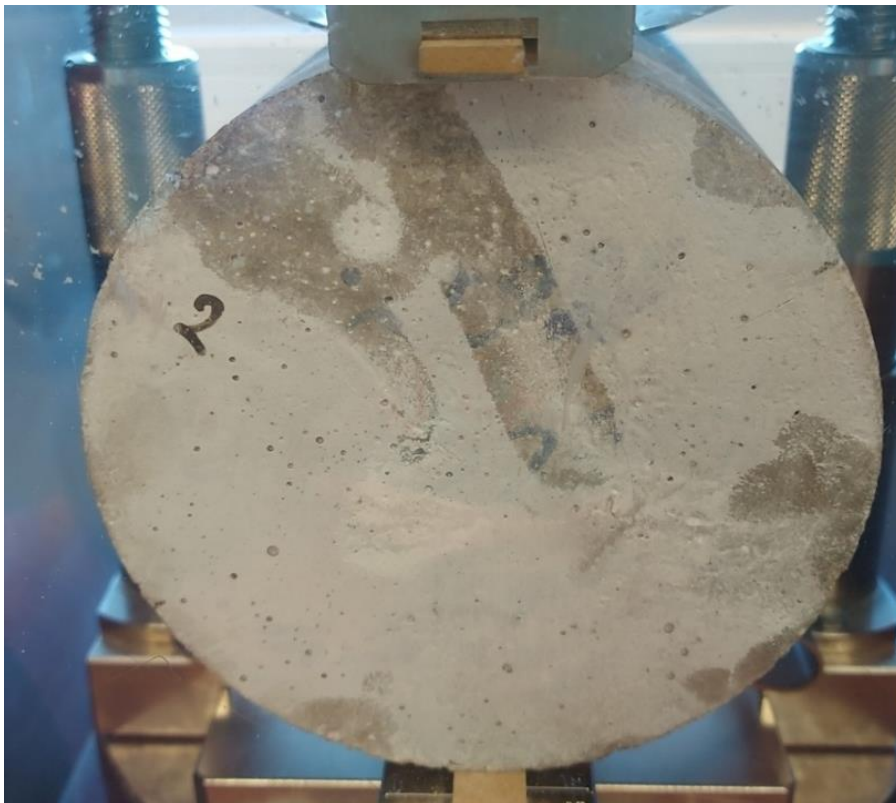
gdje je:

f_{ct} – vlačna čvrstoća betona (MPa)

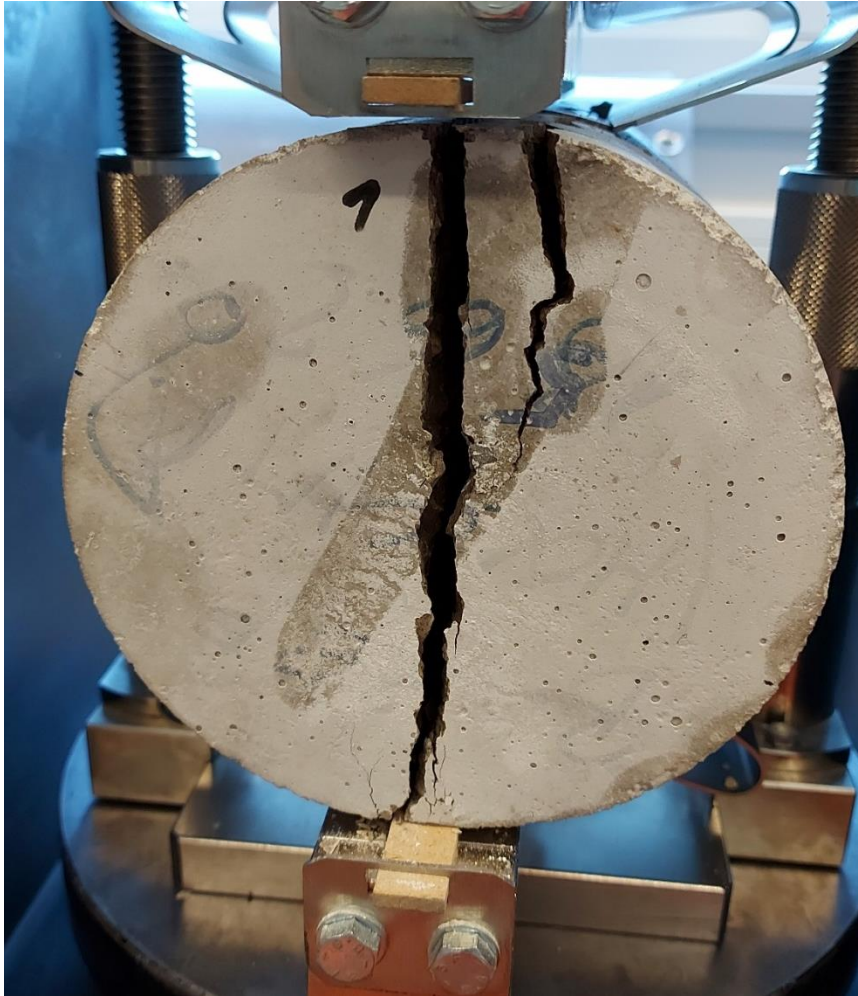
F – maksimalno opterećenje (N)

L – visina valjka (mm)

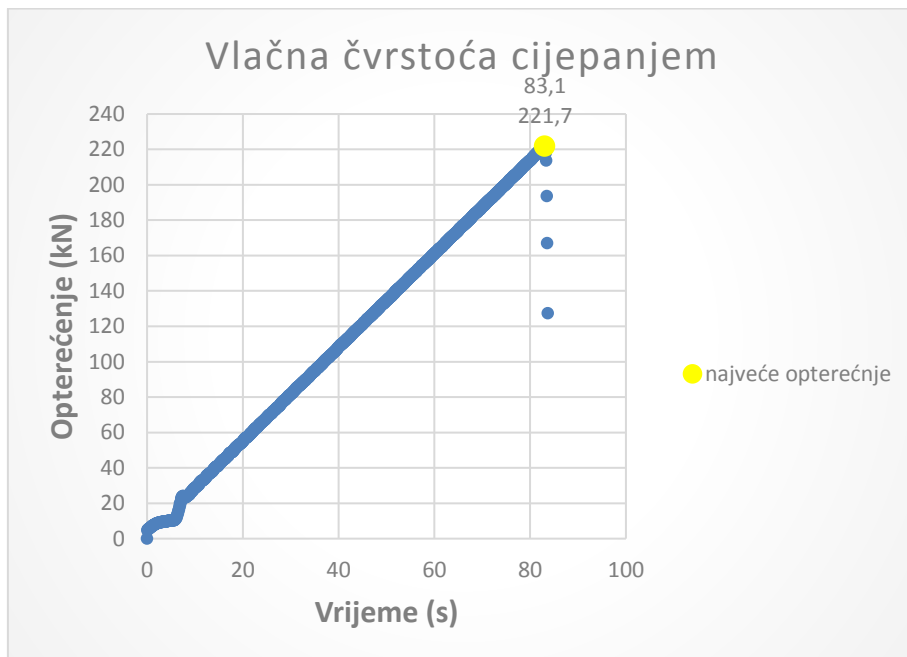
d – promjer valjka (mm)



