

Primljen / Received: 29.12.2017.

Ispravljen / Corrected: 8.10.2018.

Prihvaćen / Accepted: 20.12.2018.

Dostupno online / Available online: 10.8.2019.

# Svojstva betona visoke čvrstoće s površinski tretiranom drobljenom gumom

## Autori:



Doc.dr.sc. **Chellakavitha Nagarajan**, dipl.ing.grad.  
Tehnički fakultet Mepco Schlenk, Indija  
Odjel za građevinarstvo  
[chellakavitha@gmail.com](mailto:chellakavitha@gmail.com)



Prof.dr.sc. **Prabavathy Shanumugasundaram**, dipl.ing.grad.  
Tehnički fakultet Mepco Schlenk, Indija  
Odjel za građevinarstvo  
[spraba@mepcoeng.ac.in](mailto:spraba@mepcoeng.ac.in)



**Sree Rameswari Anmeeganathan**, dipl.ing.grad.  
Tehnički fakultet Mepco Schlenk, Indija  
Odjel za građevinarstvo  
[chellakavitha@gmail.com](mailto:chellakavitha@gmail.com)

Prethodno priopćenje

**Chellakavitha Nagarajan, Prabavathy Shanumugasundaram, Sree Rameswari Anmeeganathan**

## Svojstva betona visoke čvrstoće s površinski tretiranom drobljenom gumom

U radu se primjenjuje novi pristup površinske modifikacije drobljene gume pomoću organoglinjskih kompozita kako bi se poboljšala slaba prionljivost između cementne paste i drobljene gume. Primjenom FTIR spektara promatrana je promjena funkcionalnih skupina na površini tretirane drobljene gume. Za poboljšanje svojstava korišteni su mineralni dodaci poput silikatne prašine i metakaolina. Provedena su ispitivanja obradljivosti, tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje, modula elastičnosti, otpornosti na udar te otpornosti na djelovanje sulfata i kiselina. Postignuti rezultati pokazuju da površinska obrada gume dovodi do poboljšanja svojstava betona.

### Ključne riječi:

drobljena guma, površinska obrada, beton visoke čvrstoće, silikatna prašina, metakaolin

Research Paper

**Chellakavitha Nagarajan, Prabavathy Shanumugasundaram, Sree Rameswari Anmeeganathan**

## Properties of high strength concrete containing surface-modified crumb rubber

This study presents a new approach on surface modification of crumb rubber using organoclay composites in order to improve the poor adhesion between cement paste and crumb rubber. The change in functional groups on the surface of modified crumb rubber was observed by FTIR spectra. Mineral admixtures such as silica fume and metakaolin were used as property enhancers. Tests on workability, compressive strength and flexural strength, static modulus of elasticity, impact resistance, sulphate attack, and acid attack, were conducted. The results show that the properties of concrete were enhanced by surface modification.

### Key words:

crumb rubber, surface modification, high strength concrete, silica fume, metakaolin

Vorherige Mitteilung

**Chellakavitha Nagarajan, Prabavathy Shanumugasundaram, Sree Rameswari Anmeeganathan**

## Eigenschaften von hochfestem Beton mit oberflächenbehandeltem zerkleinertem Gummi

In der Arbeit wird ein neuer Ansatz zur oberflächlichen Modifizierung von Gummibruch durch organische Verbundstoffe verwendet, um die schlechte Haftung zwischen Zementpaste und Gummibruch zu verbessern. Unter Verwendung der FTIR-Spektren wurde eine Änderung der funktionellen Gruppen auf der Oberfläche des behandelten zerkleinerten Gummis beobachtet. Zur Verbesserung der Eigenschaften wurden mineralische Zusätze wie Silikatstaub und Metakaolin eingesetzt. Es wurden Tests zur Verarbeitbarkeit, Druckfestigkeit, Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul, Stoßfestigkeit und Beständigkeit gegen Sulfat und Säuren durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächenbehandlung des Gummis zur Verbesserung der Betoneigenschaften führt.

### Schlüsselwörter:

Gummibruch, Oberflächenbehandlung, hochfester Beton, Silikatstaub, Metakaolin

## 1. Uvod

Otpadna guma nije biorazgradiva pa negativno utječe na okoliš. Negativan ekološki utjecaj mogao bi se djelomično ublažiti njenim recikliranjem. Dodavanje otpadne gume betonu u obliku drobljene gume ili gumenih strugotina jedan je od načina uspješnog recikliranja tog otpadnog materijala [1-6]. Iako drobljena guma može negativno utjecati na tlačnu čvrstoću, savojnu čvrstoću i ugradljivost betona, treba napomenuti da takav beton ima bolju žilavost, otpornost na udare, duktilnost, sposobnost upijanja energije i trajnost, ako se usporedi s betonom bez gume [7]. Mehanička svojstva betona pogoršavaju se zbog neadekvatne veze između cementne paste i drobljene gume. Cementna je pasta hidrofilna, a površina drobljene gume hidrofobna [5]. Posljednjih godina znanstvenici ulažu velike napore kako bi poboljšali prijanjanje između cementne paste i drobljene gume primjenom postupka površinske obrade. Mohammadi i dr. [9] tretirali su gumene čestice natrijevim hidroksidom te ocijenili mehanička svojstva betona. Mehanička svojstva su se poboljšala, ali je poboljšanje veze između cementne paste i gumenih komadića jedva primjetno. Obinna Onuaguluchi i dr. [10] predložili su postupak prethodnog oblaganja u okviru kojeg je drobljena guma obložena vapnenačkim prahom. Ocjenom mehaničkih svojstava i trajnosti betona ti su autori utvrdili neznatno povećanje čvrstoće, ali je poboljšana veza između cementne paste i drobljene gume. Qiao Dong i dr. [11] primijenili su metodu površinske obrade prema kojoj je drobljena guma obložena kemijski aktivnim sredstvom te dodatno tretirana silanskim spojnim tvarima. Određena je tlačna čvrstoća i toplinski kapacitet, a dobiveni su rezultati pokazali da je vrijednost tlačne čvrstoće betona s obloženom drobljenom gumom za 10 do 20 % veća u odnosu na kontrolnu mješavinu. Fernando Pelisser i dr. [12] tretirali su recikliranu gumu natrijevim hidroksidom te su betonskoj mješavini dodali i silikatnu prašinu kako bi se poboljšala mehanička svojstva betona. Gengying Li i dr. [13] modificirali su gumirani beton koristeći kombinaciju silanskog spojnog sredstva i karboksilne SBR gume. Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje betona s tretiranom gumom poboljšana je za 4 % tj. 13 % u odnosu na kontrolnu mješavinu. Blessen Skariah Thomas i dr. [1] analizirali su ponašanje betona visoke čvrstoće u kojem drobljena guma djelomično zamjenjuje sitnozrnatu agregat. Drobljena guma dozirana je od 0 % do 20 %, pri čemu je postotak zamjene rastao u intervalima od 2,5 %. Dodatak silikatne prašine iznosio je 6 % mase cementa. Rezultati pokazuju da je, u odnosu na kontrolni uzorak, došlo do smanjenja tlačne čvrstoće. Baoshan Huang i dr. [14] proveli su površinsku obradu u dvije etape. U prvoj su gumene čestice tretirane silanskim spojnim sredstvom, a u drugoj su ih obložili slojem cementa. Ovdje je tlačna čvrstoća modificiranog gumiranog betona bila viša od čvrstoće kontrolne mješavine. Liang He i dr. [8] predložili su površinsku obradu u kojoj je drobljena guma tretirana postupkom oksidiranja i sulfoniranja kako bi se skupine jake polarnosti pojavile na

površini gume. Prionljivost između cementa i drobljene gume je poboljšana. U ovom su slučaju postignute veće vrijednosti tlačne čvrstoće betona s tretiranom gumom u odnosu na beton s običnom gumom.

