

Mogućnost primjene PVC piljevine kao sitnog agregata u mortu i betonu

Cukarić, Matei

Undergraduate thesis / Završni 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:157:067124>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



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**

MATEI CUKARIĆ

Mogućnost primjene PVC piljevine kao sitnog agregata u mortu i betonu

Završni rad

Rijeka, 2020.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Sveučilišni preddiplomski studij
Inženjerski materijali

Matei Cukarić

JMBAG: 0114029809

Mogućnost primjene PVC piljevine kao sitnog agregata u mortu i betonu

Završni rad

Rijeka, rujan 2020.

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Temeljne tehničke znanosti

Znanstvena grana: Materijali

Tema završnog rada

**MOGUĆNOST PRIMJENE PVC PILJEVINE KAO SITNOG AGREGATA U MORTU I
BETONU
POSSIBILITY OF USING PVC SAWDUST AS FINE AGGREGAT IN MORTAR AND
CONCRETE**

Kandidat: **MATEI CUKARIĆ**

Kolegij: **INŽENJERSKI MATERIJALI**

Završni rad broj: **20-P-12**

Zadatak:

Velike količine otpadnih i biološki nerazgradivih materijala nastaju kao nusproizvod raznih grana industrije te time postaju glavni uzrok onečišćenja i loše održivost okoliša. Jedan od takvih otpada nastaje i pri proizvodnji PVC stolarije, tzv. PVC piljevina, čije zbrinjavanje u RH nije adekvatno riješeno. Cilj ovog rada je ispitati mogućnost primjene PVC piljevine u spravljanju morta i betona. Eksperimentalni dio istraživanja uključuje izradu laboratorijskih mješavina u kojima je dio pijeska zamijenjen različitim udjelima PVC piljevine (0%, 15% i 30% volumena pijeska). Potrebno je ispitati utjecaj različitih udjela PVC-piljevine na osnovna svojstva cementog morta i betona u svježem (obradljivost) i očvrslom stanju (tlačna čvrstoća i čvrstoća savijanjem). Usporediti dobivene rezultate ispitivanja te izvesti zaključak.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.

Komentorica:

Doc. dr. sc. Silvija Mrakovčić
dipl. ing. građ.

Mentorica:

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

IZJAVA

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

Matei Cukarić

U Rijeci, 14. rujna 2020.

IZJAVA

Završni rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić
Šifra projekta RC.2.2.06-0001
Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)
Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH
Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 14. rujna 2020.

Mentor:

Doc. dr. sc. Natalija Bede

ZAHVALA

Zahvala Građevinskom fakultetu u Rijeci na subvencioniranju materijala korištenih za izradu i ispitivanje u ovo radu, te Laboratoriju Inženjerskih materijala Građevinskog fakulteta na korištenju njihove opreme.

Matei Cukarić

SAŽETAK

„*Moderni problemi zahtijevaju moderna rješenja*“. U današnje vrijeme rastuće industrije proizvode se velike količine otpadnih materijala koji se adekvatno ne zbrinjavaju te na taj način uvelike onečišćuju okoliš. U ovom radu ispitana je mogućnost primjene jednog od takvih otpadnih materijala pri spravljanju morta i betona. PVC piljevina nastaje kao otpadni materijal pri proizvodnji PVC stolarije. U tu svrhu, izrađene su različite mješavine standardnog cementnog morta i običnog betona na način da se udio sitnog agregata zamijeni PVC piljevinom. Mješavine se razlikuju prema udjelu PVC-piljevine (0%, 15% i 30% volumena pijeska). Na svježim mješavinama cementnog morta i betona su ispitana gustoća i obradljivost a na očvrslim uzorcima tlačna i savojna čvrstoća. Svojstva u svježem stanju ukazuju na probleme koji su nastali prilikom izrade mješavina. Rezultati ispitivanja na očvrslim uzorcima daju dosta niže vrijednosti tlačnih i vlačnih čvrstoća u usporedbi s uzorcima bez PVC piljevine. Na temelju toga se zaključuje da je potrebno pronaći prikladniji način spravljanja svježih mješavina čime bi se možda postigle i veće čvrstoće na očvrslim uzorcima.

Ključne riječi: PVC, cementni mort, beton, sitni agregat, tlačna čvrstoća, čvrstoća savijanjem, građevinarstvo

"Modern problems require modern solutions". Nowadays, growing industries produce large amounts of waste materials that are not adequately disposed of and thus greatly pollute the environment. In this paper, the possibility of use of one of the waste materials in mortar and concrete mixtures is investigated. PVC sawdust is generated as a waste material in the production of PVC joinery. For this purpose, different mixtures of standard cement mortar and ordinary concrete were made in such a way that the part of fine aggregate was replaced by PVC sawdust. The mixtures differ according to the amount of PVC sawdust (0%, 15% and 30% by sand volume). Density and workability were tested on fresh cement mortar and concrete mixtures, while compressive and flexural strength on hardened samples. The properties of fresh samples describe problems that occurred during the preparation of mixtures. The test results of compressive and tensile strengths on hardened samples give much lower values compared to samples without PVC sawdust. Based on this, it is concluded that it is necessary to find a more convenient way of preparing fresh mixtures, which might contribute to higher strengths on hardened samples.

Keywords: PVC, cement mortar, concrete, fine aggregate, compressive strength, flexural strength, civil engineering

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Korišteni materijali.....	2
2.1. Cement i voda.....	2
2.2. Agregat.....	3
2.3. PVC.....	4
3. Cementni mort.....	6
3.1. Ispitni uzorci.....	6
3.2. Cementne mješavine.....	6
3.2.1. Referentna mješavina CEM-REF.....	7
3.2.2. Mješavina CM-PVC 15.....	9
3.2.3. Mješavina CM-PVC 30.....	11
4. Svojstva očvrslog cementnog morta.....	12
4.1 Čvrstoća savijanjem na uzorcima starosti 7 dana.....	15
4.2 Čvrstoća savijanjem na uzorcima starosti 28 dana.....	18
4.2.1. Ispitivanje metodom kontrole sile.....	18
4.2.2. Ispitivanje metodom kontrole pomaka.....	21
4.3. Usporedba rezultata čvrstoće savijanjem.....	23
4.4. Tlačna čvrstoća na uzorcima starosti 7 dana.....	24
4.5. Tlačna čvrstoća na uzorcima starosti 28 dana.....	26
4.6. Usporedba rezultata tlačne čvrstoće.....	28
5. Beton.....	29
5.1. Ispitni uzorci.....	29
5.2. Betonske mješavine.....	29
5.2.1. Referentna mješavina B-REF.....	29
5.2.2. Mješavina B-PVC 15.....	32
6. Svojstva očvrslog betona.....	35
6.1. Čvrstoća savijanjem.....	37
6.2. Tlačna čvrstoća.....	41
7. Zaključak.....	43
8. Literatura.....	44

Popis tablica:

- Tablica 1. Fizikalna i kemijska svojstva CEM II 42,5 R
- Tablica 2. Svojstva agregata frakcije 0-4 mm
- Tablica 3. Svojstva svježe mješavine
- Tablica 4. Dimenzije uzoraka referentne mješavine
- Tablica 5. Dimenzije uzoraka CM-PVC 15/holcim
- Tablica 6. Dimenzije uzoraka CM-PVC 30/holcim
- Tablica 7. Dimenzije uzoraka CM-PVC 15.1/standardni
- Tablica 8. Dimenzije uzoraka CM-PVC 15.2/standardni
- Tablica 9. Dimenzije uzoraka CM-PVC 30.1/standardni
- Tablica 10. Dimenzije uzoraka CM-PVC 30.2/stadnardni
- Tablica 11. Izračun gustoća očvrsljih uzoraka
- Tablica 12. Čvrstoća savijanjem CM-PVC 15
- Tablica 13. Čvrstoća savijanjem CM-PVC 30
- Tablica 14. Izračun čvrstoće savijanja za uzorak CM-PVC 15
- Tablica 15. Izračun čvrstoće savijanja za uzorak CM-PVC 30
- Tablica 16. Izračun čvrstoće savijanja za uzorak CM-referentna
- Tablica 17. Izračun čvrstoće savijanja za uzorak CM-PVC 15 sa pomakom
- Tablica 18. Izračun čvrstoće savijanja za uzorak CM-PVC 30 sa pomakom
- Tablica 19. Tlačna čvrstoća uzorak CM-PVC 15/7d
- Tablica 20. Tlačna čvrstoća za uzorak CM-PVC 30/7d
- Tablica 21. Tlačna čvrstoća za uzorak CM-PVC 15/28d
- Tablica 22. Tlačna čvrstoća za uzorak CM-PVC 30/28d
- Tablica 23 Tlačna čvrstoća za uzorak CM-referentna/28d
- Tablica 24. Dimenzije uzoraka B-REF mješavine
- Tablica 25. Dimenzije uzoraka B- PVC 15 mješavine
- Tablica 26. Dimenzije uzoraka referentne mješavine
- Tablica 27. Dimenzije uzoraka B-PVC 15 mješavine
- Tablica 28. Čvrstoća savijanjem uzorka B-REF sa pomakom
- Tablica 29. Čvrstoća savijanjem uzorka B-PVC 15 sa pomakom
- Tablica 30. Izračun tlačne čvrstoće za uzorke referentne mješavine
- Tablica 31. Izračun tlačne čvrstoće za uzorke B-PVC 15 mješavine

Popis slika:

- Slika 1. Granulometrijski sastav standardnog pijeska
- Slika 2. PVC piljevina
- Slika 3. Granulometrijska krivulja PVC piljevine
- Slika 4. Mikser i miješavina
- Slika 5. Kalup i uređaj za rasprostiranje
- Slika 6. Mješavina nakon izvršenog postupka rasprostiranja
- Slika 7. Punjenje kalupa na vibrostolu
- Slika 8. Izgled mješavine nakon rasprostiranja
- Slika 9. Suha mješavina (gubitak vode)
- Slika 10. Kalupi spremni za njegovanje
- Slika 11. Odnos gustoća očvrslih uzoraka
- Slika 12. Raspored valjaka sa uzorkom u uređaju za ispitivanje [Norma HRN EN 196-1]
- Slika 13. Uzorak nakon ispitivanja
- Slika 14. Karakteristični graf ispitivanja čvrstoće savijanja uzoraka CM-PVC 15
- Slika 15. Karakteristični graf ispitivanja čvrstoće savijanja uzoraka CM-PVC 30
- Slika 16. Uzorak u uređaju za testiranje te LVDT ispod
- Slika 17. Karakteristični graf CM-PVC 15
- Slika 18. Karakteristični graf CM-PVC 30
- Slika 19. Karakteristični graf CM-referentna
- Slika 20. Karakteristični graf CM-PVC 15/pomak
- Slika 21. Karakteristični graf CM-PVC 30/pomak
- Slika 22. Usporedba čvrstoća savijanjem
- Slika 23. Polovica uzorka u uređaju za ispitivanje tlačne čvrstoće
- Slika 24. Oblik pješčanog sata nakon sloma uzorka
- Slika 25. Usporedba uzorka nakon ispitivanja na tlačnu čvrstoću, lijevo bez PVC piljevine te desno sa PVC piljevinom
- Slika 26. Usporedba tlačnih čvrstoća
- Slika 27. Ubacivanje vode u suhu mješavinu
- Slika 28. Mjerenje rasprostiranja svježeg betona
- Slika 29. Uzorci nakon ugradnje
- Slika 30. Svježa betonska mješavina nakon ispitivanja rasprostiranjem
- Slika 31. Ugrađeni kalupi na sušenju
- Slika 32. Njegovanje uzoraka u vodi
- Slika 33. Ispitani uzorak sa postavljenim LVDT uređajem
- Slika 34. Karakteristični graf opterećenja u vremenu referentne mješavine
- Slika 35. Karakteristični graf opterećenja u vremenu za uzroke B-PVC15
- Slika 36. Primjeri uzoraka nakon ispitivanja čvrstoće savijanja
- Slika 37. Uzorak u uređaju za ispitivanje

1. UVOD

Velike količine otpadnih i biološki nerazgradivih materijala nastaju kao nusproizvod raznih grana industrije te time postaju glavni uzrok onečišćenja i loše održivost okoliša jer zagađuju rijeke, kopna, mora i oceane. Jedan od takvih materijala današnjice jest plastika. Plastika je materijal koji je lagan, savitljiv, dugotrajan, dobar izolator i otporan na vlagu te ima jako nisku cijenu u usporedbi s drugim tradicionalnim materijalima pa je stoga danas jedan od najznačajniji i najčešće primjenjivanih materijala u raznim granama industrije pa tako i građevinarstvu. U građevinskoj industriji u posljednjih nekoliko godina posebno treba naglasiti veliki porast upotrebe polivinilklorida, poznatijeg pod kraticom PVC, koji se u velikoj mjeri koristi prvenstveno za proizvodnju stolarije, krovnih i hidroizolacijskih membrana te raznih cijevnih sustava [*Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete, Y. Senhadji, G. Escadeillas, A.S. Benosman, M. Mouli, H. Khelafi & S. Ould Kaci*]

Pri proizvodnji PVC stolarije nastaju velike količine otpada, tzv. PVC piljevina, čije zbrinjavanje u RH nije adekvatno riješeno. S ciljem smanjenja nezbrinutog industrijskog otpada i istodobno smanjenja troškova proizvodnje mortova i betona došlo se do ideje da se PVC piljevina koristi kao djelomična ili potpuna zamjena prirodnog sitnog agregata. U ovom radu PVC piljevina, nastala kao nusproizvod tvornice PVC stolarije, se koristila kao djelomična zamjena za sitni agregat (pijesak) prilikom spravljanja cementnog morta i običnog betona.