Slika 57: Uzorak postavljen u aparat za cijepanje



Slika 58: Uzorak ispitan na vlačnu čvrstoću



Dijagram 14: Nanošenje opterećenja u vremenu, do trenutka sloma

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 15:

Tablica 38: Vlačna čvrstoća cijepanjem

OZNAKA	maksimalno opterećenje (N)	visina valjka (mm)	promjer valjka (mm)	vlačna čvrstoća (MPa)
REF_1	221700	298,71	149,48	3,16
REF_2	218300	300,36	149,16	3,10
REF_3	212500	298,65	150,69	3,01
PVC_1	118400	300,46	150,12	1,67
PVC_2	147900	302,12	150,34	2,07
PVC_3	125600	300,87	149,97	1,77

5.3.3. Otpornost na habanje

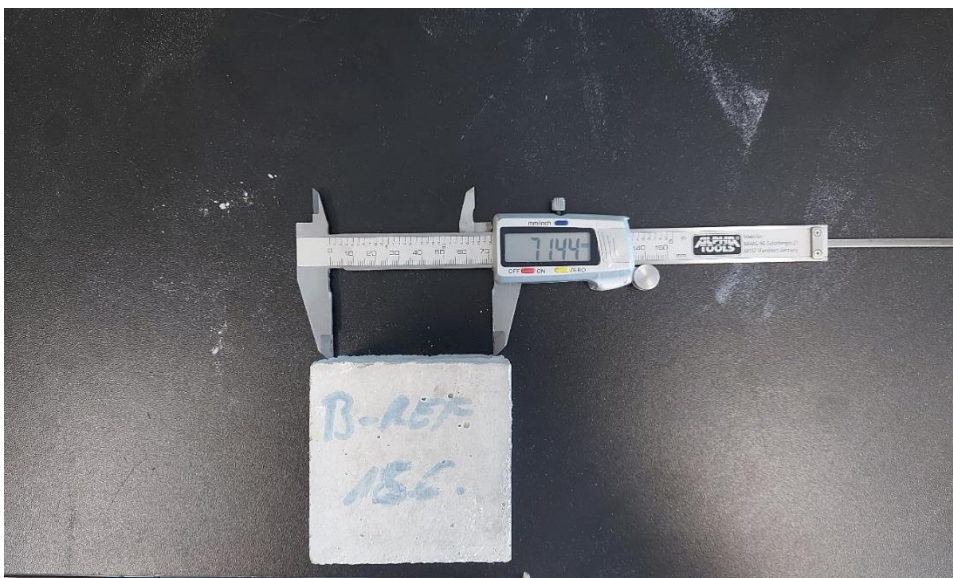
Otpornost betona na habanje provedena je prema normi EN 13892-3 na uređaju Bohme. Ispitivanje je provedeno na kockama dimenzija 7x7x7 cm čija je starost bila 89 dana. Uzorci su njegovani tako da su nakon što je beton bio ugrađen u kalupe jedan dan stajali na temperaturi $20\pm 5^{\circ}\text{C}$, nakon čega su izvađeni iz kalupa te su bili potopljeni u vodu temperature $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ u vremenu od 27 dana. Ovo ispitivanje trebalo je biti provedeno na uzorcima starosti 28 dana, ali zbog nedostatka abrazivnog materijala (slika 28) za ispitivanje, uzorci su ostavljeni u prostoriji temperature $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ do trenutka ispitivanja. Prije samog ispitivanja, kocke su bile postavljene 24 sata u peć zagrijanu na temperaturu od 105°C kako bi sva vlaga bila isušena. Ispitivanje je provedeno na 6 uzoraka, od čega su 3 od referentnog betona i 3 od betona sa 15% PVC-a.

Prije pristupanja ispitivanju, uzorcima su izmjerene dimenzije (slika 29) i masa sa točnošću 0,1 g. Ispitivanje je provedeno u 16 ciklusa, a u svakom ciklusu rotirajući disk na aparatu je napravio 22 kruga. Ispitivanje je provedeno tako da je uzorak stavljen u aparat i opterećen

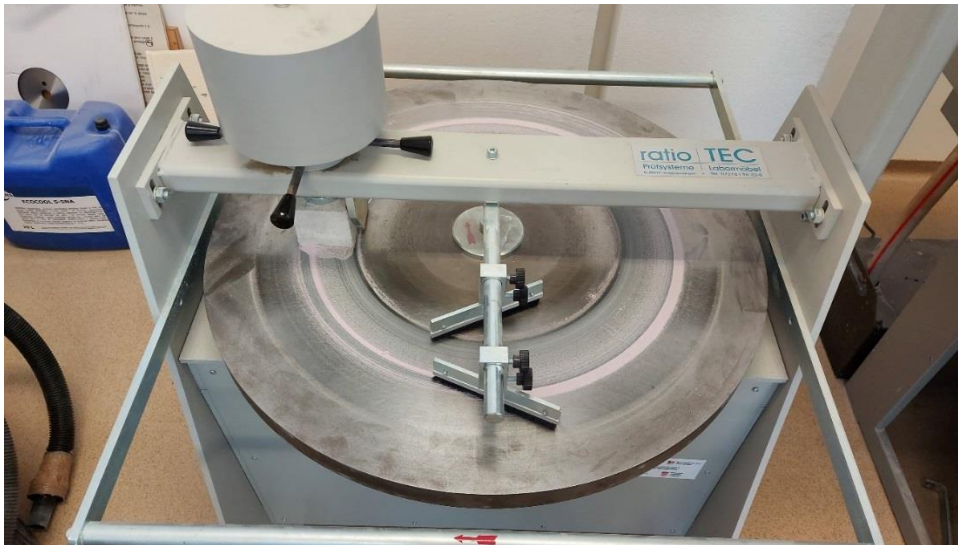
utegom koji djeluje silom od 294 ± 3 N. Nakon toga, na rotirajući disk je ravnomjerno raspoređeno 20 g abrazivnog materijala. U tom trenutku uključen je aparat i pušteno je da se disk okreće 22 puta (slika 30). Nakon svakog ciklusa uzorak je skinut sa aparata, uklonjen je ostatak abrazivnog materijala i materijala koji je ostao kao rezultat habanja, te je zarotiran za 90° oko svoje osi. Nakon svakog četvrtog ciklusa, uzorak je ponovno vagan s točnošću od 0,1 g (slika 31).



