

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

MATEA DŽAJA, MARIJA HELD, PETRA RUŽIĆ

**EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE AUTOGENOG SKUPLJANJA
SAMOZBIJAJUĆEG BETONA S POLIMERNIM VLAKNIMA IZ
RECIKLIRANIH AUTOMOBILSKIH GUMA**

ZAGREB, 2016.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Nine Štirmer, dipl.ing.građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015./2016.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. CILJ I HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA	3
3. SAMOZBIJAJUĆI BETON	4
3.1. Projektiranje sastava samozbijajućeg betona	5
3.2. Utjecaj dodatka vapnenca na svojstva samozbijajućeg betona	7
3.3. Utjecaj polipropilenskih vlakana na svojstva samozbijajućeg betona	8
4. AUTOGENO SKUPLJANJE CEMENTNIH KOMPOZITA	12
4.1. Općenito o autogenom skupljanju	14
4.2. Razlika između autogenog i kemijskog skupljanja	15
4.3. Utjecaj primjene vrste cementa na autogeno skupljanje	16
4.4. Utjecaj primjene mineralnih dodataka na autogeno skupljanje	16
4.5. Utjecaj polipropilenskih vlakana na autogeno skupljanje samozbijajućeg betona	17
5. CEMENTNI KOMPOZIT S RECIKLIRANIM POLIMERNIM VLAKNIMA	19
5.1. Karakteristike recikliranih polimernih vlakana	20
5.2. Utjecaj recikliranih polimernih vlakana na svojstva u svježem stanju	21
5.3. Utjecaj recikliranih polimernih vlakana na svojstva u očvrnulom stanju	21
5.4. Utjecaj polimernih vlakana na autogeno skupljanje	22
6. RAZVIJANJE METODOLOGIJE I UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE VLAKANA	24
6.1. Prva faza čišćenja	24
6.2. Druga faza čišćenja	25
7. EKSPERIMENTALNI DIO	26
7.1. Cilj i program ispitivanja	26
7.2. Sastavne komponente ispitnih mješavina	26
7.3. Projektiranje betonske mješavine	28
7.4. Metode ispitivanja	29
7.4.1. Ispitivanje samozbijajućeg betona u svježem stanju	30
7.4.2. Ispitivanje autogenog skupljanja	34
7.4.3. Tlačna čvrstoća betona	35
7.5. Postupak izrade samozbijajućeg betona	36
7.5.1. Ugradnja betona u kalupe	38
8. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA	39
8.1. Svojstva svježeg betona	39
8.1.1. Rasprostiranje slijeganjem	39

8.1.2.	L- kutija	42
8.1.3.	Segregacija sijanjem	43
8.1.4.	Temperatura	44
8.1.5.	Udio pora	44
8.1.6.	Volumenska masa.....	45
8.2.	Autogeno skupljanje.....	46
8.3.	Tlačna čvrstoća	48
9.	ZAKLJUČAK	50
10.	ZAHVALE	51
11.	LITERATURA	52
12.	PRILOZI.....	57

Popis slika

Slika 1 Mineralni dodaci: a) leteći pepeo; b) silicijska prašina [17].....	7
Slika 2 Odnos tlačne čvrstoće nakon 28 dana i v/c omjera [20].....	8
Slika 3 a) Monofilamentna vlakna b) Fibrilirana vlakna [25], [26].....	9
Slika 4 Raspodjela naprezanja pri ispitivanju ograničenog skupljanja [46]	11
Slika 5 Shematski prikaz volumenskih deformacija betona [51]	13
Slika 6 Dijagram stanja i vrsta skupljanja [52]	13
Slika 7 Veza između autogenog i kemijskog skupljanja [13].....	14
Slika 8 Shematski prikaz mehanizma skupljanja [52]	15
Slika 9 Autogeno skupljanje prvih 24 h: a) sa suhim polipropilenskim vlaknima ;b) s navlaženim polipropilenskim vlaknima [31]	17
Slika 10 Nusprodukti reciklaže automobilskih guma [56].....	19
Slika 11 Prosječno autogeno skupljanje za sve mješavine [48].....	23
Slika 12 Prva faza čišćenja: a) onečišćena vlakna b) čista vlakna c) granule gume	24
Slika 13 Uređaj za pročišćavanje vlakana	25
Slika 14 Druga faza pročišćavanja: a) uređaj za drugu fazu pročišćavanja; b) vlakna pročišćena drugom fazom čišćenja.....	25
Slika 15 Krivulje frakcija agregata i sumarne krivulje.....	27
Slika 16 Podloga za ispitivanje rasprostiranja slijeganjem[29].....	31
Slika 17 Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem	31
Slika 18 Ispitivanje segregacije sijanem [9]	32
Slika 19 Ispitivanje segregacije sijanem	33
Slika 20 Shema uređaja za mjerenje linearne autogene deformacije skupljanja.....	34
Slika 21 a) Urica neposredno prije početka mjerenja b) Uzorci i uređaji za ispitivanje autogenog ispitivanja.....	35
Slika 22 Preša za ispitivanje tlačne čvrstoće.....	35
Slika 23 Postupak miješanja; a) suha komponenta b) dodatak vlakana c) vizualni pregled mješavine tijekom miješanja	37
Slika 24 Neka od ispitivanja betona u svježem stanju; a) ploča i stožac za ispitivanje segregacije, b) L-kutija c) mjerenje temperature betona	38
Slika 25 Kalupi za ispitivanja betona u očvrslom stanju; a) tlačna čvrstoća, b) autogeno skupljanje	38
Slika 26 Rezultati ispitivanja rasprostiranja slijeganjem.....	39
Slika 27 Rezultati ispitivanja vremena t_{500}	41
Slika 28 a) Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem; b) Rubni dio mješavine pri ispitivanju rasprostiranja slijeganjem	41

Slika 29 Rezultati ispitivanja L- kutijom	42
Slika 30 Ispitivanje sposobnosti prolaska L- kutijom: a) mjerenje visina h_1 i h_2 , b) prikaz sposobnosti prolaska kraj tri armaturne šipke	42
Slika 31 Rezultati ispitivanja segregacije sijanjem.....	43
Slika 32 Ispitivanje segregacije sijanjem	43
Slika 33 Rezultati ispitivanja temperature.....	44
Slika 34 Ispitivanje udjela pora porometrom.....	45
Slika 35 Rezultati ispitivanja volumenske mase	45
Slika 36 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja svih mješavina: a) temperatura b) autogene deformacije	47
Slika 37 Ispitivanje tlačne čvrstoće za 3 i 7 dana za sve mješavine	48
Slika 38 Prosijavanje punila i cementa.....	61
Slika 39 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M1: a) temperatura b) autogene deformacije	62
Slika 40 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M2: a) temperatura b) autogene deformacije	63
Slika 41 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M3: a) temperatura b) autogene deformacije	64
Slika 42 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M4: a) temperatura b) autogene deformacije	65
Slika 43 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M5: a) temperatura b) autogene deformacije	66

Popis tablica

Tablica 1 Osnovni i dodatni zahtjevi za samozbijajući beton [5]	5
Tablica 2 Geometrijske karakteristike recikliranih polimernih vlakana [24]	21
Tablica 3 Fizikalna i kemijska svojstva cementa	26
Tablica 4 Prikaz sastava mješavina za m ³ betona	29
Tablica 5 Ispitivanja samozbijajućeg betona	29
Tablica 6 Ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju	30
Tablica 7 Razredi viskoznosti prema HRN EN 206:2013 [7]	32
Tablica 8 Razredi otpornosti segregaciji i pripadajuća primjena samozbijajućeg betona [9]	33
Tablica 9 Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju.....	39
Tablica 10 Vrijeme početaka autogenog skupljanja pojedinih mješavina	46
Tablica 11 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće za sve mješavine	48
Tablica 12 Podaci o masama dobiveni nakon 1. faze pročišćavanja.....	57
Tablica 13 Podaci o masama dobiveni nakon 2. faze pročišćavanja.....	60
Tablica 14 Numerički granulometrijski sastav agregata	61
Tablica 15 Kumulativni granulometrijski sastav agregata.....	61

1. UVOD

Suvremeni sustavi zalažu se za gospodarenje otpadom na način da se otpad ne odlaže, nego da se ponovno reciklira i upotrijebi. Zbog široke upotrebe automobilskih guma, bitno je nakon isteka roka valjanosti pravilno postupiti s već iskorištenima. Ukoliko se automobilska guma reciklira, kao nusproizvod dobivaju se čelična vlakna, tekstilna vlakna i granule gume. Budući da je građevna industrija jedan od najvećih potrošača prirodnih resursa, a ujedno i zagađivača okoliša bilo je bitno sagledati sve moguće načine kako ju učiniti održivom. Poznavajući svojstva materijala i zahtjeve konstrukcije, primjenom recikliranih sirovina, mogući su znatni pozitivni pomaci u razvoju inovativnih ekoloških održivih materijala za specijalne namjene [1].

U betonu se često koriste polipropilenska vlakna zbog doprinosa svojstvima u svježem i očvrslom stanju. Osnovni doprinosi takvih vlakana su smanjivanje autogenog skupljanja te sprječavanje pojave i širenja pukotina mladog betona. Zbog dimenzijske sličnosti s polipropilenskim vlaknima, reciklirana polimerna vlakna iz automobilskih guma počela su se razmatrati kao njihova zamjena. Dosadašnja istraživanja provedena su na mješavinama običnog betona s neočišćenim recikliranim vlaknima iz automobilskih guma. Takva vlakana su sadržavala čelična vlakana i veliku količinu gumenog granulata, a s obzirom na njihov sadržaj bilo je otežano ustanoviti koja komponenta nepročišćenih recikliranih polimernih vlakana utječe na koje svojstvo. Vodeći se tom mišlju, odlučeno je istražiti odgovarajuću metodologiju pročišćavanja recikliranih polimernih vlakana te proučiti njihov utjecaj na autogeno skupljanje. Kako bi se pratili novi trendovi, ispitivanja su provedena na mješavinama samozbijajućeg beton koji je svojevrsan odgovor tržišta na zahtjeve za modernom tehnologijom ugradnje [1].

Samozbijajući beton (engl. Self - compacting concrete, SCC) je posebna vrsta betona koji je velike fluidnosti, ne segregira i pod utjecajem vlastite težine u potpunosti popunjava presjek oplata čak i ako je armatura gusto postavljena te ne treba dodatne vibracije i zbijanja. Isto kao i drugi materijali koji su na bazi cementa, samozbijajući beton je krhak materijal. Razvoj samozbijajućeg betona poželjan je u građevinskoj industriji u svrhu pronalaska rješenja za česti problem - ugradnju betona. Zbog svoje visoke deformabilnosti i otpornosti na segregaciju, ima sposobnost da tečenjem pod vlastitom težinom u potpunosti ispuni oplatu, prođe kraj gusto postavljenih armaturnih mreža i zapuni sve prostore bez potrebne dodatne radne snage na gradilištu. To je napredak u odnosu na obični beton kod kojega se kao česti problem zbog lošeg zbijanja javlja zahvaćeni zrak u njegovoj strukturi koji uzrokuje

smanjenje čvrstoće i trajnosti. Samozbijajući beton se može definirati kao mješavina cementa, agregata, vode, punila i kemijskih dodataka čijim djelovanjem mješavina zadovoljava potrebne zahtjeve [2]. Ovakav sastav, zahtjevi koje mora zadovoljiti u svježem stanju te način ugradnje osnovne su razlike ovoga betona u odnosu na konvencionalni.

U radu će biti ispitana svojstva samozbijajućeg betona s tekstilnim vlaknima iz reciklirane gume, odnosno njihov utjecaj na autogeno skupljanje mladog samozbijajućeg betona. Ispitat će se svojstva u svježem stanju (rasprostiranje slijeganjem, sposobnost prolaska, viskoznost, temperatura, gustoća i udio pora), tlačne čvrstoće u starosti od 3 i 7 dana te autogeno skupljanje betona.

2. CILJ I HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA

Ciljevi istraživanja provedenog u sklopu ovog rada:

1. Razviti metodologiju pročišćavanja recikliranih polimernih vlakana iz automobilskih guma.
2. Utvrditi sadržaj gumenog granulata u uzorku nepročišćenih recikliranih polimernih vlakana iz automobilskih guma.
3. Ispitati utjecaj dodatka pročišćenih recikliranih polimernih vlakana iz automobilskih guma na svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju.
4. Ocijeniti utjecaj pročišćenih recikliranih polimernih vlakana iz automobilskih guma na autogeno skupljanje u prva 24 sata.
5. Ispitati utjecaj dodatka pročišćenih recikliranih polimernih vlakana iz automobilskih guma na razvoj tlačne čvrstoće samozbijajućeg betona.
6. Ocijeniti mogućnost zamjene industrijskih polipropilenskih vlakana s recikliranim polimernim vlaknima iz automobilskih guma na osnovi ispitanih svojstava.

Hipoteza istraživanja:

1. Dodatkom recikliranih polimernih vlakana uz automobilskih guma smanjuje se autogeno skupljanje samozbijajućeg betona.
2. Pročišćavanje recikliranih polimernih vlakana od gumenog granulata smanjuje deformaciju od autogenog skupljanja betona.

3. SAMOZBIJAJUĆI BETON

Samozbijajući beton (engl. Self - compacting concrete, SCC) je vrsta betona kojeg karakterizira velika fluidnost, otpor segregaciji te sposobnost da tečenjem pod utjecajem vlastite težine u potpunosti popunjava presjek oplata i zaobilazi gusto postavljenu armaturu. Osim što se od običnog betona razlikuje po svojstvima u svježem stanju, velika je razlika i u tehnologiji ugradnje. Samozbijajući beton nakon ugradnje nije potrebno dodatno vibrirati i zbijati pa je reduciran zahvaćeni zrak. To je napredak u odnosu na obični beton kod kojega se kao česti problem zbog lošeg zbijanja javlja zahvaćeni zrak u betonskoj strukturi koji uzrokuje smanjenje čvrstoće i trajnosti [2].

Samozbijajući beton predstavlja napredak u betonskoj industriji u posljednjih nekoliko desetljeća. Razvijen je u Japanu 1980-ih godina. Osnovni razlog bila je potreba za ostvarivanjem boljih trajnosnih svojstava betonskih konstrukcija. To je usko povezano s potrebom za kvalitetnom radnom snagom koja ugrađuje beton. Kako se u japanskoj građevinskoj industriji smanjio broj osposobljenih radnika, tako se i smanjila kvaliteta izvedbe građevinskih radova. Kao rješenje za ovakav problem, razvijen je samozbijajući beton, koji pod utjecajem vlastite težine teče i popunjava presjek oplata bez potrebe za dodatnim zbijanjem i vibriranjem. Pogodnost ove vrste betona je smanjena potreba za radnom snagom, eliminacija buke pri ugradnji, ekonomičnost, skraćeno vrijeme ugradnje i osigurana kompaktnost strukture [3], [4].

Samozbijajući se beton prema japanskim iskustvima počeo primjenjivati i u Europi krajem 90-ih godina. Nužni sastojak za izradu samozbijajućih betona jest nova generacija superplastifikatora na osnovi polikarboksilnih etera koja je omogućila projektiranje sastava betonske mješavine potrebne viskoznosti i granice tečenja [5]. Bitno je pravilno projektirati sastav mješavine, jer je u svježem stanju nužno zadovoljiti određene zahtjeve kao što su tečenje, čvrstoća, visoka obradljivost, otpornost na kemijske i mehaničke utjecaje, smanjenje popuštanja, trajnost i otpornost segregaciji [6].

U odnosu na obični beton, za samozbijajući beton propisani su osnovni i dodatni zahtjevi koji su dani u tablici 1. Ključne karakteristike samozbijajućeg betona u svježem stanju su tečenje i viskoznost, koji su osnovni faktori sposobnosti popunjavanja oplata samozbijajućeg betona [4], zatim sposobnost zaobilaženja prepreka te otpornost segregaciji.

Tablica 1 Osnovni i dodatni zahtjevi za samozbijajući beton [5]

OSNOVNI ZAHTJEVI	DODATNI ZAHTJEVI
- Razred tlačne čvrstoće (HRN EN 206-1)	- Tečenje: Vrijednost (rasprostiranje slijeganjem)
- Razred izloženosti ili granične vrijednosti sastava:	- Sposobnost zaobilazanja prepreke- Ispitivanje L-kutijom
- Najveći vodocementni omjer	- Otpornost segregaciji: GTM sito
- Najmanja količina cementa	- Viskoznost: V-lijevak; T ₅₀₀ ; O-lijevak; Orimet
	- Temperatura svježeg betona, ako se razlikuje od HRN EN 206
- Maksimalna veličina zrna agregata	- Drugi tehnički zahtjevi

3.1. Projektiranje sastava samozbijajućeg betona

Za sastav samozbijajućeg betona koriste se uobičajeni sastojci, ali u drukčijim omjerima uz nužan dodatak superplastifikatora. Zahtjevi za samozbijajući beton dani su normom *HRN EN 206:2013 Beton – Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost* [7].

Za samozbijajući beton mogu se koristiti svi cementi koji zadovoljavaju normu *HRN EN 197-1:2011* [8]. Cement kao i kod običnog betona ima ulogu slijepiti krupna i sitna zrna agregata, a preporučena količina cementa kod projektiranja samozbijajućeg betona iznosi između 350-450 kg/m³ [9]. Veća količina cementa može biti razlog povećanom puzanju, dok se manje količine cementa upotrebljavaju uz uvjet dodatak drugih finih čestica kao što su leteći pepeo, pucolan i sl. [8].

Budući da agregat čini oko tri četvrtine ukupnog volumena betona uvelike utječe na svojstva u svježem i očvrslulom stanju. Agregat može biti drobljeni i riječni, a za samozbijajući beton mogu se koristiti oba pod uvjetom da zadovolje zahtjeve iz norme *HRN EN 12620:2002+A1:2008 - Agregati za beton* [10]. Pri projektiranju sastava samozbijajućeg betona bitno je voditi računa o vlažnosti, apsorpciji, obliku i veličini zrna agregata. Osnovni uvjet za određivanje maksimalne veličine zrna je minimalni horizontalni razmak armature s

ciljem ostvarivanja kriterija prolaza u svježem stanju betonske mješavine. Preporučeno maksimalno zrno agregata je 16 mm [10].

Voda koja se koristi za spravljanje samozbijajućeg betona mora zadovoljiti normu *HRN EN 1008:2002-Voda za pripremu betona*. Ukoliko se upotrebljava reciklirana voda, treba uzeti u obzir mogući sadržaj otopljenih tvari i njeno porijeklo [11].

U svrhu poboljšanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju, u betonske mješavine dodaju se kemijski dodaci. Za dobivanje samozbijajućeg betona neizostavno je korištenje superplastifikatora. Osim ovih, također se mogu dodati i drugi kemijski dodaci kao što su stabilizator mješavine, aerant, usporivač i ubrzivač vezanja. Za izradu samozbijajućeg betona koristi se nova generacija superplastifikatora na bazi polikarboksilnih etera koji omogućavaju potrebnu granicu tečenja i viskoznost. Superplastifikator se može dozirati 1 – 4 % na masu cementa ovisno o proizvođaču [12]. Dodatkom stabilizatora mješavine (još se naziva i modifikatorom viskoznosti) modificira se svojstvo viskoznosti bez utjecaja na svojstva tečenja. Zahvaljujući djelovanju stabilizatora mješavine, postiže se tražena razina viskoznosti i na taj način omogućuje se nesmetani prolazak betonske mješavine između armaturnih šipki te otpornost na segregaciju. Dodaje se 0,1 - 0,2 % na masu cementa. Prilikom dodavanja kemijskih dodataka bitno je voditi računa da superplastifikator i stabilizator mješavine budu međusobno kompatibilni kako ne bi došlo do neželjenih kemijskih reakcija u njihovoj interakciji [13].

Mineralni dodaci dodaju se samozbijajućem betonu kako bi mu se poboljšala svojstva u svježem stanju, prvenstveno kohezivnost i otpornost segregaciji. To su fino mljeveni, disperzirani praškasti dodaci koji se doziraju u odnosu na masu cementa. U samozbijajući beton se najčešće dodaju punilo, leteći pepeo i silicijska prašina. Punilom se smatraju sve čestice koje prolaze kroz sito otvora 0,063 mm. Dodatak punila utječe na brzinu procesa hidratacije, poboljšava mikrostrukturu, a time i čvrstoću. Također zbog svoje veličine zrna pozitivno utječu na obradivost svježeg betona međutim imaju utječu i na količinu vode koju je potrebno povećati radi veće specifične površine fino mljevenih čestica [13], [14]. Leteći pepeo (slika 1a) je nusprodukt izgaranja ugljena u termoelektranama koji se uglavnom sastoji od sferičnih čestica veličine 1 - 100 μm , a specifična površina kreće se od 250 - 600 kg/m^2 [15]. Dodavanjem letećeg pepela poboljšavaju se reološka svojstva samozbijajućeg betona, smanjuje se izdvajanje vode iz svježeg betonske mješavine, poboljšava nepropusnost i usporava oslobađanje topline hidratacije [12]. Silicijska prašina (slika 1 b) je nusprodukt pri proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura. Karakterizira ju amorfnu strukturu u obliku sferičnih čestica čiji je radijus u području od 0,01 μm do 0,3 μm , a to je oko 70 - 100 puta

finije od prosječne čestice cementa [12]. Specifična površina je oko 13 do 20 puta veća od ostalih pucolanskih materijala i kreće se oko 20 000 m²/kg. Doprinosi obradivosti i kohezivnosti betonske mješavine, smanjuje izdvajanje vode i poboljšava otpornost na segregaciju [12].