Eksperimentalni dio istraživanja uključivao je izradu laboratorijskih mješavina i ispitivanje utjecaja različitih udjela PVC piljevine na osnovna svojstva cementnih mortova i betona u svježem i očvrslom stanju. Uzorci cementnog morta spravljeni su prema standardnoj recepturi pri čemu je dio pijeska zamijenjen s različitim udjelima (0%, 15% i 30% volumena) PVC piljevine. Pri projektiranju betonske mješavine također se udio sitnog agregata zamijenio različitim udjelima (0% i 15% volumena) PVC piljevine. Za svježe cementne i betonske mješavine ispitana je gustoća i konzistencija rasprostiranjem kao mjera obradivosti. Na očvrslim uzorcima cementnog morta i betona ispitani su tlačna čvrstoća te čvrstoća savijanjem. Na temelju usporedbe rezultata ispitivanja uzoraka s različitim udjelom PVC piljevine s referentnim uzorcima bez udjela PVC piljevine izvedeni su zaključci. Također, komentirana je i mogućnost primjene PVC piljevine u spravljanju mortova i betona s obzirom na rezultate ispitivanja.

2. KORIŠTENI MATERIJALI

2.1. Cement i voda

U ovom radu korišten je cement CEM II/A-LL 42,5 R , prema normi HRN EN 197-1. Cement je proizveden u tvrtki Holcim (Hrvatska) d.o.o. koja se nalazi u naselju Koromačno. Prema proizvođaču ovaj cement se sastoji od 80-94% portlandskog cementnog klinkera, 6-20% prirodnog vapnenca, do 5% filtarske prašine, ima tlačnu čvrstoću od 27 MPa nakon 2 dana vezivanja te od 51 MPa nakon 28 dana vezivanja, a specifična gustoća mu iznosi 2,95 kg/dm³. Podaci o fizikalnim i kemijskim svojstvima kako ih je dao proizvođač cementa, prikazani su u tablici 1. Za spravljanje betonskih i cementnih mješavina koristila se voda iz slavine približne temperature 22°C.

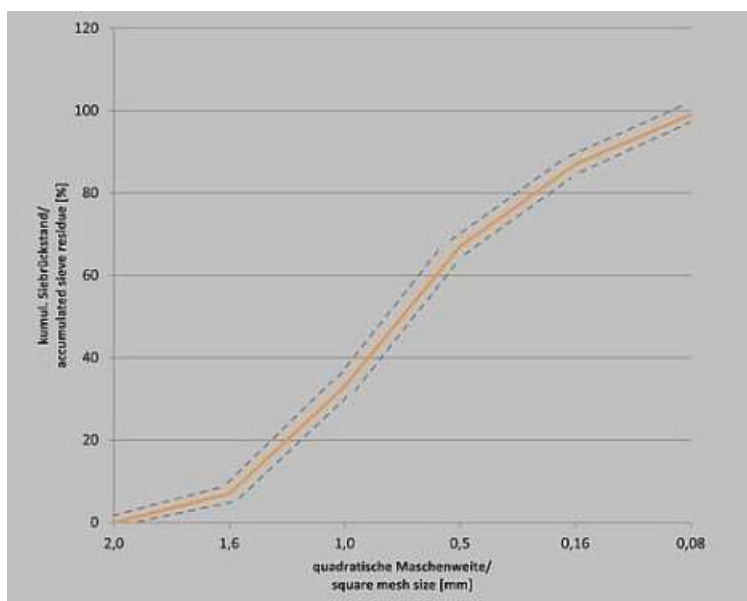
FIZIKALNA SVOJSTVA	JM	Holcim Lumen cement CEM II/A-LL 42,5 R	UVIJET NORME
Postojanost volumena	mm	0,0	≤10
Početak vezivanja	min	160,0	≥60
Tlačna čvrstoća na 2 dana	Mpa	27,0	≥20
Tlačna čvrstoća na 28 dana	MPa	51,0	≥42,5≤62,5
Kemijska svojstva			
SO ₃	%	3,0	≤4
Cl	%	0,0123	≤0,1

Tablica 1. Fizikalna i kemijska svojstva korištenog cementa
[<https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/agregati>]

2.2. Agregat

Za izradu cementnih prizmi korištene su dvije vrste pijeska; standardni pijesak u pakiranju od 1350 grama čija je naspina gustoća $1,64 \text{ g/cm}^3$ (na slici broj 1 prikazan je granulometrijski sastav) ili pijesak iz tvrtke Holcim (Hrvatska) d.o.o. (u tablici broj 2 prikazan su svojstva pijeska tvrtke Holcim). Za izradu betonskih uzoraka korišten je agregat tvrtke Holcim iz kamenoloma Šumber slijedećih frakcija 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm.

U svim mješavinama volumenski udio pijeska (standardnog ili iz tvrtke Holcim) zamijenjen je isti volumenskim udjelom PVC piljevine. Za izradu cementnih prizmi volumni udio PVC piljevine iznosio je 15% i 30 % volumena standardnog ili Holcim pijeska. Za izradu betonskih uzoraka maksimalni volumni udio PVC piljevine iznosio je 15% volumena pijeska jer se tokom izrade cementnih prizmi pokazalo da bi ugradnja betona sa 30% volumena PVC piljevine bila nemoguća.



Slika 1. Granulometrijski sastav standardnog pijeska
[\[https://www.normensand.de/en/products/cen-standard-sand-en-196-1/\]](https://www.normensand.de/en/products/cen-standard-sand-en-196-1/)

Oblik zrna		NPD
Veličina zrna		0/4 G _F 85
Gustoća zrna	ρ_a -prividna gustoća ρ_{rd} -gustoća osušenih zrna ρ_{ssd} -gustoća površinski suhih zrna	2,72 Mg/m ³ 2,60 Mg/m ³ 2,65 Mg/m ³
Čistoća čestica -Kvaliteta sitnih zrna		f_{10} MB=NPD; SE(10)=60
-Sadržaj školjki		NPD
Otpornost na fragmentaciju		LA ₃₀
Otpornost na poliranje		NPD
Otpornost na abraziju površine		NPD
Otpornost na habanje		M _{DE} 15
Sastav/Sadržaj		
-Sastav recikliranog agregata		NPD
-Kloridi		≤ 0,01 % C
-Sulfati topivi u kiselini		AS _{0,2}
-Ukupni sumpor		≤ 1 % S
-Sulfati topivi u vodi kod recikliranog agregata		NPD
-Sastojci koji utječu na vrijeme vezanja i stvrdnjavanja betona		NPD
-Utjecaj recikliranog agregata na vrijeme djelovanja cementa		NPD
-Sadržaj karbonata		NPD
Stabilnost volumena		
-Skupljanje pri sušenju		0,026 % WS
-Sastojci koji utječu na volumensku stabilnost		NPD
Upijanje vode		1,7 % WA

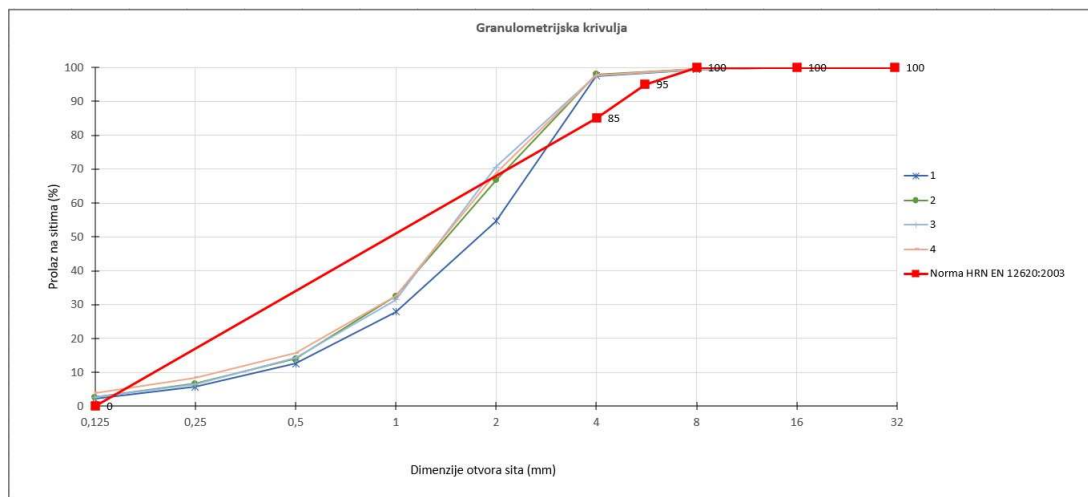
Tablica 2. Svojstva agregata frakcije 0-4 mm
[\[https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/agregati\]](https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/agregati)

2.3. PVC

Kao zamjena sitnog agregata korišten je otpadni materijal iz lokalne tvornice PVC stolarije . U nastavku rada korišteni PVC otpad nazivati ćemo PVC piljevina zbog njenog oblika (na slici broj 2 prikazan je oblik korištenog PVC otpada). U svrhu određivanja granulometrijskog sastava PVC piljevina je prosijana na sitima otvora 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 i 0.063 mm. Količina uzoraka za prosijavanje iznosila je 300g a postupak je ponovljen više puta. Na slici broj 3 prikazana je granulometrijska krivulja za ukupno četiri postupka sisanja. Prosijani materijal korišten je kao zamjena pijesku (standardnog ili Holcim pijeska) prilikom izrade cementnog morta za uzorke prizmi te za zamjenu agregata frakcije 0-4 mm za izradu betonskih uzoraka. Određena je i nasipna gustoća PVC piljevine u iznosu od 0,0989 g/cm³.



Slika 2. PVC piljevina



Slika 3. Granulometrijska krivulja PVC piljevine

3. CEMENTNI MORT

Detaljni opis svih mješavina od kojih su spravljani uzorci cementnog morta oblika prizme nalazi se u nastavku ovog poglavlja. Ukupno je spravljeno 7 mješavina cementnog morta: jedna referentna mješavina oznake CM-REF (bez PVC piljevine i sa standardnim pijeskom), tri mješavine s 15% PVC piljevine (oznake CM-PVC 15), od čega dvije mješavine sa standardnim pijeskom a jedna mješavina s Holcim pijeskom te tri mješavine s 30% PVC piljevine (oznake CM-PVC 30), od čega također dvije mješavine sa standardnim pijeskom a jedna mješavina s Holcim pijeskom. Uzorci mješavina sa standardnim pijeskom ispitani su nakon 28 dana od dana ugradnje u kalupe dok su uzorci mješavina sa Holcim pijeskom ispitani pri 7 dana starosti na tlačnu čvrstoću i čvrstoću savijanjem.

3.1. Ispitni uzorci

Svi ispitni uzorci su oblika prizme i standardnih dimenzija 40 mm × 40 mm × 160 mm, u skladu s normom HRN EN 196-1. Za svaku mješavinu napravljen je jedan set uzoraka koji se sastoji od ukupno 3 prizme.

3.2. Cementne mješavine

Nazivi mješavina sadrže podatke o volumnom udjelu PVC piljevine u mješavini. Na primjer, mješavine oznake CM-PVC 15 sadrže 15% volumena PVC piljevine koja zamjenjuje 15 % volumena standardnog pijesaka ili sitnog agregata. Količina PVC piljevine koju je potrebno zamijeniti dobivena je na način da se od potrebnih 1350 grama standardnog pijeska ili Holcimovog agregata izračunao volumen koji pijesak u mješavini zauzima korištenjem nasipne gustoće. Tom dobivenom volumenu oduzelo se 15% volumena koje će zamijeniti PVC piljevina. U nastavku je prikazan izračun za zamjenu standardnog pijeska nasipne gustoće 1,64 g/cm³:

$$\rho = \frac{m [kg]}{V [cm^3]} > V = \frac{m}{\rho} = \frac{1350}{1,64} = 823,17 \text{ cm}^3$$

$$823,17 \text{ cm}^3 * 0,15 = 123,48 \text{ cm}^3$$

Potrebno je zamijeniti 123,48 cm³ volumena pijeska sa PVC piljevinom.

$$m = V * \rho = 123,48 * 0,0989 = 12,23 \text{ g}$$

Izračunom se dobije da je za jedan set od triju uzoraka potrebno zamijeniti 1337,8 g standardnog pijeska s 12,23 g PVC piljevine. Po istom principu određena je količina PVC piljevine za mješavine oznake CM-PVC 30 te je dobiveno da za set od triju uzoraka je potrebno 24,47 g PVC piljevine i 1325,5 g standardnog pijeska.