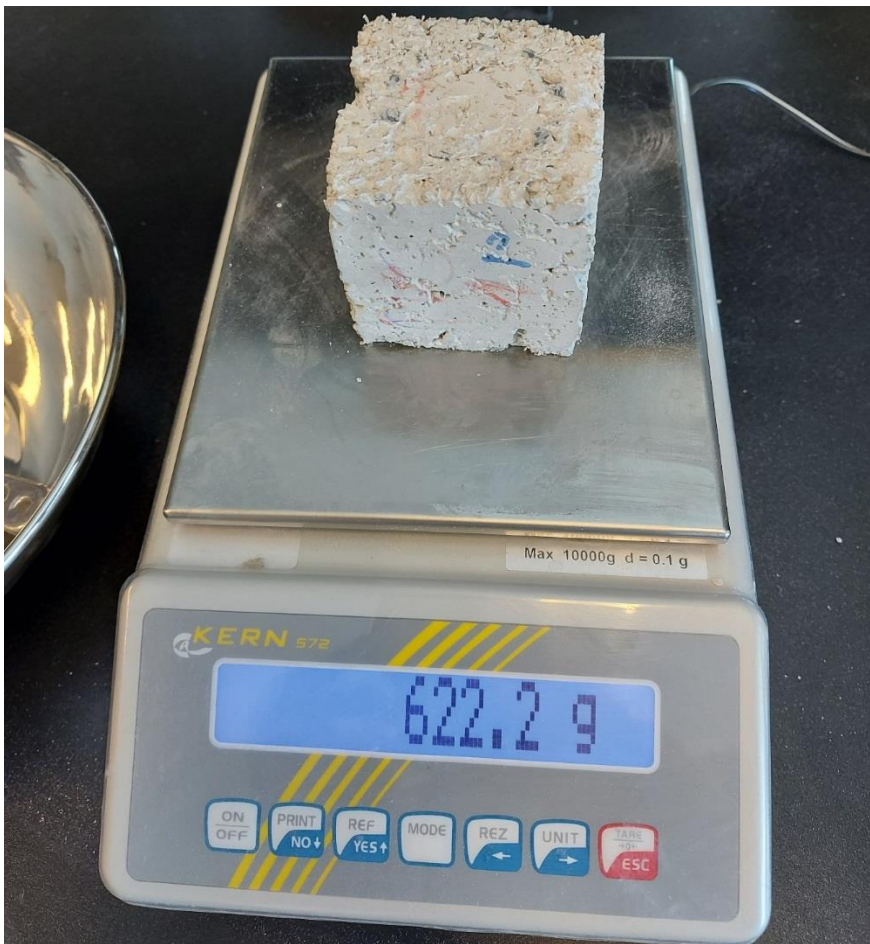
Slika 59: Abrazivni materijal



Slika 60: Mjerenje uzorka



Slika 61: Uzorak nakon što je završio jedan ciklus



Slika 62: Vaganje uzorka nakon završetka 4 ciklusa

Otpornost uzorka na habanje određena je gubitkom volumena koji se određuje prema formuli (4):

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

gdje je:

ΔV – promjena volumena nakon 16 ciklusa, izraženo u cm^3

Δm – smanjenje mase nakon 16 ciklusa, izraženo u g

ρ – gustoća uzorka, izražena u g/cm^3

Dimenzije uzoraka, masa i gustoća dane su u tablici 16:

Tablica 39: Dimenzije, masa i gustoća uzorka

OZNAKA	dimenzije (v*š*d) [mm]			masa [g]	gustoća [g/cm ³]
	v	š	d		
REF_1	70,64	69,53	70,62	760,2	2,19
REF_2	71,02	69,6	73,09	780,8	2,16
REF_3	71,66	70,99	70,18	793,1	2,22
PVC_1	70,96	70,76	72,42	642,3	1,77
PVC_2	69,7	70,18	70,61	648,2	1,86
PVC_3	70,59	70,61	69,62	636,0	1,83

Razred otpornosti na habanje određen je prema tablici 17:

Tablica 40: Razred otpornosti na habanje

Razred otpornosti na habanje	Najveća dopuštena količina obrušenog betona ($\text{cm}^3/50\text{cm}^2$)
XM1 (umjereno)	25
XM2 (znatno)	21
XM3 (ekstremno)	18

Rezultati ispitivanja dani su u tablicama 18, 19, 20, 21, 22 i 23:

Tablica 41: Razred otpornosti uzorka REF_1

početna masa uzorka (g)		m_0	760,2
masa uzorka nakon svaka 4 ciklusa (g)	1	m_1	752,8
	2	m_2	745,5
	3	m_3	738,0
	4	m_4	730,7
gubitak mase nakon 16 ciklusa (g)		$\Delta m = m_0 - m_3$	29,5
promjena volumena uzorka (cm ³)		$\Delta V = \Delta m / \rho$	13,47
promjena volumena u odnosu na površinu (cm ³ /cm ²)			13,47 cm ³ /50 cm ²
razred otpornosti			XM3

Tablica 42: Razred otpornosti uzorka REF_2

početna masa uzorka (g)		m_0	780,8
masa uzorka nakon svaka 4 ciklusa (g)	1	m_1	773,4
	2	m_2	766,6
	3	m_3	759,5
	4	m_4	751,6
gubitak mase nakon 16 ciklusa (g)		$\Delta m = m_0 - m_3$	29,2
promjena volumena uzorka (cm ³)		$\Delta V = \Delta m / \rho$	13,52
promjena volumena u odnosu na površinu (cm ³ /cm ²)			13,52 cm ³ /50 cm ²
razred otpornosti			XM3

Tablica 43: Razred otpornosti uzorka REF_3

početna masa uzorka (g)		m_0	793,1
masa uzorka nakon svaka 4 ciklusa (g)	1	m_1	785,7
	2	m_2	778,3
	3	m_3	772,5
	4	m_4	766,9
gubitak mase nakon 16 ciklusa (g)		$\Delta m = m_0 - m_3$	26,2
promjena volumena uzorka (cm ³)		$\Delta V = \Delta m / \rho$	11,80
promjena volumena u odnosu na površinu (cm ³ /cm ²)			11,80 cm ³ /50 cm ²
razred otpornosti			XM3

Tablica 44: Razred otpornosti uzorka PVC_1

početna masa uzorka (g)		m_0	642,3
masa uzorka nakon svaka 4 ciklusa (g)	1	m_1	363,4
	2	m_2	630,9
	3	m_3	625,2
	4	m_4	619,4
gubitak mase nakon 16 ciklusa (g)		$\Delta m = m_0 - m_3$	22,9
promjena volumena uzorka (cm ³)		$\Delta V = \Delta m / \rho$	12,94
promjena volumena u odnosu na površinu (cm ³ /cm ²)			12,94 cm ³ /50 cm ²
razred otpornosti			XM3