Slika 1 Mineralni dodaci: **a)** leteći pepeo; **b)** silicijska prašina [16]

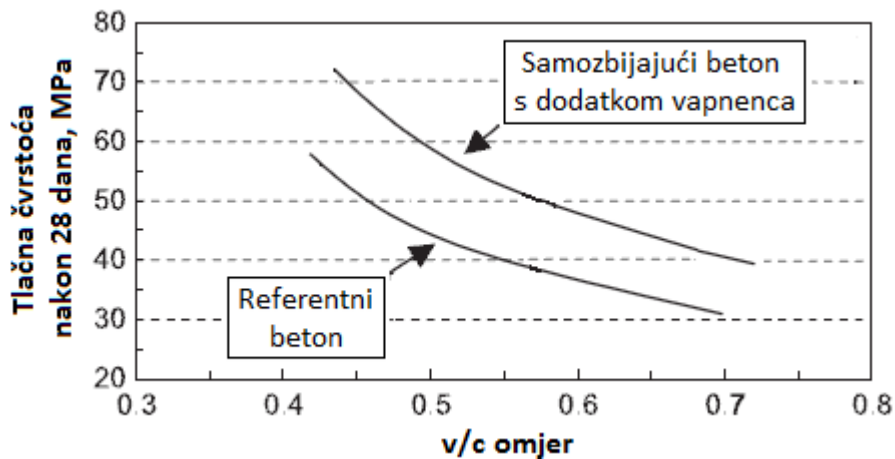
3.2. Utjecaj dodatka vapnenca na svojstva samozbijajućeg betona

Kao sastavni dio samozbijajućeg betona, mineralni dodaci poboljšavaju strukturu betona te uzrokuju bolju disperziju cementa time poboljšavajući i tlačnu čvrstoću. Dosadašnja istraživanja [17] pokazuju da punila na bazi vapnenca ubrzavaju toplinu hidratacije i bolje zapunjavaju šupljine što rezultira manjim udjelom pora u strukturi betona. Tako gusto posložene čestice otežavaju prodiranje agresivnih tvari iz okoliša u strukturu betonskog elementa. Kao krajnji rezultat takve mikrostrukture dobivaju se bolja trajnosna svojstva betona.

De Schutter i suradnici [18] proveli su istraživanje utjecaja vapnenca na brzinu razvoja topline hidratacije. Ukupno oslobođena toplina hidratacije kao i brzina oslobađanja topline hidratacije povećana je kod mješavina samozbijajućeg betona s dodatkom vapnenca u odnosu na druge dvije mješavine (obični beton i beton ultravisokih čvrstoća) bez dodatka vapnenca. Rizik od nastanka pukotina u ranoj fazi mješavine može biti nešto veći, uslijed bržeg oslobađanja topline hidratacije samozbijajuće mješavine s dodatkom vapnenca, u usporedbi s ostalim mješavinama. Ovakvi rezultati u skladu su s podacima dostupnim iz literature.

Samozbijajući beton s dodatkom vapnenca pokazuje značajno veće tlačne čvrstoće u odnosu na obični beton pri jednakom v/c omjeru (slika 2). Ispitivanja utjecaja vapnenca na

razvoj tlačne čvrstoće pokazuju povećanje čvrstoće u ranoj starosti betona, odnosno tijekom prvih 28 dana. To je dijelom i posljedica reakcije kalcijevog karbonata (CaCO_3) iz vapnenca s trikalcijskim aluminatom (C_3A) koja rezultira ubrzanjem hidratacije cementa. Rezultati ispitivanja pokazuju da je tlačna čvrstoća 60 - 80 % veća pri starosti betona od 7 dana, a 30 - 40 % pri starosti od 28 dana, u usporedbi s odgovarajućim referentnim betonom, odnosno običnim, tradicionalno vibriranim, betonom jednakog v/c omjera [19].



Slika 2 Odnos tlačne čvrstoće nakon 28 dana i v/c omjera [19]

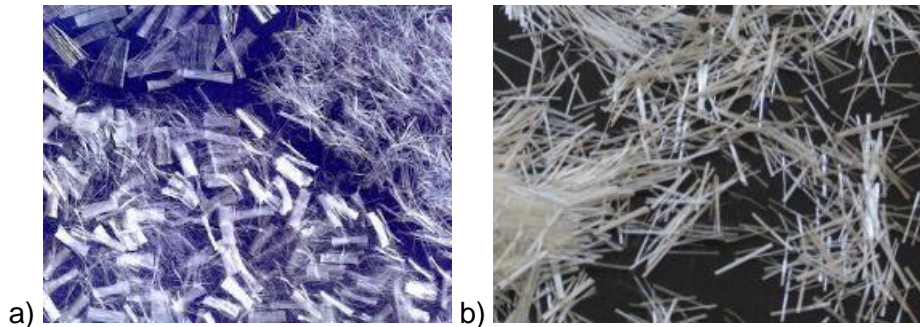
Za samozbijajuće betone s punilom na bazi vapnenca, eksperimentalni rezultati [20] upućuju da se autogeno skupljanje povećava sa smanjenjem omjera punila i cementa, no taj odnos nije toliko utjecajan kao vodocementni omjer. Utjecaj mineralnih dodataka na autogeno skupljanje detaljnije je opisan u sljedećem poglavlju.

3.3. Utjecaj polipropilenskih vlakana na svojstva samozbijajućeg betona

Prema vezi između modula elastičnosti materijala na bazi cementa i vlakana, vlakna se mogu podijeliti na kruta vlakna čiji je modul elastičnosti veći od modula elastičnosti materijala na bazi cementa i na fleksibilna vlakna čiji je modul elastičnosti manji [21].

Polipropilenska vlakna su jedna od najčešće korištenih vlakana. Prema [22], podijeljena su u dva razreda: Razred I - mikrovlakna, promjera < 0,3 mm i Razred II - makrovlakna, promjera >0,3 mm. Mikrovlakna se dijele na monofilamentna i fibrilirana vlakna (slika 3) čija je osnovna razlika u njihovom izgledu. Monofilamentna vlakna su različitog poprečnog presjeka (kružni, eliptični, x presjek) dok fibrilirana polipropilenska vlakna izgledaju kao mrežica koju čine veći broj vlakana malog promjera. Dodavanjem mikrovlakana u beton pozitivno se utječe na

plastično skupljanje, eksplozivno odlamanje betona pri povišenim temperaturama i otpornost na udar. Također postoje i multifilamentna vlakna koja se sastoje od mnogo kontinuiranih vlakana ili niti, a razlikuju se od monofilamentnih po tome što monofilamentna vlakna čini samo jedna nit [23].



Slika 3 a) Monofilamentna vlakna b) Fibrilirana vlakna [24], [25]

Svojstva mješavina u svježem stanju najviše ovise o geometrijskim karakteristikama vlakana. Kako bi se postigla homogena distribucija vlakana, potrebno je obratiti pozornost na ovisnost između maksimalnog zrna agregata i duljine vlakana [26]. Manje količine mikrovlakana (< 25 mm) mogu povećati kohezivnost i spriječiti segregaciju zbog njihove međusobne povezanosti [27]. Također je zaključeno da veće količine vlakana zahtijevaju modifikaciju sastava mješavine kako bi se povećala specifična površina vlakana i spriječili negativni utjecaji na obradivost i sadržaj zraka [27]–[29]. Modifikacija se može postići dodavanjem veće količine superplastifikatora ili promjenom sastava mješavine, odnosno povećanjem sitnih čestica u sastavu betona. To je prikazano u istraživanju koji su proveli Saje i dr. [30] gdje su se povećanjem volumenskog udjela vlakana i istodobnom promjenom omjera sitnog i krupnog agregata dobili bolji rezultati rasprostiranja. Ukoliko se ne modificira sastav mješavina, ne povećava količina superplastifikatora uz povećanje količine vlakana, može se očekivati smanjenje tečenja i sposobnosti prolaska mješavina [2]. Također dodatak vlakana povoljno utječe na viskoznost mješavina i smanjenje segregacije betona.

Fibrilirana vlakna (do 15 mm) imaju manji utjecaj na smanjenje obradljivosti u odnosu na multifilamentna vlakna ukoliko se doziraju u jednakim količinama [31]. Vrijeme miješanja treba biti optimalno, prekratko miješanje može prouzročiti grudanje vlakana dok predugo miješanje može oštetiti vlakna i utjecati na njihov faktor oblika. Vrijeme miješanja može imati utjecaj na svojstva betona u očvrnulom stanju [32], [33]. Optimalno vrijeme miješanja smatra se 5 minuta [34].

Ispitivanja pokazuju kako povećanje udjela polipropilenskih vlakana, duljina približno 6 mm, nema većeg utjecaja na tlačnu čvrstoću betona. Pобољшanje tlačnih čvrstoća je primijećeno pri manjim udjelima polipropilenskih vlakana, do 0,1% što može biti objašnjeno sposobnošću vlakana da premošćuju mikropukotine i sprječavaju njihovo širenje. Dok se kod većih udjela vlakana, od 0,5 %, smanjuju vrijednosti tlačnih čvrstoća [27], [29], [31], [35], [36]. Kod doziranja većih količina vlakana malih promjera, dolazi do problema njihove jednolike distribucije u mješavini čime se povećava količina zahvaćenog zraka koja utječe na smanjenje tlačne čvrstoće [27], [37].

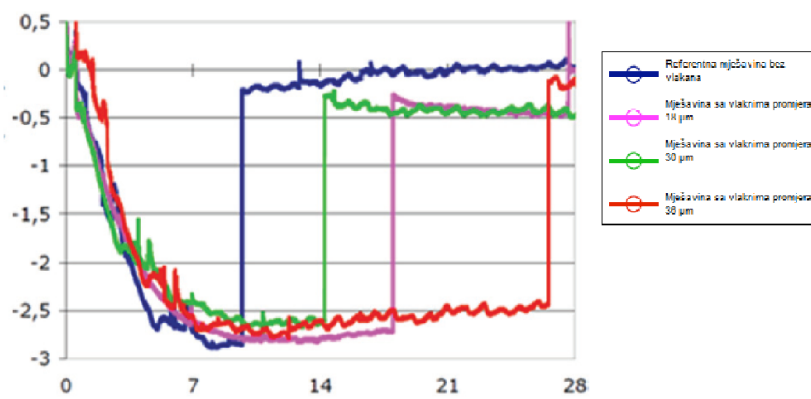
Dodatak fibriliranih polipropilenskih vlakana u količinama od 0,1 do 2,0 % na volumen, nema učinak na statički modul elastičnosti u usporedbi s običnim betonom bez dodataka vlakana [27].

Čvrstoća na savijanje i žilavost cementnih kompozita s dodatkom polipropilenskih vlakana ovise o svojstvima kao što su vrsta vlakana, njihov udio, prionjivost vlakana i cementne matrice te kvaliteta matrice kompozita. Istraživanja su pokazala da se dodavanjem vlakana u cementne kompozite čvrstoća na savijanje istih, lagano raste te da je optimalan udio vlakana 0,3 %. Svako daljnje povećanje količine vlakana uzrokuje smanjenje čvrstoće na savijanje. Također su ispitivanja pokazala da dodatak od 0,91 kg/m³ monofilamentnih vlakana kružnog poprečnog presjeka i glatke površine (duljina/promjer = 12/0,037 mm) ili fibriliranih polipropilenskih vlakana (duljina/promjer = 12/0,45 mm) osigurava između 9,48 i 13,40 % povećanja čvrstoće na savijanje. Iz toga se može zaključiti kako fibrilirana vlakna bolje utječu na čvrstoću na savijanje i žilavost cementnih kompozita [27], [33], [36].

Pri izlaganju povišenoj temperaturi, mogle bi se dogoditi eksplozivne pukotine betonskih elemenata. Ovakvo ponašanje obično se javlja tijekom ranih faza požara, najčešće unutar prvih 30 minuta kod standardnog ispitivanja požara. To rezultira ljuštenjem slojeva betona debljine od 25 do 100 mm, a zahvaćena površina može porasti do 1 m². Na taj način, gubitak zaštitnog betonskog sloja, ponekad i do armature, može dovesti do smanjenja nosivosti betonskih elemenata. Prisutnost PP mikrovlakana ima pozitivan učinak na ponašanje betona pri povišenoj temperaturi. Zahvaljujući njihovom kemijskom sastavu, polipropilenska vlakna tope se na temperaturi od 165 °C. Pretpostavlja se da otapanje vlakana omogućava smanjenje unutarnjih naprezanja u betonu koje inače uzrokuje eksplozivno ljuštenje [38], [39]. Međutim, vlakna mogu imati negativan utjecaj na preostala betonska mehanička svojstva budući da značajno smanjuju preostalu tlačnu i vlačnu čvrstoću betona. Ovdje je preporučljivo korištenje PP vlakana kao dio ukupne zaštite od ljuštenja u kombinaciji s drugim materijalima kao što su vanjske termalne barijere [40].

Dva najvažnija parametra za kontrolu plastičnog skupljanja su volumenski udio vlakana i njihov promjer [41], [42], [43]. Ukoliko se koristi optimalni udio i odgovarajući promjer vlakana, moguće je smanjiti pojavu pukotina od plastičnog skupljanja za 10 % [41]. Učinkovitija kontrola pukotina se postiže s fibriliranim za razliku od monofilamentnih vlakana [42]. Meyers i dr. [44] zaključuju kako je najučinkovitija kontrola pukotina postignuta kombiniranjem različitih duljina (6 - 20 mm) multifilamentnih vlakana.

Polipropilenska vlakna imaju pozitivan utjecaj na smanjenje širenja pukotina te samim time i na smanjenje vrijednosti ograničenog skupljanja (slika 4).



Slika 4 Raspodjela napreznja pri ispitivanju ograničenog skupljanja [45]

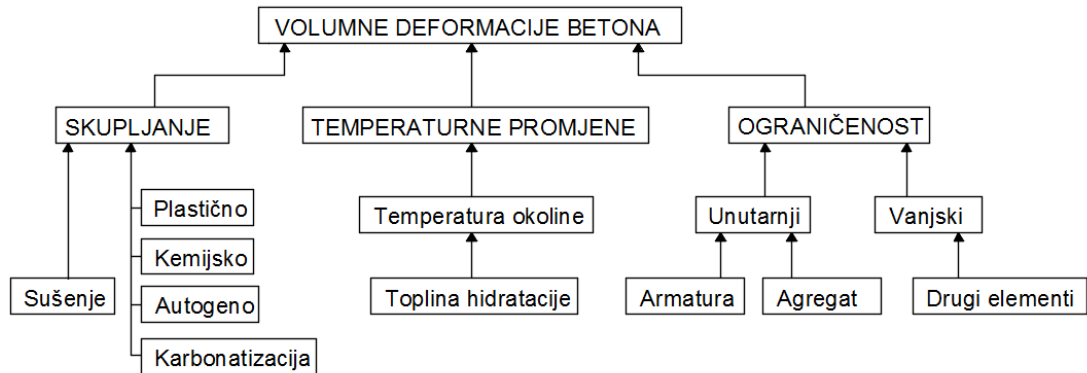
Vrijednost doprinosa vlakna ovisi o njihovoj vrsti, promjeru i obliku. Monofilamentna vlakna s promjerom 18 µm pokazuju veći utjecaj na ograničeno skupljanje u odnosu na vlakna s većim promjerom (30 µm i 36 µm). Ispitivanja monofilamentnih i makrosinoidalnih vlakna visokih svojstava (duljina 5,1 cm) pokazuju bolji utjecaj sinusoidnih vlakana [46]. Istraživanje [47] je pokazalo da beton s polipropilenskim vlaknima duljine 19 mm može izdržati veća napreznja uzrokovana ograničenim skupljanjem u odnosu na obični beton. Prva pukotina kod običnog betona pojavila se pri napreznju od 2,2 MPa dok je to kod betona s polipropilenskim vlaknima bilo 3,3 MPa.

4. AUTOGENO SKUPLJANJE CEMENTNIH KOMPOZITA

Glavnim uzročnikom smanjene čvrstoće i trajnosti betonskih konstrukcija smatraju se pukotine koje nastaju tijekom ranog razdoblja hidratacije cementnog materijala. Pojava pukotina prouzročena je volumenskim promjenama, a povezana je s mikrostrukturnim promjenama i kemijskim reakcijama koje se intenzivno odvijaju prvih nekoliko dana. To upućuje na to da su kinetika i priroda reakcije hidratacije, kao i fizikalna svojstva upotrijebljenog cementa, osnovni procesi i parametri koji izravno utječu na ranu deformaciju [48].

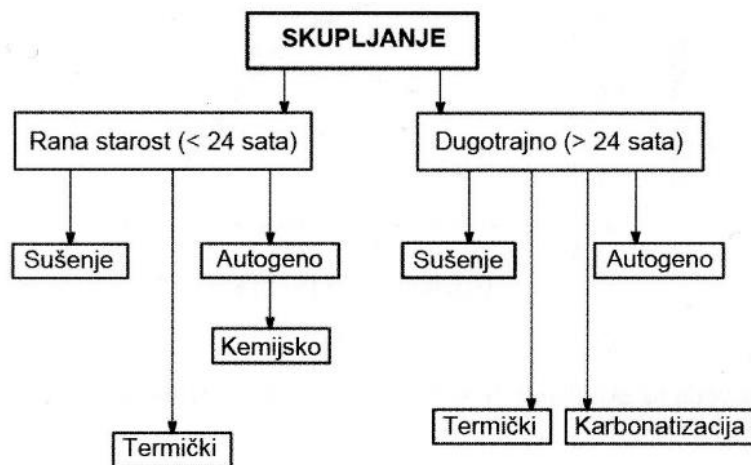
Volumenske promjene započinju ubrzo nakon ugradnje, pri čemu pojava volumenskih promjena unutar 24 sata može imati značajan utjecaj na svojstva u očvrslom stanju. Volumenske deformacije betona kao poroznog materijala nastaju pri izlaganju mehaničkim, termičkim ili hidrološkim utjecajima tako da se i podrijetlo nastanka može promatrati s ta tri različita aspekta [49].

Beton mijenja volumen uslijed kemijskih reakcija, promjene temperature i vlažnosti okoline. Tijekom hidratacije cementu se smanjuje volumen, jer produkti hidratacije imaju manji volumen od komponenti koje su ušle u reakciju. Prilikom odvijanja reakcija, može doći do nedostatka vode što uzrokuje skupljanje. Uslijed skupljanja dolazi do pojave pukotina koje dugoročno gledano mogu biti ozbiljan problem u pogledu trajnosnih svojstava betona, jer omogućuju prodor vode s površine betonskog elementa u njegovu strukturu [50]. Do plastičnog skupljanja dolazi uslijed gubitka vode evaporacijom s površine. Pri izloženosti betonskog elementa promjeni vlažnosti, može doći do bubrenja, povećanjem vlažnosti ili skupljanja uslijed smanjenja vlažnosti. Kao i kod svakog drugog materijala, tako i kod betona, temperatura ima svoj doprinos u nastanku deformacija. Ukoliko je riječ o betonskom elementu, promjene zbog temperature nastaju kod promjene vanjske temperature ili uslijed porasta temperature zbog topline hidratacije. Uslijed povećane temperature dolazi do širenja, a ako je temperatura smanjena do skupljanja. Na slici 5 prikazan je shematski prikaz volumenskih deformacija betona [50].



Slika 5 Shematski prikaz volumenskih deformacija betona [50]

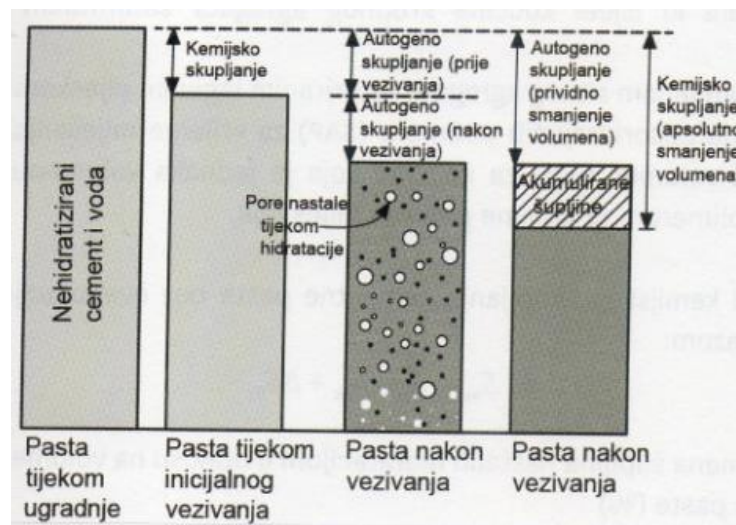
Ukoliko sve navedene deformacije nisu ograničene, beton će se slobodno deformirati i u njemu će nastajati unutarnja naprezanja. Kada unutarnja naprezanja dosegnu vrijednost vlačne čvrstoće betona, doći će do pojave pukotina. Budući da su u stvarnosti betonski elementi najčešće ograničeni susjednim elementima, vlastitom geometrijom ili krutošću, nisu mu dopuštene slobodne deformacije. Takva oštećenja ne moraju nužno ugroziti nosivost konstrukcije, ali predstavljaju mjesto na kojemu je omogućen prodor štetnih tvari u beton što za posljedicu može imati koroziju armature i propadanje konstrukcije [50]. Na slici 6 prikazana je podjela skupljanja s obzirom na starost betona.



Slika 6 Dijagram stanja i vrsta skupljanja [51]

4.1. Općenito o autogenom skupljanju

Autogena promjena volumena dijeli se na autogeno skupljanje i autogeno bubrenje. Autogeno skupljanje je makroskopsko smanjenje volumena kada cement hidratizira nakon početka vezivanja. Takva pojava javlja se uslijed smanjenja unutarnje relativne vlažnosti betona ispod kritične vrijednosti (nedovoljna količina vode), odnosno kada nema kretanja vlage iz cementne paste ili u cementnu pastu, dolazi do isušivanja cementne paste, što u konačnici rezultira smanjenjem volumena. U autogeno skupljanje ne ubraja se deformacija volumena od gubitka ili prodiranja različitih stvari, promjene temperature, primjene vanjske sile ili spriječene deformacije. Takva vrsta skupljanja izražava se kao jednodimenzijaska promjena duljine ili kao postotak smanjenja volumena [13]. Pozivajući se na dublje analize, autogeno skupljanje je zapravo dio kemijskog skupljanja (slika 7) pri čemu se kemijsko skupljanje odnosi na smanjenje unutrašnjeg volumena, dok je autogeno skupljanje zapravo vanjska promjena volumena.