3.2.1. Referentna mješavina CEM-REF

Za referentnu mješavinu korišteni su cement, pijeska i vode u omjeru 1:3:0,5, što znači 450 grama cementa, 1350 grama pijeska te 225 grama vode (u skladu s normom HRN EN 196-1). Izrađena je ukupno jedna mješavina za jedan set cementnih prizmi dimenzija 40 mm x 40 mm x 160 mm.

Mješavina je izrađena normiranim postupkom prema HRN EN 196-1 za izradu cementnih prizmi. Prvo je u posudu miksera dodano 250 grama vode i 450 grama pijeska te sve zajedno izmiješano u mikseru brzinom broj jedan u trajanju od 30 sekunda, zatim je u roku od sljedećih 30 sekunda dodavan pijesak te odmah nakon završetka dodavanja pijeska brzina je povećana na broj dva dodatnih 30 sekunda. Mikser je zaustavljen na 90 sekunda te se u roku prvih 30 s mješavina počistila sa lopatice i rubova zdjelice. Nakon toga još jednom je pokrenut mikser brzinom broj dva dodatnih 60 sekunda i s time završava postupak miješanja mješavine (na slici broj 4 prikazan je mikser sa mješavinom).

Nakon završetka miješanja gotovoj cementnoj mješavini izmjerena je temperatura od 22,5°C te ispitano svojstvo obradivosti metodom rasprostiranja. Postupak mjerenja rasprostiranja vršio se tako da se kalup, prethodno namazan uljem radi lakšeg odstranjivanja mješavine, punio u dva sloja. Prvo punjenje se vrši do pola kalupa te se sa čekićem normirane težine sabija mješavina sa 10 udaraca vlastite težine čekića, zatim se kalup prepunio te se opet sa čekićem 10 puta sabije mješavina, ako nedostaje mješavine u kalupu jednostavno se nadopuni do vrha kalupa te se odstrani višak mješavine. Uređaj za rasprostiranje se namjestio na 15 udaraca nakon čega je izmjeren promjer u dva okomita smjera. Promjeri su iznosili 18,5 cm i 19,4 cm (slika broj 5 i 6 prikazuju uređaj, kalup te mješavinu nakon izvršenog postupka).

Nakon ispitivanja obradivosti cementnog morta, napunjeni su kalupi, vibrirani na vibrostolu te stavljeni na njegovanje u vodu do dana ispitivanja (slika 7.).



Slika 4. Mikser i mješavina



Slika 5. Kalup i uređaj za rasprostiranje



Slika 6. Mješavina nakon izvršenog postupka rasprostiranja



Slika 7. Punjenje kalupa na vibrostolu

3.2.2. Mješavina CM-PVC 15

Nakon izrade referentne mješavine započeta je izrada cementnih mješavina sa 15 % volumnog udjela PVC-a. Ukupno su izrađene tri mješavine, po dvije mješavine sa standardnim pijeskom te jedna mješavina sa Holcim pijeskom (ukupno 3 seta odnosno 9 uzoraka).

Za izradu jednog seta mješavine sa 15% PVC piljevine potrebno je bilo 1337,8 grama pijeska (Holcim ili standardnog), 12,23 grama PVC piljevine, 450 grama cementa te 225 grama vode. Mješavine su izrađene po normi HRN EN 196-1 za izradu cementnih prizmi kao i referentna mješavina.

Za prvu mješavinu izmjerena je temperatura od 23,6 °C, dva okomita promjera pri ispitivanju rasprostiranjem od 14 cm i 15 cm i gustoća 2,201 kg/dm³. Druga mješavina sa 15% PVC-a imala je temperaturu od 24,3 °C, rasprostiranje mješavine iznosilo je 15,8 i 15,2 cm te gustoća 2,168 kg/dm³ (slika 8). Isto tako za mješavinu sa Holcim pijeskom izmjerena je od 23,7 °C, rasprostiranje je iznosilo 14,7 cm i 12,0 cm i gustoća 2,189 kg/dm³. Tokom miješanja uočen je problem s gubitkom obradljivosti mješavine (kao nedostatak vode) te je postupak ugradnje mješavine u kalup za test rasprostiranjem kao i ugradnja u kalupe za ispitivanje očvrsljih svojstava bio otežan (slika 9.). Prethodno ispisana svojstva mješavina prikazan su u tablici broj 3.

SVOJSTVA SVJEŽE MJEŠAVINE					
Naziv mješavine	korišteni pijesak	Postotak PVC-a [%]	temperatura smjese [°C]	rasprostiranje [cm]	gustoća [kg/dm ³]
CM-PVC 15.1	standardni	15	23,6	14,5	2,201
CM-PVC 15.2	standardni	15	24,3	15,5	2,168
CM-PVC 15.3	holcim	15	23,7	13,35	2,189
CM-PVC 30.1	standardni	30	23,5	12,4	2,174
CM-PVC 30.2	standardni	30	23,9	11,95	2,116
CM-PVC 30.3	holcim	30	23,5	17,7	2,155

Tablica 3. Svojstva svježe cementne mješavine



Slika 8. Izgled mješavine nakon rasprostiranja



Slika 9. Suha mješavina (gubitak vode)

3.2.3. Mješavina CM-PVC 30

Za mješavine sa 30% PVC piljevine potrebno je bilo 1325,5 grama pijeska, 24,47 grama PVC piljevine, 450 grama cementa te 225 grama vode. Mješavine su izrađene po normi HRN 196-1., ponovno je uočen problem gubitka obradljivosti uslijed nedostatka vode (prikazano na slici broj 9) te je ugradnja u kalupe bila otežana.

Na temelju rezultata danih u Tablicu 3 vidi se da je temperatura prve mješavina sa 30% PVC piljevine bila 23,5 °C , rasprostiranje 12,4 cm u oba okomita smjera a gustoća mješavine iznosila je 2,174 kg/dm³. Za drugu mješavina sa 30 % PVC-a izmjerena je temperaturu od 23,9 °C, rasprostiranje je iznosilo 12,4 te 11,5 cm te gustoća gotove mješavine iznosila je 2,116 kg/dm³. Također za mješavinu sa Holcim pijeskom izmjerena je temperatura od 23,5 °C te rasprostiranje je iznosilo 17,7 cm.

Nakon ugradnje u kalupe, kalupi su vibrirani na vibrostolu te prikazani na slici broj 10.



Slika 10. Kalupi spremni za njegovanje

4. SVOJSTVA OČVRSLOG CEMENTNOG MORTA

Neposredno prije ispitivanja cementne prizme su izvađene iz vode u kojoj su njegovane te im je odstranjena površinska voda. Isti su izvagani te su izmjerene dimenzije visine, širine i dužine sa dvije različite strane (za ispitivanje se uzima aritmetička sredina dviju izmjerenih jedinica). U nastavku u tablicama 4 – 10 su prikazane izmjerene dimenzije i mase

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE	DATUM ISPITIVANJA	
	CM-referentna		9.6.2020	6.7.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	40,6	160,37	40,11	572,8	2,193315888
2	41,11	160,26	40,21	583,2	2,201460143
3	40,74	160,2	40,09	584,1	2,232377381

Tablica 4. Dimenzije uzoraka referentne mješavine REF

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE	DATUM ISPITIVANJA	
	CM-PVC 15/holcim		8.6.2020	15.6.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	41,3	160,95	40,9	582,5	2,142553075
2	41,34	160,36	40,11	591,4	2,22414009
3	41,44	160,13	40,11	586,1	2,202047126

Tablica 5. Dimenzije uzoraka CM-PVC 15/Holcim

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE	DATUM ISPITIVANJA	
	CM-PVC 30/holcim		8.6.2020	15.6.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	40,74	159,95	40	549,5	2,108154503
2	40,54	159,99	39,99	552,1	2,128578937
3	41,15	160,26	40,01	561,3	2,127313582

Tablica 6. Dimenzije uzoraka CM-PVC 30/Holcim

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE	DATUM ISPITIVANJA	
	CM-PVC 15.1/standardni		9.6.2020	6.7.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	40,69	160,54	40,09	567,2	2,165854199
2	40,34	160,87	40,11	566,3	2,175619506
3	40,8	160,91	40,08	567,5	2,156725906

Tablica 7. Dimenzije uzoraka CM-PVC 15.1/standardni

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE	DATUM ISPITIVANJA	
	CM-PVC 15.2/standardni		9.6.2020	6.7.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	40,3	160,41	40,21	555	2,135120671
2	40,9	160,4	40,08	558,4	2,123684634
3	40,66	160,46	40,16	560,2	2,138037106

Tablica 8. Dimenzije uzoraka CM-PVC 15.2/standardni

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE	DATUM ISPITIVANJA	
	CM-PVC 30.1/standardni		9.6.2020	6.7.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	40,37	159,89	40,08	555,7	2,147991864
2	40,64	160,01	40,03	564,9	2,170127049
3	41,22	159,96	40,16	553,3	2,089525056

Tablica 9. Dimenzije uzoraka CM-PVC 30.1/standardni

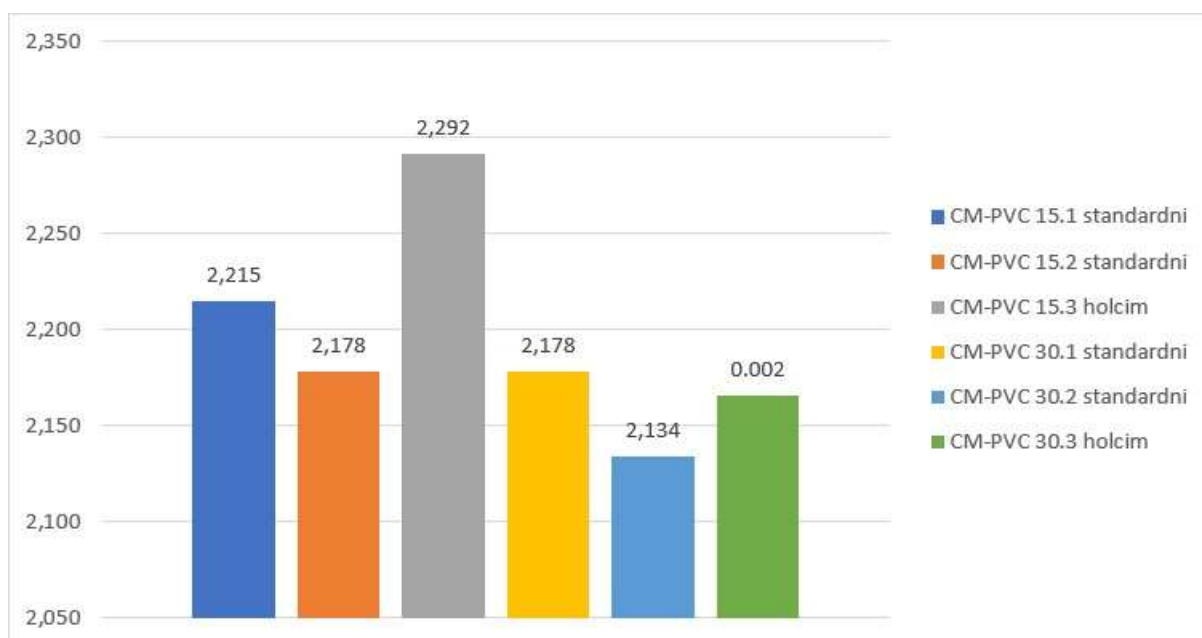
BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE	DATUM ISPITIVANJA	
	CM-PVC 30.2/standardni		9.6.2020	6.7.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	39,95	160,87	40,11	548	2,125866807
2	40,18	160,22	40,13	540,1	2,090635679
3	40,7	160,33	40,16	551,6	2,104850969

Tablica 10. Dimenzije uzoraka CM-PVC 30.2/standardni

Kao što se vidi u tablicama značajna je razlika u masama uzoraka koji sadrže PVC te referentne mješavine bez PVC-a, čak do 40 grama razlike. uzoraka. U tablici broj 11 i na slici broj 11 prikazana je srednja vrijednost gustoće po mješavini. Također, razlika je uočljiva i u gustoćama