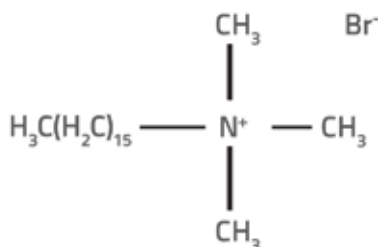
Cilj provedenog istraživanja opisanom u ovom radu bio je poboljšati svojstvo prijanjanja drobljene gume cementnom mortu i to površinskom modifikacijom na bazi novog pristupa utemeljenog na organoglinjskim kompozitima [15, 16]. U ovom se istraživanju drobljena guma upotrebljava kao djelomična zamjena sitnozrnatog agregata u betonu visoke čvrstoće, pri čemu udio zamjene varira od 0 % do 25 %, a povećava se u težinskim intervalima od po 5 % [6, 17, 18]. Betonska je mješavina projektirana prema smjernicama ACI-ja uz primjenu vodocementnog faktora od 0,3 [1]. Dodatni cementni materijali, kao što su silikatna prašina i metakaolin, korišteni su kao djelomična zamjena za cement i to u iznosu od 15 % od težine cementnog materijala [4, 19]. U ispitivanju je primijenjena infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom (FTIR), a analiza mikrostrukture provedena je kako bi se odredila promjena funkcionalnih skupina na površini tretirane drobljene gume [8]. Ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje provedena su kako bi se ocijenila mehanička svojstva gumiranog betona [20-25]. Za svaki je uzorak određen statički modul elastičnosti. Osim toga, betonski su uzorci podvrgnuti ispitivanjima trajnosti kao što su ispitivanje otpornosti na utjecaj sulfata [1], ispitivanje otpornosti na utjecaj kiselina [26, 27] te ispitivanje otpornosti na udar [28]. Ta su ispitivanja bila nužna kako bi se odredila trajnost betona u agresivnim sredinama [26]. U ovom se istraživanju predlaže novi pristup za poboljšanje slabe veze između reciklirane drobljene gume dobivene od starih automobilskih guma i cementne paste, kada se ta guma koristi kao djelomična zamjena za sitnozrnatu agregat u betonu visoke čvrstoće. Uporaba drobljene gume u betonu visoke čvrstoće djelotvoran je način da se smanje negativni ekološki utjecaji i potrošnja energije za vađenje materijala kao što je riječni pijesak.

## 2. Eksperimentalno istraživanje

### 2.1. Materijali

Korišten je obični portlandski cement (OPC) razreda čvrstoće 53 prema IS 12269-2013, specifične težine 3,15. Početno i konačno vrijeme vezivanja iznosi 30 odnosno 453 minute. Kao sitnozrnatu agregat upotrijebljen je lokalno dostupan prirodni pijesak specifične težine 2,6, modula finoće zrnatosti 2,68 i nasipne gustoće 1415 kg/m<sup>3</sup>, koji ulazi u zonu II prema IS 383-1970. Kao krupnozrnatu agregat korišten je drobljeni kamen prema IS 383-2016, veličine zrna 20 mm, specifične težine 2,66 i nasipne gustoće 1383 kg/m<sup>3</sup>. Drobljena guma specifične težine 1,08 te veličine zrna od 0,075 mm do 2,36 mm, služila je kao djelomična zamjena za sitnozrnatu agregat. Superplastifikator na bazi sulfoniranih naftalenskih polimera prema IS 9103-1999, specifične težine od 1,24, korišten je kao sredstvo za poboljšanje

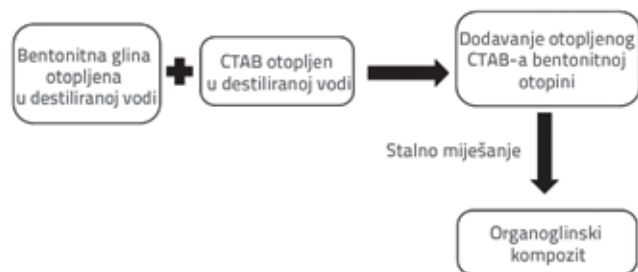
obradljivosti gumiranog betona. Silikatna prašina i metakaolin specifične težine 2,2 odnosno 2,6 korišteni su u betonu visoke čvrstoće kao dodatni cementni materijali. Bentonitna glina kemijskog sastava (po težini): 56,47 % O, 1,64 % Mg, 8,24 % Al, 20,92 % Si, 0,94 % K, 5,06 % Ca, i 6,73 % Fe te cetil trimetil amonij bromid (CTAB), korišteni su u pripremi organogline koja služi za površinsku obradu drobljene gume. Bentonit je apsorpcijsko sredstvo, a aluminijska filosilikatna glina se uglavnom sastoji od montmorilonita. Cetil trimetil amonij bromid (kemijske formule  $(C_{16}H_{33})N(CH_3)_3Br$ ) je komercijalno dostupan kationski surfaktant molekularne mase 364,46 g/mol. Kemijska struktura CTAB-a prikazana je na slici 1.



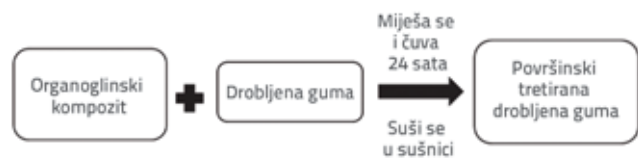
Slika 1. Kemijska struktura CTAB-a

## 2.2. Površinska modifikacija drobljene gume

Na slici 2. shematski je prikazana priprema organoglinjskog kompozita, a na slici 3. površinska obrada drobljene gume.



Slika 2. Shematski prikaz pripreme organoglinjskog kompozita



Slika 3. Shematski prikaz površinske modifikacije drobljene gume

Drobljena guma je modificirana pomoću mješavine bentonitne gline i cetil trimetil amonij bromida. Tim su slojem obavijene čestice drobljene gume [15, 16]. Za površinsku modifikaciju drobljene gume primjenjuje se sljedeći postupak:

- Potrebna količina CTAB-a (1g) otapa se u 10 ml destilirane vode pomoću magnetne miješalice.

- Istovremeno se odgovarajuća količina bentonitne gline (1 g) zamiješa u 80 ml destilirane vode uz kontinuirano miješanje.
- Otopina CTAB-a dodaje se bentonitnoj glini i smjesa se kontinuirano miješa na sobnoj temperaturi.
- Dobiveni proizvod nazivamo organoglinjskim kompozitom.
- Drobljena guma (1 kg) dodaje se u 800 ml otopine uz kontinuirano miješanje. Otopina se čuva 24 sata na sobnoj temperaturi.
- Zatim se drobljena guma suši u sušnici kako bi se odstranila vlaga. Proizvod dobiven nakon sušenja nazivamo površinski tretiranom drobljenom gumom.

Tijekom ovog postupka pore se u gumi apsorpcijskim djelovanjem zapunjavaju organoglinjskim kompozitom, čime se poboljšava veza između cementne kaše i čestica gume.