Slika 7 Veza između autogenog i kemijskog skupljanja [13]

Kod betona vrlo malih vodocementnih omjera deformacija od autogenog skupljanja smatra se vrlo značajnom. Postoje različita razmatranja o tome kako pojedini čimbenici utječu na veličinu autogenog skupljanja, ali došlo se do zaključka da se autogeno skupljanje ne može spriječiti načinom ugradnje i njegovom već se mora uzeti u obzir pri projektiranju sastava betonske mješavine. Prvi put je autogeno skupljanje opisano 1930-ih kao čimbenik koji doprinosi ukupnom skupljanju, a s obzirom da se javljao kod betona malih vodocementnih omjera koji su se u praksi slabo primjenjivali, nije mu se pridavao veliki značaj. Kasnijim

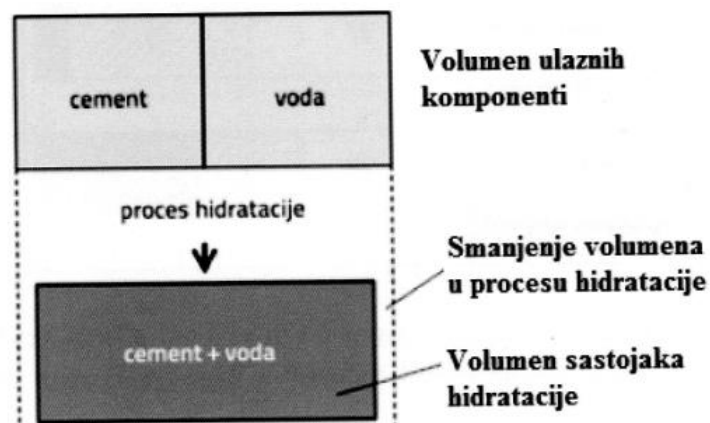
razvojem novih tehnologija betona i dodataka betonu, proučavanje autogenog skupljanja dobilo je na značaju [13].

Autogeno skupljanje javlja se u prvom danu izrade betona, a ima tri faze: tekuću fazu, fazu vezivanja betona i fazu očvršćivanja. Mjerenja se trebaju obaviti dok je beton u tekućoj fazi ili u fazi vezivanja, odnosno unutar prvoga dana. Upravo zato, početnu duljinu i volumen uzorka treba mjeriti u trenutku početka vezivanja kako bi se ponovnim mjerenjem nakon očvršćivanja mogla izračunati promjena volumena.

4.2. Razlika između autogenog i kemijskog skupljanja

S obzirom da je već spomenuto da je autogeno skupljanje dio kemijskog skupljanja, ona se ne mogu promatrati odvojeno. Nakon miješanja cementa s vodom, odmah dolazi do kemijskog skupljanja. U prvih nekoliko sati, autogeno skupljanje se u potpunosti može pripisati kemijskim promjenama zbog hidratacije cementa. Kada dođe do kraja vezivanja, autogeno skupljanje obuhvaća sve manje kemijskog skupljanja, a njegovo daljnje napredovanje nastaje samo uslijed samoisušivanja koje se definira kao lokalno sušenje unutrašnjih pora u betonu [13].

Ukoliko je apsolutni volumen produkata hidratacije manji od volumena nehidratiziranog cementa i vode, dolazi do kemijskog skupljanja. Glavni razlog smanjenja volumena cementne paste je veća gustoća kemijski vezane vode u odnosu na slobodnu vodu prije vezivanja. Na slici 8 prikazano je smanjenje volumena uzrokovano kemijskim reakcijama u cementnoj pasti.



Slika 8 Shematski prikaz mehanizma skupljanja [51]

4.3. Utjecaj primjene vrste cementa na autogeno skupljanje

Autogeno skupljanje ovisi o vrsti komponenata koje se koriste pri projektiranju sastava betona, odnosno o vrsti cementa, vodocementnom omjeru te vrsti dodataka. Smanjenjem vodocementnog omjera povećava se autogeno skupljanje, odnosno povećanje volumena cementne paste uzrokuje povećanje autogenog skupljanja. Promatrajući mješavine s različitim vrstama cementa kroz 48 sata, može se zaključiti da je deformacija betona s portlandcementom četiri puta veća nego kod betona s miješanim cementom [13].

4.4. Utjecaj primjene mineralnih dodataka na autogeno skupljanje

Samozbijajući beton, koji zahtijeva poseban sastav s povećanim udjelom finih čestica i većim volumenom paste, osjetljiviji je na pojavu pukotina od tradicionalno vibriranog betona. Osim povećanog volumena paste, na autogeno skupljanje utječe i promjena kapilarnog sustava zbog prisutnosti mineralnih dodataka. Kod finije mikrostrukture povećava se potreba za vodom, a time i autogeno skupljanje uslijed samosušenja. Finoća mliva pucolanskih mineralnih dodataka ima značajan utjecaj na autogeno skupljanje tijekom prvih 28 dana starosti betona. Finije čestice imaju veću specifičnu površinu koja sudjeluje u procesu hidratacije i tako povećava brzinu hidratacije, a time i autogeno skupljanje [52].

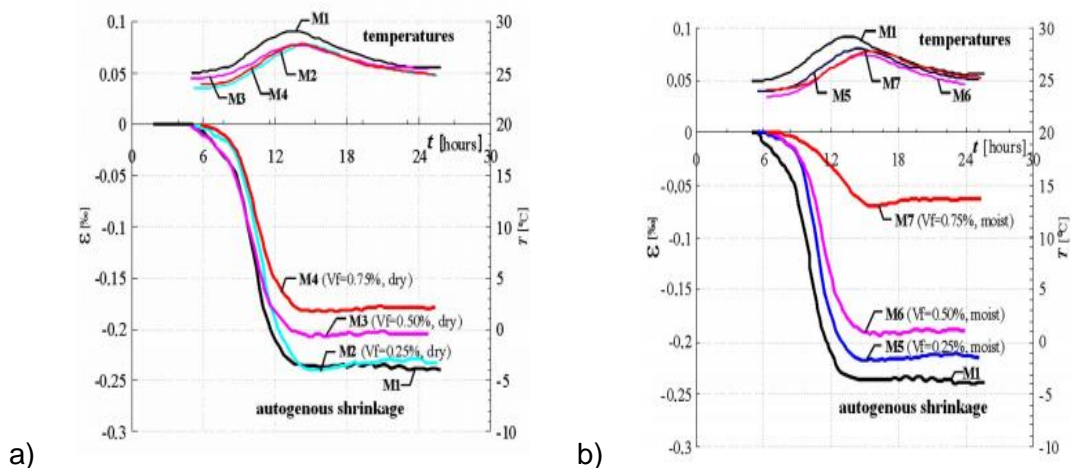
Valcuende M. i dr. [17] istraživali su utjecaj dodatka 45 i 90 kg/m³ vapnenca na autogeno skupljanje. Rezultati ispitivanja su pokazali da je skupljanje samozbijajućeg betona bilo manje za 19,8 % u odnosu na referentnu mješavinu običnog betona. Autori takvu pojavu objašnjavaju time što tijekom procesa hidratacije kalcijev karbonat koji je sastavni dio vapnenca prelazi u etringit. Punilo koje nije sudjelovalo u procesu hidratacije, ponaša se kao agregat i time sprječava skupljanje cementne paste. Mješavina s najvećim udjelom vapnenca pokazala je najmanje autogeno skupljanje. Trend smanjenja autogenog skupljanja samozbijajućeg betona s povećanjem udjela vapnenca u ranoj fazi (0 %, 10 %, 20 % i 30 % na masu cementa) zabilježen je u [51], no autori navode da je porast autogenog skupljanja zabilježen u kasnijim fazama.

Općenito, autogeno skupljanje se smanjuje upotrebom letećeg pepela, vapnenca, silicijske prašine te dodatka za smanjenje skupljanja od sušenja [13].

4.5. Utjecaj polipropilenskih vlakana na autogeno skupljanje samozbijajućeg betona

Jedna od glavnih prednosti primjene polipropilenskih vlakna u betonu je smanjenje autogenog skupljanja te sprječavanje pojave mikropukotina. Sprječavanje nastanka mikropukotina dok je beton još u svježem stanju izuzetno je bitno za betonske elemente, jer mikropukotine tijekom skupljanja uslijed sušenja vode razvoju većih pukotina, a time i većoj mogućnosti prodiranja agresivnih tvari iz okoliša. Kontrola nastanka pukotina je osnova za razvoj trajnijih i konstrukcija.

Saje i dr. [30] proveli su istraživanje utjecaja dodatka različitih volumenskih udjela PP vlakana duljine 12 mm i promjera 35 μm . Rezultati istraživanja su pokazali da je volumenskim dodatkom od 0,25, 0,5 i 0,75 % moguće smanjiti autogeno skupljanje nakon 24 sata za 5, 15 i 26 %, u odnosu na običan beton. Također je promatran utjecaj suhih vlakana i vlakana koja su 24 sata bila umočena u vodu na autogeno skupljanje betona visokih uporabnih svojstava (slika 9). Autogeno skupljanje mješavine koja ne sadrži polipropilenska vlakna gotovo je jednako skupljanju betona s volumenskim udjelom suhih vlakana od 0,25 %. S povećanjem volumenskog udjela vlakana autogeno skupljanje se smanjuje. S volumenskim udjelom 0,50 % primijećeno je smanjenje autogenog skupljanja za 10 %, a s 0,75 % suhih vlakana za 25%.



Slika 9 Autogeno skupljanje prvih 24 h: a) sa suhim polipropilenskim vlaknima ;b) s navlaženim polipropilenskim vlaknima [30]

Autogeno skupljanje uzoraka koji sadrže navlažena vlakna (slika 9b) u usporedbi s onim koja sadrže suha vlakna značajno je manje. Pogotovo je velika razlika kod autogenog skupljanja

u ranoj fazi dok su 28 - dnevna tlačna čvrstoća i obradivost u svježem stanju obaju uzoraka približno jednaka. Iz rezultata mjerenja vidljivo je da je autogeno skupljanje uzoraka sa volumenskim udjelom polipropilenskih navlaženih vlakana od 0,5 %, 25 % manje od referentnog uzorka koji ne sadrži vlakna i 15 % manje od uzoraka s udjelom vlakana od 0,25 %. Skupljanje uzorka s volumenskim udjelom vlakana od 0,75 % je 73 % u odnosu na referentni uzorak bez vlakana. Autogeno i ukupno skupljanje betona je najmanje kod uzoraka betona visokih uporabnih svojstava koji sadrži 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlakana. Dobiveni rezultati mogu se objasniti time što navlažena vlakna ne upijaju vodu potrebnu za hidrataciju.

Slični zaključci doneseni su i u istraživanju [47] gdje je autogeno skupljanje betona s polipropilenskim vlaknima duljine 19 mm bilo manje od referentnog betona bez vlakana. Međutim, postoje i istraživanja koja donose zaključke o tome da polipropilenska vlakna imaju mali ili nikakav utjecaj na autogeno skupljanje [44].

5. CEMENTNI KOMPOZIT S RECIKLIRANIM POLIMERNIM VLAKNIMA

Procjenjuje se da se svake godine samo u Europskoj uniji prikupi 63,000 tona polimernih vlakana od recikliranja gume. Takva vlakna su kontaminirana gumom te ih se najčešće uništavalo spaljivanjem. No prema europskoj Direktivi iz 2000. godine zabranjeno je njihovo spaljivanje bez recikliranja energije. Najveći problem je njihovo skladištenje pošto su veoma zapaljiva i nerijetko izazovu požar u postrojenjima za reciklažu, vrlo su lagana te nošena vjetrom zagađuju okolinu i podobna su za skupljanje i razmnožavanje raznih glodavaca i insekata [53].

Prema statistici iz 1992. Godine, u 12 zemalja EU deponiralo se 65 % otpadnih guma dok se ostalih 35 % zbrinjavalo na drugačiji način. Podaci iz 2002. godine pokazuju kako se u tadašnjih 15 država EU odlagalo manje od 35 % otpadnih guma dok današnje brojke pokazuju kako se u tim državama odlaže samo 5 % guma. U Republici Hrvatskoj Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva donijelo je 2006. godine Pravilnik o gospodarenju otpadnim gumama. Pravilnik ima za cilj uspostavljanje sustava skupljanja otpadnih guma radi uporabe u materijalne i energetske svrhe te zaštite okoliša [23], [53]. Mehaničko recikliranje najprihvatljivija je varijanta zbrinjavanja automobilskih guma. Kao nusprodukt dobivaju se granule gume, čelična vlakna i tekstilna polimerna vlakna (slika 10) [54]. Pri mehaničkoj reciklaži povoljna je činjenica da nusprodukti reciklaže zadržavaju jednaka svojstva kao i prilikom proizvodnje automobilskih guma.



Slika 10 Nusprodukti reciklaže automobilskih guma [55]

Granule gume moguće je koristiti kao zamjenu za dio agregata pri spravljanju betonske mješavine. Na taj način dobiva se beton otporan na agresivni okoliš i općenito beton s boljim

trajnosnim svojstvima. Osim navedenoga, takav beton ima dobra izolacijska svojstva i veliku mogućnost apsorpcije zvuka te se zbog toga takav betonski element može koristiti kao izolacijski materijal. Čelična vlakna dobivena reciklažom mogu se koristiti kao mikroarmatura te imaju slična svojstva kao industrijski proizvedena vlakna. Povećavaju duktilnost, žilavost i sprječavaju širenje pukotina. Velika prednost u odnosu na industrijski proizvedena vlakna je u cijeni, jeftinija su 10 puta [15].

Tekstilna vlakna kao zaseban produkt do sada nisu proučavana. Prethodna istraživanja iznosila su rezultate eksperimenata gdje su tekstilna vlakna bila „onečišćena“ s dva prethodno navedena nusprodukta. Pretpostavlja se da smanjuju skupljanje betona, a time i pukotine betonskog elementa. Također, primjena tekstilnih vlakana u betonu pokazala je da takvi betoni imaju veću otpornost na prodor klorida i vode u unutrašnjost betonskog elementa [55].

U dosadašnjoj primjeni nusprodukata reciklaže automobilskih guma sve komponente zajedno miješane su u beton. Ovim radom opisan će se metodologija uklanjanja nečistoća s vlakana te primjena pročišćenih tekstilnih vlakana u samozbijajućem betonu.

5.1. Karakteristike recikliranih polimernih vlakana

Reciklirana vlakna iz automobilskih guma su zbog svojih geometrijskih karakteristika vrlo slična polipropilenskim vlaknima. Prema analizi koja je provedena u sklopu FP7 projekta Anagennisi, neočišćena reciklirana polimerna vlakna sastoje se od 60 % PET (poliesterpolietilentereftalata), 25 % PA 66 (poliamid 66) i 15 % PBT (poli (butilentereftalata)) s malim udjelom čeličnih vlakana i gumenih čestica. Acevedo B. i dr. [56] također su proveli istraživanje identifikacije vlakana iz recikliranih guma te su zaključili da se vlakna mogu podijeliti u dvije skupine: mikrovlakna i vlakna. Termalna analiza vlakana je pokazala kako se mikrovlakna sastoje od Re (Rejon), Da (poliester dakron), Ny6,6 i Ny6, dok se vlakna sastoje od aramida, Ra i Da. Razlike u kemijskom sastavu postoje, jer su analizirana vlakna iz različitih tvornica reciklaže, a kemijski sastav vlakana prvenstveno ovisi o vrsti guma koje se recikliraju u reciklažnim pogonima (automobilske, kamionske, zrakoplovne i dr.).

U sklopu projekta FP7 Anagennisi, također je provedeno istraživanje geometrije vlakana, odnosno njihovih dviju osnovnih odrednica: duljine i debljine. Mjerenje debljine provedeno je pomoću projekcijskog mikroskopa tzv. lanametra, a mjerenje duljine vlakana izvršeno je direktnim mjerenjem izduženih vlakana. Budući da su na mikroskopskoj slici primijećene tri

vrste debljine vlakana, vlakna su razvrstana u tri kategorije. Također je zaključeno da je 80 % vlakana ispitnog uzorka manje od 12 mm. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 2 [23].

Tablica 2 Geometrijske karakteristike recikliranih polimernih vlakana [23]

Duljina, mm	Promjer, μm		Točka taljenja, $^{\circ}\text{C}$
8,4 \pm 3,8	Vrsta 1	30,93 \pm 2,46	210 - 260
	Vrsta 2	20,67 \pm 1,75	
	Vrsta 3	13,15 \pm 1,82	

5.2. Utjecaj recikliranih polimernih vlakana na svojstva u svježem stanju

Dosadašnja istraživanja [47], [57] su ustvrdila da se obradivost betonskih mješavina smanjuje dodavanjem polimernih vlakana iz automobilskih guma. Kako bi se spriječili negativni utjecaji dodatka vlakana na obradivost i sadržaj zraka, potrebno je modificirati sastav mješavina što se može postići upotrebom superplastifikatora ili većim udjelom sitnih čestica [47], [57]. Također je zaključeno da polimerna vlakna nemaju veliki utjecaj na gustoću betona u svježem stanju, jer je razlika između gustoća mješavina bila manja od 2 % [57].

5.3. Utjecaj recikliranih polimernih vlakana na svojstva u očvrslulom stanju

Iako je dosadašnja literatura ograničena, smatra se da reciklirana polimerna vlakna nemaju negativan utjecaj na mehanička svojstva betona. Serdar i dr. [47] zaključili su da su tlačne čvrstoće referentne mješavine, mješavine s polipropilenskim vlaknima i one s recikliranim polimernim vlaknima relativno slične te su u rasponu od 50 MPa (polipropilenska vlakna) do 51,8 MPa (referentna mješavina). Iz toga se može zaključiti da količina vlakana nema znatan utjecaj na tlačnu čvrstoću betona. Glavni razlog tome je što mehanička svojstva betona uglavnom ovise o kvaliteti matrice i strukturi pora.

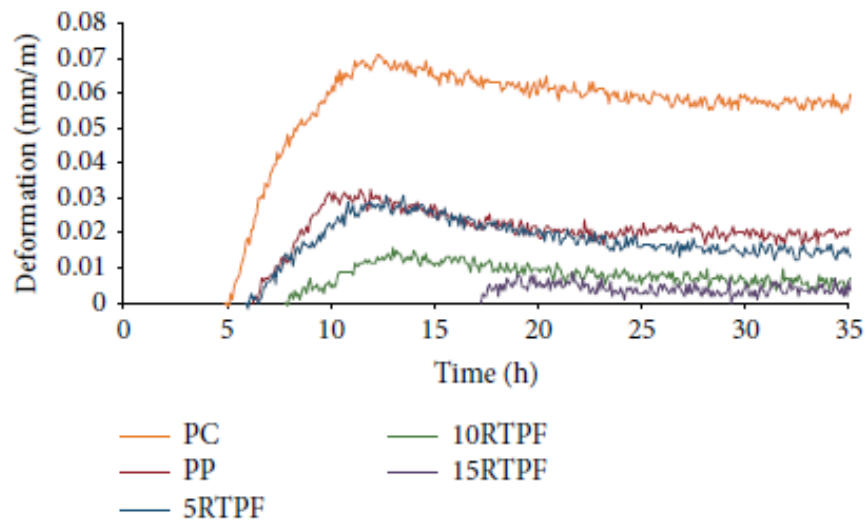
Tlačne čvrstoće mlaznih betona s recikliranim polimernim vlaknima su 11 % veće od vrijednosti dobivenih za mlazne betone bez vlakana. Mala razlika u rezultatima između mješavina s polipropilenskim vlaknima i recikliranim polimernim vlaknima može biti rezultat utjecaja vlakana na kohezivnost mješavine [57].

Mali udio polipropilenskih vlakana ($0,9 \text{ kg/m}^3$) u mješavinama nema utjecaj na čvrstoću na savijanje, dok isti udio recikliranih polimernih vlakana negativno utječe na čvrstoću na savijanje. Povećanjem volumenskog udjela vlakana, čvrstoća na savijanje raste u odnosu na običan beton za 10 – 16 %. Iako su korištena kratka vlakna u većem postotku (više od $0,9 \text{ kg/m}^3$), produljena je mogućnost apsorpcije opterećenja prije otkazivanja [57].

Mavridou S. i Oikonomou M. [58] su u svojem istraživanju ispitivali mješavine mortova s udjelima vlakana 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6, i 2,0 % na ukupni volumen mješavine. Jedna vrsta vlakana bila je onečišćena, dok je druga bila oprana u vodi. Primijećeno je da dinamički modul elastičnosti, mjeren ultrazvukom, pada s povećanjem udjela vlakana. Također su uzorci s opranim vlaknima imali nešto veće vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti od onih s neopranih vlaknima. Jednaki trend je primijećen i pri ispitivanju čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće.

5.4. Utjecaj polimernih vlakana na autogeno skupljanje

Serdar i dr. [47] proučavali su utjecaj nepročišćenih recikliranih polimernih vlakana na autogene deformacije u prvih 36 sati. Autogeno skupljanje je najprije započelo kod običnog betona (5 sati nakon ugradnje), zatim kod betona s polipropilenskim vlaknima (6 sati nakon ugradnje) a tek onda kod betona s recikliranim polimernim vlaknima (6,5 sati za mješavinu s 5 kg/m^3 , 7,3 za 10 kg/m^3 i 17,3 sata za 15 kg/m^3 vlakana). Proučavajući zadnju fazu autogenog skupljanja, zaključeno je da običan beton ima najveće, a beton s 15 kg/m^3 vlakana najmanje autogeno skupljanje. Modul elastičnosti polimernih vlakana je sličan modulu elastičnosti mladog betona te zbog toga vlakna pozitivno utječu na raspodjelu naprezanja unutar betona, a samim time i na autogeno skupljanje. Također, vlakna tijekom miješanja na sebe vežu vodu, dio te vode ostaje vezan za vlakna i nakon hidratacije što ima utjecaj na smanjenje samoisušivanja betona koje je većim dijelom odgovorno za autogeno skupljanje (slika 11).



Slika 11 Prosječno autogeno skupljanje za sve mješavine [47]

6. RAZVIJANJE METODOLOGIJE I UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE VLAKANA

Budući da se kao nusproizvod pri reciklaži automobilskih guma dobivaju polimerna vlakana s velikim količinama sitnih gumenih granula i čeličnih vlakana, bilo je potrebno razviti metodologiju pročišćavanja vlakana. Proces čišćenja vlakana bio je podijeljen u dvije faze (detalji su opisani u poglavljima 6.1. i 6.2.) te je utvrđeno da se u uzorku nepročišćenih vlakana nalazi oko 60 % gumenih granula (pročišćavanje je provedeno na 117 uzoraka od kojih je jedan od uzoraka prikazan je na slici 12, a podaci o ostalima nalaze se u prilogu u tablici 12).



