

Mogućnosti upotrebe otpadnih vlakana u cementnim kompozitima visokih uporabnih svojstava

Didulica, Katarina; Baričević, Ana

Source / Izvornik: **7. simpozij doktorskog studija građevinarstva 2021. : zbornik radova, 2021, 123 - 134**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2021.02>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:096788>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-06**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Mogućnosti upotrebe otpadnih vlakana u cementnim kompozitima visokih uporabnih svojstava

Katarina Didulica¹, doc.dr.sc. Ana Baričević²

¹ Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale, katarina.didulica@grad.unizg.hr

² Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale, ana.baricevic@grad.unizg.hr

Sažetak

Upotreba vlakana u cementnim kompozitima utječe na unapređenje njihovih svojstava i produženi uporabni vijek. Ono je vidljivo u smanjenom skupljanju u ranoj starosti, povećanoj vlačnoj i čvrstoći na savijanje te žilavosti. U radu je dan pregled stanja područja primjene različitih vrsta vlakana u cementnim kompozitima, s posebnim naglaskom na reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma te ugljična, bazaltna i staklena vlakna. Upotreba i ponašanje odabranih otpadnih vlakana, dobivenih najvećim dijelom kao ostatak pri proizvodnji visokovrijednih tkanina i mrežica za građevinarstvo, nisu u potpunosti istraženi te je cilj istraživačke grupe ReWire istražiti i objasniti njihov doprinos svojstvima cementnih kompozita.

Ključne riječi: otpadna vlakna, staklena vlakna, ugljična vlakna, bazaltna vlakna, polimerna vlakna iz otpadnih guma

Possibilities of using waste fibers in high- performance cementitious composites

Abstract

The use of fibers in cementitious composites leads to an improvement in the properties and an extension in the service life of high- performance cementitious composites. This is evident in the reduction of early shrinkage and increase in tensile and flexural strength, as well as toughness. This paper briefly reviews the state of the art regarding the application of different types of fibers in cementitious composites, with particular emphasis on recycled tire polymer, carbon, basalt, and glass fibers. Considering that the use of the selected waste fibers, mainly generated as waste in the production of high- quality construction textiles, has not been fully explored, the aim of the ReWire research group is to explore and explain a full understanding of their contribution to the properties of cementitious composites.

Key words: waste fibers, glass fiber, carbon fiber, basalt fiber, recycled tire polymer fiber

1 Uvod

Beton je najčešće korišteni građevni materijal u svijetu te čini veći dio izgrađenog okoliša. Međutim, krtoš i mala vlačna čvrstoća te posljedično pojava pukotina koja uzrokuje degradaciju betona i gubitak svojstava smatraju se glavnim nedostatkom [1]. To je moguće umanjiti primjenom kratkih vlakana; ona zbog svojih karakteristika pospješuju ponašanje cementne matrice te imaju mogućnost premošćivanja pukotina i odgađanja sloma, odnosno pridonose duktilnijem ponašanju cementnih materijala [2].

Na tržištu su dostupne razne vrste vlakana te je njihova upotreba u cementnim kompozitima istražena i poznata [3–5]. Upotrebom polimernih vlakana se ostvaruje smanjeno skupljanje, odnosno smanjuje se broj pukotina te njihova širina [6, 7], a primjenom ugljičnih vlakana doprinose unapređenju vlačne čvrstoće i žilavosti [8–10]; staklena i bazaltna vlakna doprinose se smanjenju skupljanja i poboljšanju mehaničkih svojstava, ali je njihova upotreba ograničena uslijed propadanja pri izloženosti alkalnoj okolini cementnog kompozita [11–13]. Iako su utjecaji pozitivni u pogledu svojstava, upotreba je ograničena zbog visoke cijene industrijski proizvedenih vlakana čime se povećava ukupna cijena kompozita. Umjesto industrijski proizvedenih vlakana, moguće je korištenje otpadnih vlakana lokalnih industrija koja bi u protivnom morala biti odložena na odlagalištu ili spaljena kao dio energetskog procesa [14]. Na taj način razvijaju se učinkoviti i ekološki prihvatljiviji cementni materijali, a u isto vrijeme se smanjuju količine otpada.