## 2.3. Projektiranje sastava betonskih mješavina

Sastav betonskih mješavina određen je prema metodi ACI uz primjenu vodocementnog faktora 0,3 [1]. Za djelomičnu zamjenu sitnozrnatog agregata dodavana je drobljena guma u količini od 0 do 25 % u intervalima od po 5 %. Dodatni cementni materijali, poput silikatne prašine i metakaolina, korišteni su kao djelomična zamjena za cement, a udio svakog od njih iznosio je 15 % od ukupne količine cementnog materijala. Superplastifikator na bazi sulfoniranih naftalenskih polimera korišten je u količini od 2 % od ukupne težine cementnog materijala kako bi se odredio utjecaj promjene slijeganja [29]. Udjeli pojedinih mješavina prikazani su u tablici 1.

## 2.4. Karakterizacija tretirane drobljene gume spektroskopskim postupkom FTIR

Za određivanje funkcionalnih skupina na površini netretirane i tretirane drobljene gume primijenjen je spektroskopski postupak FTIR [8]. Ispitivanje je provedeno pomoću spektrometra Bruker Alpha pri čemu su primijenjene infracrvene zrake u rasponu od 4000 do 400  $cm^{-1}$ .

## 2.5. Ispitivanje slijeganja

Ispitivanje slijeganja je metoda koja se najčešće koristi za mjerenje konzistencije betona. To je ispitivanje provedeno na svim uzorcima pri različitim udjelima gume.

## 2.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je na kockama u skladu s normom IS 516-1959 (potvrđeno 2004.). Betonske kocke dimenzija 150 mm x 150 mm x 150 mm njegovane su pod vodom 7 dana i 28 dana, nakon čega je ispitana tlačna čvrstoća pomoću tlačne preše kapaciteta 3000 kN.

Tablica 1. Udjeli mješavina

Uzorak	Udio netretirane gume [%]	Udio površinski tretirane gume [%]	Udjeli u mješavini [kg/m <sup>3</sup> ]							
			Cement	Silikatna prašina	Metakaolin	Voda	Sitnozrnati agregat	Guma	Krupnozrnati agregat	S.P.
M1	0	-	369	79	79	144	595	0	1180	11
M2	5	-	369	79	79	144	565	30	1180	11
M3	10	-	369	79	79	144	535	60	1180	11
M4	15	-	369	79	79	144	505	90	1180	11
M5	20	-	369	79	79	144	475	120	1180	11
M6	25	-	369	79	79	144	445	150	1180	11
M7	-	5	369	79	79	144	565	30	1180	11
M8	-	10	369	79	79	144	535	60	1180	11
M9	-	15	369	79	79	144	505	90	1180	11
M10	-	20	369	79	79	144	475	120	1180	11
M11	-	25	369	79	79	144	445	150	1180	11

S.P. - doziranje superplastifikatora (eng. Super plasticizer dosage)

## 2.7. Ispitivanje otpornosti na savijanje

Betonske prizme dimenzija 500 mm x 100 mm x 100 mm pripremljene su prema IS 516-1959 (potvrđeno 2004. g.) radi određivanja čvrstoće na savijanje. Uzorci su njegovani 28 dana te su nakon toga ispitani nanošenjem opterećenja u četiri točke pomoću univerzalnog uređaja za ispitivanje kapaciteta 1000 kN, pri čemu je brzina opterećenja iznosila 180 kn/min.

## 2.8. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti

Ispitivanje statičkog modula elastičnosti provedeno je u skladu s normom IS 516-1959 (potvrđeno 2004.). Betonski valjci promjera 150 mm i visine 300 mm lijevani su i ispitani kako bi se odredio modul elastičnosti betona. Uzorci su lijevani za netretirani i za površinski tretirani gumirani beton, a ispitivanje je provedeno pomoću univerzalnog uređaja za ispitivanje kapaciteta 1000 kN opremljenog uzdužnim kompresometrom.

## 2.9. Ispitivanje udarne čvrstoće

Za svaku su mješavinu izrađeni valjkasti uzorci promjera 150 mm i visine 65 mm prema uputama odbora ACI 544, a radi određivanja sposobnosti betona da apsorbira energiju. Ispitivanje otpornosti na udar provedeno je na svakom uzorku [23]. U tu je svrhu čelična kugla težine 1 kg postavljena u središnji položaj na

visini od 450 mm iznad uzorka koji je postavljen na donju ploču. Za svaki je uzorak zabilježen broj udara do pojave prve pukotine ( $N_1$ ) te broj udara do popuštanja uzorka ( $N_2$ ). Energija udara kod pojave prve pukotine ( $E_1$ ) izračunana je kako slijedi:

$$E_1 = N_1 \cdot m \cdot g \cdot h$$

Energija udara pri vršnom opterećenju ( $E_v$ ) izračunana je na sličan način:

$$E_v = N_2 \cdot m \cdot g \cdot h$$

gdje su vrijednosti  $N_1$  i  $N_2$  broj udara pri pojavi prve pukotine tj. pri vršnom opterećenju,  $m$  je masa čelične kugle ( $m = 1$  kg),  $h$  je visina pada kugle (450 mm), a  $g$  je ubrzanje sile teže ( $9,81$  m/s<sup>2</sup>).

## 2.10. Ispitivanje utjecaja sulfata

Ispitivanje utjecaja sulfata provedeno je prema normi ASTM C1012-89 [1]. Betonske kocke dimenzija 150 mm x 150 mm x 150 mm izvađene su iz spremnika nakon 28 dana njege u vodi te su nakon toga osušene u sušioniku i izvagane. Uzorci su potopljeni u 3-postotnoj otopini MgSO<sub>4</sub> u razdoblju od tri mjeseca, pri čemu je otopina mijenjana u redovitim razmacima. Na uzorcima izloženim djelovanju sulfata provedene su dvije vrste ispitivanja. Nakon 90 dana kocke su izvađene iz spremnika.

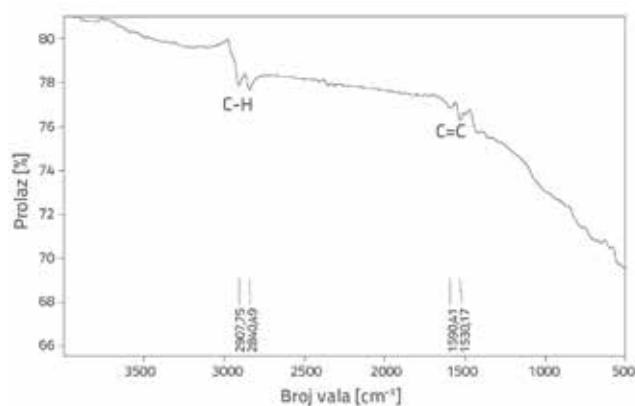
Uzorci su zatim ponovno osušeni na zraku i izvagani. Izračunan je postotak gubitka težine u odnosu na težinu suhog uzorka izvaganog prije uranjanja u otopinu  $MgSO_4$ . Tlačna čvrstoća tih uzoraka određena je nakon 90 dana njege u otopini  $MgSO_4$ . Dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 28 dana koje je provedeno na uzorcima koji nisu bili podvrgnuti djelovanju sulfata.