SVOJSTVA UČVRSLIH UZORAKA					
Naziv mješavine	korišteni pijesak	Postotak PVC-a [%]	masa uzoraka [kg]	volumen [dm ³]	gustoća [kg/dm ³]
CM-referentna	standardni	0	1,74	0,768	2,266
CM-PVC 15.1	standardni	15	1,701	0,768	2,215
CM-PVC 15.2	standardni	15	1,673	0,768	2,178
CM-PVC 15.3	holcim	15	1,76	0,768	2,292
CM-PVC 30.1	standardni	30	1,673	0,768	2,178
CM-PVC 30.2	standardni	30	1,639	0,768	2,134
CM-PVC 30.3	holcim	30	1,663	0,768	2,165

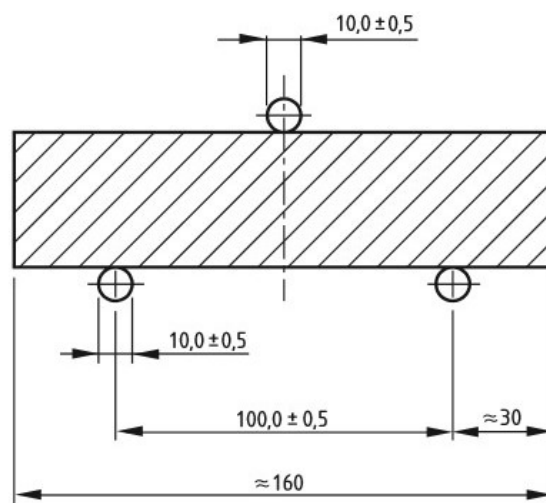
Tablica 11. Izračun gustoća očvrsljih uzoraka



Slika 11. Odnos gustoća očvrsljih uzoraka

4.1 Čvrstoća savijanjem na uzorcima starosti 7 dana

Na jednom setu uzoraka CM-PVC 15 i jednom setu uzoraka CM-PVC 30, s Holcim pijeskom, ispitivanje čvrstoće na savijanje provedeno je pri starosti uzoraka od 7 dana. Ispitivanje se vršilo po normi HRN EN 196-1 u uređaju za ispitivanje savojne čvrstoće. Uređaj mora zadovoljavati slijedeće norme: uređaj mora biti sposoban podnijeti opterećenja do 10 kN, mora biti opremljen sa fleksibilnim/mobilnim zglobom koji uključuje dva čelična potporna valjka promjera ($10,0 \pm 0,5$ mm) razmaknutih ($100,0 \pm 0,5$ mm) i treći čelični valjak istog promjera smještenog u sredinu između ostale dvije preko kojeg se prenosi opterećenje. Duljina valjaka mora biti između 45 mm i 50 mm (slika broj 12).



Slika 12. Raspored valjaka sa uzorkom u uređaju za ispitivanje [Norma HRN EN 196-1]

Ispitivanje savojne čvrstoće provedeno je na sva tri uzorka od svake mješavine prema primjeru ispitivanja danom na slici 13, metodom kontrole sile, a rezultati su prikazani u obliku dijagrama sila u vremenu. Na temelju izmjerenih sila sloma izračunata je čvrstoća na savijanje korištenjem izraza iz norme HRN EN 196-1 :

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

Gdje je

R_f – čvrstoća savijanjem [MPa]

F_f – granična sila sloma [N]

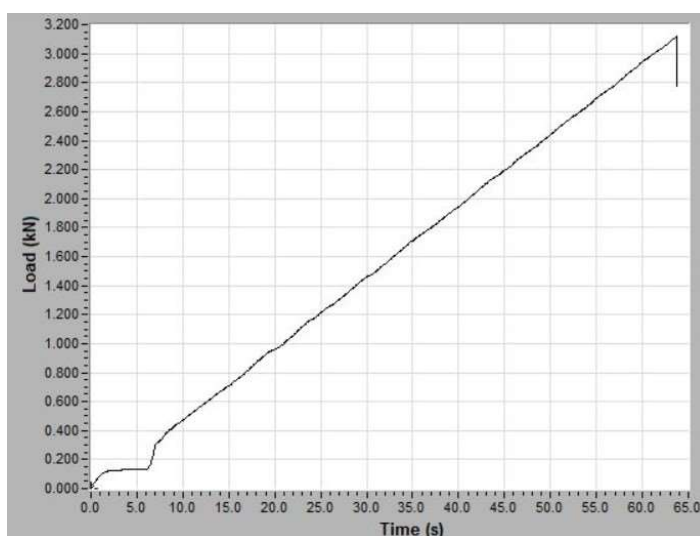
b – širina uzorka [mm]

l – razmak između donjih oslonaca uređaja [mm]



Slika 13. Uzorak nakon ispitivanja

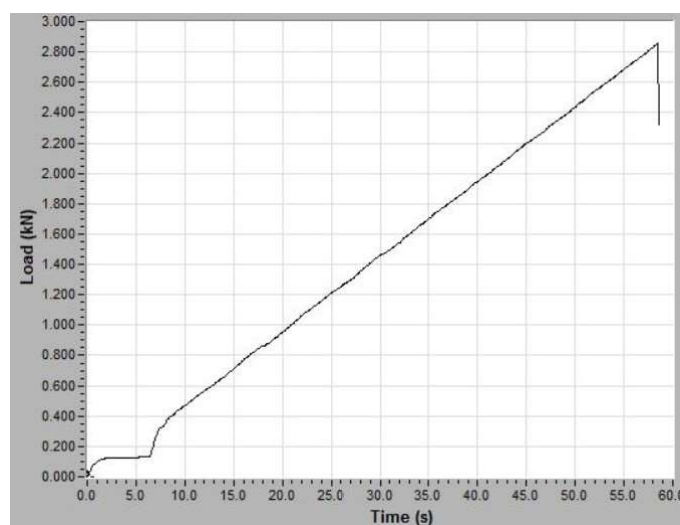
Za svaki uzorak mješavine CM-PVC 15 dobivena su tri grafa nakon ispitivanja te sila i oblik sloma uzoraka (na slici broj 14 prikazan je karakteristični graf koji se dobije prilikom izvođenja ispitivanja). U tablici broj 12 prikazan je izračun savojne čvrstoće za pojedini uzorak te aritmetička sredina triju uzoraka. Također za uzorke CM-PVC 30 prikazan je karakteristični graf na slici broj 15 te izračun čvrstoće savijanjem u tablici broj 13. Za izračun čvrstoće savijanjem korištena je prethodno navedena formula iz norme HRN EN 196-1.



Slika 14. Karakteristični graf ispitivanja čvrstoće savijanja uzoraka CM-PVC 15

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	ČVRSTOČA SAVIJANJA	
	CM-PVC 15		15.6.2020		
	b [mm]	Ff [kN]	udaljenost oslonaca (l)	Rf [MPa]	Rfuk [Mpa]
1	40	3,18	100	7,453125	7,50078125
2	40	3,304	100	7,74375	
3	40	3,117	100	7,30546875	

Tablica 12. Čvrstoća savijanjem CM-PVC 15



Slika 15. Karakteristični graf ispitivanja čvrstoće savijanja uzoraka CM-PVC 30

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	ČVRSTOČA SAVIJANJA	
	CM-PVC 30		15.6.2020		
	b [mm]	Ff [kN]	udaljenost oslonaca (l)	Rf [MPa]	Rfuk [Mpa]
1	40	2,857	100	6,69609375	7,03515625
2	40	3,094	100	7,2515625	
3	40	3,054	100	7,1578125	

Tablica 13. Čvrstoća savijanjem CM-PVC 30

4.2 Čvrstoća savijanjem na uzorcima starosti 28 dana

Uzorci mješavine CM-REF, CM-PVC 15 i CM-PVC 30 koji su izrađeni od standardnog pijeska ispitivani su metodom kontrole sile i pomaka pri starosti od 28 dana. Po jedan set uzoraka od mješavine CM-PVC 15 i CM-PVC 30 ispitan je metodom kontrole pomaka (ukupno 6 uzoraka) a ostali uzorci i uzorci referentne mješavine metodom kontrole sile (ukupno 9 uzoraka).

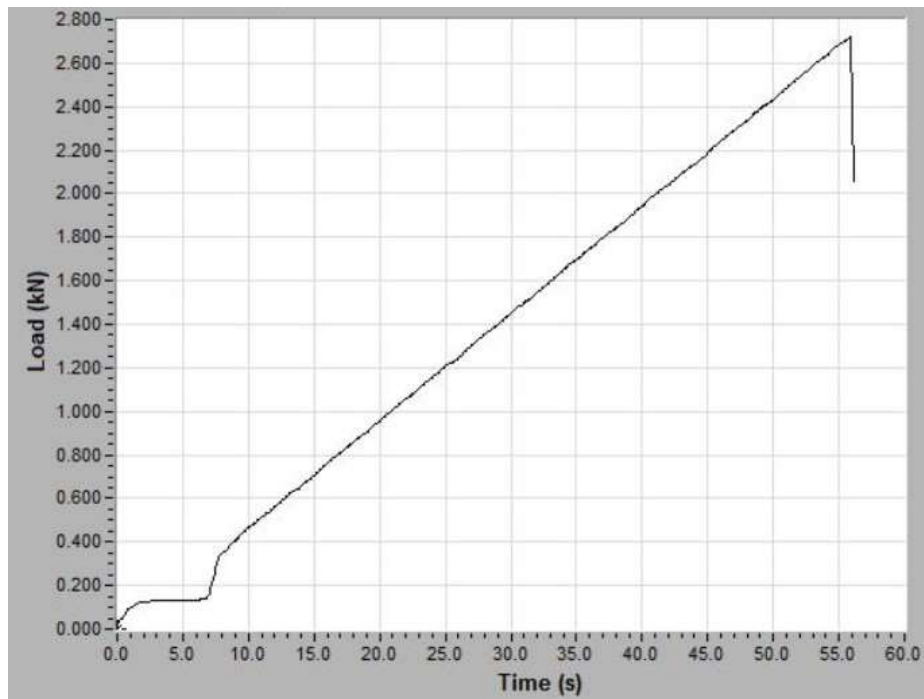
4.2.1. Ispitivanje metodom kontrole sile

Ispitivanje metodom sila izvedeno je isto kao i za uzorke ispitane pri starosti od 7 dana po normi HRN EN 196-1. Nakon izračuna svih potrebnih mjera i dimenzija za testiranje započeto je ispitivanje uzoraka metodom kontrole sile (slika 16.) Za ispitivanje metodom kontrole sila korišten je jedan set uzoraka mješavine REF, CM-PVC 15 i CM-PVC 30. Nakon provedenog ispitivanja dobiveni su grafovi opterećenja u vremenu te maksimalne vrijednosti sile prije sloma uzorka. U nastavku su priloženi karakteristični grafovi ispitanih uzoraka za svaku mješavinu (Slika 17-19) te savojna čvrstoća za pojedini uzorak i aritmetička sredina po mješavini svih ispitanih uzoraka (Tablica 14-16).

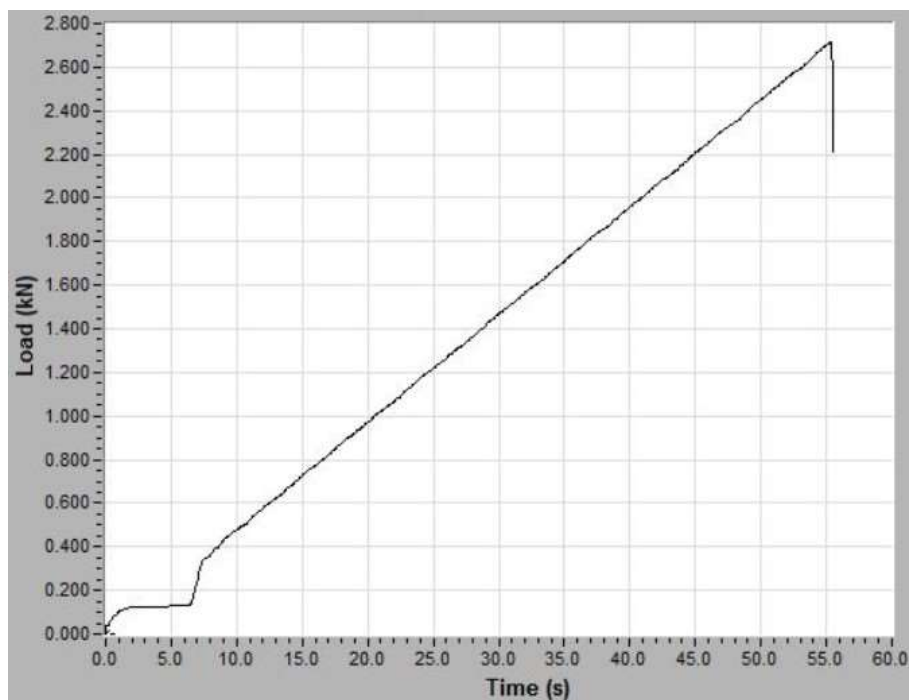
Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je da nema velike razlike u čvrstoći savijanjem za uzorke sa 15% i 30 % PVC piljevine međutim u usporedbi sa uzorcima referentne mješavine razlika iznosi otprilike 10%.