Slika 12 Prva faza čišćenja: a) onečišćena vlakna b) čista vlakna c) granule gume

6.1. Prva faza čišćenja

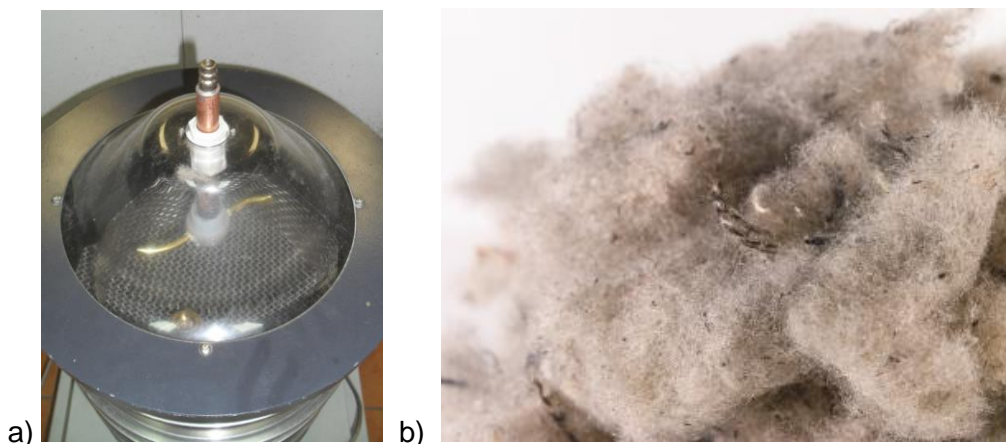
Za prvu fazu čišćenja razvijen je uređaj za pročišćavanje vlakana (slika 13) koji se sastojao od 4 sita (otvori sita bili su 0,250, 0,710, 2 i 4 mm). Sita su bila smještena na treskalicu koja je bila podešena na amplitudu 1,5 Hz. Na najviše sito (4 mm) postavljala su se vlakna zajedno sa 5 gumenih loptica. Uređaj je zatim zatvoren poklopcem te se kroz prije pripremljen otvor postavio pištolj kroz koji je strujao zrak pod tlakom od 8 bara. Zrak se upuhivao 5 minuta. Zbog svoje težine, većina granula guma pala je na zadnje sito na dnu zajedno s najsitnijim vlaknima. Svakom uzorku izvagana je masa prije čišćenja, također vagane su i mase čistih vlakana, mase onečišćenih vlakana i masa otpada nakon čišćenja. Za drugu fazu čišćenja korištena su samo vlakna koja su ostala na najvišem situ što čini oko 16 % ukupne mase prije pročišćavanja.



Slika 13 Uređaj za pročišćavanje vlakana

6.2. Druga faza čišćenja

Kako bi se vlakna još bolje očistila, bilo je potrebno izložiti ih još jednoj fazi čišćenja. Sita su postavljena istim redoslijedom kao i u prvoj fazi te je na treskalici amplituda postavljena na 1,5 Hz. Vrijeme je bilo 5 minuta, također isto kao i u prvoj fazi. Razlika je u tome što se u ovoj fazi zrak upuhivao kroz propeler koji je bio postavljen na vrh poklopca. Pod utjecajem zraka pod tlakom propeler se rotirao, a samim time su se rotirala i vlakna. Zbog upuhanog zraka vlakna su se rotirala i nečistoće su padale na niža sita. Budući da su se čišćenju podvrgavala vlakna koja su prošla već jednu fazu čišćenja, sada su dobivena vlakna koja se smatraju potpuno čistim vlaknima (slika 14). Od ukupne mase koja je ušla u drugu fazu čišćenja potpuno čista vlakna čine čak 70 % mase (prilog tablica 13).



Slika 14 Druga faza pročišćavanja: a) uređaj za drugu fazu pročišćavanja; b) vlakna pročišćena drugom fazom čišćenja

7. EKSPERIMENTALNI DIO

7.1. Cilj i program ispitivanja

Eksperimentalni dio rada je obuhvaćao je izradu 5 mješavina samozbijajućeg betona: mješavina bez vlakana (M1), mješavina s 1 kg/m^3 polipropilenskih vlakana (M2), mješavina s 1 kg/m^3 nepročišćenih recikliranih polimernih vlakana (M3) te 2 mješavine s različitim udjelima čistih recikliranih vlakana iz automobilskih guma (M4 i M5). Reciklirana polimerna vlakna varirana su u mješavinama s različitim stupnjem pročišćenosti, odnosno različitim masama vlakana po mješavini kada je riječ o pročišćenim vlaknima kako bi se odredio utjecaj stupnja pročišćavanja.

7.2. Sastavne komponente ispitnih mješavina

U eksperimentalnom dijelu rada korišten je cement CEM II/ BM (S-LL) 42,5N proizvođača Holcim Hrvatska d.o.o. (tablica 3). To je miješani portlandski cement s udjelom klinkera od 65 -79 %, 21 – 35 % miješanog dodatka (granulirana zgura visoke peći (S) i silicijski leteći pepeo (V), do 5 % filtarske prašine, dobivene iz procesa proizvodnje portlandskog cementnog klinkera i industrijskog gipsa dihidrata (regulator vezivanja). Svojstva upotrijebljenog cementa sukladna su normi HRN EN 197-1 i HRN EN 197-2 [8]. Cement karakterizira umjeren zahtjev za vodom; mali gubitak optimalne konzistencije; umjerenom vezivanje cementa; umjeren razvoj čvrstoće; vrlo umjeren razvoj topline hidratacije; dobra otpornost na umjerenom agresivne utjecaje zbog dodatka granulirane zgre i silicijskog letećeg pepela.

Tablica 3 Fizikalna i kemijska svojstva cementa

<i>Fizikalna svojstva</i>	<i>JM</i>	<i>CEM II/B-M (S-V) 42,5 N</i>	<i>Uvjet normi</i>
Postojanost volumena (Le Chatelier)	Mm	0	≤ 10
Početak vezivanja	Min	200	≤ 60
Tlačna čvrstoća na 2 dana	MPa	23	≤ 10
Tlačna čvrstoća na 28 dana	MPa	50	$\geq 42,5 \leq 62,5$
<i>Kemijska svojstva</i>			
SO₃	%	2,4	$\leq 3,5$
Cl	%	0,02	$\leq 0,1$

Za izradu betona korišten je vapnenački drobljeni agregat iz nalazišta Zvečaj (Arkada). Numerički i kumulativni granulometrijski sastavi agregata, s frakcijama 0 - 4 mm, 4 - 8 mm, 8 - 16 mm, dani su u tablicama 14 i 15 koje se nalaze u prilogu. Za proračun sastava agregata korištena je optimalna granulometrijska krivulja B po Fulleru prikazana formulom:

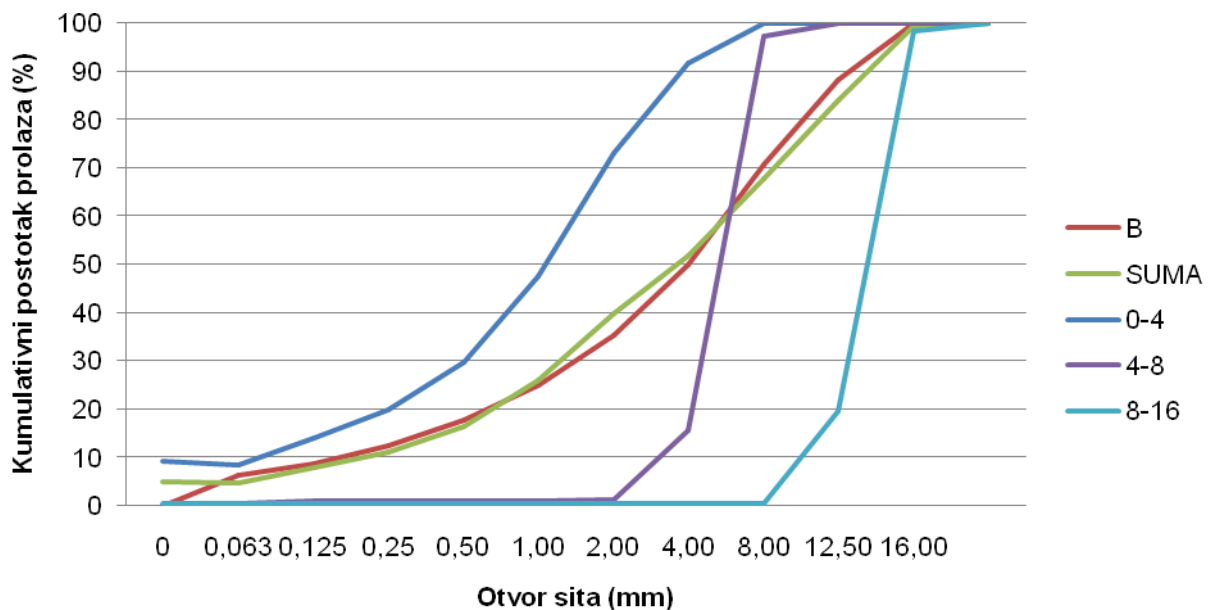
$$B = 100 \sqrt{\frac{d}{d_m}} \%$$

gdje je:

d – otvor sita (mm)

d_m – najveće zrno agregata (mm)

Krivulje dobivene prosijavanjem frakcija agregata te sumarna krivulja i krivulja B prikazane se na slici 15.



Slika 15 Krivulje frakcija agregata i sumarne krivulje

U eksperimentalnom radu kao punilo je korišten vapnenac s nalazišta Zvečaj. Krivulje prosijavanja punila i cementa prikazani u prilogu na slici 38.

Superplastifikator je kemijski dodatak koji omogućava smanjenje sadržaja vode u betonskoj mješavini, a da se ne promijeni njena obradljivost. Zbog takvog učinka, superplastifikatori se smatraju novijom vrstom kemijskih dodataka koji omogućavaju smanjenje vode za pripremu

betona i do 35 %. Smanjenje vode uglavnom ovisi o količini upotrijebljenog superplastifikatora, o početnoj konzistenciji betona, te o svojstvima uporabljenog cementa i ostalih mineralnih dodataka [12]. U eksperimentalnom djelu korišten je superplastifikator Glenium Sky 629 koji spada u novu generaciju superplastifikatora na bazi polikarboksilnih etera. Namijenjen je za proizvodnju transportnog betona visoke kvalitete s malim vodocementnim faktorom i izvanrednom obradljivošću. Doprinosi visokoj konzistenciji, betonska mješavina u koju je dodan ovaj superplastifikator ne pokazuje segregaciju te uz mali vodocementni omjer daje velike rane i konačne čvrstoće. Disperzijski efekt superplastifikatora baziran je na apsorpciji molekula na cementna zrna. Dolazi u obliku tekućine smeđe boje. Specifična težina mu je 1,06-1,1 g/cc na 20 °C. Uobičajeno preporučena količina ovog superplastifikatora iznosi 0,4 do 1,4 l na 100 kg veziva. Za samozbijajuće betone preporučuje se doziranje od 0,8 do 1,6 l na 100 kg cementa [59].

U radu je korišten je stabilizator mješavine RheoMATRIX 100 proizvođača BASF, tj. vodena otopina sintetičkih kopolimera visoke molekulske mase. Utječe na smanjenje segregacije i izdvajanja vode, može se koristiti sa svim vrstama cementa i ne utječe na vrijeme očvršćivanja betona.

RheoMATRIX 100 se dozira u količini između 0,1-1,5 % na masu finih čestica. U tablici 18 prikazani su tehnički podaci upotrijebljenog stabilizatora mješavine [60].

7.3. Projektiranje betonske mješavine

U radu je projektirano i analizirano ukupno 5 betonskih mješavina čiji su sastavi određeni prema CBI metodi projektiranja samozbijajućeg betona. Mješavina M1 korištena je kao referentna. Ostalim mješavinama u odnosu na referentnu dodavana su vlakna. U mješavinu M2 dodana su multifilamentna polipropilenska vlakna, u mješavinu M4 dodan je 1 kg/m³ nepročišćenih polimernih vlakana dok je u mješavinu M3 dodan 1 kg/m³ potpuno pročišćenih vlakana, a u mješavinu M5 2 kg/m³ potpuno pročišćenih vlakana. U tablici 4 prikazani su sastavi projektiranih mješavina.

Tablica 4 Prikaz sastava mješavina za m³ betona

Komponenta (kg/m³)	M1	M2	M3	M4	M5
Cement	450	450	450	450	450
Voda	243	243	243	243	243
Superplastifikator	4,87	6,94	4,87	6,94	4,87
Stabilizator mješavine	0,22	0,17	0,22	0,17	0,22
Punilo -vapnenac	220	220	220	220	220
v/c	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
Vlakna					
PP vlakna	-	1,0	-	-	-
RTPF-P	-	-	1,0	-	-
RTPF	-	-	-	1,0	2,0
Agregat					
Agregat (0 - 4)	842,14	838,60	840,89	838,60	839,64
Agregat (4 - 8)	187,21	186,15	186,83	186,15	186,46
Agregat (8 - 16)	420,60	418,20	419,75	418,20	418,91

7.4. Metode ispitivanja

Ispitivanje svojstava svježeg betona obuhvaćalo je sljedeća svojstva svježeg betona: rasprostiranje slijeganjem, gustoća, sadržaj pora, sposobnost prolaska, viskoznost i temperatura betona te ispitivanje autogenog skupljanja i tlačne čvrstoće pri starosti 3 i 7 dana. U tablici 5 je prikazan program ispitivanja s pripadajućim normama za ispitivanje.

Tablica 5 Ispitivanja samozbijajućeg betona

Ispitivanje	Norma
Rasprostiranje slijeganjem	HRN EN 12350 – 8:2010
Ispitivanje t ₅₀₀	HRN EN 12350 – 8:2010
Ispitivanje L-posudom	HRN EN 12350 – 10:2010
Ispitivanje segregacije	HRN EN 12350 – 11:2010
Ispitivanje gustoće betona	HRN EN 12350 – 6:2009
Ispitivanje sadržaja pora	HRN EN 12350 – 7:2009
Tlačna čvrstoća	HRN EN 12390-3:2009
Autogeno skupljanje	Metoda razvijena u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

7.4.1. Ispitivanje samozbijajućeg betona u svježem stanju

Ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona opsežnija su i zahtjevnija od ispitivanja svojstava običnog betona u svježem stanju. U tablici 6 prikazana su normom propisana ispitivanja koja beton na temelju njegovih svojstava svrstava u određene razrede [9].

Tablica 6 Ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona u svježem stanju

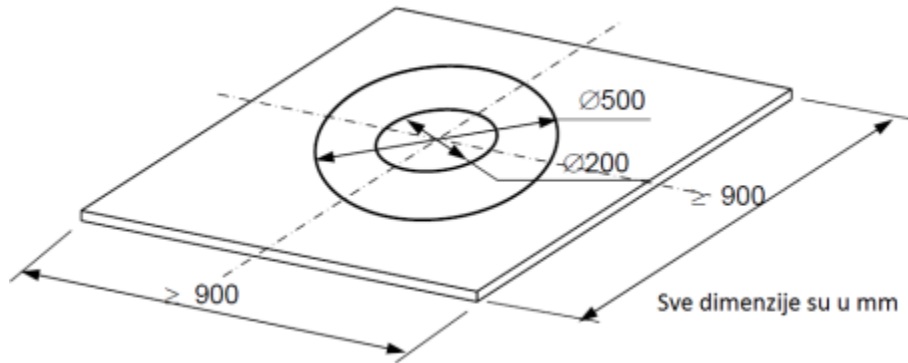
Svojstvo	Metoda ispitivanja	Oznaka razreda			
Tečenje	Rasprostiranje slijeganjem	550 - 650 mm		SF1	
		660 - 750 mm		SF2	
		760 - 850 mm		SF3	
Viskoznost	Vrijednost T_{500}	<2 s	≥2 s	VS1	VS2
Sposobnost zaobilaženja prepreka	Ispitivanje L - posudom	≥0,8 2 šipke	≥0,8 3 šipke	PL1	PL2
	Ispitivanje J- prstenom	≤10 12 šipki	≤10 16 šipki	PJ1	PJ2
Segregacija	Ispitivanje za određivanje otpornosti segregaciji	≤ 20		SR1	
	prosijavanjem	≤ 15		SR2	

7.4.1.1. Rasprostiranje slijeganjem (Slump flow test)

Ispitivanje se provodi prema normi *HRN EN 12350-8:2010* [61]. Slump flow i t_{500} je ispitivanje kojim se ispituje tečenje i viskoznost samozbijajućeg betona bez prisutnosti prepreka (slika 16 i 17). Temelji se na ispitivanju rasprostiranja opisanog u normi *HRN EN 12350-2:2010* [61]. Ispitivanje (t_{500}) mjeri brzinu tečenja i naznaku relativne viskoznosti samozbijajućeg betona.

Svježim betonom napuni se stožac do vrha kojeg se prethodno položi na ravnu ploču. Kada se stožac povuče prema gore, mjeri se vrijeme od podizanja stošca do rasprostiranja betona do promjera 500 mm (t_{500}). U tablici 7 prikazano je svrstavanje betona u razrede viskoznosti u ovisnosti o vremenu.

Na kraju se izmjeri najveći promjer i onaj okomit na njega. Vizualna opažanja tijekom ispitivanja mogu dati dodatne informacije o otpornosti segregaciji [9], [62].



Slika 16 Podloga za ispitivanje rasprostiranja slijeganjem[28]

Rasprostiranje slijeganjem SF dobiva se iz formule:

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

gdje je:

SF – rasprostiranje slijeganjem u mm

d_1 – veći promjer dužine rasprostiranja betona u mm

d_2 – promjer okomit na d_1 u mm

Vrijeme ispitivanja (t_{500}) zaokružuje se na 0,5 s.



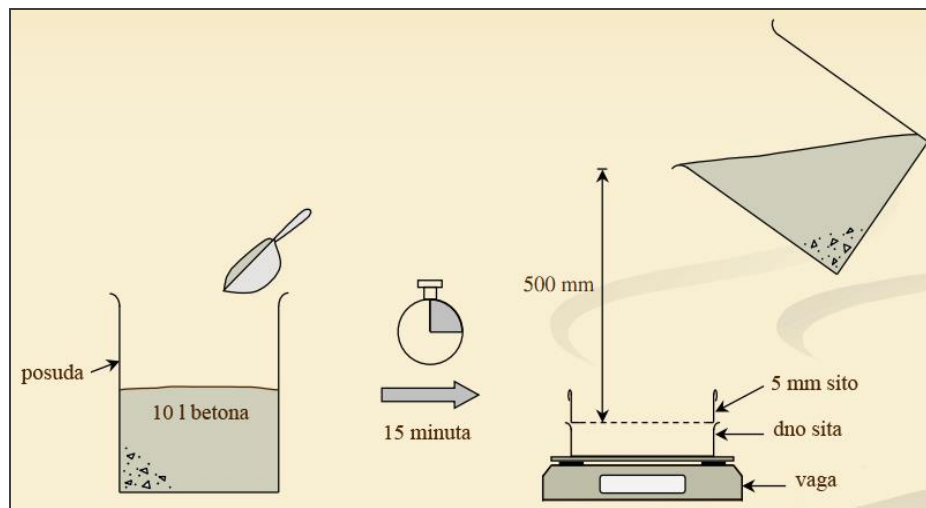
Slika 17 Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem

Tablica 7 Razredi viskoznosti prema HRN EN 206:2013 [7]

RAZRED	VS1/VF1	VS2/VF2
T_{500} (s)	≤ 2	> 2
Svojstva	-prikladno za gusto složenu armaturu, dobra završna površina -može doći do izdvajanja vode i segregacije	-moguća pojava tiksotropnih efekata (povoljno za smanjenje pritiska na oplatu) -poboljšana otpornost na segregaciju -loš izgled površine -veća osjetljivost pri nastavku betoniranja

7.4.1.2. Metoda ispitivanja segregacije

Ispitivanje se provodi prema normi *HRN EN 12350-11:2010* [63]. Ova metoda koristi se da bi se procijenila otpornost samozbijajućeg betona segregaciji. Nakon uzimanja uzorka ostavlja se beton da odstoji 15 minuta i promatra je li došlo do izdvajanja vode. Definira se gornji dio uzorka koji se izlije na sito pravokutnih otvora 5 mm. Nakon 2 minute izvaže se materijal koji je prošao kroz sito. Segregacija se računa kao omjer mase uzorka i mase materijala koji je prošao kroz sito (slike 18, 19 i tablica 8).



Slika 18 Ispitivanje segregacije sijanjem [9]

Segregirajući dio SR dobiva se iz formule:

$$SR = \frac{(m_{ps} - m_p)}{m_c} \times 100\%$$

gdje je:

SR – segregirajući dio

m_{ps} – masa dna sita i betona koji je prošao kroz sito u gramima

m_p – masa dna sita u gramima

m_c – masa betona na situ u gramima

Tablica 8 Razredi otpornosti segregaciji i pripadajuća primjena samozbijajućeg betona [9]

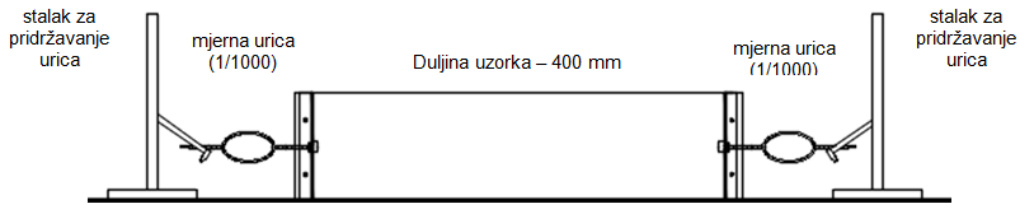
RAZRED	OTPORNOST SEGREGACIJI [%]	PRIMJENA
SR1	≤ 20	Za tanke ploče i vertikalne elemente za koje se zahtijeva tečenje betona u oplati do 5 m. Dimenzije otvora veće od 80 mm.
SR2	≤ 15	Za vertikalne elemente koji zahtijevaju tečenje betona veće od 5 m i s dimenzijama otvora većim od 80 mm. Koristi se i za elemente s otvorima manjim od 80 mm, ali onda tečenje betona mora biti manje od 5 m.