## 2.11. Ispitivanje utjecaja kiseline

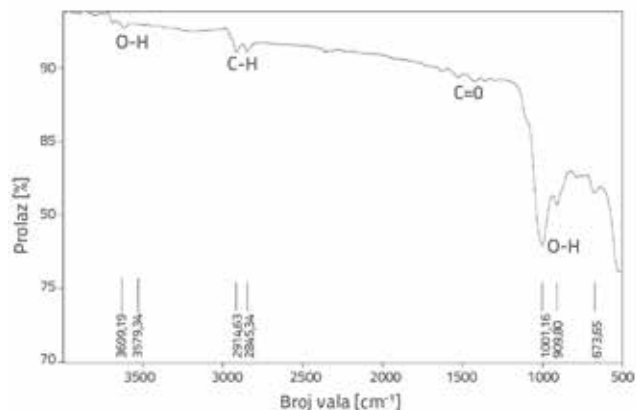
Ispitivanje utjecaja kiseline provedeno je u skladu s normom ASTM C 267-97. Kao medij za ispitivanje utjecaja kiselina poslužila je 3-postotna sumporna kiselina. Betonske kocke dimenzija 150 mm x 150 mm x 150 mm uronjene su u razrijeđenu sumpornu kiselinu te su u toj otopini čuvane 90 dana. Na tim uzorcima provedene su dvije vrste ispitivanja. Nakon 90 dana kocke su izvađene iz spremnika te su zatim osušene i izvagane. Izračunan je postotak smanjenja težine u odnosu na kontrolni uzorak (težina prije uranjanja u otopinu  $H_2SO_4$ ). Tlačna čvrstoća uzoraka podvrgnutih djelovanju kiseline određena je nakon 90 dana namakanja u otopini  $H_2SO_4$ . Dobivene vrijednosti uspoređene su s rezultatima ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 28 dana na uzorcima koji nisu bili podvrgnuti djelovanju kiseline.

## 3. Rezultati i rasprava

Provedena je karakterizacija tretirane gume postupkom FTIR. FTIR spektri netretirane i tretirane gume prikazani su na slikama 4. i 5. U spektrima za netretirane čestice sirove gume pojasevi se iskazuju kod  $1520 \sim 1650 \text{ cm}^{-1}$ , što potvrđuje prisutnost veze  $C=C$  ili benzena. Dva jaka pojasa iskazuju se kod  $2830 \sim 2910 \text{ cm}^{-1}$  i oni prikazuju vezu  $C-H$  koja se širi do benzenskog prstena. Međutim, u FTIR spektrima tretirane drobljene gume pojasevi se pojavljuju blizu  $3580 \text{ cm}^{-1}$  i  $1000 \text{ cm}^{-1}$ , što predstavlja vezu  $O-H$ , dok pojasevi kod  $1500 \text{ cm}^{-1}$  predstavljaju vezu  $C=O$ . Pojasevi se javljaju kod  $2845 \sim 2914 \text{ cm}^{-1}$ , što upućuje na prisutnost veze  $C-H$ . Dakle, postupkom modifikacije površine, funkcionalne se skupine unose na površinu drobljene gume, što poboljšava njena adhezivna svojstva.



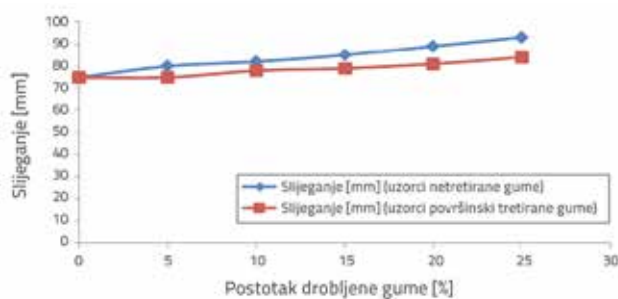
Slika 4. FTIR spektri netretirane drobljene gume



Slika 5. FTIR spektri drobljene gume s tretiranom površinom

## 3.1. Ispitivanje konzistencije betona slijeganjem

Kod željenog vodocementnog faktora, vrijednost slijeganja raste usporedo s porastom udjela gume. To znači da obradljivost betona raste s porastom udjela gume. Vrijednosti slijeganja betona u usporedbi s kontrolnom mješavinom prikazane su na slici 6.



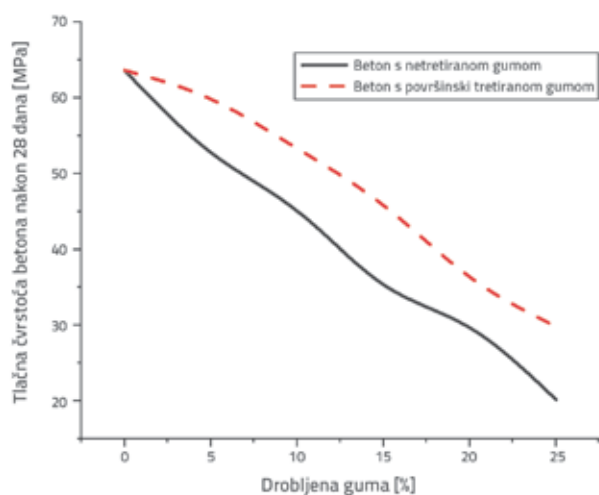
Slika 6. Vrijednosti slijeganja betonskih mješavina

U slučaju betona s netretiranom guminom, vrijednost slijeganja u odnosu na slijeganje kontrolne mješavine raste za 7 %, 9 %, 13 %, 19 % i 24 % kod zamjene sitnozrnatog agregata s 5 %, 10 %, 15 %, 20 % i 25 % netretirane gume. Međutim, u slučaju drobljene gume s tretiranom površinom, vrijednost slijeganja raste za 0 %, 4 %, 5 %, 8 % i 12 % u slučaju zamjene sitnozrnatog agregata s 5 %, 10 %, 15 %, 20 % i 25 % drobljene gume. Porast vrijednosti slijeganja može se objasniti činjenicom da je guma po svojoj prirodi hidrofobna, tj. ona odbija vodu. Dakle, dolazi do porasta količine slobodne vode u mješavini, što dovodi do većeg slijeganja [30, 31]. Uspoređivanjem rezultata netretiranog i tretiranog gumiranog betona, utvrđeno je da se vrijednost slijeganja smanjuje za 6 %, 5 %, 7 %, 9 % i 10 % kod udjela gume od 5 %, 10 %, 15 %, 20 % i 25 % kada se umjesto netretirane gume koristi tretirana. Do pada vrijednosti slijeganja kod betona s gumom tretirane površine dolazi zbog poboljšanja hidrofilnih svojstava gume uslijed površinske modifikacije.

### 3.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Vrijednost tlačne čvrstoće betona nakon 28 dana, s postocima drobljene gume, prikazana je na slici 7. Može se uočiti da veći udio gume dovodi do smanjenja tlačne čvrstoće betona. Pad tlačne čvrstoće nakon 7 dana iznosio je 22 %, 31 %, 48 %, 59 % i 72 % kod uzoraka M2, M3, M4, M5 i M6 u odnosu na kontrolnu mješavinu. Pad tlačne čvrstoće nakon 28 dana iznosio je 17 %, 29 %, 44 %, 53 % i 68 % kod uzoraka M2, M3, M4, M5 i M6 u odnosu na kontrolnu mješavinu. Smanjenje čvrstoće betona s netretiranom drobljenom gumom uzrokovano je:

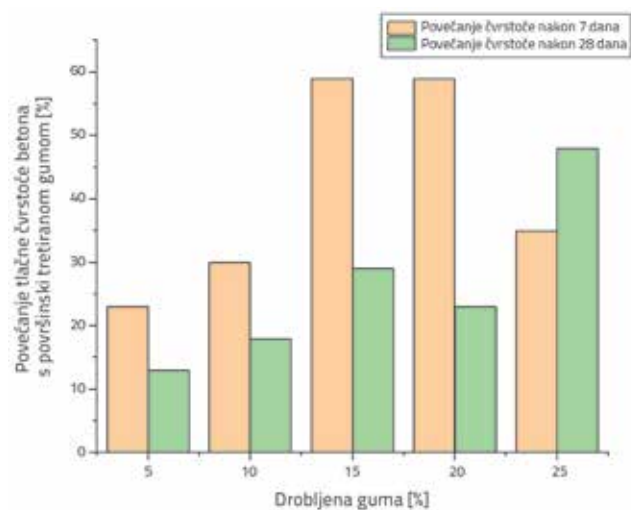
- lošom vezom između drobljene gume i cementne paste
- manjom krutošću gume zbog čega dolazi do smanjenja krutosti cijele mase i tlačne čvrstoće [2, 20].