Otpadna vlakna mogu biti dio polimernih kompozita, onečišćena ili čista vlakna dobivena kao ostatak pri proizvodnji [15–17]. Otpadna vlakna koja su dio kompozita najprije treba toplinski obraditi i očistiti. Iako se nakon toplinske obrade vlaknima umanjuju svojstva, njihova upotreba je još uvijek moguća. Onečišćena vlakna se sastoje od vlakana te drugih čestica i nečistoća, a čista otpadna vlakna neobrađeni su ostatak u proizvodnji koji nema daljnju upotrebu. Velik potencijal se pronalazi u čistim otpadnim vlaknima jer zahtijevaju manju potrošnju energije za pripremu i obradu, a imaju svojstva slična ili jednaka u odnosu na industrijski proizvedena.

U sklopu projekta “Cementni kompoziti ojačani otpadnim vlaknima” – ReWire, analizirat će se reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma (RTPF) te ugljična (C), staklena (G) i bazaltna (B) vlakna dobivena kao ostatak prilikom proizvodnje visokovrijednih tkanina i mrežica za građevinarstvo. Cilj projekta ReWire je karakterizacija lokalno dostupnih otpadnih vlakana, razvoj tehnologija obrade i integracije koje će otvoriti potencijal otpadnih vlakana te ih pretvoriti u vrijedan resurs u građevinskoj industriji za razvoj mikroarmiranih cementnih materijala. U ovom radu dan je kratak pregled osnovnih svojstava odabranih otpadnih vlakana te dosadašnje spoznaje o primjeni u cementnim kompozitima.

2 Izvor otpadnih vlakana

Tekstil je opći naziv za vlakna i sve proizvode načinjene od njih bilo kojom prerađivačkom tehnologijom, odnosno pređenjem, tkanjem, pletenjem, čipkanjem, pustenjem, iglanjem i drugim suvremenim tehnikama [18]. Ono uključuje sve tekstilne tvorevine i proizvode koji se iz njih izvode. Tekstili i mrežice se često koriste u građevinarstvu, a mogu imati različita svojstva ovisno o načinu tkanja te orijentaciji i vrsti vlakna. Način tkanja može biti isprepletanjem pod pravim kutom, pletenje u petlju, pletenje dva ili više vlakana ne pod pravim kutom ili netkani tekstil spojen kemijski, mehanički ili toplinsko. Koriste se za ojačanje, sanaciju, izolaciju, kao dio fasada, ploča i strukturnih elemenata, za predgotovljene elemente ili u umjetničkim djelima (skulpturama i sl.). Prilikom tkanja stroj ima ograničenje radne širine te se zbog sklonosti raspletanju na rubovima mrežica reže. Odrezani rub širine 5 – 6 cm se odvaja te s obzirom na to da nema daljnju upotrebu sortira prema vrsti vlakna i skladišti kao otpad. Tako nastali otpad (slika 1) je čist i u većini slučajeva povezan staklenom ili viskoznom niti.

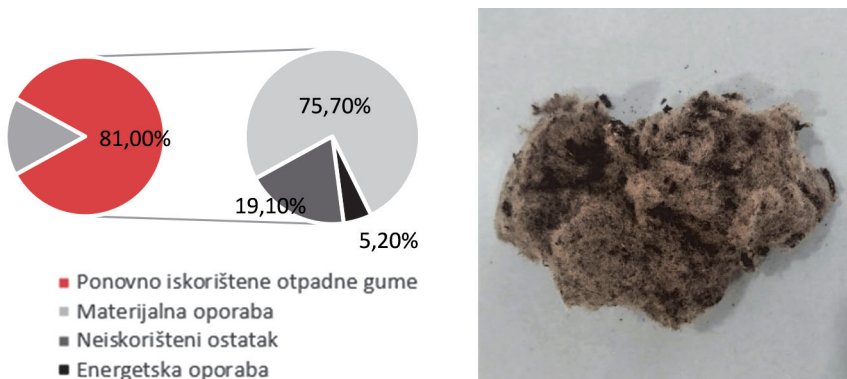
Prema anketama provedenim u sklopu projekta ReWire među proizvođačima mrežica za građevinarstvo, dobiven je podatak da se samo na području Hrvatske generira približno 327 tona otpadnih vlakana godišnje, odnosno 10 % korištene vrijednosti [19]. Otpad se skladišti u spremnicima i odlaže na odlagalištu. Sve to predstavlja trošak za proizvođača, a istovremeno nije u skladu s Direktivom o otpadu [20].