Slika 19 Ispitivanje segregacije sijanjem

7.4.2. Ispitivanje autogenog skupljanja

Ispitivanje autogenog skupljanja provedeno je na uzorcima veličine 10×10×40 cm koji su postavljeni u kalup s mjernim uricama (slika 20) (tj. digitalnim instrumentima koji mjere linearni pomak točnosti 0,001 mm) koje su pričvršćene na držače sa vanjske strane. Dužina mjerne baze iznosi 380 mm. Sa strana je stavljena guma probušena u sredini kako bi mogli proći vijci koji su spajani na mikrourice.

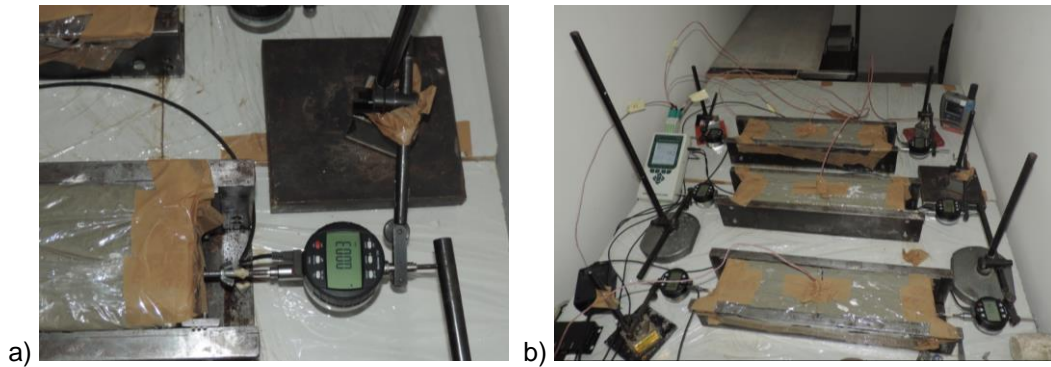


Slika 20 Shema uređaja za mjerenje linearne autogene deformacije skupljanja

Kalupi za ispitivanje autogenog skupljanja prilagođeni su tako da su probušene rupe s dvije suprotne strane kako bi se pričvrstile mjerne urice. One su pričvršćene na vijke koji se s unutarnje strane spajaju s posebnim čeličnim dijelom proširenim na kraju. Na početku su vijci zategnuti kako ne bi došlo do pomaka prilikom punjenja kalupa i dok je beton još u plastičnom stanju. Nakon početka vezivanja vijci se opuste da bi mogli pratiti deformaciju u betonu. Mjerne urice se prislone na kraj vijaka te precizno mjere linearne pomake [12].

Kalupi su prethodno obloženi plastičnom folijom da bi se spriječilo sušenje uzorka kao i smanjenje trenja sa stjenkama kalupa. Sredinom dvije suprotne strane čeličnog kalupa prolazi po jedan vijak koji se s unutarnje strane spaja s posebnim čeličnim dijelom proširenim na kraju. Na početku su vijci zategnuti da ne dolazi do pomaka prilikom punjenja kalupa i dok je beton još u plastičnom stanju. Nakon početka vezivanja betona vijci se popuste da bi mogli pratiti deformaciju u betonu te se na vanjski kraj vijaka prislone i uključe digitalne mjerne urice koje precizno mjere linearne pomake.

Instrumenti su spojeni s kompjuterom koji posebnim programom kontinuirano zapisuje podatke. Za svaku mješavinu ispitana su po tri takva uzorka pri temperaturi 20 ± 1 °C i konstantnoj vlažnosti 50 ± 5 % (slika 21). Veoma je bitno da je površina uzorka dobro zabrtvljena kako bi se eliminirala mogućnost gubitka vlažnosti što je postignuto plastičnom folijom i ljepilima (slika 21).



Slika 21 a) Urica neposredno prije početka mjerenja **b)** Uzorci i uređaji za ispitivanje autogenog ispitivanja

Također, mjerena je i promjena temperature u betonskom uzorku pomoću termočlanka smještenog u sredinu uzorka. Prema Japanskom institutu za beton, za početak autogenog skupljanja trebalo bi uzeti početak vezivanja cementa koji je približno jednak početku porasta temperature [64]. Točno predviđanje početka vezivanja betona teško je odrediti, a obično odgovara naglom porastu temperature betona, dok konačno stvrdnjavanje betona najvjerojatnije odgovara dosegnutom maksimumu temperature [65].

7.4.3. Tlačna čvrstoća betona

Tlačna čvrstoća određuje se prema normi *HRN EN 12390-3:2009* [66] na kockama dimenzija 15×15×15 cm. Uzorci koji se ispituju ugrađuju se u čelične ili plastične kalupe, koji moraju biti precizno izrađeni s planparalelnim stranicama.

U ovom radu ispitana je tlačna čvrstoća nakon 3 dana i 7 dana starosti uzoraka betona. Ispitivanje tlačne čvrstoće vrši se pomoću preše, a njena preciznost, ravnost pritisknih ploča i ostalo propisuje se normom (slika 22). Izmjerena je masa kao i dimenzije probnog tijela te je dobivena volumenska masa betona.



Slika 22 Preša za ispitivanje tlačne čvrstoće

Uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom *HRN EN 12390-2:2009*, oblika i dimenzija određenih normom *HRN EN 12390-1:2005*. Prije ispitivanja se s uzorka briše površinska vlažnost. Uzorci kocke se u prešu postavljaju okomito na smjer ugradnje i moraju se postaviti u sredinu preše (s točnošću od 1 %), kako bi opterećenje koje se nanosi bilo ujednačeno. Opterećenje se nanosi jednoliko, bez udara i brzinom od 0,2 MPa/s do 1,0 MPa/s. Maksimalno opterećenje (F) pri kojem je došlo do sloma se zabilježi kao rezultat ispitivanja. Tlačna čvrstoća je maksimalna potisnuta sila podijeljena s nominalnom površinom poprečnog presjeka uzorka.

Tlačna čvrstoća betona se računa prema izrazu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \left[\text{N/mm}^2 \right]$$

gdje je: f_c – tlačna čvrstoća betona (N/mm^2)

F – maksimalno opterećenje pri slomu (N)

A_c – površina uzorka (mm^2)

7.5. Postupak izrade samozbijajućeg betona

Prije izrade betona sastojci su čuvani u laboratoriju na temperaturi od 20 ± 2 °C. Za pripravak mješavine korištena je voda iz vodovoda (koju u skladu s *Tehničkim propisom za betonske konstrukcije* nije potrebno ispitivati), a koja je također bila približno iste temperature. Postupak miješanja betona prikazan je na slici 23.

Prilikom miješanja samozbijajućeg betona, veoma je bitan redoslijed ubacivanja komponenti. Mineralni i kemijski dodaci moraju biti dodani pravovremeno kako bi se postigao zahtijevani učinak. U mješavinama u koje su dodavana vlakna, vlakna su dodavana sa suhim komponentama te su miješane 3 min kako bi se osigurala dobra distribucija vlakana u mješavini i spriječilo nastajanje gruda vlakana u betonu.



Slika 23 Postupak miješanja; **a)** suha komponenta **b)** dodatak vlakana **c)** vizualni pregled mješavine tijekom miješanja

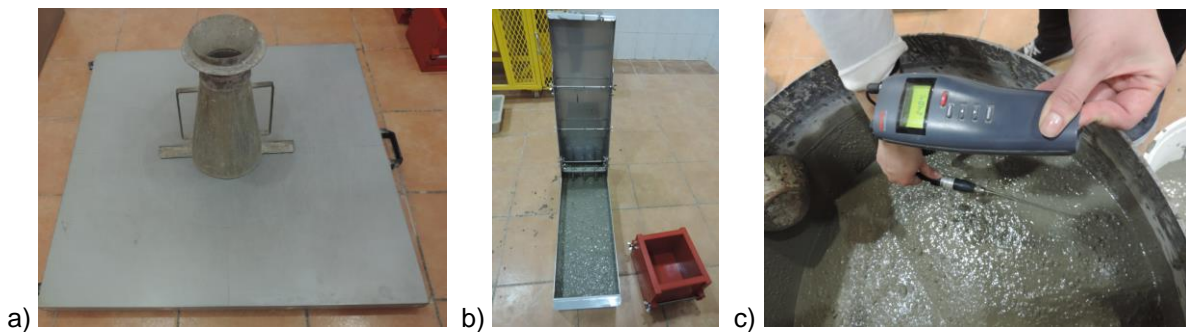
Sljedeće točke opisuju postupak izrade samozbijajućeg betona:

1. U miješalicu se prvo dodaju agregat i punilo u suhom stanju, te se miješaju slijedećih 5 sekundi.
2. Zatim se dodaje trećina projektom određene vode nakon čega je miješanje trajalo 30 sekundi.
3. Dodaju se cement i mineralni dodaci (leteći pepeo ili silikatna prašina) i miješanje se nastavlja dodatnih 30 sekundi.
4. Nakon toga, dodaje se druga trećina vode te se takav sastav miješa 60 sekundi.
5. Naposljetku se dodaju kemijski dodaci (superplastifikator i stabilizator mješavine) i posljednja trećina vode. Miješanje traje 90 sekundi, nakon čega slijedi pauza od 120 sekundi.
6. Nastavak miješanja traje daljnjih 180 sekundi.

Tijekom procesa miješanja betona potrebno je zabilježiti točno vrijeme dodavanja cementa, kao bitan ulazni podatak pri mjerenju autogenog skupljanja. Također, vizualno opažanje mješavine pri završetku miješanja daje informacije o svojstvima dobivenog samozbijajućeg betona. Uočavanje segregacije i izdvajanja vode zahtijeva povećanje projektirane količine kemijskih dodataka, posebice stabilizatora mješavine.

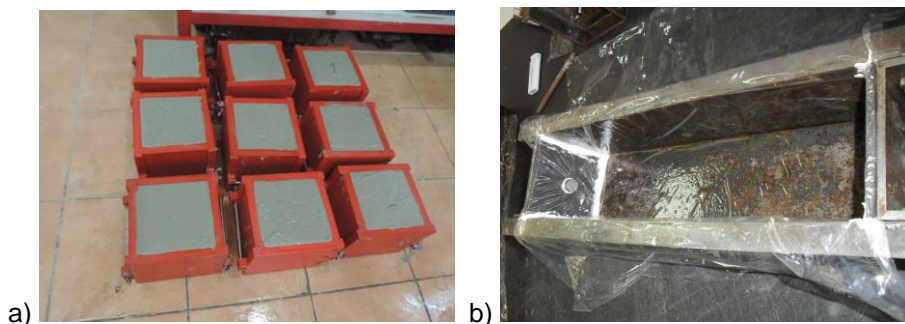
7.5.1. Ugradnja betona u kalupe

Pri projektiranju eksperimenta određena je količina betona koju je potrebno zamiješati kako bi se betonu u svježem stanju mogla ispitati zadana svojstva i kako bi se mogao ugraditi u kalupe za daljnja ispitivanja u očvrslom stanju. Pri provjeravanju je li beton zadovoljio dodatne zahtjeve da bi ga proglasili samozbijajućim, bilo je potrebno odmah po završetku miješanja odrediti konzistenciju slijeganjem (slika 24a), otpornost na segregaciju sijanjem i L-posudom (slika 24b). Osim dodatnih zahtjeva, betonu su se u svježem stanju ispitati i osnovni zahtjevi; sadržaj pora porometrom, gustoća i temperatura. Sva ispitivanja su se provela po normi propisanom postupku.



Slika 24 Neka od ispitivanja betona u svježem stanju; **a)** ploča i stožac za ispitivanje segregacije, **b)** L-kutija **c)** mjerenje temperature betona

U uzorke za mjerenje autogenog skupljanja ugrađen je beton te su zabrtvljeni (slika 25b). Autogeno skupljanje započelo je 4 - 5 sati nakon ugradnje betona, a mjerenje je započeto odmah nakon ugradnje. Beton je ugrađen i u 9 uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće (slika 25a) - po tri uzorka za starosti od 3, 7 i 28 dana. Uzorci su čuvani u vlažnoj komori od raskalupljivanja do trenutka mjerenja.



Slika 25 Kalupi za ispitivanja betona u očvrslom stanju; **a)** tlačna čvrstoća, **b)** autogeno skupljanje

8. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG RADA

8.1. Svojstva svježeg betona

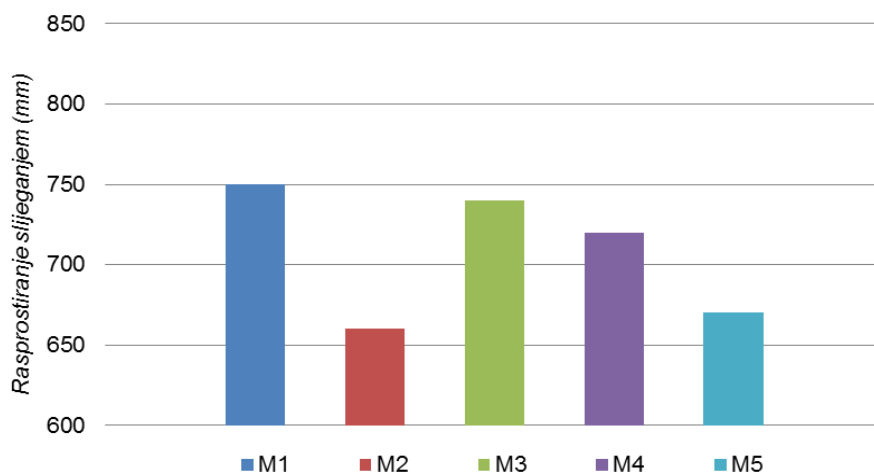
Nakon ispitivanja betona u svježem stanju, sve projektirane mješavine zadovoljile su zahtjeve za samozbijajući beton. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 9.

Tablica 9 Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju

Svojstvo	M1	M2	M3	M4	M5
Volumenska masa (g/cm^3)	2,29	2,29	2,29	2,28	2,27
Rasprostiranje slijeganje (mm)	735	660	730	700	665
$L_{\text{box-3}}$ šipke	0,8	0,8	0,71	0,8	0,8
Segregacija (%)	10,10	7,95	9,10	8,42	7,09
T_{500} (s)	0,63	1,06	0,68	0,56	0,72
Udio pora (%)	1,00	1,70	1,10	0,90	1,60
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	20,6	22,4	22,3	22,9	22,6

8.1.1. Rasprostiranje slijeganjem

Prema rezultatima ispitivanja rasprostiranja slijeganjem prikazanim na slici 26 sve mješavine spadaju u razred SF2 za rasprostiranje slijeganjem (što upućuje da je beton prikladan za većinu radova (zidove i stupove) [5].



Slika 26 Rezultati ispitivanja rasprostiranja slijeganjem

Referentna mješavina M1 pokazuje najveće rasprostiranje. Mješavine s dodatkom 1 kg/m³ vlakana (neočišćena M3 i potpuno čista vlakna M4) imaju slične vrijednosti slijeganja, dok mješavina M2 koja sadrži multifilamentna polipropilenska vlakna pokazuje najmanje rasprostiranje slijeganjem.

Iz dobivenih rezultata da se zaključiti da uz isti sastav polipropilenska vlakna smanjuju obradljivost (M2) te da niti dodatak veće količine superplastifikatora nije povećao obradljivost mješavine [23], [28], [44], [67].

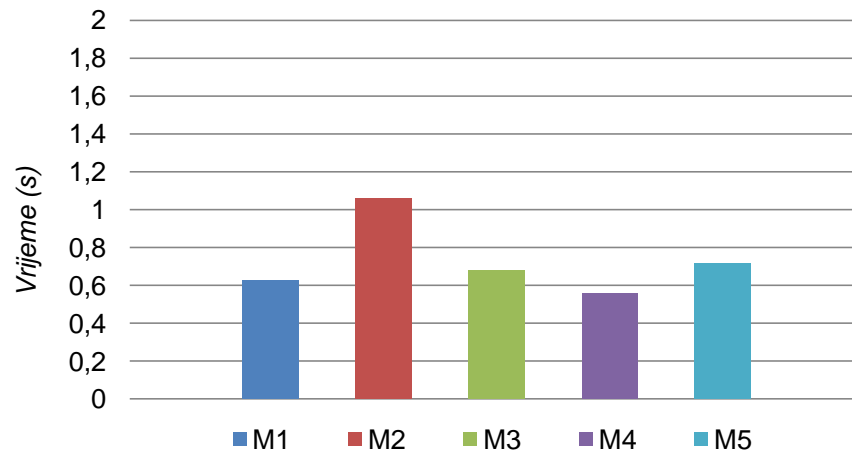
U mješavini M3 s 1 kg/m³ nepročišćenih vlakana obradljivost je istog razreda kao i kod ostalih mješavina iako su u literaturi iznešeni rezultati eksperimentalnih ispitivanja kod kojih je vidljiv pad obradivosti uz dodatak vlakana [19], [53], [54]. Ovakvo ponašanje betonske mješavine u svježem stanju može se objasniti time što se analizom rezultata dobivenih čišćenjem vlakana zaključilo da uzorak onečišćenih vlakana ima 60 % granula guma. Budući da su granule izrazito malih dimenzija, u betonu djeluju kao punilo što doprinosi obradivosti.

Manja obradljivost mješavine M5 koja ima 2 kg/m³ objašnjava se manjim udjelom superplastifikatora.

S obzirom da je u svaku od mješavina dodavano punilo na bazi vapnenca, može se zaključiti da fine čestice povećavaju obradljivost, a time i rasprostiranje slijeganjem.

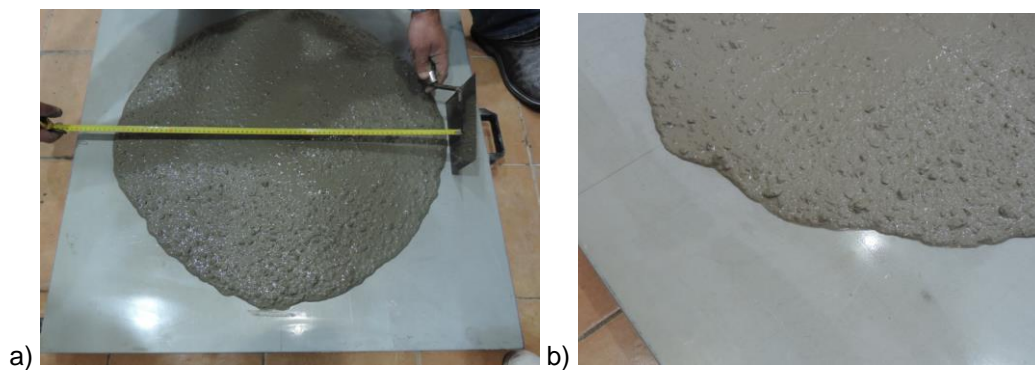
Također, superplastifikator i stabilizator mješavine doprinjeli su zahtijevanim svojstvima samozbijajućeg betona.

Rezultati prikazani slikom 27 pokazuju da sve mješavine spadaju u razred VS1 za ispitivanje t_{500} što znači da su postigle promjer od 500 mm za manje od 2 sekunde. Najkraće vrijeme t_{500} pokazuje mješavina M4 s 1 kg/m³ pročišćenih vlakana, dok mješavina M2 s dodatkom polipropilenskih vlakana najsporije zauzima promjer od 500 mm. Takvi rezultati u skladu su s dostupnom literaturom koja upućuje da dodatak vlakana povoljno utječe na viskoznost mješavine [27].



Slika 27 Rezultati ispitivanja vremena t_{500}

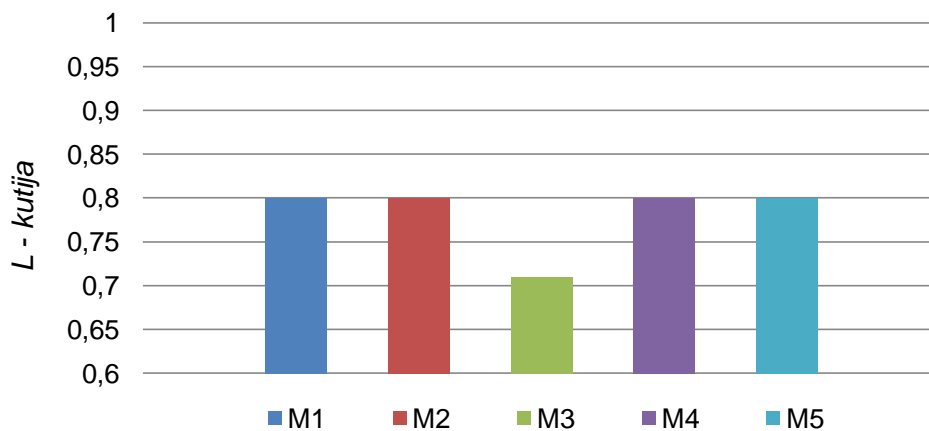
Slika 28 prikazuje da vizualnim pregledom nije uočena pojava segregacije krupnih zrna po rubovima pogače.



Slika 28 a) Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem; **b)** Rubni dio mješavine pri ispitivanju rasprostiranja slijeganjem

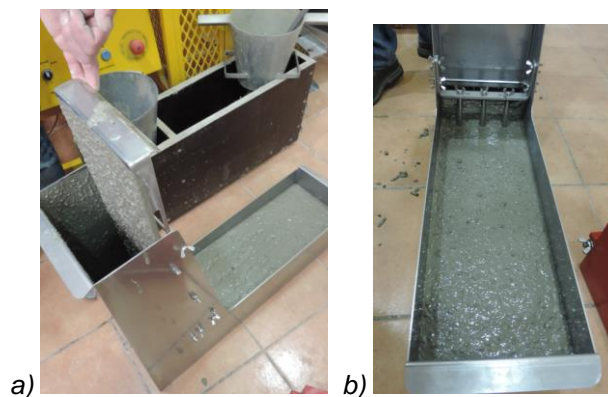
8.1.2. L- kutija

Na slici 29 prikazani su rezultati ispitivanja L- kutijom s tri armaturne šipke. Može se zaključiti da mješavina s 1 kg/m^3 nepročišćenih vlakana pokazuje najnižu vrijednost sposobnosti zaobilaženja prepreka. Omjer visina $h_1/h_2 \leq 0,8$ što ju svrstava u razred sposobnosti prolaska PL1. Ostale mješavine su jednake, imaju omjer $h_1/h_2 \geq 0,8$ i sve spadaju u razred PL2. Prema dobivenim rezultatima možemo zaključiti kako dodavanjem mikrovlakana ne smanjujemo sposobnost prolaska mješavine kraj armaturnih šipki. Vizualnim pregledom nije primijećeno grudanje vlakana.