Slika 7. Usporedba tlačne čvrstoće betonskih uzoraka nakon 28 dana

Pri nanošenju vanjskog opterećenja na površinu betona dolazi do stvaranja pukotina na spoju između gume i cementne paste. Zbog formiranja pukotina, smanjuje se otpornost na opterećenje pri različitim udjelima zamjene. Međutim, u slučaju betona s gumom tretirane površine, zamjena sitnozrnatog agregata s 5 %, 10 %, 15 %, 20 % i 25 % tretirane drobljene gume dovodi do smanjenja čvrstoće od 3 %, 11 %, 17 %, 35 % i 62 % nakon 7 dana te od 6 %, 16 %, 28 %, 43 % i 53 % nakon 28 dana. Tlačna se čvrstoća postupno smanjuje i kod betona s netretiranom drobljenom gumom i kod betona s tretiranom drobljenom gumom. Ipak, smanjenje čvrstoće manje je kod betona s tretiranom drobljenom gumom u usporedbi s betonom s netretiranom drobljenom gumom. Postotak povećanja tlačne čvrstoće betona s tretiranom gumom u usporedbi s betonom s netretiranom gumom prikazan je na slici 8. U odnosu na uzorke M2, M3, M4, M5 i M6, povećanje čvrstoće uzoraka M7, M8, M9, M10 i M11 iznosi otprilike 23 %, 30 %, 59 %, 59 % i 35 % nakon 7 dana, tj. 13 %, 18 %, 29 %, 23 % i 48 % nakon 28 dana. Dakle, tretirana površina gume omogućuje bolju vezu između cementne paste i drobljene gume. Kod udjela gume od 5 %, pad tlačne čvrstoće nakon 28

dana u odnosu na kontrolnu mješavinu iznosi 11 % za beton s netretiranom gumom, tj. 6 % za beton s tretiranom gumom. Smanjenje čvrstoće betona s tretiranom gumom bitno je niže u odnosu na netretirani beton. Stoga se manja količina drobljene gume koja zamjenjuje sitnozrnati agregat može povećati kod betona čiji su rezultati bliži rezultatima kontrolne mješavine.



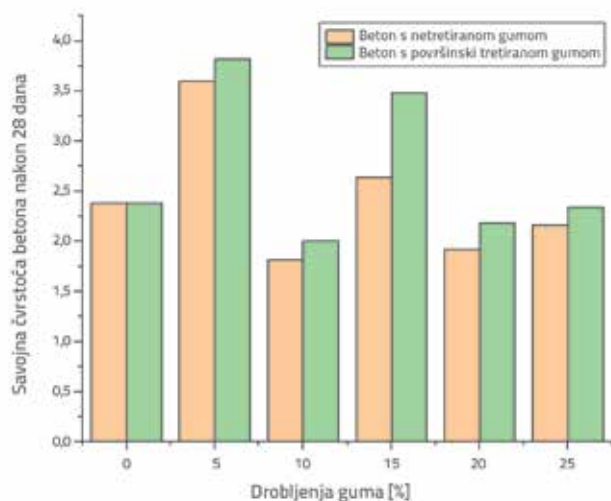
Slika 8. Povećanje tlačne čvrstoće betonskih uzoraka s površinski tretiranom gumom

### 3.3. Ispitivanje čvrstoće na savijanje

Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana prikazana je na slici 9. za beton s tretiranom i netretiranom gumom. Dobiveni rezultati ukazuju na nekoliko skokova čvrstoće betona na savijanje pri različitim udjelima zamjene. Čvrstoća na savijanje uzoraka M2 i M4 bila je nakon 28 dana za 51 % tj. 11 % viša od odgovarajuće čvrstoće kontrolne mješavine (M1), dok je čvrstoća uzoraka M3, M5 i M6 bila za 24 %, 19 % i 9 % niža u odnosu na kontrolnu mješavinu M1. Isto tako, čvrstoća na savijanje uzoraka M7 i M9 bila je za 61 % i 46 % veća od čvrstoće uzorka M1, a čvrstoća uzoraka M8, M10 i M11 bila je za 16 %, 8 % i 17 % niža u odnosu na kontrolnu mješavinu. Kod uzoraka s 5 % i 15 % gume (M2, M4, M7 i M9), čvrstoća na savijanje bila je veća od odgovarajuće čvrstoće kontrolne mješavine. Taj porast čvrstoće na savijanje pokazuje da gumene čestice omogućuju bolju vezu između pukotina zbog elastičnog ponašanja gume [2]. Međutim, čvrstoća na savijanje uzoraka s 10 %, 20 % i 25 % gume (to se odnosi na uzorke s tretiranom i s netretiranom površinom gumenih čestica) bila je niža od odgovarajuće čvrstoće kontrolne mješavine. Tome je razlog loša povezanost gumenih čestica i cementne paste. Pad čvrstoće na savijanje uzoraka s 10 % gume objašnjava se lošom ugradnjom betona jer je kod uzoraka s 5 % i 15 % gume zabilježena čvrstoća na savijanje veća od čvrstoće kontrolne mješavine.

Čvrstoće na savijanje uzoraka M7, M8, M9, M10 i M11 bile su za 6 %, 10 %, 32 %, 14 % i 8 % veće od čvrstoće uzoraka M2, M3, M4, M5 i M6. Dakle, modifikacija površine gumenih čestica dovodi

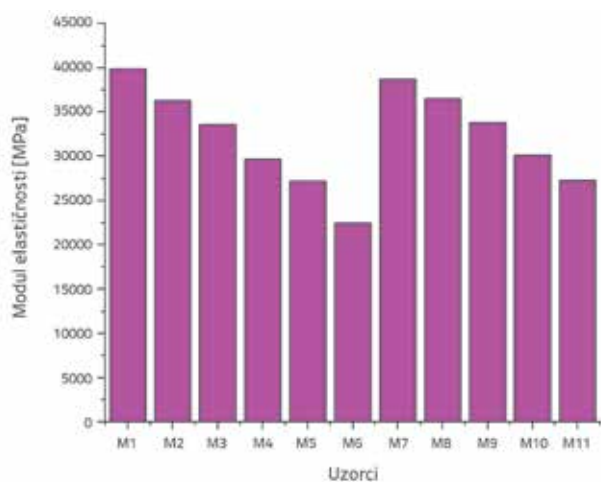
do povećanja čvrstoće na savijanje betona. Rezultati pokazuju da čvrstoća na savijanje raste nakon zamjene agregata s 5 % i 15 % gume (i kod tretiranih i netretiranih površina). Stoga se optimalne vrijednosti zamjene, tj. 5 % i 15 %, mogu primijeniti za beton, jer su u tom slučaju rezultati bolji u odnosu na kontrolnu mješavinu.