Slika 1. Otpadna vlakna dobivena u proizvodnji mrežica za građevinarstvo; s lijeva na desno: staklena, ugljična, bazaltna vlakna

Tekstil svoju primjenu pronalazi i za ojačanje automobilskih i drugih vrsta guma. Nakon isteka uporabnog vijeka gume, provodi se njeno recikliranje. Ono se uglavnom odvija mehaničkim putem, trganjem na manje komade i usitnjavanjem do željene veličine. Posljednji podaci iz 2019. godine pokazuju da je u Europi 95 % prikupljenih otpadnih guma ponovno iskorišteno na tržištu sekundarnih materijala, a ta vrijednost za Hrvatsku je 81 % (slika 2, lijevo) [21]. Rezultati anketa provedenih u sklopu

projekta ReWire pokazuju da se recikliranjem otpadne gume dobije približno 10 % polimernih vlakana, 10 – 15 % čeličnih vlakana te 75 – 80 % gume [19]. Ako uzme-
mo u obzir da se u Europi svake godine prikupi više od 3,5 milijuna tona guma [21],
jasno je da upotreba sekundarnih materijala iz otpadnih guma predstavlja značajan
izvor za korištenje u građevinskoj industriji. Samo na razini Hrvatske godišnje nastaje
220 - 250 tona recikliranih polimernih vlakana iz otpadnih guma (RTPF) (slika 2,
desno) [19]. Dosadašnja istraživanja primjene RTPF-a u cementnim kompozitima
upućuju na njihov pozitivan doprinos pri ranom skupljanju bez velikih utjecaja na
mehanička svojstva [22–24].



Slika 2. Odnos vrsta ponovnog iskorištavanja otpadnih guma u Hrvatskoj (lijevo); onečišćena polimerna vlakna dobivena recikliranjem otpadnih guma (desno)

3 Osnovna svojstva vlakana za upotrebu u cementnim kompozitima

Poznavanje svojstava vlakana bitno je za određivanje njihove daljnje uporabe. Potrebno je da vlakna zadovolje osnovna svojstva za preradu i dodatna svojstva za određenu namjenu. Za definiranje vlakana potrebno je znati njihovu duljinu, promjer, finoću, čvrstoću, savitljivost te kod upotrebe u cementnim kompozitima i morfološke karakteristike, sposobnost upijanje vlage i vode, ponašanje pri zagrijavanju te otpornost na kiseline i alkalije.

Duljina vlakna se odnosi na razmak između krajeva ispravljenog, ali ne istegnuto vlakna; razlikujemo vlasasto- kratko i filamentno- dugo vlakno. Kako je vidljivo u tablici 1 i tablici 2, koriste se vlakna širokog raspona duljine. Makrovlakna (> 30 mm) imat će veći utjecaj na čvrstoću i žilavost materijala, a kraća, mikrovlakna (≤ 30 mm) imat će veći utjecaj na ponašanje pri skupljanju [4, 9, 25–28]. Promjer monofilamenta kod kružnog presjeka vlakna se izražava u mikrometrima, a u slučajevima nepravilnog presjeka potrebno je odrediti njegovu ekvivalentnu vrijednost (promjer

kruga s površinom jednakom srednjoj poprečnoj površini presjeka). Promjer je moguće opisati i finoćom vlakna, odnosno odrediti mu duljinsku masu. Ona predstavlja masu u jediničnoj duljini vlakna i izražava se pomoću mjerne jedinice tex ($1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km}$) [18].

Čvrstoća vlakana izražava se kao omjer prekidne sile i površine vlakna te se izražava u centinjutnima cN ili duljinske mase u cN/tex . Vlakna se odlikuju iznimno visokom vlačnom čvrstoćom, tablice 1 i 2, u odnosu na cementnu matricu ($f_{\text{CM}} = 2,0 - 4,0$ MPa) te imaju sposobnost preuzimanja vlačnih opterećenja na sebe. Zbog toga dolazi do povećanja vlačne i čvrstoće na savijanje kompozita [2–4]. Nisu primjetni veći utjecaji na iznos tlačne čvrstoće, ali primjetan je utjecaj na mehanizam sloma, odnosno duktilnije ponašanje kompozita [2–4]. Duljina koju vlakno postigne prije pucanja pri vlačnom opterećenju u odnosu na početnu duljinu nazivamo prekidno istežanje. Prema vrijednostima prikazanim u tablicama 1 i 2, čvrstoća i prekidno istežanje mogu varirati i unutar iste vrste vlakana, ovisno o proizvodnji i namjeni. Najveću vrijednost vlačne čvrstoće imaju ugljična vlakna na bazi smole, a najmanje su vrijednosti zabilježene za polimerna mikrovlakna. Isti trend vrijedi i za vrijednosti modula elastičnosti. Bazaltna i staklena vlakna imaju usporedive karakteristike, ali mehanička svojstva kompozita su bolja u slučaju bazaltnih vlakana [11, 25].