Tablica 45: Razred otpornosti uzorka PVC_2

početna masa uzorka (g)		m_0	648,2
masa uzorka nakon svaka 4 ciklusa (g)	1	m_1	642,4
	2	m_2	636,5
	3	m_3	629,6
	4	m_4	622,2
gubitak mase nakon 16 ciklusa (g)		$\Delta m = m_0 - m_3$	26,0
promjena volumena uzorka (cm ³)		$\Delta V = \Delta m / \rho$	13,98
promjena volumena u odnosu na površinu (cm ³ /cm ²)			13,98 cm ³ /50 cm ²
razred otpornosti			XM3

Tablica 46: Razred otpornosti uzorka PVC_3

početna masa uzorka (g)		m_0	636,0
masa uzorka nakon svaka 4 ciklusa (g)	1	m_1	630,2
	2	m_2	624,6
	3	m_3	617,8
	4	m_4	610,8
gubitak mase nakon 16 ciklusa (g)		$\Delta m = m_0 - m_3$	25,2
promjena volumena uzorka (cm ³)		$\Delta V = \Delta m / \rho$	13,77
promjena volumena u odnosu na površinu (cm ³ /cm ²)			13,77 cm ³ /50 cm ²
razred otpornosti			XM3

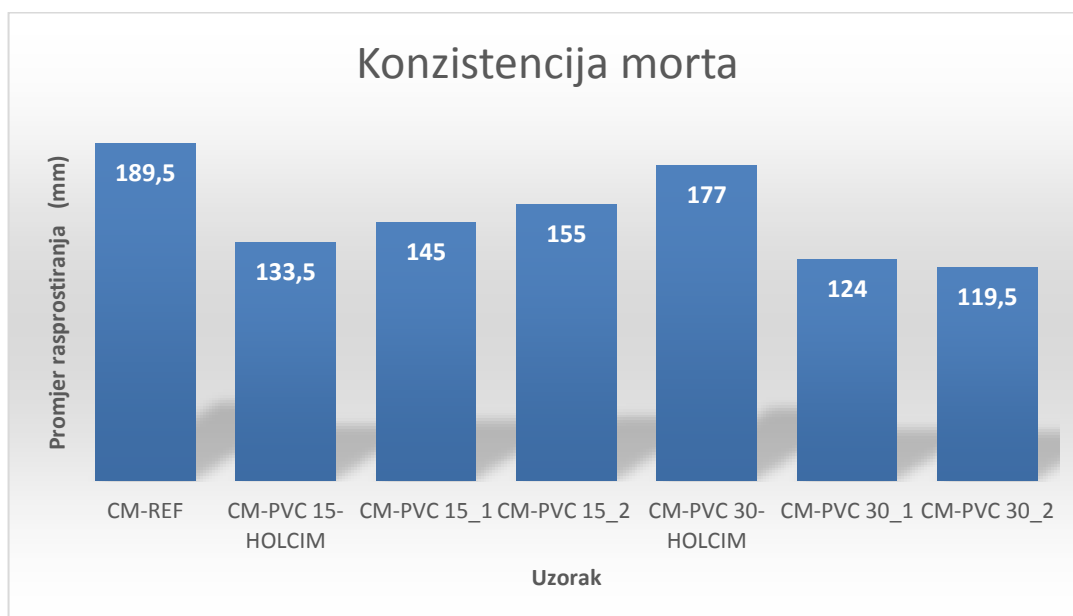
6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Na temelju rezultata koji su dobiveni nakon provedenih ispitivanja na mortu i betonu napravljena je analiza, te su uspoređena svojstva referentnog morta sa svojstvima morta s 15% i 30% PVC-a i svojstva referentnog betona sa svojstvima betona s 15% PVC-a.

6.1. Ispitivanje svježeg morta

6.1.1. Konzistencija morta

Konzistencija morta ispitana je odmah nakon što je završeno miješanje morta, a odnos izmjerenih promjera rasprostiranja pojedinih mješavina vidljiv je na grafu 1. Referentni mort ima najveći promjer rasprostiranja, a iz tog razloga je i u ugradnja bila lakša nego kod ostalih mješavina. Mješavine s 15% i 30% PVC piljevine imale su lošiju konzistenciju što se pripisuje zadržavanju vode na PVC piljevini uslijed površinske napetosti te ta voda nije uspjela prodrijeti do čestica cementa.



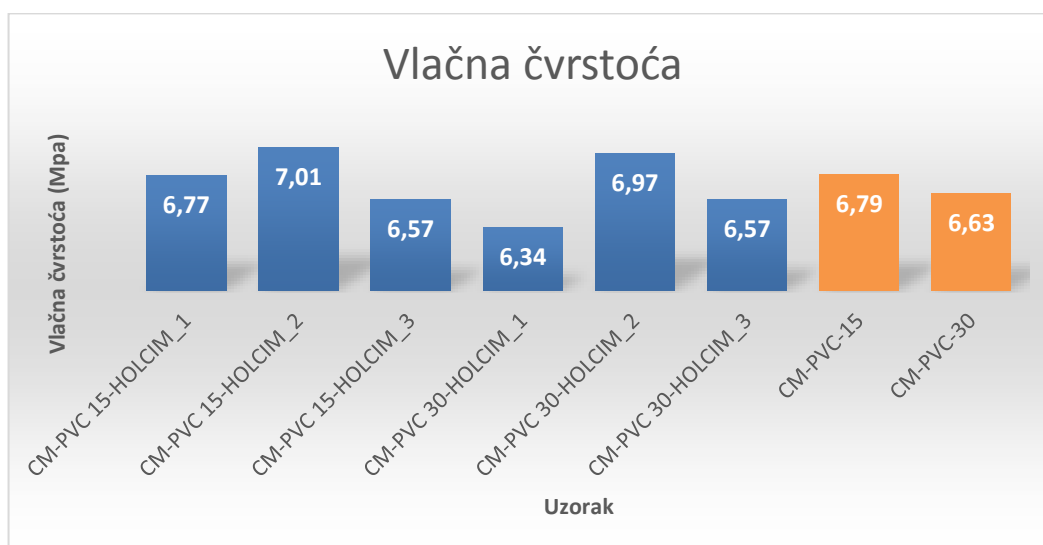
Graf 1: promjer rasprostiranja cementnog morta