Slika 9. Čvrstoća na savijanje betona nakon 28 dana

### 3.4. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti

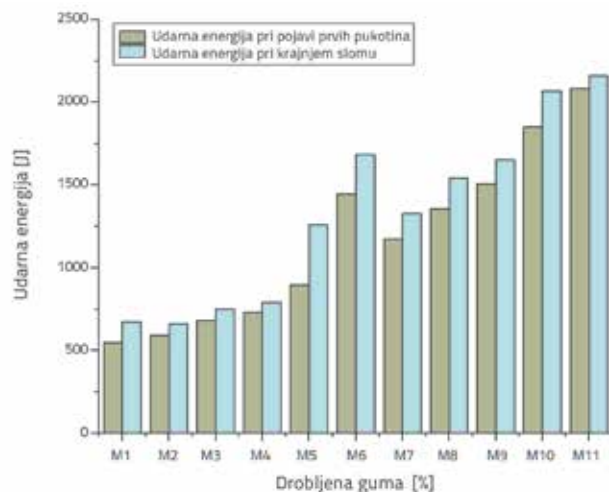
Uočeno je da modul elastičnosti utječe na ponašanje betona. Vrijednosti modula elastičnosti prikazane su na slici 10. za različite uzorke betona. Može se uočiti da se modul elastičnosti betona smanjuje usporedo s povećanjem udjela gume. Tome je razlog loša veza između gumenih čestica i cementne paste, što dovodi do niže krutosti betona, manje krutosti drobljene gume te visokog udjela zraka [32, 33].



Slika 10. Modul elastičnosti betonskih uzoraka

Razlike između modula elastičnosti tretiranih i netretiranih uzoraka prikazane su na slici 10. Smanjenje modula elastičnosti

uzoraka M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, i M9 u odnosu na kontrolnu mješavinu iznosilo je 9 %, 16 %, 25 %, 32 %, 44 %, 3 %, 8 %, 15 %, 24 % i 32 %. Međutim, moduli betona s površinski tretiranom gumom bili su viši od modula betona s netretiranom gumom, što pokazuje čvrstu mehaničku vezu između gumenih čestica i cementne paste. Moduli elastičnosti uzoraka M7, M8, M9, M10 i M11 bili su za 7 %, 9 %, 14 %, 11 % i 22 % viši od modula uzoraka M2, M3, M4, M5, i M6. Otpornost na udar betonskih uzoraka s tretiranom i netretiranom površinom gume prikazana je na slici 11. za slučaj pojave početne pukotine i graničnog opterećenja.



Slika 11. Otpornost na udar betonskih uzoraka

Ustanovljeno je da povećanje udjela gume dovodi do povećanja otpornosti betonskih uzoraka na udar. Otpornost na udar je energija koju uzorak može apsorbirati. Otpornost na udar postupno raste ovisno o postotku zamjene materijala.



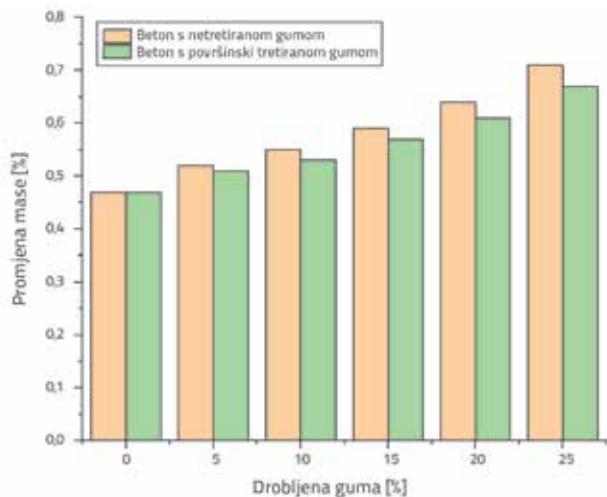
Slika 12. Obrazac pojave pukotina na betonskim uzorcima

Uzorci M7, M8, M9, M10 i M11 otporniji su na udar od uzoraka M2, M3, M4, M5 i M6. Bolja apsorpcija energije uzoraka s površinski modificiranom gumom objašnjava se jačom

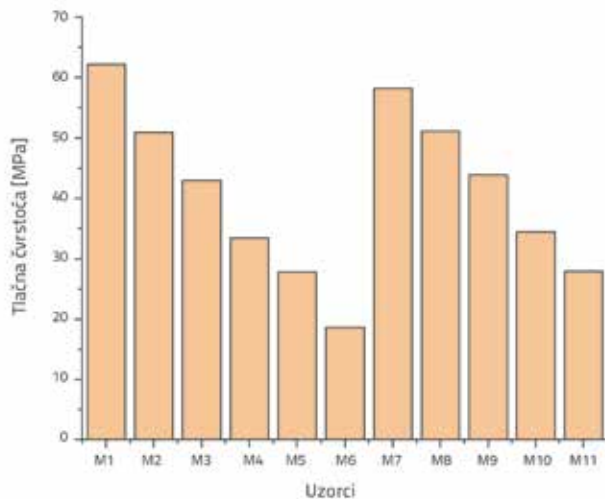
mehaničkom vezom između čestica gume i cementne paste. Način pojave pukotina na betonskim uzorcima prikazan je na slici 12. Kontrolni uzorak (I1) puca na tri dijela već kod niže energije udara od 675,42 J dok gumirani beton (uzorci I2 do I11) ostaju neoštećeni čak i kod nanošenja veće energije. Beton s 25 % tretirane gume iskazuje veću otpornost pa je postojan čak i kod nanošenja energije od 2163,11 J.

### 3.5. Ispitivanje utjecaja sulfata

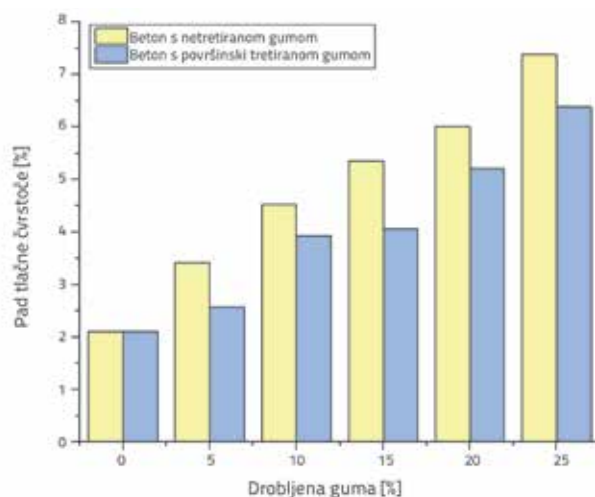
Promjena težine uzoraka gumiranog betona pod utjecajem sulfata, ovisno o postotku drobljene gume, prikazana je na slici 13. Ustanovljeno je da težina uzoraka postupno raste. Drugim riječima, težina betonskog uzorka raste s povećanjem količine drobljene gume. U usporedbi s uzorcima kod kojih se nije ispitivala otpornost na sulfata, povećanje težine uzoraka M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10 i M11 iznosilo je 0,47 %, 0,52 %, 0,55 %, 0,59 %, 0,64 %, 0,71 %, 0,51 %, 0,53 %, 0,57 %, 0,61 % i 0,67 %. Kod uzoraka M7, M8, M9, M10 i M11 zabilježen je manji porast težine u odnosu na uzorke M2, M3, M4, M5 i M6. Slike 14 i 15 prikazuju tlačnu čvrstoću i porast tlačne čvrstoće pod utjecajem sulfata za uzorke betona s površinski tretiranom i netretiranom drobljenom gumom, a u ovisnosti o postotku drobljene gume. Zabilježeno je postupno smanjenje tlačne čvrstoće gumiranih betonskih uzoraka u odnosu na kontrolnu mješavinu. U usporedbi s rezultatima uzoraka kod kojih se nije mjerio utjecaj sulfata, pad tlačne čvrstoće uzoraka M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10 i M11 iznosio je 2,11 %, 3,42 %, 4,52 %, 5,36 %, 6,01 %, 7,39 %, 2,57 %, 3,92 %, 4,06 %, 5,21 % i 6,38 %. Vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka M7, M8, M9, M10 i M11 bile su za 14,36 %, 19,08 %, 31,26 %, 23,67 % i 49,59 % više od uzoraka M2, M3, M4, M5 i M6. U usporedbi s kontrolnom mješavinom, kod uzoraka M7, M8, M9, M10 i M11 bilježi se manji pad tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke M2, M3, M4, M5 i M6. Spomenuti rezultati pokazuju da su betonski uzorci s površinski obrađenom gumom otporniji na djelovanje sulfata od betonskih uzoraka bez površinski obrađene gume.