Izgled površine vlakana i poprečni presjek uvelike utječu na vezu vlakna i matrice koja definira ponašanje kompozita. Povoljni način sloma se događa izvlačenjem vlakana te je mehanička veza između vlakna i cementne matrice vrlo važna kod predviđanja ponašanja. Mikrostruktura sučeljka između mikrovlakana i cementne matrice je gusta i ne može se primijetiti jasna razlika zone te se razlikuje od zone između većeg dodatka, npr. agregata ili makrovlakana i cementne matrice. Razlog tomu je isti red veličine promjera vlakna i cementa što minimizira nepovoljne utjecaje [29]. Iako je promjer vlakna istog reda veličine kao i promjer cementa, njegova duljina je puno veća te iz 3D perspektive dolazi do pogoršanja određenih svojstava.

Tablica 1. Osnovna svojstva proizvedenih vlakana ovisno o vrsti vlakna [3, 4, 25, 27, 28, 30–36, 5, 6, 8–13]

Vrsta vlakna	Vlačna čvrstoća [GPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Duljina [mm]	Promjer (eq) [μm]	Gustoća [g/cm^3]	Prekidno istežanje [%]
Ugljična vlakna	1,0 – 7,0	150 – 820	3 – 10	5 – 10	1,6 – 1,8	0,5 – 3,2
na bazi PAN	1,4 – 3,5	140 – 820	10	9 – 18	1,8 – 2,2	0,5–1,1
na bazi smole	1,8 – 7,0	230 – 540	3	7 – 9	1,6 – 1,7	0,5 – 1,5
Bazaltna vlakna	0,9 – 4,8	40 – 115	6 – 30	6 – 20	1,9 – 2,8	2,4 – 3,2
E – staklo	1,4 – 3,8	72 – 76	–	6 – 21	2,5 – 2,6	1,8 – 4,8
Ar – staklo	1,0 – 3,5	72 – 80	6	14 – 20	2,5 – 2,8	2,0 – 4,0
S – staklo	4,2 – 4,6	83 – 97	–	6 – 21	2,5	5,3
Polimerna (mikro) vlakna	0,3 – 0,7	3 – 40	6 – 12	10 – 60	0,9 – 1,4	3,0 – 60,0

Iz tablice 2 je vidljivo da reciklirana vlakna imaju nešto lošija svojstva u odnosu na proizvedena vlakna prikazana u tablici 1. Prikazana reciklirana ugljična i staklena vlakna su dobivena iz mrežica i sustava polimera ojačanog vlaknima te traka, panela, i sl., a reciklirana polimerna vlakna dobivena su iz otpadnih guma. Pregledom literature nisu pronađeni izvori korištenih recikliranih bazaltnih vlakana. Najveće vrijednosti vlačne čvrstoće i modula elastičnosti imaju reciklirana ugljična vlakna, a najniže vrijednosti dobivene su na recikliranim polimernim vlaknima. Iako su vrijednosti niže u odnosu na proizvedena vlakna, svojstva recikliranih vlakana su još uvijek povoljna u odnosu na cementnu matricu. Upotrebom recikliranih vlakana u cementnim kompozitima očekivano je manje poboljšanje čvrstoća te poboljšanje ponašanja uslijed skupljanja [22–24, 30, 37–41]. Iz dosadašnjih ispitivanja vidimo da postoji velik potencijal otpadnih vlakana bilo da se radi o obrađenim ili neobrađenim vlaknima.