6.2. Ispitivanje očvrstlog morta

6.2.1. Vlačna čvrstoća morta

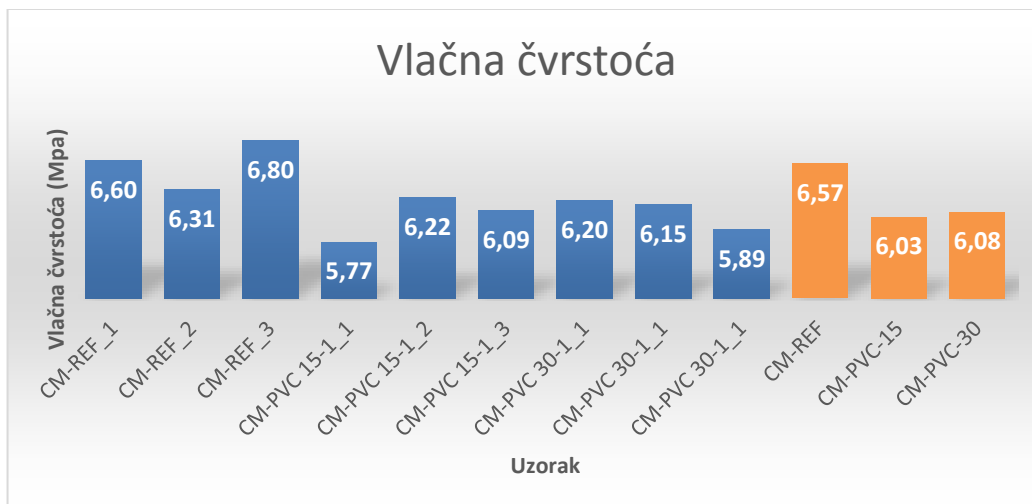
Vlačna čvrstoća morta ispitana je na uzorcima starosti 7 dana, u kojima je korišten Holcim pijesak te na uzorcima starosti 28 dana, u kojima je korišten standardni pijesak. Na uzorcima starosti 28 dana provedeno je ispitivanje kontrolom sila i kontrolom pomaka. Iz dobivenih rezultata, vidljivo je da uzorci s Holcim pijeskom imaju veću vlačnu čvrstoću.

Na grafu 2 prikazane su čvrstoće pojedinih uzoraka te srednja vrijednost uzorka sa 15% i 30% PVC-a. Vlačna čvrstoća uzorka sa 15 % PVC-a nakon 7 dana iznosi 6,79 MPa, a uzorka sa 30% PVC-a iznosi 6,63 MPa. Prema dobivenim rezultatima zaključeno je da mort sa 30% PVC-a ima 2,4% manju vlačnu čvrstoću u odnosu na mort sa 30% PVC-a.



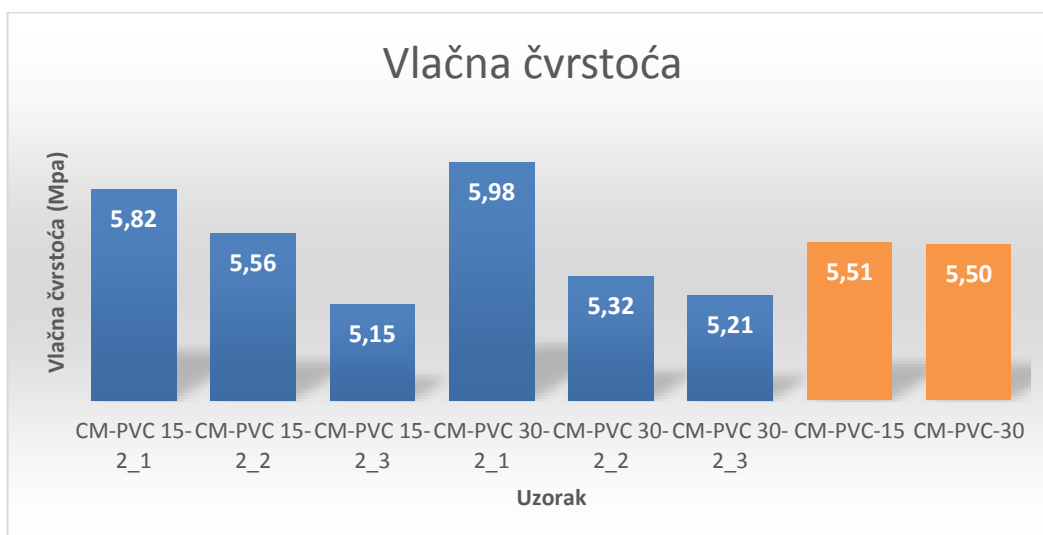
Graf 2: Vlačna čvrstoća uzorka nakon 7 dana, Holcim pijesak

Na grafu 3 prikazane su čvrstoće pojedinih uzoraka te srednja vrijednost referentnog uzorka i uzorka sa 15% i 30% PVC-a. Vlačna čvrstoća referentnog uzorka iznosi 6,57 MPa, uzorka s 15 % PVC-a iznosi 6,03 MPa, a uzorka s 30% PVC-a iznosi 6,08 MPa. Prema dobivenim rezultatima zaključeno je da mort s 15% i 30% PVC-a ima podjednaku vlačnu čvrstoću, a ona je 8,2% manja u odnosu na referentni mort.



Graf 3: Vlačna čvrstoća nakon 28 dana, kontrola sila, standardni pijesak

Na grafu 4 prikazane su čvrstoće pojedinih uzoraka te srednja vrijednost uzorka s 15% i 30% PVC-a. Vlačna čvrstoća uzorka sa 15% PVC-a iznosi 5,51 MPa, a uzorka s 30% PVC-a iznosi 5,50 MPa. Prema dobivenim rezultatima zaključeno je da mort s 15% i 30% PVC-a imaju jednaku vlačnu čvrstoću.



Graf 4: Vlačna čvrstoća nakon 28 dana, kontrola pomaka, standardni pijesak

6.2.2. Tlačna čvrstoća morta

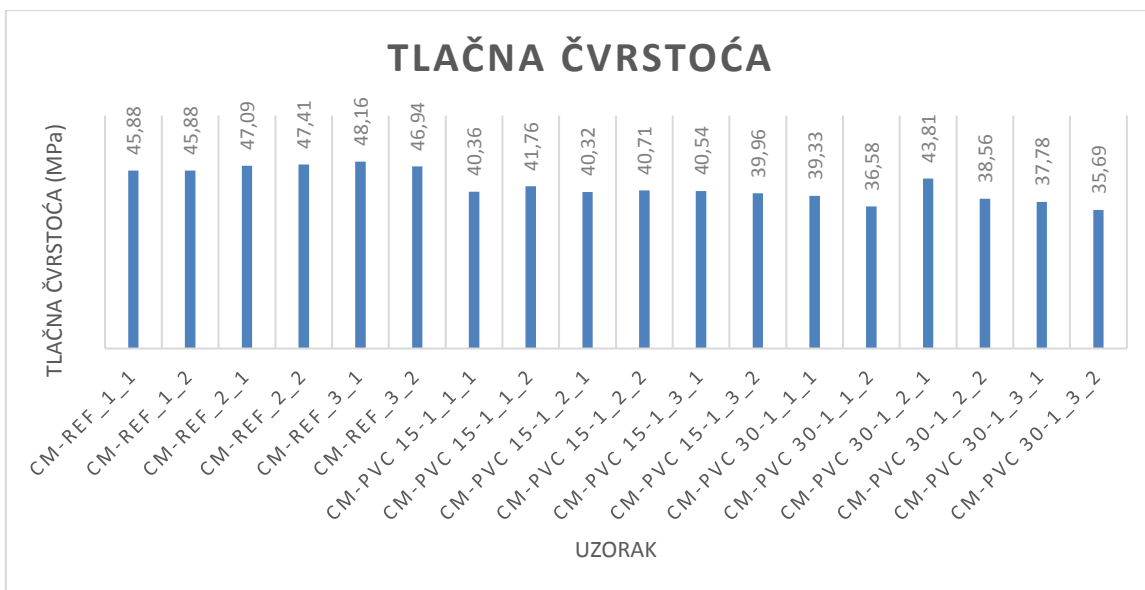
Tlačna čvrstoća morta ispitana je na polovicama uzoraka koje su ostale nakon ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem.