Slika 13. Promjena mase uzoraka betona pod utjecajem djelovanja sulfata



Slika 14. Tlačna čvrstoća betonskih uzoraka pod utjecajem djelovanja sulfata



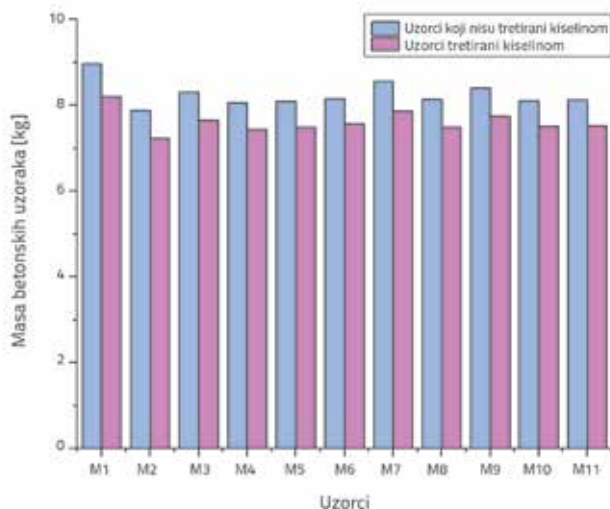
Slika 15. Promjena tlačne čvrstoće betonskih uzoraka pod utjecajem djelovanja sulfata

### 3.6. Ispitivanje utjecaja kiseline

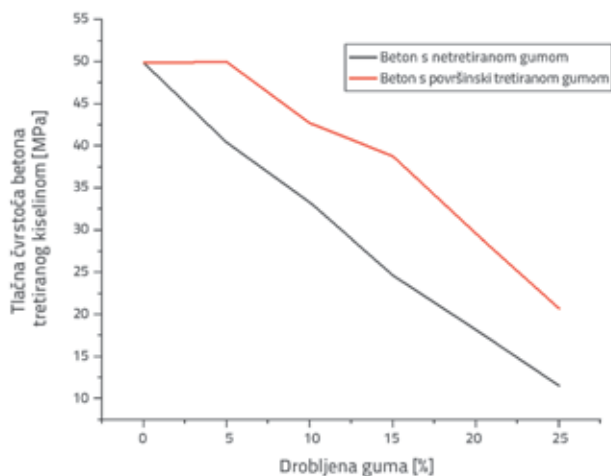
Masa betonskih uzoraka s površinski obrađenom gumom i betonskih uzoraka bez površinske obrade gume, nakon ispitivanja kiselinom, prikazana je na slici 16. u ovisnosti o postotku drobljene gume. Uočeno je postupno smanjenje mase uzoraka. Drugim riječima, masa betonskih uzoraka se smanjivala s porastom količine drobljene gume. U usporedbi s uzorcima koji nisu tretirani kiselinom, smanjenje težine uzoraka M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10 i M11 iznosilo je 8,6 %, 8,2 %, 7,84 %, 7,69 %, 7,46 %, 7,24 %, 8,1 %, 7,93 %, 7,72 %, 7,54 % i 7,41 %. Kod uzoraka M7, M8, M9, M10 i M11 bilježi se manji pad težine u odnosu na uzorke M2, M3, M4, M5 i M6. Slika 17 prikazuje tlačnu čvrstoću netretiranih i tretiranih uzoraka gume pod utjecajem kiseline, a u odnosu na postotak drobljene gume. U usporedbi s kontrolnom mješavinom, bilježi se postupan pad tlačne čvrstoće betonskih uzoraka s udjelom gume.



U usporedbi s uzorcima koji nisu tretirani kiselinom, pad tlačne čvrstoće uzoraka M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10 i M11 iznosio je 21,6 %, 23,5 %, 26,1 %, 30,3 %, 38,7 %, 42,7 %, 16,5 %, 19,86 %, 15,3 %, 18,6 % i 30,54 %. Vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka M7, M8, M9, M10 i M11 bile su za 23,67 %, 28,32 %, 57,32 %, 62,76 % i 79,39 % više od odgovarajućih vrijednosti uzoraka M2, M3, M4, M5 i M6. Kod uzoraka M7, M8, M9, M10 i M11 zabilježena je niža tlačna čvrstoća nego kod uzoraka M2, M3, M4, M5 i M6, u usporedbi s kontrolnom mješavinom. Dobiveni rezultati pokazuju da su betonski uzorci s površinski obrađenom gumom otporniji na djelovanje kiseline od betonskih uzoraka bez površinske obrade gume.



Slika 16. Masa betonskih uzoraka nakon djelovanja kiseline



Slika 17. Tlačna čvrstoća betona podvrgnutog djelovanju kiseline

#### 4. Zaključak

Ovo eksperimentalno ispitivanje provedeno je radi određivanja načina na koji površinsko tretiranje drobljene gume pomoću organogline utječe na mehanička svojstva i svojstva trajnosti betona s udjelom gume.

Površina drobljene gume tretirana je bentonitnom glinom i cetil trimetil amonij bromidom (CTAB), a uspješnost ovog postupka analizirana je pomoću infracrvene spektroskopije s Fourierovom transformacijom. Dobiveni rezultati upućuju na postojanje hidrofilnih skupina na površini drobljene gume, zbog čega dolazi do poboljšanja veze između čestica drobljene gume i materijala sadržanih u cementnoj matrici.

Kada se udio gume u betonu visoke čvrstoće povećava u rasponu od 0 do 25 %, tada raste i obradljivost betona i to zbog vodoodbojnog svojstva gume. Međutim, obradljivost se smanjuje kod betona s gumenim česticama tretirane površine.

Dodavanjem gume smanjuje se tlačna čvrstoća betona, a razlog tome je nedostatna veza između drobljene gume i cementne paste. Beton s površinski tretiranom drobljenom gumom ima višu tlačnu čvrstoću od betona s netretiranom drobljenom gumom.

Kada je betonu dodano 5 % gume, postotak povećanja savojne čvrstoće nakon 28 dana bio je kod betona s površinski tretiranom drobljenom gumom te kod betona s netretiranom drobljenom gumom za 11 % tj. 46 % viši u odnosu na kontrolni beton. Stoga se može prihvatiti da su optimalne vrijednosti zamjene gume 5 % i 15 % jer su u tim slučajevima rezultati bolji nego kod kontrolne mješavine.

Smanjenje modula elastičnosti upućuje na veću elastičnost gumiranog betona, čime se istovremeno poboljšava i otpornost gumiranog betona na udar.

Ispitana je i trajnost betonskih uzoraka, tj. njihova otpornost na djelovanje kiseline i sulfata. Dobiveni rezultati upućuju na vrlo dobro ponašanje gumiranog betona u uvjetima agresivne okoline.

