

# Trajnost umjetnih vlakana u cementnim kompozitima

**Branka Mrduljaš<sup>1</sup>, doc. dr. sc. Ana Baričević<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, branka.mrduljas@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ana.baricevic@grad.unizg.hr

## Sažetak

Trajnost vlakana u cementnoj matrici definirana je njihovom otpornošću alkalnom okolišu. Kako bi utvrdili svojstva trajnosti otpadnih vlakana u cementnim kompozitima vlakna se podvrgavaju različitim ispitivanjima u cilju utvrđivanja njihove kemijske stabilnosti, ali i promjene geometrijskih i mehaničkih svojstava nakon izlaganja alkalnom okolišu. U radu je prikazan sustavan pregled literature iz područja trajnosti staklenih, bazaltnih, ugljičnih vlakana i polimernih vlakana iz recikliranih otpadnih guma. Dan je pregled najčešće korištenih alkalnih otopina, uvjeti i trajanje ispitivanja, definirani su mehanizmi korozije za svaku vrstu vlakana iz dostupne literature. Na osnovi danih istraživanja zaključeno je da postoji nedostatak normiranih ispitivanja u cilju definiranja otpornosti vlakana u alkalnom okolišu, ali i temeljem provedenih ispitivanja predviđanja uporabnog vijeka u cementnim kompozitima.

*Ključne riječi: staklena vlakna, ugljična vlakna, bazaltna vlakna, vlakna iz otpada recikliranih guma*

## Durability of synthetic fibers in cement composites

### Abstract

The durability of fibers in a cement matrix is defined by their resistance to an alkaline environment. To determine the durability properties of waste fibers in cement composites, the fibers are subjected to various tests to determine their chemical stability, as well as changes in geometric and mechanical properties after exposure to an alkaline environment. The paper presents a systematic review of the literature in the field of durability of glass, basalt, carbon and recycled tire polymer fibers. An overview of the most commonly used alkaline solutions, test conditions, and test duration is provided, and corrosion mechanisms for each fiber type are defined from the available literature. Based on the research conducted, it was concluded that there is a lack of standardized tests to define the resistance of fibers in an alkaline environment, but also based on tests to predict the service life of cement composites.

*Key words: glass fibers, carbon fibers, basalt fibers, recycled tire polymer fibers*

## 1 Uvod

Vlakna se u cementnim kompozitima učestalo primjenjuju već duži niz godina. Prva primjena vlakana u cementnim kompozitima upotreba je azbestnih vlakana 1900-tih godina te nakon toga slijedi široka primjena vlakana u cementnim kompozitima [1]. Uloga vlakana je različita, od poboljšanja duktilnost samog kompozita, poboljšanja otpornosti na udar do otpornosti na habanje [1]. Najčešće korištena i analizirana vlakna u cementnim kompozitima su čelična vlakna. Visoko kvalitetna vlakna poput ugljičnih, staklenih ili bazaltnih učestalo se koriste za ojačanje raznih vrsta kompozita. Vlakna iz recikliranih otpadnih guma pronašla su svoju ulogu na tržištu u potrazi za isplativosti i održivosti te se danas sve češće istražuje njihova primjena [2, 3].

Vlakna u cementnim kompozitima izložena su alkalnom okruženju zbog procesa hidratacije cementa. Visoki pH uglavnom je posljedica prisutnosti  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , a pH se može povećati do vrijednosti 13,8 zbog visokih udjela KOH i NaOH [4]. Stupanj korozije osim o okolišnim uvjetima, svakako ovisi o matrici, ali i vrsti vlakana. Stoga je jasno da trajnost kompozita ovisi o velikom broju čimbenika te se ne može jednoznačno odrediti. Ipak, otpornost pojedine vrste vlakana u alkalnom okolišu može se smatrati indikacijom za očekivanu promjenu svojstava kompozita tijekom uporabnog vijeka.