Na grafu 5 prikazane su tlačne čvrstoće uzoraka starosti 7 dana te srednja vrijednost uzorka s 15% i 30% PVC-a. Prema dobivenim rezultatima vidljivo je da je čvrstoća uzorka s 15% PVC-a 42,47 MPa, a uzorka s 30% PVC-a 34,88 MPa, odnosno manja za 17,9%.

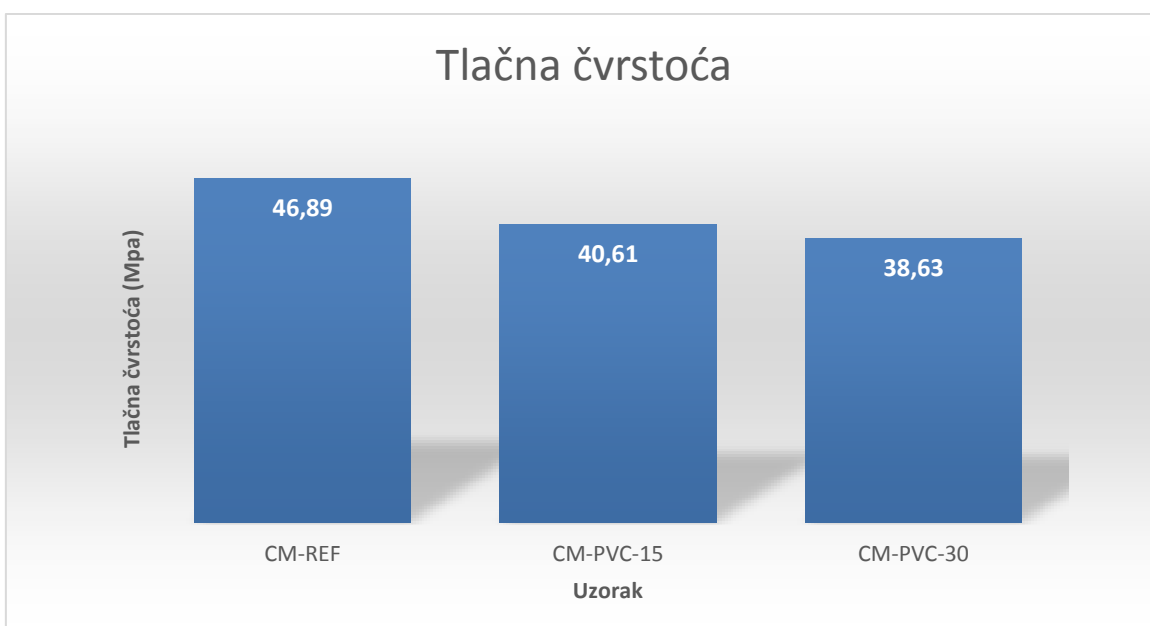


Graf 5: Tlačna čvrstoća nakon 7 dana, Holcim pijesak

Na grafu 6 prikazane su tlačne čvrstoće pojedinih uzoraka, a srednja vrijednost referentnog uzorka i uzorka s 15% i 30% PVC-a prikazan je na grafu 7. Ovo ispitivanje je provedeno na uzorcima nakon ispitivanja vlačne čvrstoće kontrolom sila. Tlačna čvrstoća referentnog uzorka iznosi 46,89 MPa, uzorka sa 15 % PVC-a iznosi 40,61 MPa, a uzorka s 30% PVC-a iznosi 38,63 MPa. Prema dobivenim rezultatima zaključeno je da mort s 15% PVC-a ima 13,4 % manju tlačnu čvrstoću od referentnog morta, a mort s 30% PVC-a ima 17,6% manju čvrstoću. Tlačna čvrstoća morta s 30% PVC-a je 4,9% manja od tlačne čvrstoće morta s 15%PVC-a.

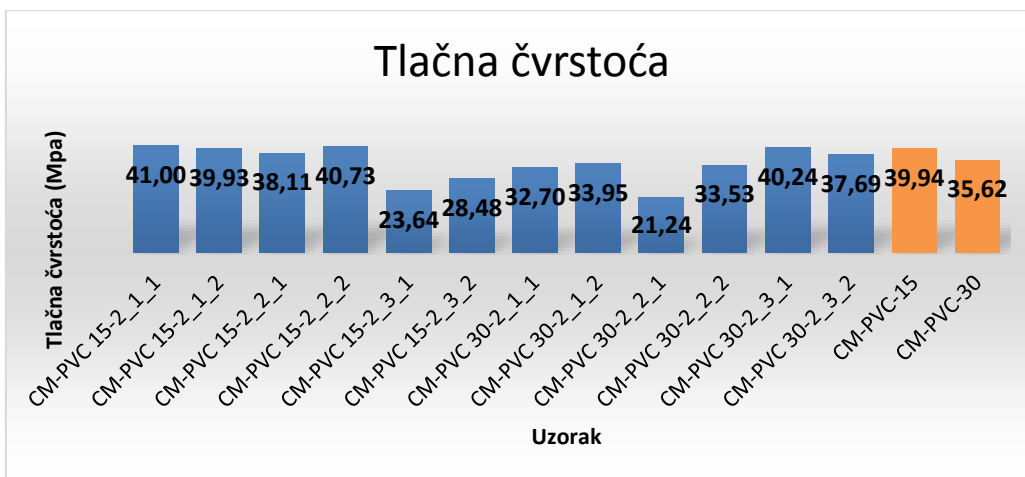


Graf 6: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, standardni pijesak, nakon ispitivanja kontrole sila



Graf 7: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, standardni pijesak, nakon ispitivanja kontrole sila

Na grafu 8 prikazane su tlačne čvrstoće pojedinih uzoraka te srednja vrijednost uzoraka s 15% i 30% PVC-a. Ovo ispitivanje je provedeno na uzorcima nakon ispitivanja vlačne čvrstoće kontrolom pomaka. Tlačna čvrstoća uzorka sa 15 % PVC-a iznosi 39,94 MPa, a uzorka s 30% PVC-a iznosi 35,62 MPa. Prilikom računanja srednjih vrijednosti tlačne čvrstoće, neki rezultati su odbačeni jer su varirali više od 10% srednje vrijednosti. Prema dobivenim rezultatima zaključeno je da mort s 30% PVC-a ima 10,8 % manju tlačnu čvrstoću od morta s 15% PVC-a.