#### Zahvala

Autori zahvaljuju Mepco Schlenk Engineering College, Sivakasi, Virudhunagar (Indija) na osiguranim sredstvima za izradu ovog rada.

#### OZNAKE

- M1 - kontrolni uzorak
- M2 - beton s 5 % netretirane drobljene gume
- M3 - beton s 10 % netretirane drobljene gume
- M4 - beton s 15 % netretirane drobljene gume
- M5 - beton s 20 % netretirane drobljene gume
- M6 - beton s 25 % netretirane drobljene gume
- M7 - beton s 5 % površinski tretirane drobljene gume
- M8 - beton s 10 % površinski tretirane drobljene gume
- M9 - beton s 15 % površinski tretirane drobljene gume
- M10 - beton s 20 % površinski tretirane drobljene gume
- M11 - beton s 25 % površinski tretirane drobljene gume
- $E_1$  - energija udara pri pojavi prve pukotina
- $E_u$  - energija udara pri vršnom opterećenju
- $N_1$  - broj udaraca do pojave prve pukotine
- $N_2$  - broj udaraca do vršnog opterećenja
- $m$  - masa čelične kugle
- $g$  - ubrzanje sile teže
- $h$  - visina s koje se ispušta kugla
- S.P. - doziranje superplastifikatora

## LITERATURA

- [1] Blessen Skariah, T., Ramesh Chandra, G., Vinu, J.P.: Experimental and modelling studies on high strength concrete containing waste tyre rubber. *Journal on Sustainable Cities and Society*, 19 (2015), pp. 68-73.
- [2] Bharathi Murugan, R., Ram Sai, E., Natarajan, C., Shen, E.C.: Flexural fatigue performance and mechanical properties of rubberized concrete, *GRADEVINAR*, 69 (2017) 11, pp. 983-990, <https://doi.org/10.14256/JCE.1427.2015>
- [3] Jing, L., Tianhua, Z., Q, D., Wu, H.: Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 91 (2015), pp. 145-149.
- [4] Shuaicheng, G., Qingli, D., Ruizhe, S., Xiao, S., Chao, L.: Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire, *Journal of Cleaner Production*, 148 (2017), pp. 681-689.
- [5] Blessen Skariah, T., Ramesh Chandra, G., Vinu, J.P.: Recycling of waste tyre rubber as aggregate in concrete: durability-related performance, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016), pp. 504-513.
- [6] Giedrius, G., Nagrockienė, D.: Crushed rubber waste impact of concrete basic properties, *Construction and Building Materials*, 140 (2017), pp. 36-42.
- [7] Aliabdo, A.A., Elmoaty, M.A., Elbaset, M.M.: Utilization of waste rubber in non-structural applications, *Construction and Building Materials*, 91 (2015), pp. 195-207.
- [8] Liang, H., Yu, M., Quantao, L., Yuanhua, M.: Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete, *Construction and Building Materials*, 120 (2016), pp. 403-407.
- [9] Mohammadi, I., Khabbaz, H., Vessalas, K.: Enhancing mechanical performance of rubberised concrete pavements with sodium hydroxide treatment, *Material and Structures*, 49 (2016) 3, pp. 813-827.
- [10] Onuaguluchi, O., Panesar, D.K.: Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume, *Journal of Cleaner Production*, 82 (2014), pp. 125-131.
- [11] Qiao, D., Baoshan, H., Xiang, S.: Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent, *Construction and Building Materials*, 48 (2013), pp. 116-123.
- [12] Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T.A., Bernardin, A.M.: Concrete made with recycled tyre rubber: effect of alkaline activation and silica fume addition, *Journal of Cleaner Production*, 19 (2011), pp. 757-763.
- [13] Li, G., Wang, Z., Leung, C.K.Y., Tang, S., Pan, J., Huang, W., Chen, E.: Properties of rubberized concrete modified by using silane coupling agent and carboxylated sbr., *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016), pp. 797-807.
- [14] Huang, B., Shu, X., Cao, J.: A two-staged surface treatment to improve properties of rubber modified cement composites. *Construction and Building Materials*, 40 (2013), pp. 270-274, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.014>
- [15] Rittirong, K., Uasopon, S., Prachayawasin, P., Euaphantasate, N., Aiempnanakit, K., Ummartyotin, S.: CTAB as a soft template for modified clay as filler in active packaging, *Data in Brief*, pp. 347-50, 2015.
- [16] Shirzad-Siboni, M., Khataee, A., Hassani, A., Karaca, S.: Preparation, characterization and application of a CTAB-modified nanoclay for the adsorption of an herbicide from aqueous solutions: Kinetic and equilibrium studies, *Comptes Rendus Chimie*, 18 (2015), pp. 204-214.
- [17] Bisht, K., Ramana, P.V.: Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete, *Construction and Building Materials*, 155 (2017), pp. 811 - 817.
- [18] Gerges, N.N., Issa, C.A., Fawaz, S.A.: Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties, *Case Studies in Construction Materials*, 9 (2018), pp. e00184.
- [19] Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., Barroso de Aguiar, J.L., Camões, A.F.: Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes, *Construction and Building Materials*, 34 (2012), pp. 186-191.
- [20] Blessen Skariah, T., Ramesh Chandra, G.: Properties of high strength concrete containing scrap tyre rubber, *Journal of Cleaner Production*, 113 (2015), pp. 1-7.
- [21] Liu, H., Wang, X., Jiao, Y., Sha, T.: Experimental investigation of the mechanical and durability properties of crumb rubber concrete, *Materials*, 9, 172 (2016), pp. 1-12.
- [22] Youssf, O., Mills, J.E., Hassanli, R.: Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete, *Journal on Construction and Building Materials*, 125 (2016), pp. 175-183.
- [23] Onuaguluchi, O.: Effects of surface pre-coating and silica fume on crumb rubber cement matrix interface and cement mortar properties, *Journal of cleaner Production*, 104 (2015), pp. 339-345.
- [24] Su, H., Yang, J., Ling, T.C., Ghataora, G.S., Dirar, S.: Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes, *Journal of Cleaner Production*, 91 (2015), pp. 288-296.
- [25] Trilok, G., Ravi, K. Sharma, S.C.: Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 73 (2014), pp. 562-574.
- [26] Blessen Skariah, T., Ramesh Chandra, G., Mehra, P., Kumar, S.: Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment, *Journal on Construction and Building Materials*, 83 (2015), pp. 320 -326.
- [27] Blessen Skariah, T., Ramesh Chandra, G., Mehra, P., Kumar, S.: Resistance to acid attack of cement concrete containing discarded tyre rubber, *Ukieri Concrete Congress - Concrete Research Driving Profit and Sustainability*.
- [28] Trilok, G., Ravi, K. Sharma, S.C.: Impact resistance of concrete containing waste rubber fiber and silica fume, *International Journal of Impact Engineering*, 83 (2015), 76-87.
- [29] Ruizhe, S., Shuaicheng, G., Qingli, D.: Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles, *Construction and Building Materials*, 153 (2017), pp. 496-505.
- [30] Bashar, S.M., Musa, A.: Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica, *Construction and Building Materials*, 159 (2018), pp. 234 - 251.
- [31] Musa, A., Bashar, S.M., Mohd Shahir, L.: Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica, *Construction and Building Materials*, 171 (2018), pp. 521 - 538.
- [32] Abdulaziz, A., Lampros, K., Bernal, S.A., Guadagnini, M., Pilakoutas, K.: Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements, *Construction and Building Materials*, 172 (2018), pp. 533 - 543.
- [33] Guneyisi, E., Gesoglu, M., Ozturan, T.: Properties of rubberized concretes containing silica fume, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004), pp. 2309-2317.