Slika 29 Rezultati ispitivanja L- kutijom

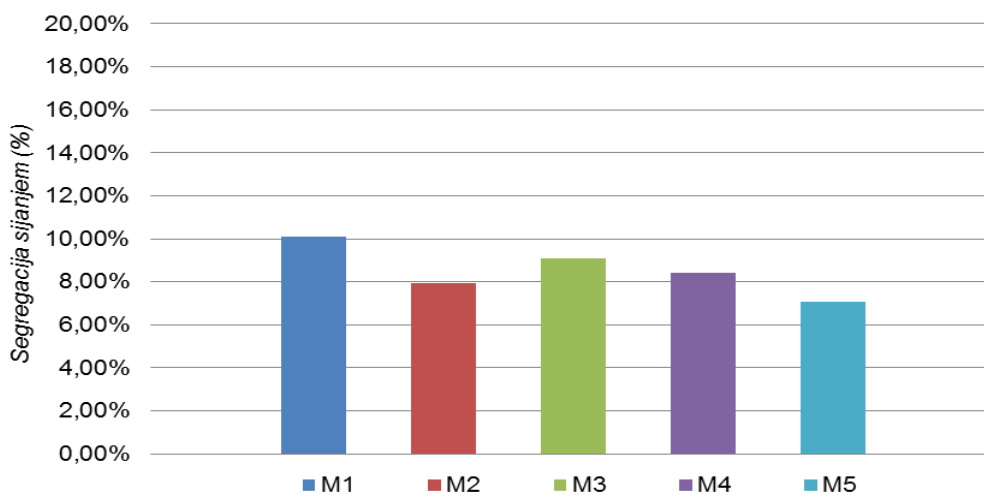
Na slici 30 prikazane su ispitane mješavine koje pokazuju dobru sposobnost prolaska kroz armaturne šipke bez vidljivih zapinjanja hkrupniji zrna agregata.



Slika 30 Ispitivanje sposobnosti prolaska L- kutijom: **a)** mjerenje visina h_1 i h_2 ; **b)** prikaz sposobnosti prolaska kraj tri armaturne šipke

8.1.3. Segregacija sijanjem

Rezultati ispitivanja segregacije sijanjem prikazani su na slikama 31 i 32 te prikazuju da sve mješavine zadovoljavaju u pogledu segregacije. Najmanja segregacija je zabilježena za mješavinu s 2 kg/m³ čistih recikliranih vlakana, a najveća za mješavinu bez dodatka vlakana. No, sve mješavine imaju otpornost segregaciji $\leq 15\%$ i tako spadaju u SR2 razred otpornosti segregaciji. Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da dodatak vlakana povećava otpornost segregaciji. Dobiveni zaključak je u skladu s rezultatima istraživanja u dostupnoj literaturi [27].



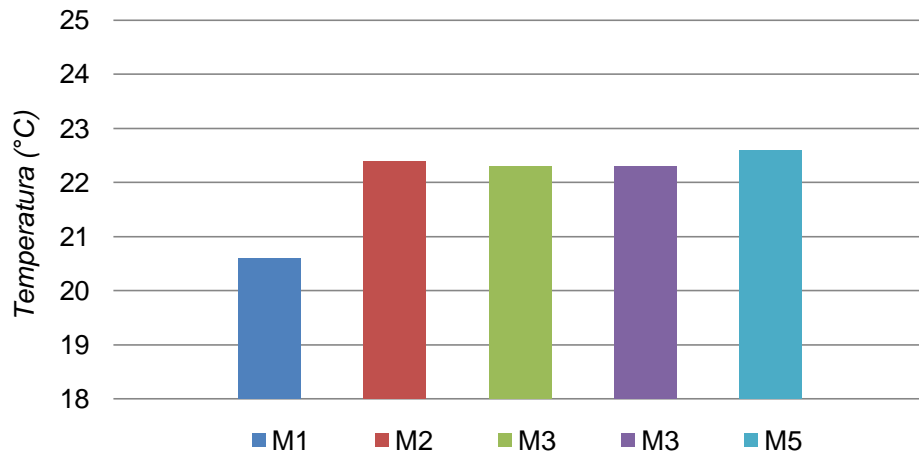
Slika 31 Rezultati ispitivanja segregacije sijanjem



Slika 32 Ispitivanje segregacije sijanjem

8.1.4. Temperatura

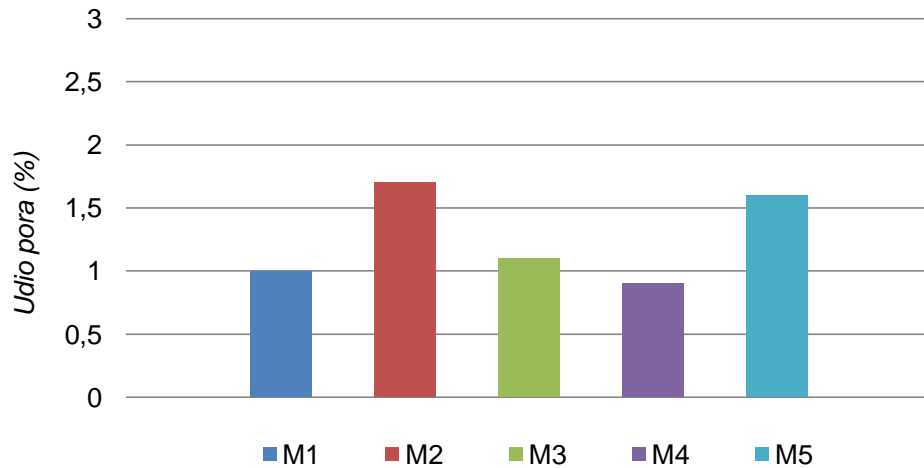
Ispitivanja temperature pokazuju da betonske mješavine s dodatkom vlakana imaju približno iste temperature i kreću se između 22 i 23°C (slika 33). Temperatura referentne mješavine bila je nešto niža i iznosila je 20,6°C.



Slika 33 Rezultati ispitivanja temperature

8.1.5. Udio pora

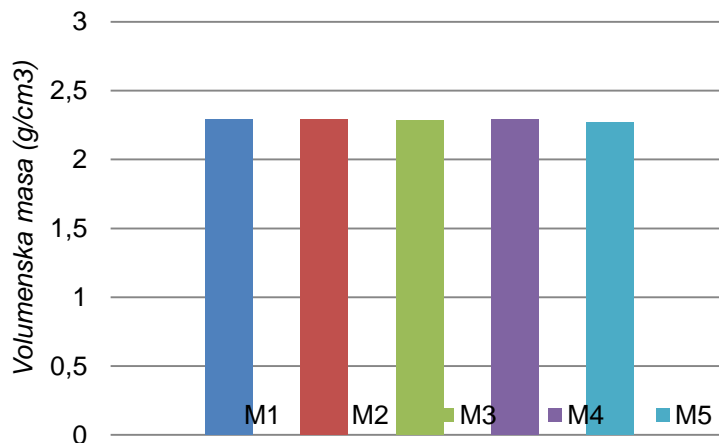
Porometrom je ispitan udio pora u pojedinoj mješavini. Rezultati ispitivanja prikazani su slikom 37. Može se zaključiti da mješavina M4 s 1 kg/m³ pročišćenih vlakana ima najmanji udio pora od 0,90 % dok mješavina M2 s polipropilenskim vlaknima ima 1,70 % pora. Također se povećanjem udjela recikliranih polimernih vlakana povećava udio pora u mješavini. Rezultati su u skladu s dostupnom literaturom koja kaže da povećanjem udjela vlakana dolazi do problema njihove distribucije u mješavini čime se povećava količina zahvaćenog zraka [37], [41].



Slika 34 Ispitivanje udjela pora porometrom

8.1.6. Volumenska masa

Ispitivanja volumenske mase pokazala su da su gustoće mješavina u svježem stanju približno jednake te da se kreću od $2,27 \text{ kg/m}^3$ do $2,29 \text{ kg/m}^3$ (slika 35). Prema istraživanju kojega su proveli Baričević i dr. [57] polimerna vlakna nemaju velik utjecaj na gustoću betona u svježem stanju što je u skladu sa dobivenim rezultatima.



Slika 35 Rezultati ispitivanja volumenske mase

8.2. Autogeno skupljanje

Ispitivanjem utjecaja očišćenih polimernih vlakana na autogeno skupljanje betona u prvih 24 sata može se zaključiti kako dodatak vlakana ima pozitivan utjecaj na smanjenje skupljanje. Mjerenje je započelo u trenutku kada je zabilježen prirast temperature, tj. kada je započela hidratacija cementa jer to indicira početak autogenog skupljanja. Analizirajući rezultate uočeno je kako je autogeno skupljanje najveće kod referentne mješavine bez dodataka te je deformacija nakon 24 h iznosilo 0.1211 mm/m, dok je za mješavinu sa dodatkom polipropilenskih vlakana iznosilo 0.0965 mm/m, a za mješavine sa nepročišćenim polimernim vlaknima 0.065 mm/m odnosno 0.061 mm/m za mješavinu sa 1 kg/m³ vlakana i 0.038 mm/m za mješavinu s 2 kg/m³ vlakana. Također, zabilježeno je vrijeme početka autogenog skupljanja prikazano u tablici 10. Početak autogenog skupljanja ovisi o početnoj temperaturi betonske mješavine jer se betonu nakon ugradnje temperatura najprije izjednači s temperaturom okoline, a zatim početkom hidratacije počinje rasti. Rezultati autogenog skupljanja ovise i o količini dodanog superplastifikatora u pojedine mješavine.

Tablica 10 *Vrijeme početka autogenog skupljanja pojedinih mješavina*

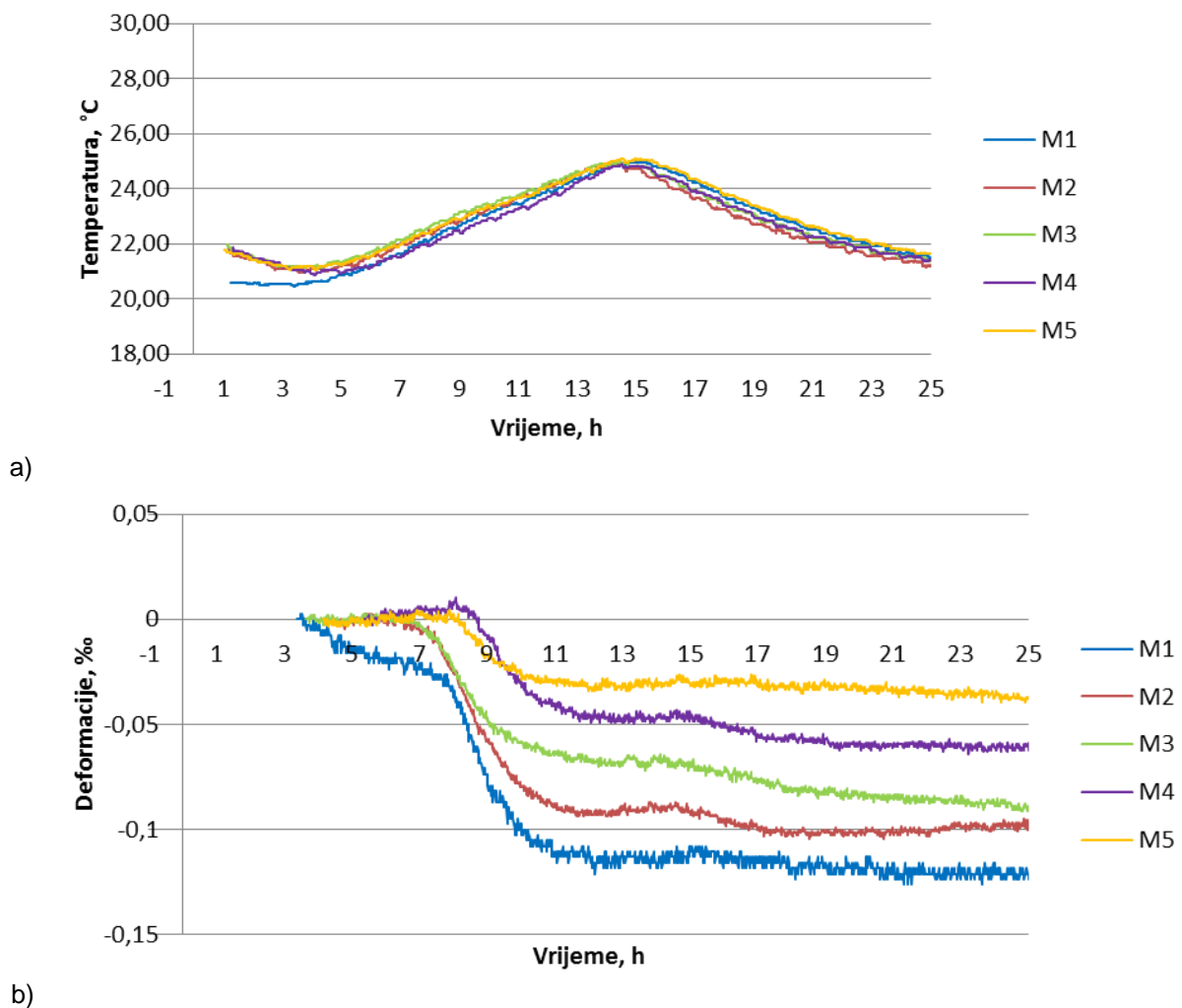
Mješavina	Vrijeme početka autogenog skupljanja
M1	3,42 h nakon ugradnje
M2	4,55 h nakon ugradnje
M3	3,68 h nakon ugradnje
M4	5,44 h nakon ugradnje
M5	4,18 h nakon ugradnje

S obzirom da betoni s većim udjelom sitnih čestica pokazuju veće skupljanje, a samozbijajući beton je takvog sastava, bilo je za očekivati da će referentna mješavina M1 pokazati najveće deformacije. Utjecaj vlakana na autogeno skupljanje može se objasniti time što je modul elastičnosti vlakana sličan modulu elastičnosti mladog betona. Zbog ove sličnosti u mehaničkim svojstvima vlakana i mladog betona, vlakna pozitivno utječu na raspodjelu naprezanja i smanjuje deformacije uzrokovane skupljanjem [47]. Kako vlakna utječu na smanjenje nastanka mikropukotina i postpukotinsko širenje [2], mješavina M2 s dodatkom polipropilenskih vlakana pokazala je manje skupljanje od mješavine M1 u prva 24 sata.

Autogeno skupljanje smanjivalo se povećanjem udjela recikliranih polimernih vlakana. Najmanje skupljanje pokazala je mješavina s 2 kg/m³ čistih vlakana. Isti trend smanjenja autogenog skupljanja primijećeno je u istraživanju [47] gdje je zaključeno da je 36 sati nakon

početka mjerenja, deformacija betonskih mješavina sa dodatkom 1 kg/m^3 i 2 kg/m^3 nepročišćenih recikliranih polimernih vlakana uzrokovana autogenim skupljanjem iznosila $0,0140 \text{ mm/m}$ i $0,0061 \text{ mm/m}$.

Rezultati izmjerene srednje temperature i srednje deformacije usljed autogenog skupljanja prikazane su na slici 36. U prilogu su dani rezultati za svaki pojedini uzorak.



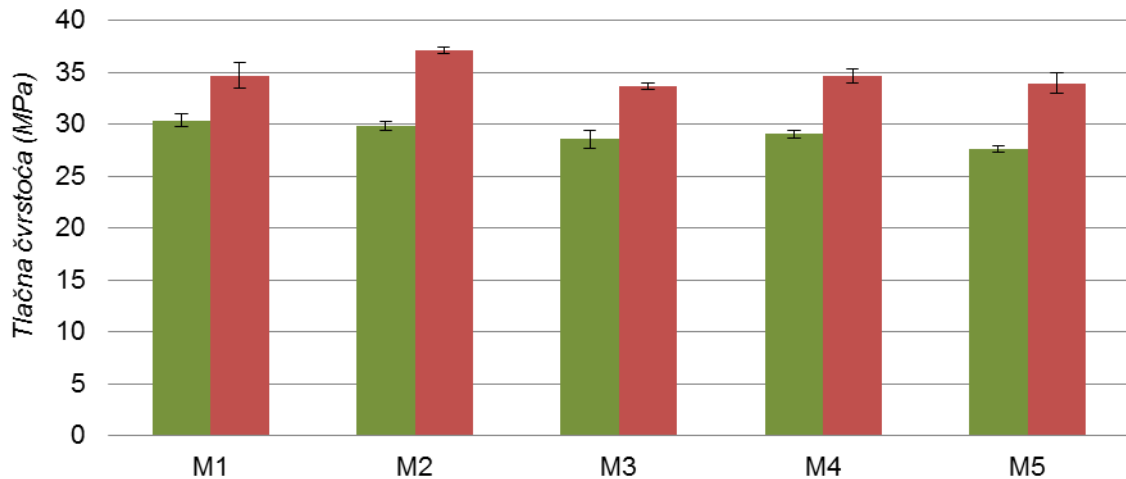
Slika 36 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja svih mješavina: a) temperatura b) autogene deformacije

8.3. Tlačna čvrstoća

Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je prema normi HRN EN 12390-3:2009 [66] na kockama veličine 15x15x15 cm nakon 1 dana i 7 dana. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 11, a grafički prikaz rezultata dan je na slici 37.

Tablica 11 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće za sve mješavine

Mješavina	Tlačna čvrstoća		Standardna devijacija	
	3 dana	7 dana	3 dana	7 dana
M1	30,38	34,69	0,66	1,25
M2	29,86	37,10	0,44	0,31
M3	29,07	34,62	0,88	0,28
M4	28,55	33,65	0,37	0,67
M5	27,58	33,94	0,29	0,97



Slika 37 Ispitivanje tlačne čvrstoće za 3 i 7 dana za sve mješavine

Iz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće, vidljiv je prirast 7 - dnevne tlačne čvrstoće u odnosu na onu ispitanu nakon tri dana (slika 37). Usporedbom rezultata 3 - dnevnih tlačnih čvrstoća može se zaključiti kako dodatak vlakana smanjuje čvrstoće. Smanjene tlačne čvrstoće kod uzoraka s vlaknima u korelaciji je s dosadašnjim istraživanjima koja pad tlačne čvrstoće povezuje s problemom veće količine zahvaćenog zraka kao posljedice otežane distribucije

vlakana u mješavini [37], [41]. Također treba uzeti u obzir činjenicu da superplastifikator ima utjecaj na veći prirast tlačne čvrstoće [13] što je vidljivo kod mješavina M2 i M4 u koje je dodana veća količina superplastifikatora. Analizirajući po tri uzoraka iz pojedine mješavine, za svaku od starosti, zaključeno je da je standardna devijacija za svaku od mješavina zanemariva.

9. ZAKLJUČAK

U svrhu smanjenja potrošnje prirodnih resursa koje nalažu europske direktive, građevinska industrija kao jedna od najvećih potrošača istih ima veliki potencijal za primjenu različitih recikliranih sirovina i nusprodukata iz drugih industrija. Jedan od takvih su i vlakna dobivena reciklažom automobilskih guma. Dosadašnja istraživanja su dokazala kako se primjenom vlakana utječe na smanjenje nastanka i širenja pukotina. Budući da su upravo pukotine pogodne za prodor agresivnih tvari u mikrostrukturu betona, bitno ih je pravovremeno spriječiti kako bi se očuvala trajnost konstrukcije.

Cilj istraživanja bio je proučiti utjecaj recikliranih polimernih vlakana iz automobilskih guma na autogeno skupljanje. Vlakna dobivena iz pogona za reciklažu bilo je potrebno odvojiti od ostalih nusprodukata, čeličnih vlakana i granula gume. Osmišljena je metodologija i uređaj za pročišćavanje te su vlakna podvrgnuta dvjema fazama čišćenja kako bi se daljnjom analizom napravila usporedba mješavina s polipropilenskim, nepročišćenim i pročišćenim polimernim tekstilnim vlaknima.

Kako bi se postigla svojstava samozbijajućeg betona bilo je potrebno modificirati sastave betonskih mješavina mineralnim i kemijskim dodacima. Sve mješavine, bez obzira na vrstu i podrijetlo dodanih vlakana, međusobno su ujednačene te svrstane u iste razrede propisane normom za samozbijajući beton. Također je zaključeno da dodatak vlakana nema znatan utjecaj na smanjenje tlačne čvrstoće betona.

Autogeno skupljanje samozbijajućeg betona s dodatkom industrijskih polipropilenskih vlakna smanjeno je u odnosu na referentnu mješavinu. Dodatno smanjenje autogenih deformacija postignuto je primjenom nepročišćenih i pročišćenih recikliranih polimernih vlakana u različitim udjelima.

U skladu s polazišnom činjenicom da vlakna smanjuju autogeno skupljanje, potvrđeno je pozitivno djelovanje svih vlakana sa različitim doprinosom. Jedan od naših ciljeva bio je razmotriti mogućnost zamjene industrijskih vlakana recikliranim. Budući da su već nepročišćena reciklirana vlakna pokazala bolje rezultate nego industrijska polipropilenska vlakna, jasno je da je zamjena moguća.

Kako je smanjenje deformacija bilo proporcionalno povećanju udjela pročišćenih vlakana u mješavinama, može se zaključiti da bi odabir pročišćenih vlakana bio optimalno rješenje proučavane problematike. No, ukoliko se želi ostati u duhu energetske održivosti, potrebno je dodatno razmotriti energetske isplativost pročišćavanja.

10. ZAHVALE

Prof. dr. sc. Nini Štirmer na pruženoj prilici, ukazanom povjerenju i stručnim savjetima.

Asistentici mag. ing. aedif. Martini Pezer na pomoći, razumijevanju, strpljenju i pozitivnom pristupu problematici.