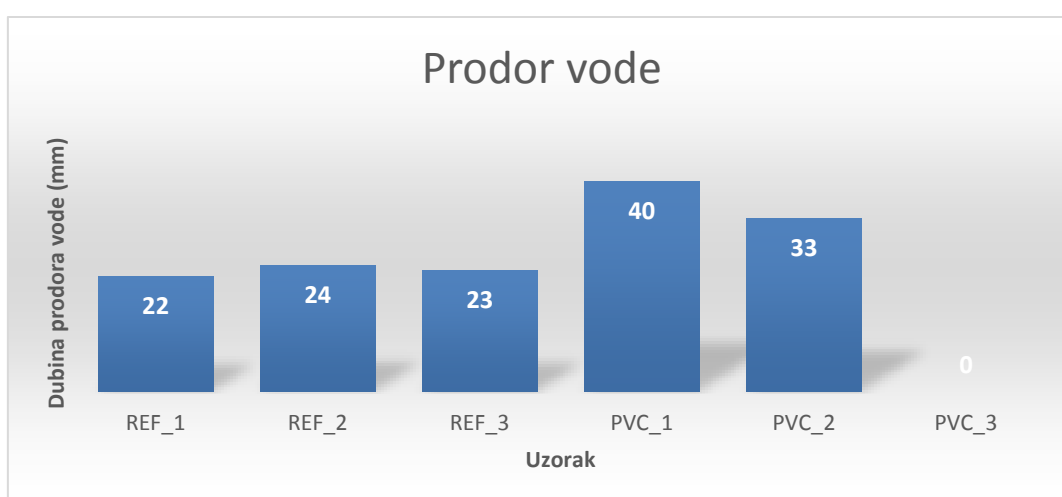


Graf 8: Tlačna čvrstoća nakon 28 dana, standardni pijesak, nakon ispitivanja kontrole pomaka

6.3. Ispitivanje očvrslog betona

6.3.1. Dubina prodora vode pod tlakom

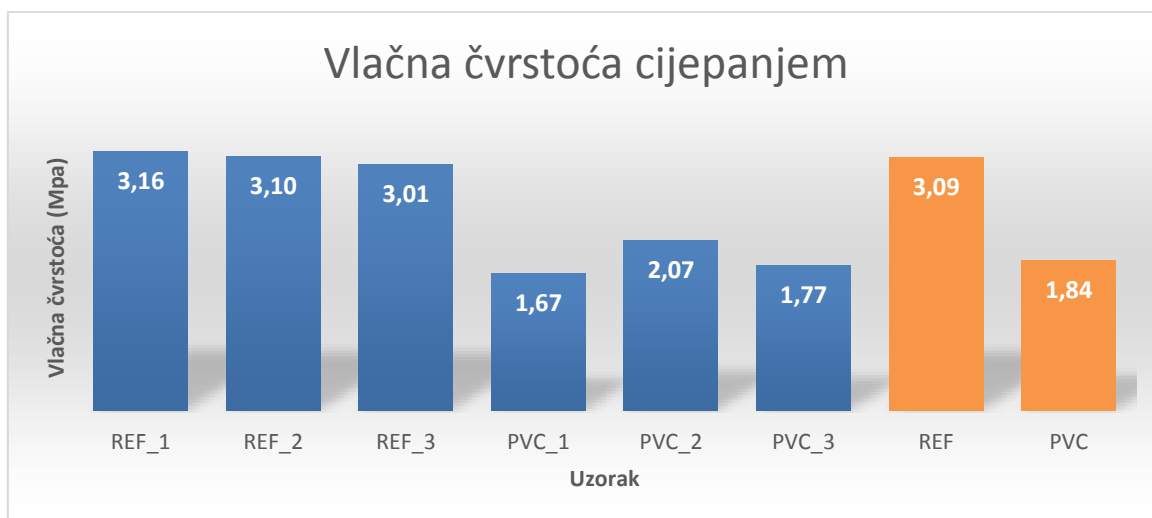
Dubina prodora vode pod tlakom ispitana je na 3 uzorka od referentnog betona i na 2 uzorka betona s 15% PVC-a. Kao mjerodavan rezultat uzima se najveći prodor vode, a prema grafu 9 vidljivo je da je kod referentnog betona najveći prodor vode 24 mm, a kod betona sa 15% PVC-a 40 mm. Dakle, razlika između ovih dviju mješavina je 16 mm, odnosno beton sa PVC-om ima veću vodopropusnost od referentnog betona.



Graf 9: Prodor vode pod tlakom

6.3.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem

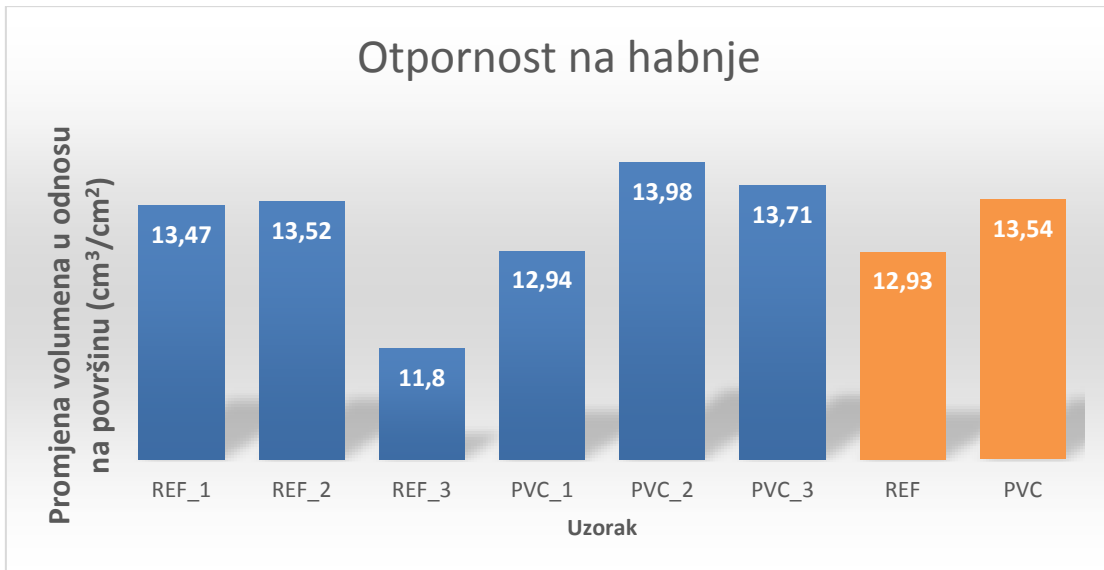
Ovo ispitivanje je provedeno na 6 uzoraka, po 3 za svaku mješavinu betona. Pojedinačni rezultati, kao i srednja vrijednost vlačne čvrstoće dani su u grafu 10. Prema dobivenim rezultatima, srednja vrijednost vlačne čvrstoće za referentni beton iznosi 3,09 MPa, a za beton s 15% PVC-a iznosi 1,84 MPa, odnosno dodavanjem 15% PVC-a vlačna čvrstoća se smanjila za 40,5%.