Tablica 2. Osnovna svojstva recikliranih vlakana ovisno o vrsti vlakna, [15, 16, 22–24, 26, 30, 37–39, 40, 41]

Vrsta vlakana	Vlačna čvrstoća [GPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Duljina [mm]	Promjer (eq) [μm]	Gustoća [g/cm^3]	Prekidno istežanje [%]
Reciklirana ugljična vlakna	3,15 – 4,95	200 – 252	6 – 40	7 – 11	1,55 – 2,00	1,5
Reciklirana bazaltna vlakna	–	–	–	–	–	–
Reciklirana staklena vlakna	1,75	71,5	10	12	2,69	–
Reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma	0,10 – 0,48	2,1–3,5	8,5 – 19	8 – 38	0,92 – 1,16	–

4 Ponašanje cementnih kompozita ojačanih vlaknima

Kako je prethodno objašnjeno, moguće je korištenje raznih vrsta i geometrijskih karakteristika vlakana. Svaka od njih različito utječu na ponašanje cementnih kompozita u svježem i očvrnulom stanju. Neka od svojstava prikazana su u tablici 3 na način da strelica prema dolje označava smanjenje, odnosno pad vrijednosti navedenog svojstva, strelica prema gore označava povećanje, odnosno rast vrijednosti te horizontalna strelica koja označava da vlakno nema utjecaja na svojstvo. Potrebno je naglasiti da za određena svojstva smanjenje može značiti pogoršanje, ali za neka ono znači poboljšanje ponašanja.

Tablica 3. Ponašanje cementnih kompozita ovisno o vrsti dodanog vlakna, [3-6, 8-13, 25, 27, 28, 30-36]

SVOJSTVO	CF			BF			GF			PF		
Plastično skupljanje	↓			↓			↓			↓		
Skupljanje uslijed sušenja	↓			↓			↓			↓		
Širina pukotina (GSU)	↓			↓			↓			↓		
Postpukotinsko ponašanje (GSN)		↑			↑			↑				↔
Vlačna čvrstoća savijanjem		↑			↑			↑				↔
Tlačna čvrstoća		↑			↑	↔	↓		↔	↓		↔
Eksplozivno odlamanje	↓			↓					↔	↓		
Optimalna količina [%V]	0,1 – 1,0			0,1 – 0,4			0,1 – 1,0			0,1 – 3,0		

U odnosu na mješavinu bez vlakana, dodatak vlakana rezultirat će smanjenjem vriednosti konzistencije svježe mješavine slijeganjem. Gubitak konzistencije je veći što je veći koeficijent oblika vlakna (omjer duljine i (ekivalentnog) promjera vlakna) i povećanjem količine vlakana [8, 26, 29, 31, 42]. Smanjenje konzistencije slijeganjem mikroarmiranog kompozita ne znači nužno lošiju, manje obradivu mješavinu već se preporuča ispitivanje obradivosti Vebe postupkom ili obrnutim *slump* testom [31]. Utjecaj vlakana na svježja svojstva objašnjava se sposobnošću vlakana da upijaju vodu i/ili uključivanjem sastojaka igličastog oblika velike specifične površine u sastav [29, 31, 42]. Upijanje vode vežemo uglavnom za prirodna vlakna, a umjetna vlakna od anorganskih tvari (ugljična, staklena, bazaltna i dr.) i vlakna od sintetskih polimera upijaju vrlo malo ili nimalo. Unatoč promjenama u reološkom ponašanju, prema radu Panzera i suradnika [42], ne očekuju se veće promjene prilikom procesa hidratacije cementnih kompozita s vlaknima koja ne upijaju vodu. Međutim, kod dodatka prirodnih vlakana moguće je upijanje vode te njeno naknadno otpuštanje, odnosno unutarinja njega. Vrsta anorganskih i polimernih vlakana nema veliku ulogu u pogoršanju svojstava u svježem stanju, već je veći utjecaj geometrijskih karakteristika. Koeficijent oblika manji od 60 najbolji je u pogledu manipulacije i miješanja, ali koeficijent oblika oko 100 je poželjan s gledišta čvrstoće, a koeficijent oblika od 50 do 70 najbolji je za unaprijed pripremljene mješavine [42]. Svojstva svježe mješavine je moguće korigirati projektiranjem sastava te dodatkom kemijskih i mineralnih dodataka pa je moguće zadovoljiti i zahtjeve samozbijajućeg betona ojačanog vlaknima [36, 43].