U literaturi pronalazimo različite metode izlaganja vlakana alkalnom okolišu kao što su izlaganje različitim alkalnim otopinama u približnom rasponu pH vrijednosti od 9 do 13,5 ili miješanjem vlakana u cementni kompozit u različitim vremenskim periodima i uvjetima. Koriste se metode tzv. ubranog starenja s povišenim temperaturama [5–7] i manji broj ispitivanja gdje se vlakna izlažu stvarnim uvjetima umiješana u cementnu matricu [8–10]. Međutim, ne postoji uniformirani tj. dogovoreni način određivanja svojstava trajnosti vlakana u alkalnoj otopini (cementnoj matrici). Glavni cilj ovog rada je pregled znanstvene literature na temu ocjene trajnosti umjetnih vlakana u alkalnom okolišu. Istraživanjem su obuhvaćena staklena (GF), bazaltna (BF), ugljična (CF) vlakna i polimerna vlakna iz recikliranih otpadnih guma (RTPF). Rad je podijeljen u 2 poglavlja, u prvom dijelu prikazan je pregled metoda i uvjeta ispitivanja svojstava trajnosti vlakana. U drugom dijelu prezentirana su dosadašnja saznanja o trajnosti odabranih umjetnih vlakana u alkalnom okolišu.

## 2 Metode određivanja svojstava trajnosti vlakana

Mehanizmi degradacije usko su povezani s vrstom promjene mehaničkih i geometrijskih svojstava vlakana tijekom izloženosti alkalnoj otopini. Dugotrajna kemijska otpornost vlakana ne može se direktno odrediti, općenito se uspoređuju vlakna prije i nakon izlaganja ubranom starenju u strogo kontroliranim uvjetima. Trajnost vlakana se ispituje izlaganjem vlakana u različitim otopinama, pri različitim temperatu-

rama i vremenu izloženosti kao što je vidljivo u tablici 1. Najčešće korištene alkalne otopine su NaOH i  $\text{Ca(OH)}_2$ . Povišene temperature koriste se prilikom ispitivanja kako bi se ubrzao sam proces degradacije, a vrijeme izlaganja razlikuje se ovisno o autorima i nije egzaktno definirano.

Također, ispitivanja vlakana u različitim alkalnim otopinama suviše su agresivna u usporedbi s izlaganjem vlakana u cementnom kompozitu [11]. Pri tome treba imati na umu da je brzina korozije vlakana ovisna o brojnim parametrima poput temperature, vremena izlaganja, sastava vlakana, sastava otopine te vrsti zaštitnog premaza, tzv. sizinga. Prisutnost zaštitnih premaza na površini vlakna, tipične debljine nekoliko nanometara, najčešće na bazi silana, osigurava dodatnu zaštitu vlakana u alkalnom okolišu [12]. Zaslužan je za poboljšanu adheziju između matrice i vlakana, određuje mehanička svojstva, kemijsku otpornost i toplinsku stabilnost vlakana. Izloženost zaštitnog premaza alkalnom okolišu može se negativno odraziti na njegova svojstva, tj. dolazi do degradacije premaza, ali može doprinijeti inhibiciji korozije vlakana [7]. Ispitivanje kemijske otpornosti mineralnih vlakana (GF i BF) temelji se na analiziranju komponenti vlakana koja se izlužuju u alkalnu otopinu ili nakupljanjem korozijskih produkata na površinu samog vlakna [11, 13–15]. Izluživanjem vlakana u alkalnoj otopini dolazi do stvaranja novih defekata na površini vlakna. U tu svrhu koristi se rendgenska difrakcija (XRD), rendgenska fluorescencija (XRF) i energijska disperzivna spektrofotometrijska (EDX ili EDS) analiza. Rezultat takvih analiza ukazuje da kemijski sastav vlakna u svom središtu ostaje nepromijenjen dok površinski sloj vlakna prolazi različite kemijske promjene [9].

Promjena mase vlakna jedan je od pokazatelja promjene svojstava tijekom izloženosti. Nastaje uslijed stvaranja novih spojeva, izluživanja postojećih spojeva ili zbog degradacije vlakna. Na gubitak mase vlakana značajno utječu temperatura, vrijeme i koncentracija alkalne otopine [16]. Nadalje, smanjenje ili povećanje promjera filameta također ukazuje na kemijsku otpornost vlakana [13], a ujedno je pokazatelj kemijskih promjena [15].

Gubitak čvrstoće usko se povezuje s nedostacima i defektima prilikom proizvodnje vlakana i izluživanjem određenih elemenata iz vlakana u alkalnu otopinu te povećanjem defekata na površini vlakna. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti vlakana također se koriste za mjerenje kemijske otpornosti vlakana [17–19]. Mehanička svojstva vlakana uslijed ubrzanog starenja pokazuju bolje ponašanje u slučaju kada vlakna na sebi imaju zaštitni premaz [20] dok vlačna čvrstoća opada s produljenim izlaganjem u alkalnoj otopini [5].