Laborantima ing. građ. Zvezdani Matuzić i ing. Miri Matuziću na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

11. LITERATURA

- [1] Serdar M., Baričević A., Lakušić S., and D. Bjegović, "Betonski proizvodi specijalne namjene od reciklata otpadnih guma," *Gradjevinar*, vol. 65, no. 9, pp. 793–801, 2013.
- [2] Widodo S., "Fresh and Hardened Properties of Polypropylene Fiber Added Self-Consolidating Concrete," vol. 3, no. 1, pp. 85–93, 2012.
- [3] I. Papić, "Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva samozbijajućeg betona." diplomski rad, Zagreb, 2012.
- [4] Ouchi M., "Self-Compacting Concrete – Development." Applications and Investigations, pp. 29–34, 1999.
- [5] N. Štirmer and I. B. Pečur, "Projektiranje sastava samozbijajućeg betona," *Gradjevinar*, vol. 61, no. 4, pp. 321–329, 2009.
- [6] Kordts H.; Grube S., "Controlling The Workability Properties of Self Compacting Concrete Used as Ready-Mixed Concrete," 2002.
- [7] "HRN EN 206:2013-Beton - Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost."
- [8] "HRN EN 197-1:2011-Cement --1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene."
- [9] I. . Skomeršić, " Svojstva samozbijajućeg betona s različitim dodacima u svježem stanju." Zagreb, 2011.
- [10] "HRN EN 12620:2002+A1:2008-Agregati za beton."
- [11] "HRN EN 1008:2002-Voda za pripremu betona - Specifikacije za uzorkovanje, ispitivanje i potvrđivanje prikladnosti vode, uključujući vodu za pranje iz instalacija za otpadnu vodu u industriji betona, kao vode za pripremu betona."
- [12] A. Đureković, *Cement i cementni kompozit i dodaci za beton; Institut građevinarstva Hrvatske*, Školska kn. Zagreb, 1996.
- [13] N. Bjegović D.;Štirmer, *Teorija i tehnologija betona*. Zagreb.
- [14] Okamura H.; Ouchi M.;, "Self-compacting Concrete," *J. Adv. Concr. Tehnol.*, vol. 1, pp. 5–15.
- [15] Bjegović D.; Serdar M., Jelčić Rukavina M.; Baričević A.; Pezer M. " Possibilities in Concreteindustry Towards Circular Economy Through Industrial Symbiosis," vol. 57, pp. 31–42, 2014.
- [16] Pittsburgh Mineral and Environmental Technology, Inc.Silicafume
<http://www.pmetlabservices.com/library/Silica%20Fume/index5.html>,
- [17] Valcuende M.; Marco E.; Parra C.; Serna P., "Influence of Limestone Filler and Viscosity-Modifying Admixture on the Shrinkage of Self-Compacting Concrete," *Cem.*

- Concr. Res.*, vol. 42, no. 4, pp. 583–592, 2012.
- [18] T. L. Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe A.-M., “*Influence of Limestone Powder Used as Filler in SCC on Hydration and Microstructure of Cement Pastes.*” *Cement and Concrete Composites*, pp. 94–102, 2007.
- [19] Zhu J.C., Wenzhong; Gibbs, “*Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete.*” *Cement and Concrete Research*, pp. 1457–1462.
- [20] A. Alrifai, S. Aggoun, A. Kadri, S. Kenai, and E. Kadri, “*Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete.*” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 969–976, Oct. 2013.
- [21] He X.B.; Li Y.; Shen Q.; Key S.; Bridge M.; Engineering T., “*Impermeability Durability Polypropylene Fiber SCC Reinforced with Fibrillated.*” pp. 159–166, 2015.
- [22] “EN 14845–2:2006. Test methods for fibres in concrete–Part 2: Effect on concrete.”
- [23] D. Symposium and I. N. Civil, “*Doprinos održivom razvoju građevinarstva primjenom recikliranih polimernih vlakana iz automobilskih guma u cementnim kompozitima*” pp. 1–8.
- [24] “https://www.google.hr/search?q=monofilamentna+vlakna&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjK566WpbHMAhXLJcAKHbvaAosQ_AUIBygB&biw=1152&bih=562#imgrc=_XyVv2HDmTWRNM%3A.”
- [25] “https://www.google.hr/search?q=fibrilirana+vlakna&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi4tLnNpbHMAhXF_SwKHaaBA2YQ_AUIBygB&biw=1152&bih=562#imgdii=f5ISIRJkAwY92M%3A%3Bf5ISIRJkAwY92M%3A%3BflzwdSU3_3FXvM%3A&imgrc=f5ISIRJkAwY92M%3ANo Title.”
- [26] Baricevic A.; Pezer M.; Stirmer N., “*Utilization of Polypropylene Fibre Reinforced Cement Composites as a Repair Material: A Review.*” *Concr. Repair, Rehabil. Retrofit. IV 4th Int. Conf. Concr. Repair, Rehabil. Retrofit.*, no. Table 2, pp. 465–472, 2015.
- [27] “ACI 544.1R-96. Report on Fiber Reinforced Concrete. Reported by ACI Committee 544.1 R-96.” 2009.
- [28] “ACI Education Bulletin E2-00. Reinforcement for concrete—materials and applications. Developed by Committee E-701, Materials for Concrete Construction.” 2006.
- [29] Bayasi, Z. & Zeng, J. “*Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete.*” *ACI Materials Journal*, 90, 6, 605–610, 1993.
- [30] Saje D., Bandelj B., Šušteršič J., Lopatič J., Saje F., “*Shrinkage of Polypropylene Fiber-Reinforced High-Performance Concrete.*” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 7, pp.

- 941–952, 2011.
- [31] Kumar, R., Goel, P., Mathur, R. "*Suitability of Concrete Reinforced with Synthetic Fiber for the Construction of Pavements.*" In Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan, 2013.
- [32] Grdić, Z. "*Concrete Technology*", Niš, Civil Engineering and Architectural Faculty, University of Niš. (in Serbian), 2011.
- [33] Skazlic, M. "*Hybrid High Performance Fibre-Reinforced Concrete.*" M.S Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2003.
- [34] Nili, M. & Afroughsabet, A.V. "*The Effects of Silica Fume and Polypropylene Fibers on the Impact Resistance and Mechanical Properties of Concrete.*" *Construction and Building Materials*, 24, 927–933, 2010"
- [35] Seferovic, E. "*Polypropylene Fibers In The Support Work for the Sveti Rok Tunnel*" *Gradjevinar—Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 54 (9), 535–539, 2002
- [36] Sadrmomtazi, A., Fasihi, A. "*Influence of Polypropylene Fibers on the Performance of Nano-Sio₂-Incorporated Mortar.*" *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 34, 4, 385–395, 2010
- [37] Leung, C.K.Y., Lai, R., Lee, A.Y.F. "*Properties of Wet-Mixed Fiber Reinforced Shotcrete and Fiber Reinforced Concrete Wwth Similar Composition.*" *Cement and Concrete Research*, 35, 4, 788–795, 2005.
- [38] Smith, K. ; Atkinson, T. 2010. PP fibres to resist fire induced concrete spalling. *Tunneltalk*, <http://www.tunneltalk.com/Polypropylene-fibres-Nov10-Resistance-to-concrete-spalling-under-fire.php>, 08.03.2015."
- [39] Jelcic Rukavina, M., Bjegovic, D., Seferovic, E. "*Influence of high fire temperatures on fibre reinforced concrete.*" In Milanko, V., Laban, M., Mračkova, E. (eds), *Book of Proceedings of 4th International Scientific Conference on Safety Engineering* , 2014.
- [40] Sideris K.K. & Manita P., "*Residual Mechanical Characteristics and Spalling Resistance of Fiber Reinforced Self-Compacting Concretes Exposed to Elevated Temperatures.*" *Construction and Building Materials*, 41, 296–302, 2003.
- [41] "ACI 544.5R-10. 2010. Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete. Reported by ACI Committee 544. 5R-10."
- [42] Banthia R.; Gupta N., "*Influence of polypropylene Fibre Geometry on Plastic Shrinkage Cracking in Concrete,*" pp. 1263–1267, 2006.
- [43] Naaman, A.E., Wongtanakitcharoen, T., Hauser, G. "*Influence of Different Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete.*" *ACI Materials Journal*, 102, 1, 49–58, 2004.
- [44] Myers R., D. Kang T.H., "*Early-age propertis of polymer fibre-reinforced concrete,*"

- ACI Mater. J.*, pp. 9–14, 2008.
- [45] Lamour V., Moranville M., Chaignon J., “*Effect of low volume polypropylene fibers on early age cracking of concrete.*”
- [46] Folliard, K. et.al. “*Evaluation of Alternative Materials to Control Drying Shrinkage Cracking in Concrete Bridges.*” Research Report, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 2004
- [47] Serdar M., Baričević A., Jelčić Rukavina M., Pezer M., Bjegović D., Štirmer N., “*Shrinkage Behaviour of Fibre Reinforced Concrete with Recycled Tyre Polymer Fibres,*” *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, 2015.
- [48] I. Sušac, “*Model hidratacije kalcij-aluminata.*”, *diplomski rad*. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu; Zagreb.
- [49] Sahinagic-Isovic M., Markovski G., Čeček M., “*Deformacije skupljanja betona - uzroci i vrst,*” *Gradjevinar*, vol. 64, pp. 727–734, 2012.
- [50] Šokman A., “*Utjecaj vlakana na sposobnost deformacije mikroarmiranih betona.*” *diplomski rad*, Zagreb, 2014.
- [51] Čančar M., “*Eksperimentalno određivanje i predviđanje volumenskih deformacija mlaznih betona s mikroarmiranim polimernim vlaknima*”, *diplomski rad*. Zagreb, 2015.
- [52] X. F. Long W. J.; Khayat K. H., “*Autogenous Shrinkage of Prestressed Self-Consolidating Concrete,*” *Open Civ. Eng. J.*, pp. 116–123, 2011.
- [53] Huang, Shan-Shan; Angelakopoulos, Harris; Pilakoutas, Kypros; Burgess, “*Reused Tyre Polymer Fibre for Fire - spalling Mitigation.*”
- [54] Pezer M., “*Mehanička svojstva betona mikroarmiranih recikliranim čeličnim vlaknima*”, *diplomski rad*, Zagreb, 2012.
- [55] Degač G., “*Upotreba recikliranih polimernih vlakana u proizvodnji tunelskih obloga.*”, *diplomski rad*, Zagreb, 2014.
- [56] B. Acevedo; Fernandez A.M.; Barriocanal C., “*Identification of Polymers in Waste Tyre Reinforcing Fibre by Thermal Analysis and Pyrolysis,*” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 111, pp. 224–232, 2015.
- [57] Baricevic A.; Bjegovic D; Pezer M., “*Properties of Sprayed Concrete with Recycled Tyre Polymer Fibres.*”
- [58] Mavridou S.; Oikonomou N. “*Utilization of Textile Fibres from Worm Automobile Tires in Cement Based Mortar,*” no. 109, pp. 3–5, 2009.
- [59] “*Tehnički list- GLENIUM SKY 629.*” .
- [60] “*Tehnički list- RHEOMATRIX.*”
- [61] “*HRN EN 12350-8:2010-Ispitivanje svježega betona - 8. dio: Samozbijajući beton - Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem.*”

- [62] Alagušić M.; Lavriv F., "*Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona.*" Zagreb, 2010.
- [63] "HRN EN 12350-11:2010-Ispitivanje svježega betona - 11. dio: Samozbijajući beton - Ispitivanje segregacije sijanjem (EN 12350-11:2010)."
- [64] Tazawa E., "*Autogenous Shrinkage of Concrete; Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute, Hiroshima, June 13-14,*" 1998.
- [65] Zhang L.M.P; Tam C. T., "*Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete.*" *Cement and Concrete Research*, 33," pp. 1687–1694, 2003.
- [66] "HRN EN 12390-3:2009/AC:2011-Ispitivanje očvrtnuloga betona - 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka."
- [67] Bayasi J. ; Zeng Z "*Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete.,*" *ACI Mater. J.*, vol. 90, no. 6, pp. 605–610., 1993.

12. PRILOZI

Tablica 12 Podaci o masama dobiveni nakon 1. faze pročišćavanja

redni broj serije	masa prljavog uzorka [g]	masa "čistih" vakana [g]	masa "prljavih" vlakna [g]	guma + sitna vlakna [g]
1	94,86	11,35	30,09	53,42
2	74,44	5,19	30,46	38,79
3	85,92	10,08	31,13	44,71
4	91,06	10,69	30,39	49,98
5	87,37	6,2	33,09	48,08
6	91,81	9,4	29,24	53,17
7	84,41	10,56	25,79	48,06
8	98,82	10,27	36,28	52,27
9	85,05	12,35	26,67	46,03
10	93,57	11,42	27,33	54,82
11	85,4	6,15	32,84	46,41
12	90,91	8,76	33,08	49,07
13	91,96	12,03	36,77	43,16
14	96,6	9,15	35,79	51,66
15	104,39	16,78	34,46	53,15
16	92,49	8,51	37,56	46,42
17	97,81	11,67	33,69	52,45
18	96,09	11,24	34,9	49,95
19	94,36	6,37	43,06	44,93
20	89,6	9,44	35,56	44,6
21	81,99	6,72	31,54	43,73
22	81,95	8,44	30,39	43,12
23	87,77	8,74	33,47	45,56
24	84,95	5	38	41,95
25	76,35	8,29	29,77	38,29
26	93,59	7,76	41,58	44,25
27	92,07	13,77	31,19	47,11
28	94,2	6,89	34,88	52,43
29	93,22	8,24	34,03	50,95
30	93,52	13,89	28,86	50,77
31	93,02	16,47	17,31	59,24
32	97,45	14,26	23,63	59,56
33	85,78	18,58	15,34	51,86
34	85,72	13,58	19,68	52,46
35	92,84	13,58	20,94	58,32
36	92,53	14,82	18,79	58,92

Eksperimentalno ispitivanje autogenog skupljanja samozbijajućeg betona s polimernim vlaknima iz recikliranih automobilskih guma

37	88,29	14,35	20,83	53,11
38	87,45	16,53	16,6	54,32
39	88,07	8,22	32,15	47,7
40	89,35	18,11	17	54,24
41	89,3	19,33	18,42	51,55
42	82,94	13,52	19,76	49,66
43	84,32	16,85	16,04	51,43
44	85,84	13,22	17,77	54,85
45	79,74	11,72	22,64	45,38
46	88,6	16,1	16,1	56,4
47	91,3	14,9	18,8	57,6
48	98,8	21	21,6	56,2
49	86,2	18,3	21,4	46,5
50	80,9	17,4	19,5	44
51	83,7	8,1	30,5	45,1
52	82	18,3	16,2	47,5
53	84,2	7,1	34,7	42,4
54	90,4	16	17,6	56,8
55	88,6	17,4	17,6	53,6
56	82,1	10,9	25,5	45,7
57	84,6	10,4	27,1	47,1
58	92,2	16,6	18,6	57
59	90,6	12,4	28,9	49,3
60	93	18,5	15,4	59,1
61	85,9	13,2	19,4	53,3
62	87,2	18,2	17,5	51,5
63	90	23,5	14,3	52,2
64	87,6	16,3	20,3	51
65	86	18,8	20,3	46,9
66	88,9	15,8	24,1	49
67	84,5	15,2	18,3	51
68	91,1	18,1	21	52
69	91	18,1	18,6	54,3
70	93,1	16,6	23,8	52,7
71	91,6	18,5	19,4	53,7
72	95,5	16,4	27	52,1
73	92,1	17,5	21,6	53
74	93,4	20,1	24,8	48,5
75	89,5	13,2	27,4	48,9
76	86,1	18,7	20,1	47,3
77	83,8	12,2	25,8	45,8
78	93,2	16	21,4	55,8
79	90,8	15,4	20,4	55

Eksperimentalno ispitivanje autogenog skupljanja samozbijajućeg betona s polimernim vlaknima iz recikliranih automobilskih guma

80	88	16,6	17,5	53,9
81	88,5	15,5	20,1	52,9
82	96,5	20,3	22,8	53,4
83	90,5	13,4	22,8	54,3
84	88,9	14,6	23,7	50,6
85	92,2	15,2	23,8	53,2
86	94,8	18,7	22,9	53,2
87	90,3	14,7	25,7	49,9
88	91,4	17,9	20,8	52,7
89	88,8	16,9	18,7	53,2
90	94,1	22,5	23,6	48
91	90,4	14,2	24,2	52
92	86,8	17	15,1	54,7
93	86,4	13	26,8	46,6
94	88,9	18,7	15,6	54,6
95	86,3	16,7	16,5	53,1
96	88,7	16,9	19,2	52,6
97	87,4	8,6	31,5	47,3
98	87,9	15,7	20	52,2
99	91,3	19,3	16,6	55,4
100	91,3	13,4	24,9	53
101	85,4	18,4	13,2	53,8
102	86,5	12,2	22,6	51,7
103	87,7	11,5	24,1	52,1
104	89,2	13,9	21,3	54
105	90,9	13,6	25,3	52
106	87,7	13	21,3	53,4
107	88	8,3	29,3	50,4
108	88,5	15,2	18,3	55
109	87,4	13,2	20,9	53,3
110	89,3	4,1	44,1	41,1
111	91,6	14,3	20,7	56,6
112	90	12	25,6	52,4
113	99,1	14,7	28,7	55,7
114	92,2	15,6	24	52,6
115	89,5	12,1	22,7	54,7
116	89,1	9,8	28,7	50,6
117	77,2	11,8	22,7	42,7
UKUPNO	10446,37	1607,19	2890,09	5949,09

Tablica 13 Podaci o masama dobiveni nakon 2. faze pročišćavanja

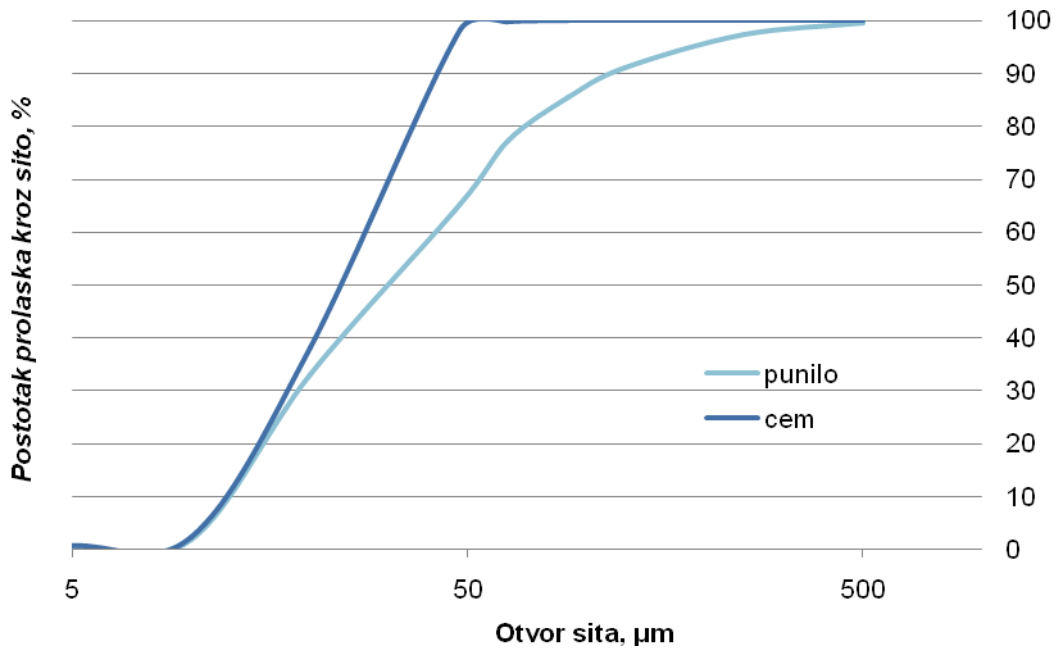
redni broj serije	masa prljavog uzorka [g]	masa "čistih" vakana [g]	masa "prljavih" vlakna [g]	guma + sitna vlakna [g]
1	29,36	18,62	6,79	3,95
2	22,72	16,81	4,88	1,03
3	23,31	15,85	6,25	1,21
4	23,75	16,93	6,3	0,52
5	25,09	21,82	2,45	0,82
6	25,57	17,31	4,62	3,64
7	25,78	21,29	3,46	1,03
8	25,78	18,01	6,32	1,45
9	24,86	18,59	5,1	1,17
10	26,81	18,4	6,67	1,74
11	23,61	18,04	4,51	1,06
12	26,22	19,4	5,57	1,25
13	26,96	20,69	5,36	0,91
14	26,52	19,15	6,41	0,96
15	27,44	21,05	5,33	1,06
16	24,9	19,03	5,03	0,84
17	25,42	20,36	3,77	1,29
18	26,63	19,13	6,12	1,38
19	26,22	18,09	6,69	1,44
20	27,8	20,5	6,29	1,01
21	27,62	19,61	6,93	1,08
22	26	17,07	6,32	2,61
23	27,77	19,25	6,44	2,08
24	25,21	19,99	3,76	1,46
25	27,63	19,63	7,76	0,24
UKUPNO	648,98	474,62	139,13	35,23

Tablica 14 Numerički granulometrijski sastav agregata

NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA												
Frakcija (mm)	Sito (mm)	0	0,063	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	12,50	16,00
0-4 (s filerom)		9,1	8,5	14,1	19,8	29,8	47,5	73,1	91,7	100,0	100,0	100,0
4-8		0,0	0,4	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	15,7	97,4	100,0	100,0
8-16		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	19,6	98,5
B	%	0	6,3	8,8	12,5	17,7	25,0	35,4	50,0	70,7	88,4	100,0