Tijekom procesa hidratacije dolazi do smanjenja volumena kompozita i stvaranja mikropukotina. Mikropukotine predstavljaju kritično mjesto koje napredovanjem prerasta u makropukotinu koja naposljetku dovodi do loma. Navedeno je moguće kontrolirati mikrovlaknima visoke vlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Prema dostupnoj literaturi, kod ugljičnih [10], bazaltnih [11, 25, 27, 28], staklenih [11, 25] i polimernih [4] vlakana primjetno je smanjenje skupljanja u odnosu na referentnu

mješavinu bez vlakana. Osim industrijski proizvedenih vlakana, za postizanje smanjenog skupljanja mogu se koristiti i reciklirana vlakna iz otpadnih guma [22–24] te reciklirana ugljična vlakna [30, 44].

Iako dodatak mikrovlakana doprinosi poboljšanju mehanizma sloma, nema veći utjecaj na vrijednost tlačne čvrstoće [2, 8, 10, 11], ali dodatkom makrovlakana postiže se povećanje tlačne čvrstoće i žilavosti [25, 27, 45]. Povećanjem količine i dimenzija vlakana vlačna i čvrstoća na savijanje se poboljšavaju, ali do određene granice. Nakon toga nema daljnjeg napretka svojstava ili, štoviše, dolazi do pogoršanja [6, 11, 27, 28]. Prevelika količina vlakana otežava miješanje, uvlači prevelike količine zraka i pospješuje nakupljanje vlakana. Kod ugljičnih vlakana optimalna mehanička svojstva se postižu dodatkom 0,25 – 0,75 % vlakana [8, 10], dok su količine za bazaltna i staklena vlakna 0,5 – 1,0 % [11]. Isti trend rasta vrijedi i kod ispitivanja žilavosti i apsorpcije energije [2, 4, 8, 10, 11].

Iz tablice 3 je vidljivo da dodatak ugljičnih, bazaltnih i polimernih vlakana ima pozitivan utjecaj i pri eksplozivnom odlamanju tijekom požara. Tijekom izloženosti visokim temperaturama u betonu dolazi do ograničenog toplinskog skupljanja te isparavanja prisutne vode i stvaranja pritisaka koji narušavaju stabilnost i otpornost. Kod upotrebe polimernih vlakana dolazi do otapanja vlakana i stvaranja kanala kojima se omogućuje distribucija pritiska [33, 34], a upotrebom bazaltnih vlakana utječe se na osiguranje čvrstoće elementa zbog otpornosti vlakana na visoku temperaturu [35]. Izlaganjem ugljičnih, staklenih (S- staklo) i bazaltnih vlakana temperaturi do 200°C ponašanje vlakana je približno jednako, odnosno dolazi do minimalnog gubitka čvrstoće. Porastom temperature izlaganja na 600°C bazaltna vlakna zadržavaju i do 90 % vrijednosti čvrstoće, dok je kod ugljičnih i staklenih vlakana ostvaren pad vrijednosti za približno 40 % [32].

5 Zaključak

Upotreba vlakana u cementnim kompozitima omogućuje unapređenje mehaničkih i svojstava trajnosti. Ovisno o zahtjevima upotrebe moguće je korištenje vlakana različitog materijala, dimenzija i svojstava. Unatoč poboljšanju svojstava i posljedično duljem uporabnom vijeku kompozita te smanjenom potrebom za održavanjem i sanacijom, upotreba vlakana nije česta u svakodnevnoj primjeni zbog visoke cijene industrijski proizvedenih vlakana. Kako bi se otklonio utjecaj cijene na korištenje vlakana u cementnim kompozitima, potiče se korištenje otpadnih vlakana. Na taj način se osim poboljšanja svojstava kompozita smanjuju količine otpada na odlagalištima te umanjuje potrošnja prirodnih resursa potrebna za proizvodnju novih vlakana.

Dosadašnja ispitivanja provedena na recikliranim vlaknima dobivenim radom industrije, ugljična i staklena vlakna, te recikliranim polimernim vlaknima iz otpadnih

guma upućuju na mogućnosti njihove primjene u cementnim kompozitima. Mogućnosti uključuju poboljšanje svojstava kompozita prilikom skupljanja i svojstava trajnosti, ali bez nepovoljnih utjecaja na mehanička svojstva u odnosu na kompozite bez vlakana. Cilj projekta ReWire je nastaviti istraživanja primjene otpadnih vlakana u cementnim kompozitima i dokazati mogućnost njihove primjene bez nepovoljnih utjecaja na ponašanje kompozita.

Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u sklopu projekta “Cementni kompoziti ojačani otpadnim vlaknima” – ReWire (UIP-2020-02-5242) koji se provodi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, financiranom od strane Hrvatske zaklade za znanost.

Literatura

- [1] Bjegović, D., Štirmer, N.: *Teorija i tehnologija betona*, Građevinski fakultet Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [2] Micelli, F., Renni, A., Kandalajt, A. G., Moro, S.: Fiber-reinforced concrete and ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete materials, *New Materials in Civil Engineering*, Elsevier, pp. 273–314, 2020.
- [3] Bertelsen, I. M. G., Ottosen, L. M., Fischer, G.: Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review, *Construction and Building Materials*, vol. 230. Elsevier Ltd, 10-Jan-2020.
- [4] Brandt, A. M.: Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Compos. Struct.*, vol. 86, no. 1–3, pp. 3–9, Nov. 2008.
- [5] Hussain, I., Ali, B., Akhtar, T., Jameel, M. S., Raza, S. S.: Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene), *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, Dec. 2020.
- [6] Wongtanakitcharoen, T., Naaman, A. E.: Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers, *Mater. Struct. Constr.*, vol. 40, no. 3, pp. 289–300, 2007.
- [7] Ullah, F.: Early Age Autogenous Shrinkage and Long-term Drying Shrinkage of Fibre Reinforced Concrete, Aalto University, 2017.
- [8] Safiuddin, M., Yakhlaif, M., Soudki, K. A.: Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 477–488, Mar. 2018.

- [9] Shu, X., Graham, R. K., Huang, B., Burdette, E. G.: Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of Portland cement mortar, *Mater. Des.*, vol. 65, pp. 1222–1228, Jan. 2015.
- [10] Kizilkanat, A. B.: Experimental evaluation of mechanical properties and fracture behavior of carbon fiber reinforced high strength concrete, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 60, no. 2, pp. 289–296, 2016.
- [11] Kizilkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., Akça, A. H.: Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study, *Constr. Build. Mater.*, vol. 100, pp. 218–224, Dec. 2015.
- [12] Wang, Q., Ding, Y., Randl, N.: Investigation on the alkali resistance of basalt fiber and its textile in different alkaline environments, *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, 2021.
- [13] Scheffler, C., Förster, T., Mäder, E., Heinrich, G., Hempel, S., Mechtcherine, V.: Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function, *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 355, no. 52–54, pp. 2588–2595, 2009.
- [14] Bartl, A. Hackl, A., Mihalyi, B., Wistuba, M., Marini, I.: Recycling of fibre materials, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 83, no. 4 B, pp. 351–358, 2005.
- [15] Abdou, T. R., Botelho Junior, A. B., Espinosa, D. C. R., Tenório, J. A. S.: Recycling of polymeric composites from industrial waste by pyrolysis: Deep evaluation for carbon fibers reuse, *Waste Manag.*, vol. 120, pp. 1–9, Feb. 2021.
- [16] Nguyen, H., Carvelli, V., Fujii, T., Okubo, K.: Cement mortar reinforced with reclaimed carbon fibres, CFRP waste or prepreg carbon waste, *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 321–331, Nov. 2016.
- [17] Haramina, T., Jelavić, T., Šolić, T., Katalinić, M., Pilipović, A. Analiza mogućnosti recikliranja diskontinuiranih E-staklenih vlakana, *Polim.*, vol. 32, no. 2, pp. 52–61, 2011.
- [18] Čunko, R., Andrassy, M.: *Vlakna*, Zagreb, Zrinski, 2005.
- [19] Didulica, K., Baričević, A., Carević, I., Jelčić Rukavina, M., Frančić Smrkić, M.: D2.2. Izvješće o dostupnim količinama otpadnih vlakana u regiji, Zagreb, 2021.
- [20] Direktiva o otpadu, Direktiva 2008/98/EZ,
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098>.
- [21] ETRMA - European Tyre & Rubber Manufacturers association, <https://www.etrma.org/>.
- [22] Baričević, A., Jelčić Rukavina, M., Pezer, M., Štirmer, N.: Influence of recycled tire polymer fibers on concrete properties, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 91, pp. 29–41, Aug. 2018