Graf 10: Vlačna čvrstoća cijepanjem

6.3.3. Otpornost na habanje

Ispitivanje je provedeno na 6 uzoraka, po 3 od svake mješavine betona. Na grafu 11 vidljivi su rezultati ispitivanja, a prema njima je izračunata srednja vrijednost promjena volumena u odnosu na površinu. Srednja vrijednost promjene volumena kod referentnog betona iznosi $12,93 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$, a kod betona s 15% PVC-a iznosi $13,54 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$, odnosno beton sa PVC-om je izgubio 4,7% više volumena na 50 cm^2 od referentnog betona.



Graf 11: promjena volumena u odnosu na površinu

7. ZAKLJUČAK

Na temelju eksperimentalnog djela u kojem su ispitivana svojstva svježeg i očvrslog cementnog morta i betona zaključeno je sljedeće:

- u proizvodnji cementnog morta, kod kojeg je količina pijeska zamijenjena s 15% i 30% PVC piljevine veličine 0/2 mm, bilo je vidljivo kako je mort sa PVC-om puno suši od referentnog morta, a to zapažanje potvrdilo je i ispitivanje konzistencije
- referentni mort se ravnomjerno rasprostro po stoliću za rasprostiranje, a kod morta koji je sadržavao PVC, rasprostiranje je bilo nejednako
- rasprostiranjem je zaključeno da PVC materijal na sebi zadržava vodu, najvjerojatnije zbog adhezijskih svojstva te je zbog toga razloga i ugradnja morta u kalupe bila je teža od ugradnje referentnog morta
- razlika u vlačnoj čvrstoći između uzoraka sa 15% i 30% PVC-a bila je zanemariva, a u odnosu na referentni beton vlačna čvrstoća je smanjena za 8 %
- veći pad čvrstoće vidljiv je kod ispitivanja na tlak, a u odnosu na referentni mort, čvrstoća kod morta s 15% PVC-a je smanjena za 13% dok je kod morta sa 30% PVC-a smanjena za 17%
- u proizvodnji betona PVC piljevina se nije prosijavala, već je korištena u stanju u kakvom je proizvedena, a upravo iz tog razloga bilo je prisutno i dužih komada plastike za koje se vjerovalo da bi mogli služiti kao vlakna koja bi mogla pomoći pri ispitivanju vlačne čvrstoće
- svježni beton sa otpadnom plastikom pokazao je loša svojstva konzistencije, zbog čega je ugradnja u kalupe bila iznimno zahtjevna, a rezultat toga su bile značajne količine pora u nekim uzorcima
- dokaz tome je taj da se jedan uzorak nije mogao ispitati na vodopropusnost pod tlakom jer je voda kroz pore izlazila van
- prisutnost pora je također vidljiva na ostalim uzorcima kod kojih je vodopropusnost bila za 66% veća od referentnog betona
- prisutnost pora, odnosno loša veza između agregata i cementa kao vezivnog materijala vidljiva je i u ispitivanju vlačne čvrstoće cijepanjem gdje je čvrstoća smanjena za 40% u odnosu na referentni beton.

- najmanja razlika uočena je kod otpornosti na habanje gdje je beton s PVC-om izgubio 4,7% više volumena od referentnog betona.

Zaključak je da se beton ovakve recepture ne bi mogao primjenjivati u konstruktivnim elementima zbog jako loše obradivosti, a posljedica toga je veliko smanjenje čvrstoće. U daljnjim istraživanjima trebalo bi izraditi recepturu mješavine betona koja bi bila obradljivija te time lakše ugradiva. Također, budući da se radi o PVC piljevini koja osim zrnaca ima i niti različitih duljina u većem postotku, trebalo bi razmotriti mogućnost mikroarmiranja betona umjesto zamjene dijela agregata.

8. LITERATURA

- [1] <https://www.betonlucko.hr/ruconbar.html>
- [2] D. Bjegović, N. Štirmer: Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015
- [3] Vouk, D., Serdar, M., Nakić, D., Anić-Vučinić, A., Korištenje mulja s UPOV-a u proizvodnji cementnog morta i betona, Građevinar 3/2016
- [4] EMERGING MATERIALS: FERROCK, <https://www.certifiedenergy.com.au/emerging-materials/emerging-materials-ferrock>, pristup 25.08.2020.
- [5] Primjena letećeg pepela kao dodatka betonu i tlu, <https://www.bib.irb.hr/848750>, pristup 25.08.2020.)
- [6] Građevinski materijali koji su bolji od klasičnog betona, <https://www.tportal.hr/biznis/clanak/gradevinski-materijali-koji-su-bolji-od-klasicnog-betona-20171120/print>, pristup 25.08.2020.
- [7] Adewumi J.B., Šavija B., Suvash Chandra P. i Anggraini V., Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A Review, MDPI, 2018.
- [8] Arka Saha, Dr. Samaresh Pan, Soumen Pan: Strength development characteristics of high strength concrete incorporating an Indian fly ash, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.636.7827&rep=rep1&type=pdf>, pristup 02.09.2020.
- [9] Klobučar, Mirna Analiza svojstava samozbijajućeg betona s dodatkom karbidnog mulja, diplomski rad, Građevinski fakultet, Rijeka, 2016.
- [10] Nakić, D., Vouk, D., Štirmer, N., Serdar, M.: Management of sewage sludge – new possibilities involving partial cement replacement, GRAĐEVINAR 70 (2018) 4, 277-286
- [11] Vouk, D., Serdar, M., Nakić, D., Anić-Vučinić, A.: Korištenje mulja s UPOV-a u proizvodnji cementnog morta i betona, GRAĐEVINAR 68 (2016) 3, 199-210
- [12] Serdar, M., Baričević, A., Lakušić, S., Bjegović, D.: Betonski proizvodi specijalne namjene od reciklata otpadnih guma, GRAĐEVINAR 65 (2013) 9, 793-801
- [13] <https://www.betonlucko.hr/ruconbar.html>)
- [14] http://www.ruconbar.com/rcnb/wp-content/uploads/2013/02/RUCONBAR_BH_Congress_on_railways.pdf

- [15] [https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/documents/RUCONBAR -
Prof.dr.sc. Stjepan Lakusic i Prof.dr Ana Baricevic.pdf](https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/documents/RUCONBAR-_Prof.dr.sc._Stjepan_Lakusic_i_Prof.dr_Ana_Baricevic.pdf)
- [16] https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2238785420302817-gr2_lrg.jpg
- [17] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420302817>
- [18] <https://pdfs.semanticscholar.org/8642/4f125ff8945a3ef59fb33b78addb81fb937a.pdf>