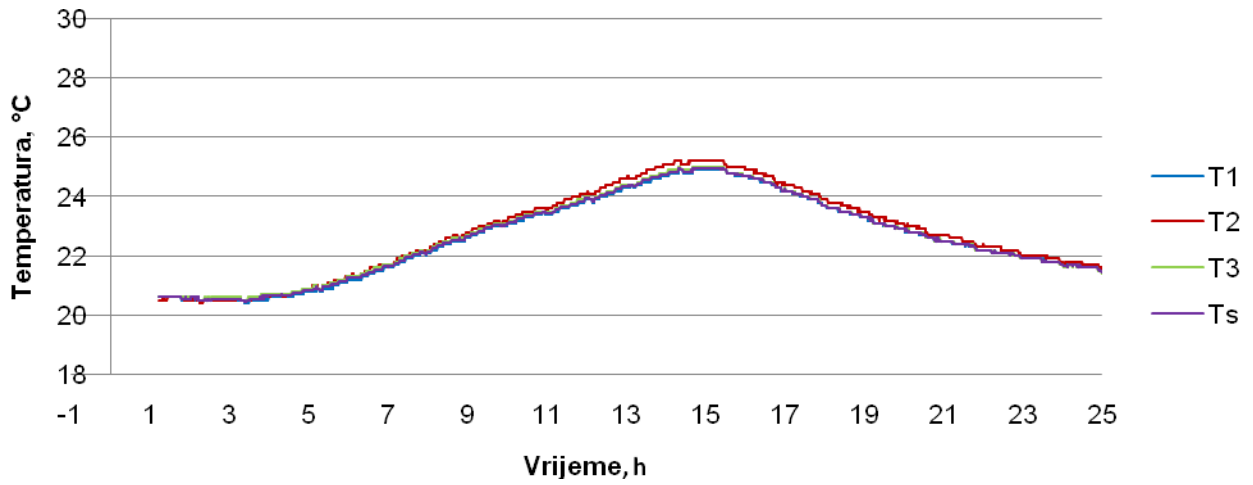
Tablica 15 Kumulativni granulometrijski sastav agregata

KUMULATIVNI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA												
Frakcija (mm)	Sito (mm)	0	0,063	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	12,50	16,00
0-4	54,0	4,9	4,6	7,6	10,7	16,1	25,7	39,5	49,5	54,0	54,0	54,0
4-8	14,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	2,2	13,6	14,0	14,0
8-16	32,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	6,3	31,5
SUMA	100	5	5	8	11	16	26	40	52	68	84	100

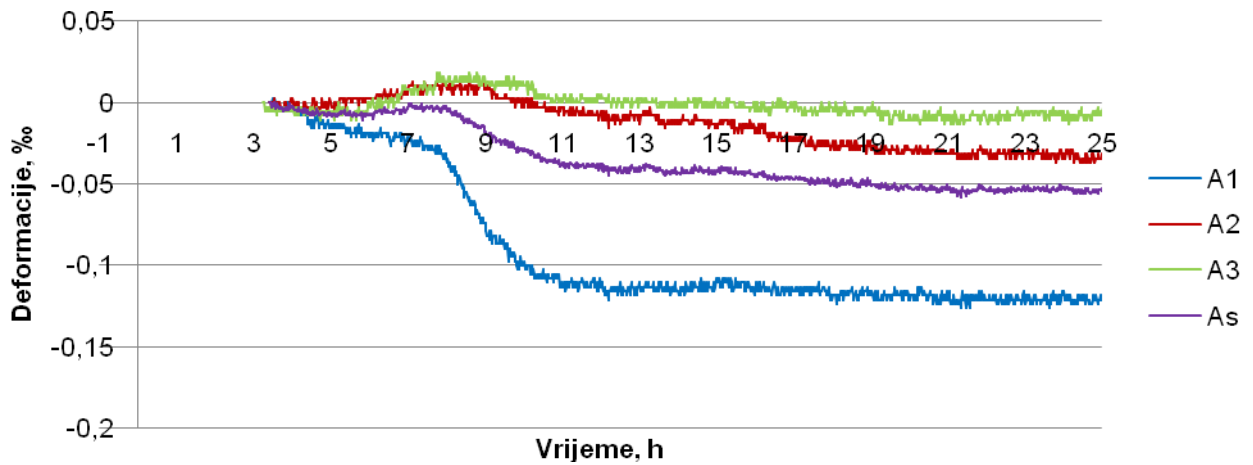


Slika 38 Prosijavanje punila i cementa

a)

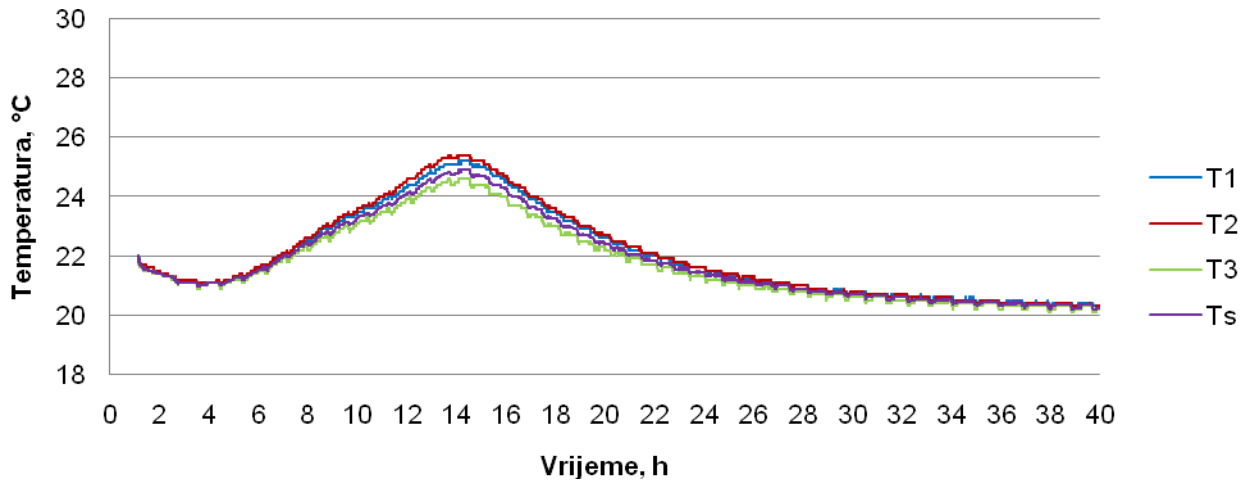


b)

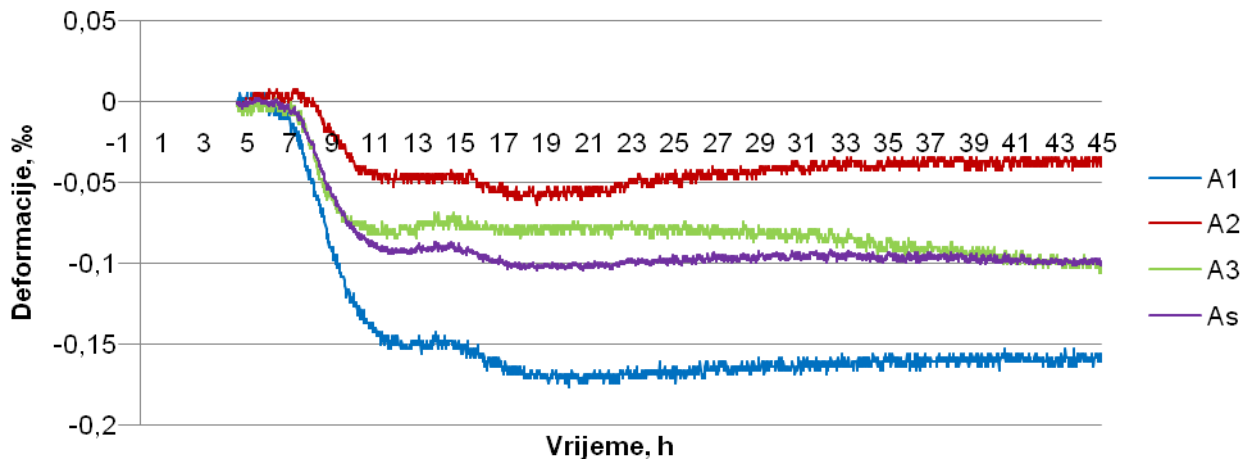


Slika 39 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M1: **a)** temperatura **b)** autogene deformacije

a)

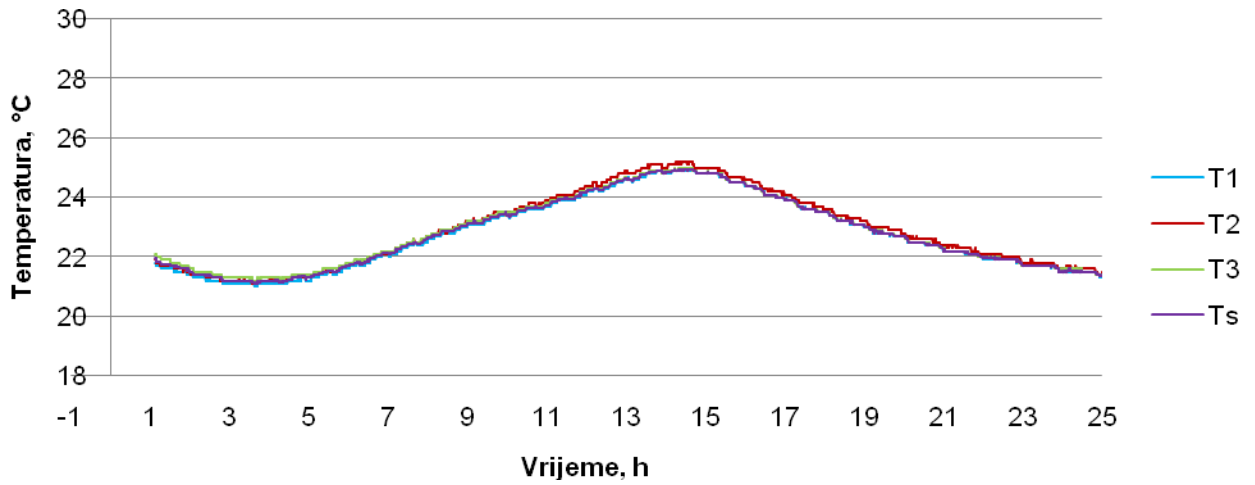


b)

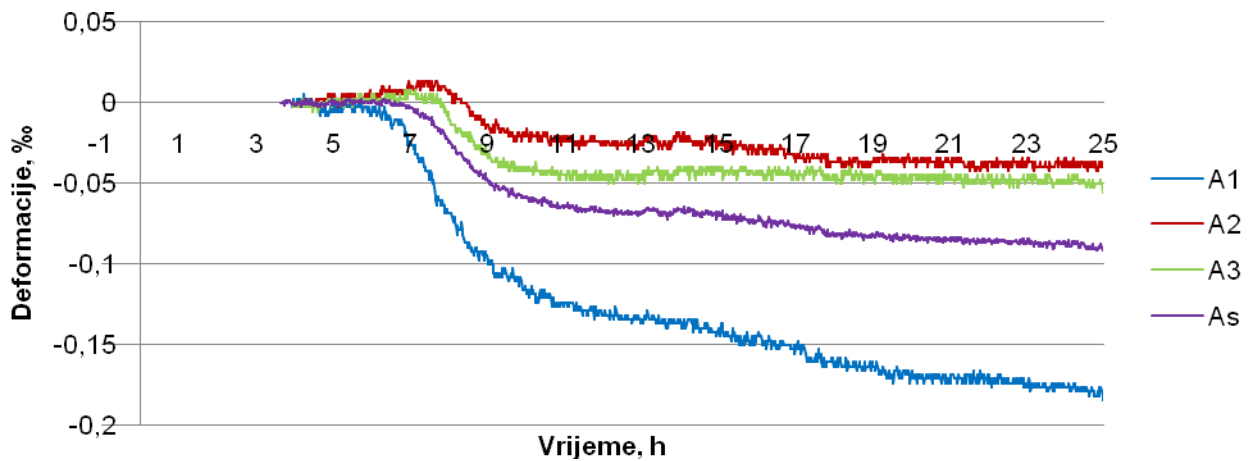


Slika 40 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M2: **a)** temperatura **b)** autogene deformacije

a)

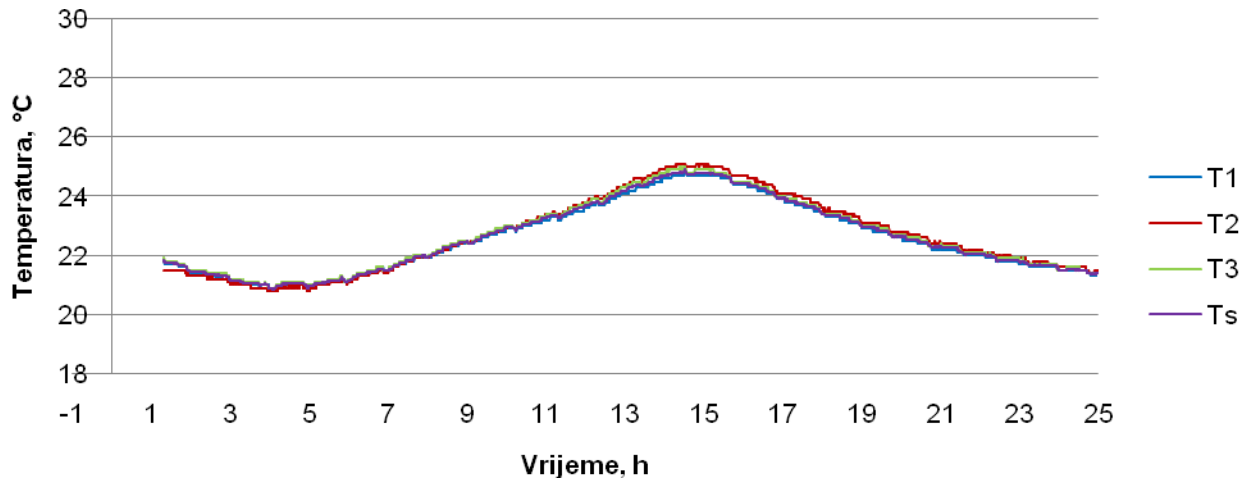


b)

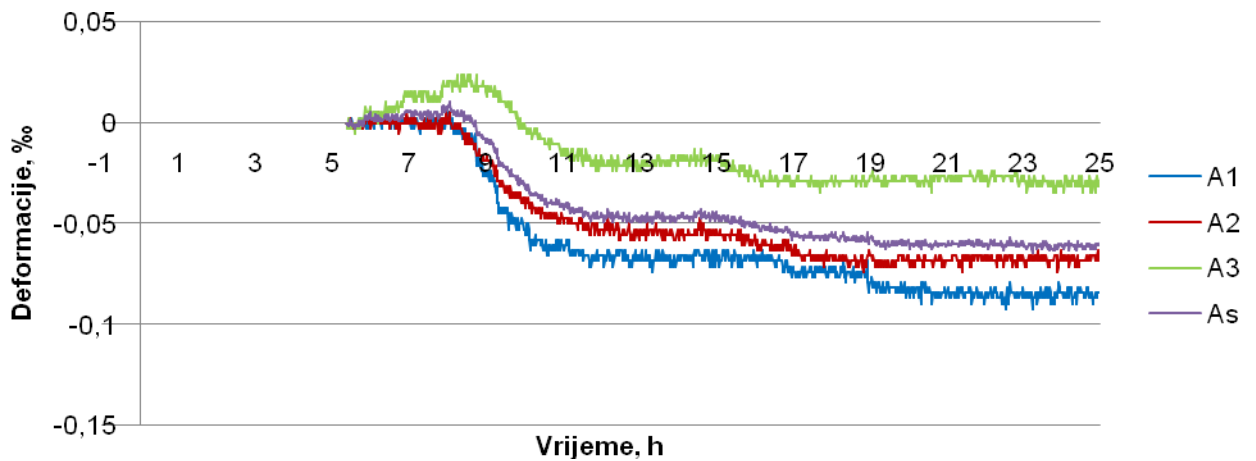


Slika 41 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M3: **a)** temperatura **b)** autogene deformacije

a)

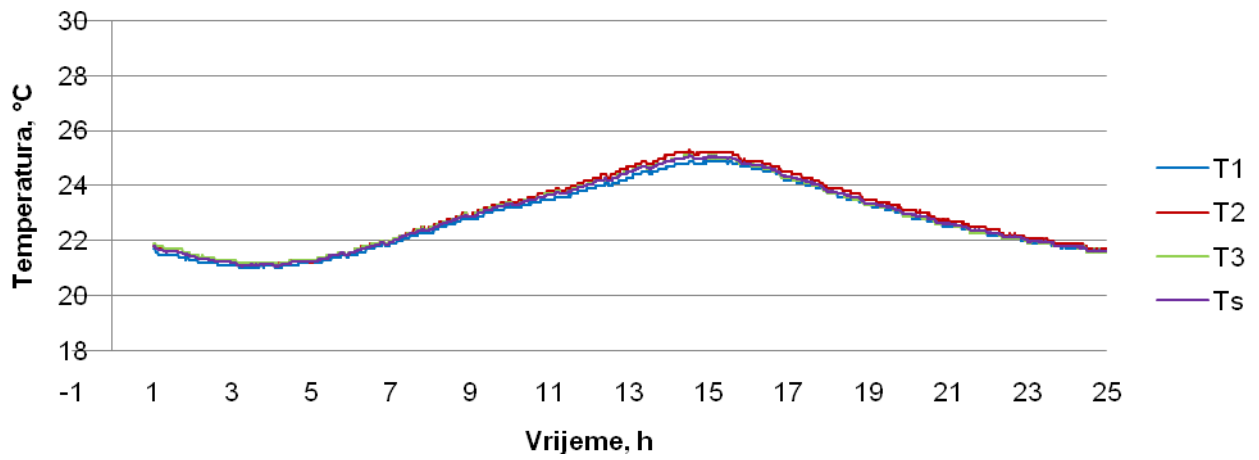


b)

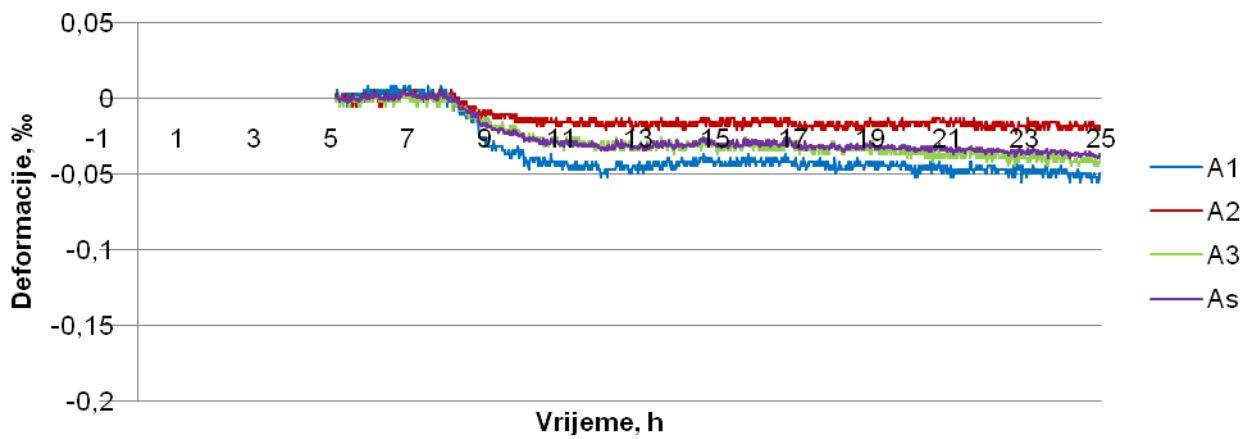


Slika 42 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M4: **a)** temperatura **b)** autogene deformacije

a)



b)



Slika 43 Rezultati ispitivanja autogenog skupljanja za mješavinu M5: **a)** temperatura **b)** autogene deformacije

SAŽETAK

Autori: Matea Džaja, Marija Held, Petra Ružić

Naslov: Eksperimentalno ispitivanje autogenog skupljanja samozbijajućeg betona s polimernim vlaknima iz recikliranih automobilskih guma

U ovom istraživanju promatran je utjecaj recikliranih polimernih vlakana iz automobilske industrije na svojstva samozbijajućeg betona i mogućnost njihove zamjene s polipropilenskim industrijski proizvedenim vlaknima. S obzirom da vlakna smanjuju nastanak i širenje pukotina uzrokovanih skupljanjem, koje su pogodne za prodor agresivnih tvari u mikrostrukturu betona, bitno ih je pravovremeno spriječiti kako bi se očuvala trajnost konstrukcije. Razvijena je metodologija za pročišćavanje vlakana kako bi se usporedio doprinos pročišćenih recikliranih vlakana u odnosu na nepročišćena reciklirana i polipropilenska industrijska vlakna. Ispitano je 5 mješavina; referentna mješavina bez vlakana, mješavina s dodatkom industrijskih polipropilenskih vlakana, mješavina s nepročišćenim recikliranim vlaknima i dvije mješavine s različitim udjelima pročišćenih vlakana. Težište eksperimentalnog ispitivanja bilo je na autogeno skupljanje koje se javlja kod mladog betona. Rezultati su pokazali da je moguća zamjena industrijskih vlakana recikliranim polimernim vlaknima čime bi se doprinijelo zbrinjavanju jednog od nusprodukata reciklaže automobilskih guma za čiju upotrebu do sada nije pronađeno pravo rješenje.

Ključne riječi: samozbijajući beton, autogeno skupljanje, reciklirana polimerna vlakna, polipropilenska vlakna, automobilska guma

ABSTRACT

Authors: Matea Džaja, Marija Held, Petra Ružić

Title: Experimental testing of autogenous shrinkage of self-compacting concrete with polymer fibers from recycled tires

This study shows the influence of recycled polymer fibers from recycled tires on the properties of self-compacting concrete and replacing them with industrially produced polypropylene fibers. Considering that the fibers reduce the formation and propagation of cracks in the concrete caused by autogenous shrinkage, which enable the penetration of aggressive matters in the microstructure, it is necessary to prevent them in order to maintain the structures durability. Methodology for the purification of recycled fiber was invented for determinating the influence of purified polymer fibers in compare to untreated polymer fibers an polypropylene fibers. The experiment consisted of 5 mixtures; reference mixture without fibers, mixture with the addition of industrial polypropylene fibers, mixture with unpurified recycled fiber and two mixtures with different ratios of purified fibers. The focus of the experiment was the autogenous shrinkage that occurs in fresh concrete. The results showed that it is possible to substitute industry manufactured fiber with recycled polymer fibers which would contribute greatly of reuse one byproduct of recycling tires, currently there is no good solution for its use.

Keywords: self-compacting concrete, autogenous shrinkage, recycled polymer fibers, polypropylene fibers, tires