Promjene na površini vlakana, poput lokalnih oštećenja, pitting korozije, nakupljanja produkata korozije, uočavaju se SEM analizom te ih je moguće povezati s promjenom mehaničkih svojstava vlakana. Analiza topografije površine primjenom mikroskopa atomskih sila (AFM topografija) daje detaljni uvid u stanje površine vlakana prije i nakon izlaganja te otkriva u kojoj mjeri dolazi do degradacije zaštitnog

filma tzv. sizinga [21]. Nove nerazorne metode praćenja korozije vlakana temelje se na metodi analize slike kombinacijom SEM analize i metodama kao što su promjena mase, promjera vlakana i tlačne čvrstoće [22].

**Tablica 1. Pregled ispitivanja trajnosti GF, BF, CF i RTPF vlakana ovisno o vrsti otopine, temperaturi i vremenu izloženosti**

Vrsta otopine	Vrijeme izlaganja	Reference	Temperatura [°C]	Reference
NaOH	do 6 h	[5, 14–16, 19]	23 ± 3	[7, 12, 14, 16–18, 20, 21]
	1 do 30 dana	[7, 12–15, 17, 18, 20–23]	40 ± 3	[7, 13]
	30 do 60 dana	[12, 13, 23]	≈ 50, 60, 70	[7] [14]
	60 do 90 dana	[11, 20, 22]	80	[7, 15]
	90 do 180 dana	[17, 18, 20]	100-105	[5, 19, 23]
Ca(OH) <sub>2</sub>	1 do 30 dana	[17, 18]	23 ± 3	[12, 17, 18, 24]
	30 do 60 dana	[12, 13, 23–25]	40 ± 3	[13]
	60 do 90 dana	[11]	80	[11, 25]
	90 do 180 dana	[17, 18]		
	90 do 180 dana	[24]		
KOH	1 do 30 dana	[13, 25]	40 ± 3	[13]
	60 do 90 dana	[11]	80	[11, 25]
NaOH + KOH	90 do 180 dana	[27]	≈ 50	[27]
NaCl Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaOH + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaOH + NaCl NaOH + NaCl + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 do 30 dana	[12]	23 ± 3	[12]
	30 do 60 dana	[23]	100-105	[23]
NaOH + KOH + Ca(OH) <sub>2</sub>	1 do 30 dana	[13]	23 ± 3	[20]
	60 do 90 dana	[20]	40 ± 3	[13]
Cementna otopina	1 do 30 dana	[7, 15, 17, 18]	23 ± 3	[7, 17, 18]
	60 do 90 dana	[31]	27	[26]
	90 do 180 dana	[26]	40 ± 3, 60	[7]
Cementna matrica	1 do 30 dana	[9]	80	[7, 15]
	90 do 180 dana	[28, 30]	23 ± 3	[9]

### 3 Svojstva vlakana u alkalnom okolišu

#### 3.1 Alkalno otporna staklena vlakna

Staklena vlakna degradiraju u prisustvu vode, kiselina i alkalnih otopina [8]. Degradacija stakla u alkalnim otopinama je spor proces i ubrzava se u slučajima kada je pH iznad 10, što je slučaj u cementnim kompozitima. Korozija staklenih vlakana u cementnim kompozitima nastaje kao rezultat utjecaja porne vode. Alkalije izravno napadaju silicijsku mrežu staklenog vlakna i potpuno otapaju staklo. U slučaju korozije staklenih vlakana u cementnim kompozitima proces ne uključuje samo razgradnju silicijske mreže nego i nakupljanje korozivskih produkata na površini vlakana. Alkalno okruženje dovodi do brzog procesa propadanja koji uključuje gubitak vlačne čvrstoće i mase, te smanjenje promjera filamenata, a razlog tome je prisutnost kalcij hidroksida  $\text{Ca(OH)}_2$  u cementnoj matrici kompozita [10, 16]. Iz tog razloga dolazi do razvoja alkalno otpornih (AR) staklenih vlakana, njihov kemijski sastav dodatno je obogaćen cirkonij dioksidom ( $\text{ZrO}_2$ ). Otpornost staklenih vlakana u alkalnim otopinama raste s povećanjem udjela cirkonijevog dioksida (do 15 %) [23], te se time omogućuje veća alkalna otpornost vlakana u usporedbi s ostalim komercijalnim staklenim vlaknima. Alkalno otporna staklena vlakna otpornija su ali i dalje nisu inertna u alkalnom okolišu [11]. Istraživanja pokazuju da se tijekom alkalne korozije AR staklenih vlakana, na površini razvija sloj bogat  $\text{ZrO}_2$  koji djeluje kao difuzijska barijera i tako smanjuje brzinu korozije [13].