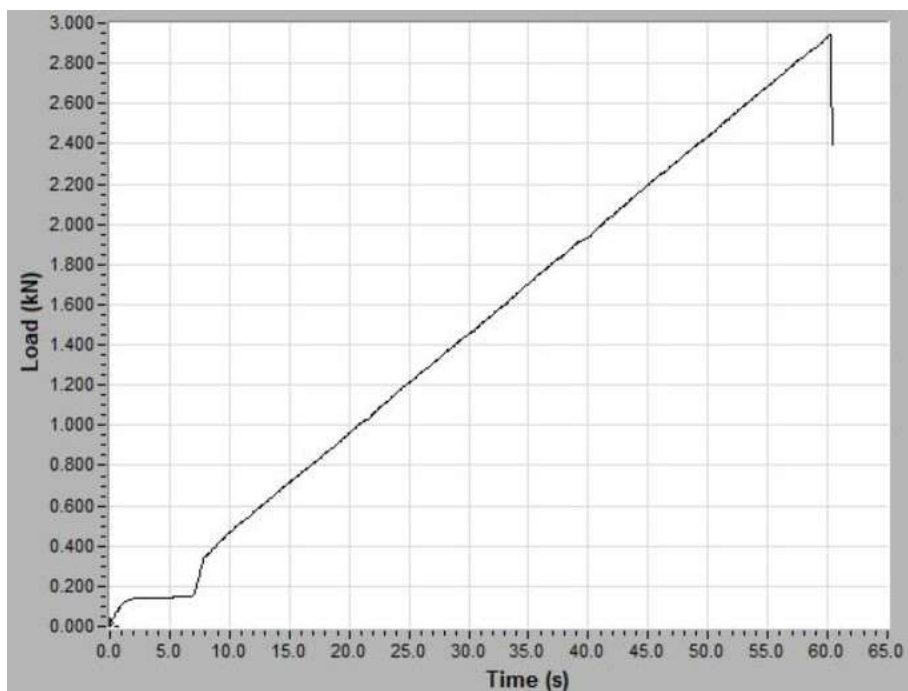
Slika 16. Uzorak u uređaju za testiranje metodom kontrole pomaka te LVDT ispod



Slika 17. Karakteristični graf CM-PVC 15



Slika 18. Karakteristični graf CM-PVC 30



Slika 19. Karakteristični graf CM-referentna

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	ČVRSTOČA SAVIJANJA	
	b [mm]	Ff [kN]	udaljenost oslonaca (l)	Rf [MPa]	Rfuk [Mpa]
	CM-PVC 15		6.7.2020		
1	40	2,592	100	6,075	6,30390625
2	40	2,722	100	6,3796875	
3	40	2,755	100	6,45703125	

Tablica 14. Čvrstoća savijanjem za uzorak CM-PVC 15

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	ČVRSTOČA SAVIJANJA	
	b [mm]	Ff [kN]	udaljenost oslonaca (l)	Rf [MPa]	Rfuk [Mpa]
	CM-PVC 30		6.7.2020		
1	40	2,718	100	6,3703125	6,42265625
2	40	2,751	100	6,44765625	
3	40	2,752	100	6,45	

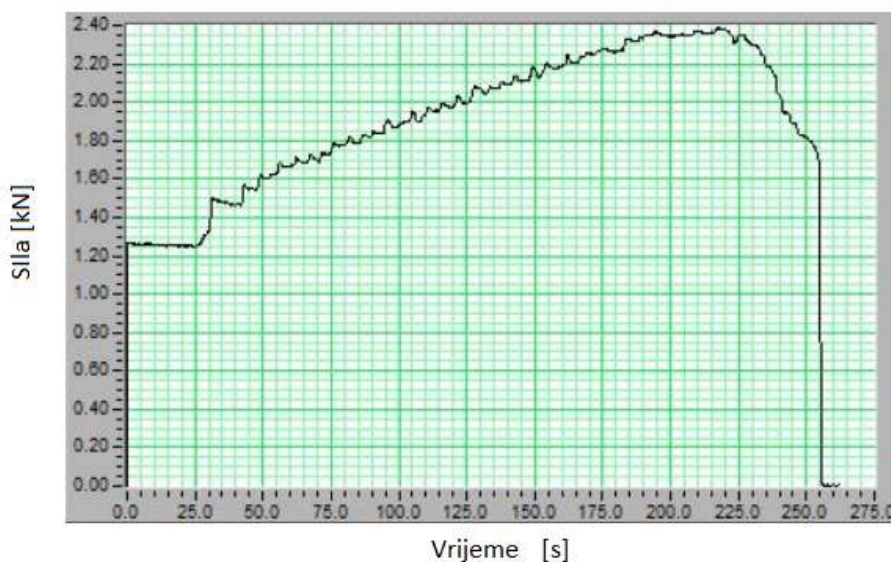
Tablica 15. Čvrstoća savijanjem za uzorak CM-PVC 30

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	ČVRSTOČA SAVIJANJA	
	b [mm]	Ff [kN]	udaljenost oslonaca (l)	Rf [MPa]	Rfuk [Mpa]
	CM-referentna		6.7.2020		
1	40	2,943	100	6,89765625	6,9765625
2	40	2,921	100	6,84609375	
3	40	3,066	100	7,1859375	

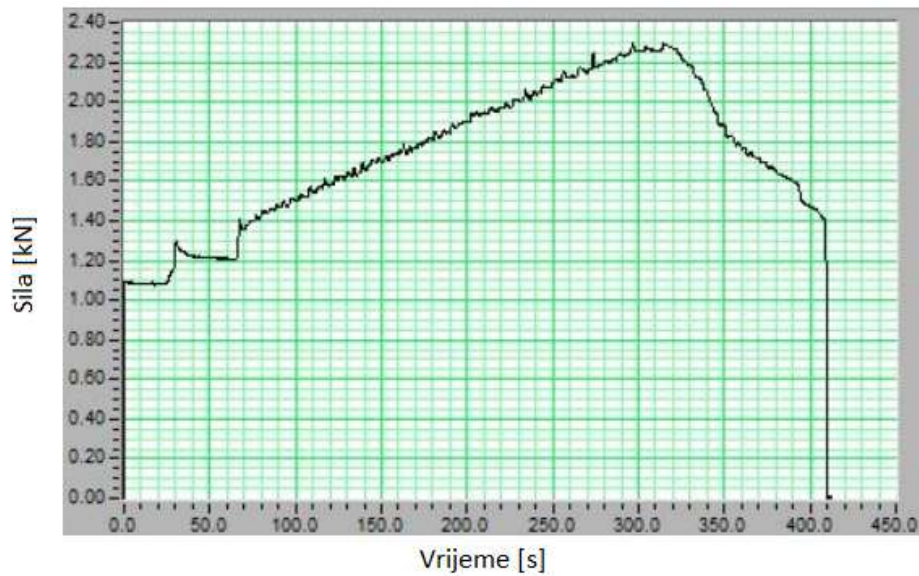
Tablica 16. Čvrstoća savijanjem za uzorak CM-referentna

4.2.2. Ispitivanje metodom kontrole pomaka

Završetkom ispitivanja metodom kontrole sile započeto je ispitivanje metodom kontrole pomaka. Uzorak je postavljen na oslonce udaljene 100 mm te između njih je postavljen LVDT (Linearni Varijabilni Diferencijalni Transformer (slika 16.), mjernog područja 10 mm) uređaj na sredini uzorka kako bi izmjerio pomak prilikom nanošenja opterećenja (prikazano na slici 16). U postavkama programa namješten je nanos opterećenja na 2 N/s. Prilikom trajanja testa opterećenje se nanosilo s gornje strane uzorka dok je LVDT mjerio pomak sa donje strane uzorka te prenosio pomak u vremenu na računalo koje je iscrtavalo graf. Na slikama broj 20 i 21 prikazani su karakteristični grafovi opterećenja u vremenu za pojedine uzorke te u tablicama broj 17 i 18 prikazani su dobiveni pomaci od pojedinih uzoraka te granične sile koje su nanošene prilikom testiranja do sloma uzorka.



Slika 20. Karakteristični graf CM-PVC 15/pomak



Slika 21. Karakteristični graf CM-PVC 30/pomak

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	ČVRSTOČA SAVIJANJA		
	CM-PVC 15		6.7.2020	KONTROLA POMAKA		
	b [mm]	Ff [kN]	udaljenost oslonaca (l)	pomak prije loma [μ]	Rf [MPa]	Rfuk [MPa]
1	40	2,53	100	27,39	5,9296875	5,6484375
2	40	2,39	100	29,68	5,6015625	
3	40	2,31	100	32,19	5,4140625	

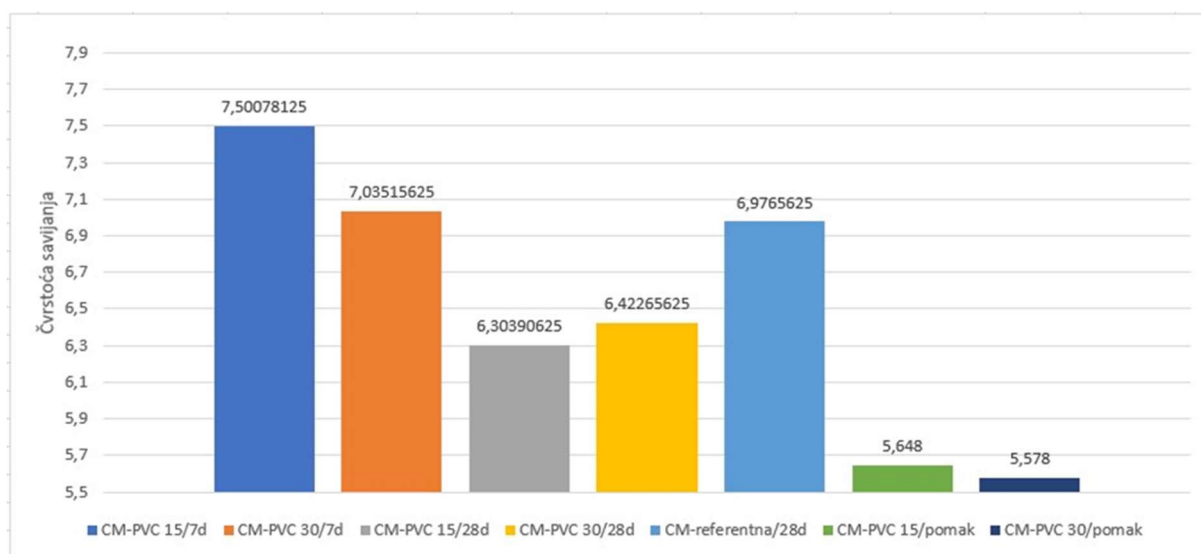
Tablica 17. Izračun čvrstoće savijanja za uzorak CM-PVC 15 sa pomakom

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	ČVRSTOČA SAVIJANJA		
	CM-PVC 30		6.7.2020	KONTROLA POMAKA		
	b [mm]	Ff [kN]	udaljenost oslonaca (l)	pomak prije loma [μ]	Rf [MPa]	Rfuk [MPa]
1	40	2,54	100	29,46	5,953125	5,578125
2	40	2,29	100	48,77	5,3671875	
3	40	2,31	100	38,63	5,4140625	

Tablica 18. Izračun čvrstoće savijanja za uzorak CM-PVC 30 sa pomakom

4.3. Usporedba rezultata čvrstoće savijanjem

Na slici 22 dana je usporedba čvrstoća savijanjem dobivenih prilikom ispitivanja uzoraka nakon 7 i 28 dana starosti. Vidljiv je značajan pad čvrstoće od 13% nakon 28 dana u usporedbu na čvrstoću od 7 dana. Također, uočeno je da nakon 7 dana čvrstoća uzorka PVC-CM 15 je veća od čvrstoće uzorka PVC-CM 30 za 7% dok nakon 28 dana je obrnuto, veća je čvrstoća uzorka CM-PVC 30 za 2%. Isto tako vidljiva je razlika u čvrstoćama dobivenim metodom kontrole sile i metodom kontrole pomaka. Za uzorak CM-PVC 15 čvrstoća savijanja metodom kontrole pomaka je manja za 10% od čvrstoće savijanja mjerene metodom kontrole sila 28 dana od ugradnje, također za uzorak CM-PVC 30 vidljivo je kako je čvrstoća mjerena metodom kontrole pomaka manja za 13% od čvrstoće mjerene metodom kontrole sila. Očekivano je da će uzorci sa PVC piljevinom imati manju čvrstoću od uzoraka referentne mješavine, u odnosu na uzorke referentne mješavine čvrstoća uzoraka nakon 28 dana za CM-PVC 15 je manja za 10% te za uzorke CM-PVC 30 za 8%.