- [23] Baricevic, A., Pezer, M., Jelcic Rukavina, M., Serdar, M., Stirmer, N.: Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, pp. 135–144, Jul. 2018.
- [24] 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.
- [25] Ahmad W., Khan, M.: Effect of Short Fiber Reinforcements on Fracture Performance of Cement-Based Materials : A Systematic Review Approach, pp. 1–44, 2021.
- [26] Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A.: The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages, *Compos. Part B Eng.*, vol. 112, pp. 74–92, Mar. 2019.
- [27] Ruijie, M. A., Yang, J., Liu, Y., Zheng, X.: Influence of length-to-diameter ratio on shrinkage of basalt fiber concrete, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 242, no. 1, 2017.
- [28] Wang, X., He, J., Mosallam, A. S., Li, C., Xin, H.: The Effects of Fiber Length and Volume on Material Properties and Crack Resistance of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC), *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2019, 2019.
- [29] He, S., Li, Z., Yang, E. H.: Quantitative characterization of anisotropic properties of the interfacial transition zone (ITZ) between microfiber and cement paste, *Cem. Concr. Res.*, vol. 122, no. May, pp. 136–146, 2019.
- [30] Belli, A., Mobili, A., Bellezze, T., Tittarelli, F.: Commercial and recycled carbon/steel fibers for fiber-reinforced cement mortars with high electrical conductivity, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 109, May 2020.
- [31] Daniel, J. I., Ahmad, S. H., Arockiasamy, M., Ball, H. P.: State-of-the-art report on fiber reinforced concrete reported by ACI Committee 544, *Ac.544.1R-96*, vol. 96, no. Reapproved, 2002.
- [32] Sim, J., Park, C., Moon, D. Y.: Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures, *Compos. Part B Eng.*, vol. 36, no. 6–7, pp. 504–512, 2005.
- [33] Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q., Zhang, Z.: Durability of ultra-high performance concrete – A review, *Constr. Build. Mater.*, vol. 255, p. 119296, 2020
- [34] Wu, H., Lin, X., Zhou, A.: A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, vol. 135. Elsevier Ltd, 01-Sep-2020
- [35] Yonggui, W., Shuaipeng, L., Hughes, P., Yuhui, F.: Mechanical properties and microstructure of basalt fibre and nano-silica reinforced recycled concrete after exposure to elevated temperatures, *Constr. Build. Mater.*, vol. 247, Jun. 2020.

- [36] Algin, Z., Ozen, M.: The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 678–685, 2018.
- [37] Mastali, M., Dalvand, A.: The impact resistance and mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with recycled CFRP pieces, *Compos. Part B Eng.*, vol. 92, pp. 360–376, May 2016
- [38] Faneca, G., Segura, I., Torrents, J. M., Aguado, A.: Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibres, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 92, pp. 135–144, Sep. 2018.
- [39] Aflaki Samani, M., Jabbari Lak, S.: Experimental investigation on the mechanical properties of recycled aggregate concrete reinforced by waste carbon fibers, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 8, pp. 4519–4530, Aug. 2019.
- [40] Mastali, M., Abdollahnejad, Z., Dalvand, A., Sattarifard, A., Illikainen, M.: Comparative effects of using recycled CFRP and GFRP fibers on fresh- and hardened-state properties of self-compacting concretes: a review, *New Materials in Civil Engineering*, Elsevier, 2020, pp. 643–655.
- [41] Yildizel, S. A., Timur, O., Ozturk, A. U.: Abrasion Resistance and Mechanical Properties of Waste-Glass-Fiber-Reinforced Roller-compacted Concrete, *Mech. Compos. Mater.*, vol. 54, no. 2, pp. 251–256, May 2018.
- [42] Panzera, T. H., Christoforo, A. L., Ribeiro Borges, P. H.: High performance fibre-reinforced concrete (FRC) for civil engineering applications, *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 552–581
- [43] Ferrara, L., Park, Y. D., Shah, S. P.: A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 6, pp. 957–971, Jun. 2007.
- [44] Akbar, A., Liew, K. M.: Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials, *J. Clean. Prod.*, vol. 274, Nov. 2020.
- [45] Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A. R.: The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers, *J. Clean. Prod.*, vol. 124, pp. 312–324, 2016.