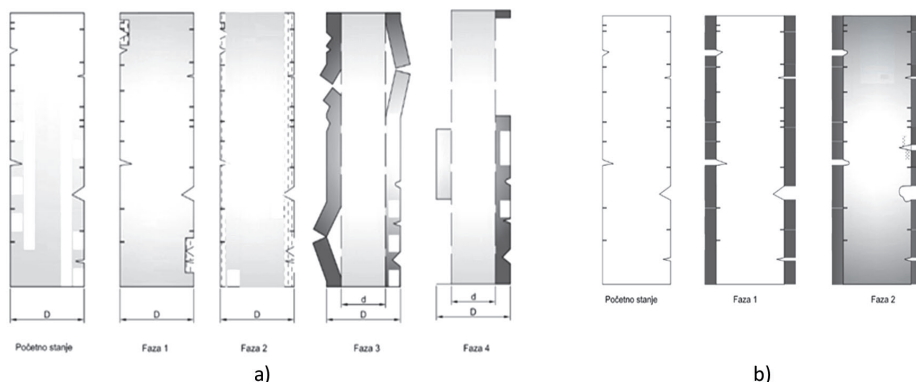
Ispitivanja trajnosti staklenih vlakana u alkalnom okolišu provode se različitim metodama, među kojima su izlaganje zasićenoj otopini  $\text{Ca(OH)}_2$ , cementnoj otopini, NaOH, KOH ili otopinama koje sadrže NaOH, KOH,  $\text{Ca(OH)}_2$  sa ili bez povišenih temperaturama te su izlagani u različitim vremenskim periodima [5, 13, 15]. Mehanizam korozije razlikuje se za različite vrste otopina. U slučaju NaOH i KOH otopine mehanizam korozije manifestira se kao razvoj ljuske na površini vlakana koja se djelomično ili potpuno ljušti sa površine vlakna (slika 1a) dok se u slučaju  $\text{Ca(OH)}_2$  i cementnih otopina (slika 1b) manifestira stvaranjem ljuske i šupljinama/pukotinama na površini vlakana tzv. "pitting" korozijom [7, 13, 21]. Inicijacija korozije počinje izluživanjem natrija i razgradnjom Si-O-Si mreže na površini vlakna i postojećim defektima te tako prodire u dublje slojeve samog vlakna s povećanjem koncentracije cirkonijevog dioksida [24]. Vlakna s premazom u otopini  $\text{Ca(OH)}_2$  prekrivena su precipitatima kalcijevog karbonata i kalcijevog hidroksida i degradirana pitting korozijom, dok vlakna bez premaza sadrže i precipitate silikata bez značajnih promjena [13]. U KOH otopini pH vrijednosti 12.7 nema značajnih promjena dok u otopini s agresivnijim pH 14 vlakna su značajnije degradirana te se na površini formira sloj s povećanim udjelom  $\text{ZrO}_2$  [13].

### 3.2 Bazaltna vlakna

Kao i u slučaju staklenih vlakana, bazaltna vlakna na površini mogu imati zaštitni premaz, tzv. sizing, najčešće na bazi silana [25]. Fizikalno-kemijske analize, nakon izlaganja bazaltnih vlakana alkalnim otopinama, pokazuju da je premaz na bazi silana dobra zaštita te može doprinijeti dugoročnim svojstvima cementnih kompozita ojačanih ovom vrstom vlakana [16]. Ipak, treba imati na umu da uslijed izloženosti agresivnom okolišu, tijekom vremena dolazi do raspadanja zaštitnog premaza [15]. Jedno od prvih istraživanja bazaltnih vlakana 1979 g. [17] upućivalo je na izvrsnu otpornost bazaltnih vlakana u cementnoj otopini. No daljnjim istraživanjima utvrđeno je da mehanizam korozije kod bazaltnih vlakana vrlo sličan koroziji kao kod staklenih vlakana ovisno o vrsti alkalne otopine [14, 19, 26].