Slika 22. Usporedba čvrstoća savijanjem

4.4. Tlačna čvrstoća na uzorcima starosti 7 dana

Nakon ispitivanja savojne čvrstoće uslijedilo je ispitivanje uzoraka na tlačnu čvrstoću. Korištene su polovice uzoraka nastale nakon ispitivanja na čvrstoću savijanjem (slika 23). Također se ispitivanje vršilo po normi HRN EN 196-1 u standardnom uređaju.



Slika 23. Polovica uzorka u uređaju za ispitivanje tlačne čvrstoće

Nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje uzoraka CM-PVC 15 i CM-PVC 30 sa Holcim pijeskom nakon 7 dana, provedeno je ispitivanje tlačne čvrstoće na ukupno po šest uzoraka od svake mješavine. Nakon ispitivanja (nakon sloma) uzorka, vidljiv je lom uzorka u obliku pješčanog sata koji se može vidjeti djelomično na slici br. 23 te na slici br. 24.



Slika 24. Oblik pješčanog sata nakon sloma uzorka

Kao rezultat ispitivanja dobiveni su graf opterećenja u vremenu sa maksimalnim vrijednostima sila prije sloma uzorka. Dobivene vrijednosti iz grafa prikazane su u tablicama broj 19 i 20 sa izračunom tlačne čvrstoće po sljedećoj formuli:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

gdje je

R_c – tlačna čvrstoća [MPa]

F_c – granična vrijednost sile prije sloma [N]

1600 – površina na kojoj djeluje sila F_c (40x40 mm)

Vidljivo je smanjenje tlačne čvrstoće sa povećanjem udjela PVC piljevine u uzorcima.

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	TLAČNA ČVRSTOĆA
	CM-PVC 15		15.6.2020	
	površina [mm]	F_c [kN]	R_c [Mpa]	
15_1_1	40x40	65,43	40,89375	
15_1_2	40x40	64,07	40,04375	
15_2_1	40x40	72,09	45,05625	R_{cuk} [Mpa]
15_2_2	40x40	70,03	43,76875	41,432
15_3_1	40x40	66,84	41,775	
15_3_2	40x40	59,29	37,05625	

Tablica 19. Tlačna čvrstoća uzorak CM-PVC 15/7d

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	TLAČNA ČVRSTOĆA
	CM-PVC 30		15.6.2020	
	površina [mm]	F_c [kN]	R_c [Mpa]	
30_1_1	40x40	52,17	32,60625	
30_1_2	40x40	52,67	32,91875	
30_2_1	40x40	57,53	35,95625	R_{cuk} [Mpa]
30_2_2	40x40	58,03	36,26875	34,876
30_3_1	40x40	58,31	36,44375	
30_3_2	40x40	56,1	35,0625	

Tablica 20. Tlačna čvrstoća za uzorak CM-PVC 30/7d

4.5. Tlačna čvrstoća na uzorcima starosti 28 dana

Na isti način provedeno je ispitivanje na uzorcima koji su ispitani na čvrstoću savijanja metodom kontrole sile i pomaka 28 dana nakon ugradnje u kalupe. Također se ispitivanje provodilo na svakoj polovici uzorka nakon sloma, sveukupno je bilo 18 polovica prizmi za ispitivanje na tlačnu čvrstoću (6 polovica od svake mješavine sa dodatkom PVC-piljevine te 6 polovica referentne mješavine). Prilikom ispitivanja uzoraka CM-referentne te uzoraka sa PVC-piljevinom zapaženo je da nakon provedenog ispitivanja slom u obliku pješčanog sata je vidljiviji na uzorcima referentne mješavine te je lakše odstraniti slomljene dijelove dok kod uzoraka sa PVC-piljevinom nije sasvim izražen pješčani sat te odstranjivanje odlomljenih dijelova uzorka je otežano. Razlog tome je PVC – piljevina koja pridržava odlomljene dijelove da se ne odlome do kraja (na slici 25 vidi se razlika uzoraka nakon ispitivanja).



Slika 25. Usporedba uzorka nakon ispitivanja na tlačnu čvrstoću, lijevo bez PVC piljevine te desno sa PVC piljevinom

U nastavku su prikazane tablice sa dobivenim vrijednostima iz grafova te izračunom tlačnih čvrstoća pomoću granične sile prije sloma uzorka (tablice 21–23)

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	TLAČNA ČVRSTOĆA
	CM-PVC 15		6.7.2020	
	površina [mm]	Fc [kN]	Rc [Mpa]	
15_1_1	40x40	64,57	40,35625	
15_1_2	40x40	66,82	41,7625	
15_2_1	40x40	64,51	40,31875	Rcuk [Mpa]
15_2_2	40x40	65,14	40,7125	40,609
15_3_1	40x40	64,87	40,54375	
15_3_2	40x40	63,94	39,9625	

Tablica 21. Tlačna čvrstoća za uzorak CM-PVC 15/28d

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	TLAČNA ČVRSTOĆA
	CM-PVC 30		6.7.2020	
	površina [mm]	Fc [kN]	Rc [Mpa]	
15_1_1	40x40	62,92	39,325	
15_1_2	40x40	58,53	36,58125	
15_2_1	40x40	70,1	43,8125	Rcuk [Mpa]
15_2_2	40x40	61,7	38,5625	38,626
15_3_1	40x40	60,45	37,78125	
15_3_2	40x40	57,11	35,69375	

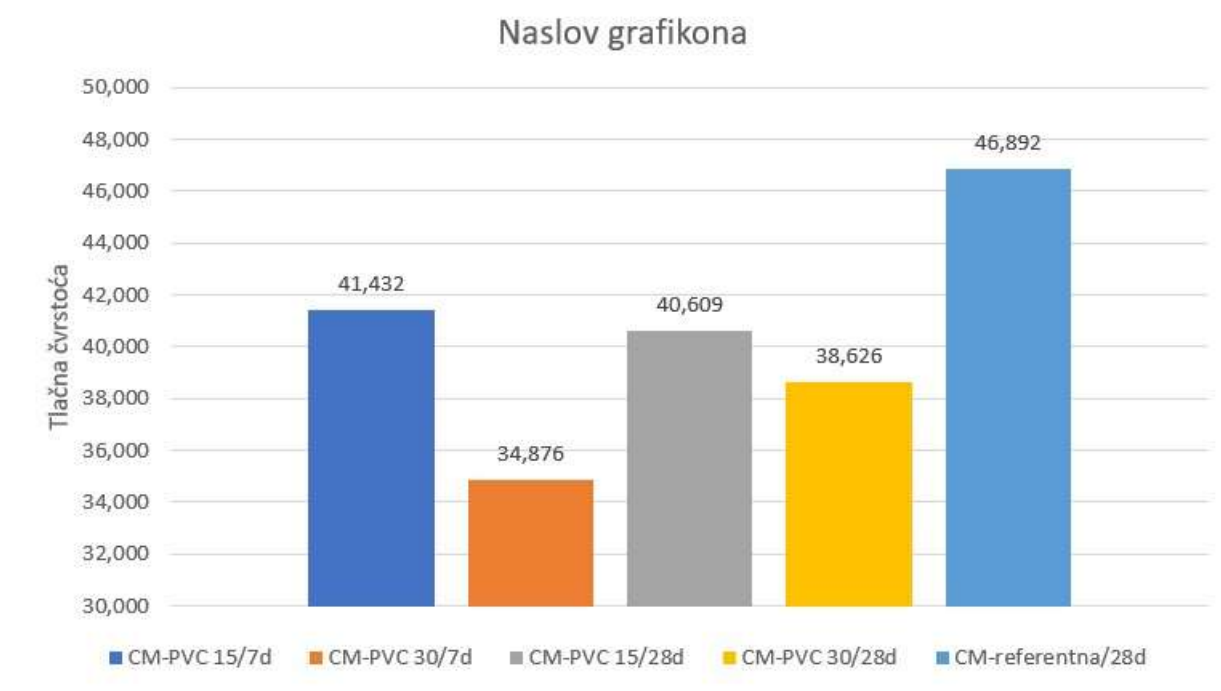
Tablica 22. Tlačna čvrstoća za uzorak CM-PVC 30/28d

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	TLAČNA ČVRSTOĆA
	CM-referentna		6.7.2020	
	površina [mm]	Fc [kN]	Rc [Mpa]	
15_1_1	40x40	73,4	45,875	
15_1_2	40x40	73,4	45,875	
15_2_1	40x40	75,35	47,09375	Rcuk [Mpa]
15_2_2	40x40	75,85	47,40625	46,892
15_3_1	40x40	77,05	48,15625	
15_3_2	40x40	75,11	46,94375	

Tablica 23. Tlačna čvrstoća za uzorak CM-referentna/28d

4.6 Usporedba rezultata tlačne čvrstoće

Na slici broj 26 prikazana je usporedba tlačnih čvrstoća ispitanih nakon 7 i 28 dana od ugradnje u kalupe. Vidljiv je porast tlačne čvrstoće za uzorak CM-PVC 30 nakon 28 dana za 10% u usporedbi sa tlačnom čvrstoćom nakon 7 dana istog uzorka te lagani pad tlačne čvrstoće uzorka CM-PVC 15 za 2%. Također vidljiva je značajna razlika tlačnih čvrstoća uzorka sa PVC piljevinom i uzorka referentne mješavine, u odnosu na referentnu mješavinu tlačna čvrstoća uzorka CM-PVC 15 je manja za 13% a uzorka CM-PVC 30 za čak 22%.



Slika 26. Usporedba tlačnih čvrstoća

5. BETON

Nakon ispitivanja na uzorcima prizmi od cementnog morta s PVC-om projektirane su dvije recepture betonskih mješavina.. Ukupno su spravljene 3 mješavine: jedna referentne mješavina oznake B-REF (bez PVC piljevine) te dvije mješavine s 15% PVC piljevine (oznake B-PVC 15). Jedna od dviju betonskih mješavina s 15% PVC-a te referentna mješavina ispitane su nakon 28 dana od dana ugradnje u kalupe. Preostala mješavina sa 15% PVC-a planira se ispitati kasnije kako bi se promatrao utjecaj PVC-a na čvrstoću beton sa starošću.

5.1. Ispitni uzorci

Uzorci oblika kocke 150 mm x 150 mm x 150 mm korišteni su za ispitivanja tlačne čvrstoće a uzorci oblika prizme dimenzija 100 mmx 100 mm x 400 mm za ispitivanja čvrstoće savijanjem. Također, izrađeni su uzorci oblika valjka za ispitivanje čvrstoće cijepanjem dimenzija 150 mm x300 mm, uzorci oblika valjka za ispitivanje vodopropusnosti 100 mm x 200 mm te kocke za ispitivanje habanja dimenzija 70mm x 70 mm x 70 mm, međutim oni nisu sastavni dio teme ovog završnog rada.

5.2 Betonske mješavine

Izrađena je jedna referentna betonska mješavinu bez PVC piljevine (oznaka B-REF) te dvije betonske mješavine kod kojih je udio pijeska zamijenjen sa 15% PVC piljevine (oznake B-PVC 15).

5.2.1 Referentna mješavina B-REF

Za izradu 61 l betonske referentne mješavine oznake B-REF potrebno je 22,6 kg cementa , 11,6 kg vode te agregata u frakcijama:

0 do 4 – 47,6 kg

4 do 8 – 20,9 kg

8 do 16 – 36,9 kg

Mješavina je izrađena na način da su se u miješalicu prvo ubacili suhi sastojci te su se miješali 30 sekunda, zatim se ubacila voda i nastavilo se miješati dodatnih 90 sekunda (slika broj 27

prikazuje ubacivanje vode u suhu mješavinu). Nakon miješanja, svježa mješavina je ugrađena u prethodno pripremljene kalupe za ispitivanje čvrstoće tlak i na savijanje: 3 kalupa za ispitivanje tlačne čvrstoće te 6 kalupa za ispitivanje čvrstoće savijanjem, a preostala mješavina u 3 kalupa za ispitivanje čvrstoće na cijepanje, 3 kalupa za ispitivanje vodo propusnosti te 5 kalupa za ispitivanje otpornosti na abraziju.

Prilikom ugrađivanja mješavine u pripremljene kalupe pomoću posude volumena 3 l te kalupa prizme dimenzija 100 mm × 100 mm × 400 mm, na temelju izmjerenih masa i poznatih volumenima izračunata je gustoća gotove mješavine čija srednja vrijednost iznosi 2,364 kg/dm³. Također, ispitana je i obradivost betonske mješavine metodom rasprostiranja prema normi HRN EN 12350-5. Rezultat mjerenja dva okomita promjera rasprostiranja za referentnu mješavinu je iznosio 37,5 i 35,5 cm te njihova srednja vrijednost je 36,5 cm (slika 28.). Nakon ispitivanja obradivosti svježi beton je ugrađen u kalupe na takav način da se kalup napunio u jednom sloju malo preko vrha a zatim vibrirao na vibrostolu u trajanju od 10 sekunda. Ukoliko je bilo potrebno dodati još mješavine kalup bi se opet prepunio te vibrirao dodatnih 5 sekunda a ostatak mješavine što se prelio van kalupa se odstranio lopaticom.



Slika 27. Ubacivanje vode u suhu mješavinu

Nakon ugradnje betona u kalupe uzorci su 24 h njegovani u laboratoriju na zraku (slika 29.) a zatim u vodi do dana ispitivanja,.



Slika 28. Mjerenje rasprostiranja svježeg betona



Slika 29. Uzorci nakon ugradnje

5.2.2 Mješavina B-PVC 15

Izrađene su dvije betonska mješavine oznake B-PVC 15 kod kojih je količina sastojaka ista (15% volumena pijeska zamijenjeno sa PVC piljevinom) a samo postupak spravljanja mješavine se razlikuje.

Za 61 l betonske mješavine korišteno je: 22,9 kg cementa, 11,7 kg vode, 3,5 kg PVC piljevine te agregata u frakcijama :

0 do 4 – 41,1 kg

4 do 8 – 21,3 kg

8 do 16 – 37,5 kg

Za prvu mješavinu postupak miješanja sastojaka u miješalici bio je isti kao i za referentnu mješavinu, dakle 30 sekundi suhi sastojci a nakon dodavanja vode miješanje u trajanju 90 sekundi Također, nakon završetka miješanja svježa betonska mješavina ugrađivana je u kalupe istih oblika i dimenzija kao i referentna mješavina. Prilikom ugrađivanja u kalupe ponovno se pojavila poteškoća sa „gubitkom obradljivosti“ zbog nedostatka vezane vode kao i prilikom izrade cementnih prizma (prikazano na slici broj 29). Postupak ugradnje svježe mješavine u kalupe bio je izrazito težak zbog nedostatka likvidnosti mješavine. Zaključeno je da moguć razlog tome je da PVC piljevina na sebe prikupi vodu u obliku filma zbog sila adhezije te uslijed toga ne dopušta uobičajenu reakciju vezivanja vode s cementom .

Unatoč poteškoćama prilikom ugradnje, odlučeno je da se mješavina ispita po uzoru na referentnu betonsku mješavinu. Prema tome, korištenjem posude volumena 3 l izračunata je gustoća svježeg betona u iznosu od $2,1 \text{ kg/dm}^3$. Isto tako, provedeno je ispitivanje rasprostiranja svježe mješavine kao i za referentnu mješavinu betona te su izmjereni rezultati dva okomita promjera od 54 i 58,6 cm te srednja vrijednost od 56,3 cm. Dobiveni rezultati rasprostiranja su za 35 % veći od rezultata rasprostiranja referentne mješavine zato jer se mješavina B-PVC 15 raspala prilikom ispitivanja (slika 30 prikazuje test rasprostiranja i nedostatak vode u mješavini). Usprkos navedenim nedostacima, svježa betonska mješavina se ugradila u kalupe te su isti dalje ispitani prema planu ispitivanja.



Slika 30. Svježa betonska mješavina nakon ispitivanja rasprostiranjem

Odlučeno je da će se druga mješavina B-15 umiješati na način da se PVC piljevina tretira kao vlakno . Dakle, PVC piljevina nije dodavana suhoj mješavini sa agregatom već nakon dodavanje vode što bi značilo da su se prvo u miješalicu dodali agregat i cement, te se miješali 30 s, zatim se dodala voda te se miješalo još 90 s a na kraju se dodala PVC piljevina i sve skupa se zamiješalo dodatnih 30 s. Nažalost, i ovaj pokušaj je bio neuspjeli te je mješavina izgledala identično kao i prethodna. Rasprostiranje mješavine iznosilo je 50,4 i 43,5 cm (srednja vrijednost 46,95 cm) a gustoća svježe mješavine iznosila je istih $2,1 \text{ kg/dm}^3$. Nastavljena je ugradnja mješavine u kalupe s istim poteškoćama kao i sa prethodnom mješavinom. Nakon završetka ugradnje kalupi su stavljeni na sušenje jedan dan (slika 31.) te nakon jednog dana njegovani idućih 27 dana u vodi do dana ispitivanja (slika 32.).



Slika 31. Ugrađeni kalupi na sušenju



Slika 32. Njegovanje uzoraka u vodi

6. SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

Nakon izrade uzorka te njege od 28 dana u bazenu ispunjenim vodom uslijedilo je ispitivanje očvrslog betona. U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće savijanje. Neposredno prije ispitivanja, uzorci su izvađeni iz vode, površinska voda odstranjena te izmjerene masa i dimenzije uzoraka. U tablicama br. 24 i br. 25 prikazane su mase i dimenzije uzoraka za B-REF i B-PVC 15 za ispitivanje čvrstoće savijanjem te izračunate gustoće očvrsljih uzoraka.

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE		DATUM ISPITIVANJA
	B-referentna PRIZMA		18.6.2020	16.7.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	102,65	399,5	102,13	9493,2	2,267
2	102,7	399,5	100,1	9542	2,323
3	100,5	400	100,61	9352,3	2,312
4	102,04	400	100,72	9461,3	2,301
5	103,91	400	100,29	9597,1	2,302
6	101,52	400	99,81	9350,7	2,307

Tablica 24. Dimenzije uzoraka B-REF mješavine

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE		DATUM ISPITIVANJA
	B-PVC 15 PRIZMA		18.6.2020	16.7.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	103,33	399,5	100,31	8364,1	2,020
2	105,73	399,7	99,96	7972,8	1,887
3	103,39	399	100,26	8144,2	1,969
4	104,57	399,5	99,91	8143,9	1,951
5	101,93	399,75	99,93	7993,5	1,963
6	105,95	399,25	100,06	8229,9	1,944

Tablica 25. Dimenzije uzoraka B- PVC 15 mješavine

Iz navedenih gustoća pojedinih uzoraka aritmetičkom sredinom dobije se srednja vrijednost gustoće te tako srednja vrijednost gustoće za mješavinu B-REF iznosi 2,302 kg/dm³ te za mješavinu B-PVC 15 iznosi 1,956 kg/dm³.

U tablicama 26 i 27 prikazani su prikazane su mase i dimenzije uzoraka B-REF i B-PVC 15 za ispitivanje čvrstoće na tlak te izračunate gustoće očvrsljih uzoraka. Isto kao i za prethodne uzorke aritmetičkom sredinom dobivene su gustoće mješavina, gustoća mješavine B-REF iznosi 2,29 kg/dm³ te za mješavinu B-PVC 15 iznosi 2,063 kg/dm³.

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE		DATUM ISPITIVANJA
	B-referentna KOCKA		18.6.2020	16.7.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	149,7	149,55	150,45	7706,9	2,288
2	150	149,54	150,21	7809	2,318
3	150,11	149,37	150,38	7725,8	2,291

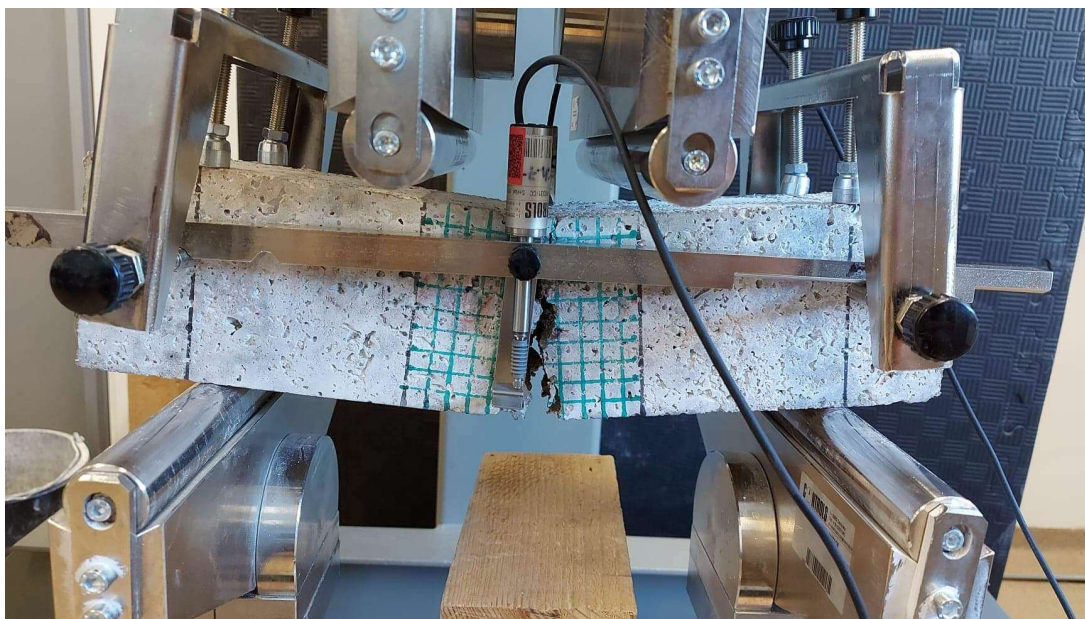
Tablica 26. Dimenzije uzoraka referentne mješavine

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM UGRADNJE		DATUM ISPITIVANJA
	B-PVC 15 KOCKA		18.6.2020	16.7.2020	
	širina [mm]	dužina [mm]	visina [mm]	masa [g]	gustoća [kg/dm ³]
1	150,23	150,22	149,85	6906,8	2,042
2	150,1	153,37	149,78	7161,2	2,077
3	150,1	152,49	150,37	7129,6	2,071

Tablica 27. Dimenzije uzoraka B-PVC15 mješavine

6.1. Čvrstoća savijanjem

Ispitivanje savijanjem metodom kontrole pomaka provedeno je na uzorcima dimenzija 100 mm × 100 mm × 400 mm. Prije samog ispitivanja, na uzorcima je iscrtana kvadratna mreža dimenzija 10 cm × 10 cm na sredini raspona uzorka veličine 1/3 razmaka oslonaca uređaja za ispitivanje. Na temelju kvadratne mreže vizualno se može ocijeniti pozicija sloma uzorka nakon ispitivanja. Prema normi HRN EN 12390-5 ispitivanje je uspješno provedeno ako se uzorak slomi unutar područja gdje je iscrtana mreža. Kako bi se prikazao pomak u vremenu prilikom nanošenja opterećenja na uzorak je potrebno postaviti LVDT uređaj (poglavlje 4.2). LVDT uređaj se postavlja na način da uređaj stoji fiksirano uspravno na kukici koja visi na sredini gornje strane uzorka. Kako se opterećenje povećava tako se povećava i pomak, dakle kukica se spušta ovisno o pomaku te LVDT uređaj mjeri pomak kukice i prikazuje ga u obliku grafa. Na slici broj 33 prikazan je uzorak nakon ispitivanja.



Slika 33. Ispitani uzorak sa postavljenim LVDT uređajem

Nakon provedenog ispitivanja dobiva se graf opterećenja u vremenu. Na slici broj 34 prikazan je karakteristični graf opterećenja u vremenu za uzorke referentne mješavine dok na slici 35 je prikazan karakteristični graf uzoraka B-15. Na Slici 36 dan je oblik sloma uzoraka nakon ispitivanja.

U tablicama broj 28 i 29 prikazani su podatci za čvrstoću na savijanje dobiveni po formuli :

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

gdje je

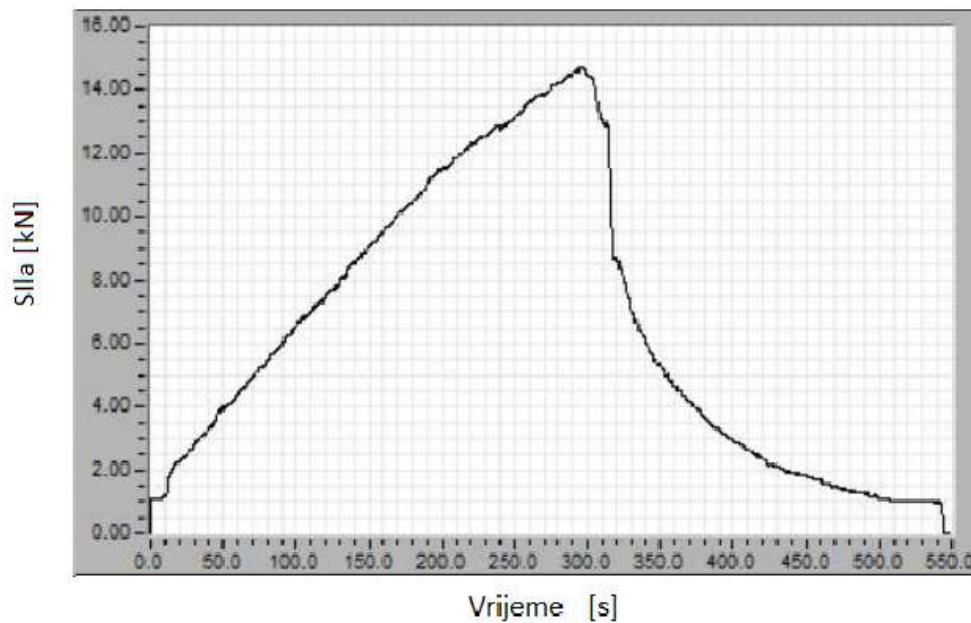
R_f – čvrstoća savijanja [MPa]

F_f – granična sila sloma [N]

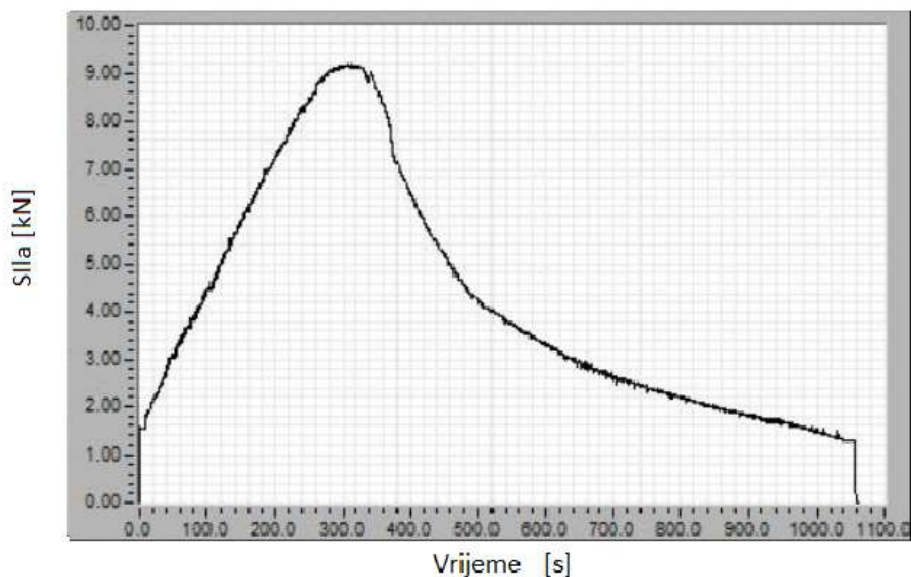
b – širina uzorka [mm]

l – razmak između donjih oslonaca uređaja [mm]

Na temelju rezultata ispitivanja uočljiva je razlika u čvrstoćama savijanjem kao i u pomacima uzoraka prije sloma, čvrstoća savijanjem za uzorak B-PVC 15 manja je za 35% od uzorka B-REF referentne mješavine dok su pomaci uzorka B-PVC 15 čak do 580% puta veći od pomaka uzoraka referentne mješavine.



Slika 34. Karakteristični graf opterećenja u vremenu referentne mješavine



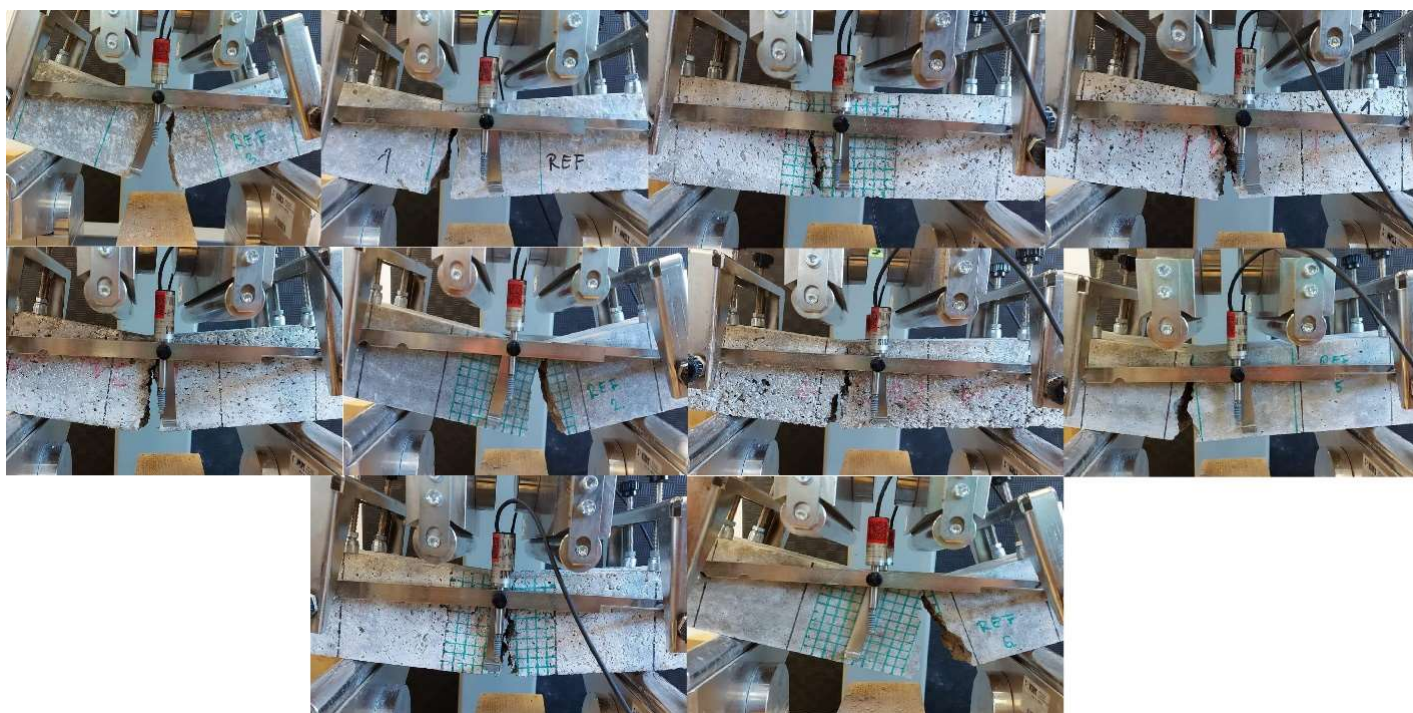
Slika 35. Karakteristični graf opterećenja u vremenu za uzroke B-PVC15

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	ČVRSTOČA SAVIJANJA		
	B-referentna		16.7.2020	KONTROLA POMAKA		
	b [mm]	Ff [kN]	udaljenost oslonaca (l)	pomak prije loma [μ]	Rf [MPa]	Rfuk [MPa]
1	100	13,95	300	167,79	6,2775	6,34125
2	100	14,3	300	183,88	6,435	
3	100	13,75	300	123,92	6,1875	
4	100	14,55	300	47,32	6,5475	
5	100	14,65	300	262,1	6,5925	
6	100	13,35	300	62,66	6,0075	

Tablica 28. Čvrstoća savijanjem uzorka B-REF sa pomakom

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	ČVRSTOČA SAVIJANJA		
	B-PVC 15		16.7.2020	KONTROLA POMAKA		
	b [mm]	Ff [kN]	udaljenost oslonaca (l)	pomak prije loma [μ]	Rf [MPa]	Rfuk [MPa]
1	100	9,2	300	619,82	4,14	4,12725
2	100	9,22	300	902,35	4,149	
3	100	9,21	300	618,63	4,1445	
4	100	8,99	300	877,82	4,0455	
5	100	8,81	300	946,64	3,9645	
6	100	9,6	300	910,23	4,32	

Tablica 29. Čvrstoća savijanjem uzorka B-PVC 15 sa pomakom



Slika 36. Primjeri uzoraka nakon ispitivanja čvrstoće savijanja

6.2. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća ispitana je na uzorcima oblika kocke dimenzija 150 mm x 150 mm x 150mm, prema normi HRN EN 12390-3. Uzorke se postavlja u uređaj za mjerenje tlačne čvrstoće (slika 37.) tako da smjer nanošenja opterećenja bude okomit na smjer ugradnje mješavine u kalupe. Uređaj nanosi opterećenje te rezultat prikazuje u obliku grafa opterećenja u vremenu. Također, iz graničnog opterećenja prije sloma uzorka se izračunava tlačnu čvrstoću korištenjem izraza :

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

gdje je

R_c – tlačna čvrstoća [MPa]

F_c – granična vrijednost sile prije sloma [N]

1600 – površina na kojoj djeluje sila *F_c* (40x40 mm)



Slika 37. Uzorak u uređaju za ispitivanje

Dobiveni rezultati prikazani su u tablici broj 30 i 31 za uzorke B-REF i B-15 mješavine sa izračunom srednje vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka za svaku mješavinu. U tablicama je vidljivo kako uzorci sa PVC-piljevinom značajno gube na tlačnoj čvrstoći, u ovom slučaju tlačna čvrstoća B-PVC 15 uzoraka je za 40% manja od tlačne čvrstoće uzoraka referentne mješavine.

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	TLAČNA ČVRSTOĆA
	B-referentna		16.7.2020	
	površina [mm]	Fc [kN]	Rc [Mpa]	
1	150x150	817,1	36,31555556	Rcuk [Mpa]
2	150x150	848	37,68888889	36,867
3	150x150	823,4	36,59555556	

Tablica 30. Izračun tlačne čvrstoće za uzorke referentne mješavine

BROJ UZORKA	NAZIV UZORKA		DATUM ISPITIVANJA	TLAČNA ČVRSTOĆA
	B-PVC 15		16.7.2020	
	površina [mm]	Fc [kN]	Rc [Mpa]	
1	150x150	443,3	19,70222222	Rcuk [Mpa]
2	150x150	543,8	24,16888889	21,996
3	150x150	497,6	22,11555556	

Tablica 31. Izračun tlačne čvrstoće za uzorke B-PVC15 mješavine

7. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj ovog rada je bio istražiti ideju o upotrebi otpadne plastike, tzv. PVC piljevine, u spravljanju ekološki prihvatljivijih mortova i betona u građevinarstvu. Rezultati laboratorijskog ispitivanja pokazali su da uzorci od cementnog morta i betona povećanjem udjela PVC piljevine gube na mehaničkim svojstvima (tlačna i savojna čvrstoća). Zamjenom 15% volumena pijeska s udjelom PVC piljevine tlačna čvrstoća se smanjila za otprilike 40% u usporedbi s referentnim uzorcima, a savojna čvrstoća za otprilike 35%. Međutim, uočena je veća duktilnost uzoraka s PVC piljevinom u odnosu na referentne uzorke.

Također, tokom ispitivanja došli se do spoznaje da treba ispitati prikladniji način spravljanja svježih cementnih i betonskih mješavina kako bi se izbjegao problem gubitka obradljivosti mješavine zbog nemogućnosti vezivanja zarobljene vode s cementom.

Iako je ugradljivost betona sa PVC-om bila otežana a mehanička svojstva manja u usporedbi s referentnim uzorcima, provedeno ispitivanje svakako je poticaj za daljnje istraživanje kako bi se pronašao prikladan načina korištenja ovog otpadnog materijala pri spravljanju mortova i betona. Stoga, za daljnje istraživanje se preporuča obrada svojstava otpadne plastike, promjena oblika i veličine granula ili pak postupka miješanja sastojaka kako bi se poboljšala kvaliteta kompozitnog proizvoda, njegova ugradljivost a samim time i mehanička svojstva.

8. LITERATURA

<https://www.normensand.de/en/products/cen-standard-sand-en-196-1/> , pristup 28.8.2020

<https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/agregati> , pristup 28.8.2020

Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete, Y. Senhadji, G. Escadeillas, A.S. Benosman, M. Mouli, H. Khelafi & S. Ould Kaci , 20.01.2015

Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A Review, Adewumi John Babafemi , Branko Šavija , Suvash Chandra Paul and Vivi Anggraini , 25.08.2018

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

Ispitivanje očvrnuloga betona – 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka (EN 12390-3:2009)

Ispitivanje očvrnuloga betona – 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka (EN 12390-3:2009)