Mehanizam korozije bazaltnih vlakana u NaOH otopini prema [15] možemo podijeliti u 4 faze (slika 1a). Faza 1 u kojoj se metalni kationi u sastavu vlakana luče u otopinu procesom izluživanja, a  $\text{OH}^-$  proizveden u procesu povećava pH vrijednost otopine. Veze Si-O-Si i Al-O-Al prekinute su hidroksilnim skupinama ( $\text{OH}^-$ ). Aluminosilikatna mreža vlakana počinje se otapati u oslabljenim zonama, tj. postojećim površinskim defektima. U fazi 2 nastaje porozan sloj gela na površini vlakana Si-OH strukture, čija debljina se s vremenom povećava. Netopivi metali (npr. Fe, Ca i Mg), oksidi i hidroksidi šire se izvan sloja gela i talože se kao kristalni i amorfni ostatak na površini vlakana, koji može usporiti difuziju  $\text{OH}^-$  u jezgru vlakna i usporiti oštećenje vlakana. U fazi 3 dolazi do potpunog prekrivanja površine vlakna korozijskim slojem. U fazi 4, lokalno se javlja ljuštenje korozijske ljuske. Površina vlakna je neoštećena a preostali promjer je manji od početnog promjera.

U cementnoj otopini prema [7] proces korozije se odvija u dvije faze (Slika 1b). U prvoj fazi proces se odvija sporije u odnosu na NaOH otopinu. Površinski defekti na vlaknima rastu iz razloga što  $\text{OH}^-$  razdvaja Si-O-Si i Al-O-Al strukturu vlakana. Korozija se javlja samo kod površinskih oslabljenja i defekata zbog hidratiziranog kalcijevog hidroksida i silicij dioksida koji tvore teško topiv kalcijev silikat na površini vlakna te štiti vlakno od daljnje degradacije. U ovoj fazi oštećenja tj. pukotine različitih veličina nastale u fazi 1 napreduju u veće pukotine s vremenom te s vremenom dolazi do degradacije vlakna. Izlaganje bazaltnih vlakana u betonu utječe na smanjenje promjera u iznosu od 2 do 5 %, modula elastičnosti od 31 do 37 % i vlačne čvrstoće od 25 do 29 %. Međutim, bazaltna vlakna na bazi alkalnog bazalta ne ostvaruju promjenu u svojstvima što upućuje na usku vezu između otpornosti vlakana i njihovog kemijskog sastava [19].



Slika 1. Shematski prikaz mehanizma korozije za staklena i bazaltna vlakna za a) KOH i NaOH otopini, b)  $\text{Ca(OH)}_2$  i NaOH otopini [7]

### 3.3 Ugljična vlakna

Ugljična vlakna primjenjuju se u građevinskoj industriji kao ojačanje nosivih elemenata ili kao zamjena za čeličnu armaturu u polimernim smolama. Pregledom literature nalazi se ograničen broj istraživanja otpornosti ugljičnih vlakana u alkalnom okolišu, ali i podatak da su ugljični filamenti otporni na vremenske uvjete i ne podliježu koroziji u alkalnim uvjetima te ne apsorbiraju vlagu [27]. Prema istraživanju trajnosti osam vrsta vlakana [28] među kojima i ugljičnih vlakana izloženih alkalnim uvjetima u različitom okolišu ( $\text{Ca(OH)}_2$  otopini Portland cementa, KOH i NaOH otopinama) pri povišenim temperaturama (20 – 45°C) pokazalo je da ugljična vlakna imaju najveću kemijsku stabilnost bez gubitka mehaničkih svojstava.

### 3.4 Reciklirana polimerna vlakna iz otpadnih guma

Istraživanja recikliranih polimernih vlakana iz otpadnih guma vrlo su rijetka kao i u slučaju ugljičnih vlakana. Ispitivanje alkalne otpornosti RTPF vlakana, izlaganjem 3 mjeseca Lawrencevoj otopini ( $\text{NaOH} + \text{Ca(OH)}_2 + \text{NaCl}$ ), pokazalo je nezatno povećanje hrapavosti i točkaste korozije RTPF vlakana [29]. Obzirom na kemijski sastav RTPF vlakana (PET, PA 66, PBT) i prethodna istraživanja otpornosti polimernih vlakana u alkalnom okolišu [30–32], za očekivati je degradaciju RTPF vlakana.

## 4 Zaključak

Trajnost cementnih kompozita ovisi o trajnosti samog kompozita, trajnosti vlakana i interakciji vlakna i cementnog kompozita. Trajnost vlakana u cementnom kompozitu ovisi prije svega o kemijskom sastavu vlakana. Istraživanja pokazuju da:

- Koroziju GF i BF vlakana uzrokuju hidroksilne skupine ( $\text{OH}^-$ ) razlažući Si-O-Si i Al-O-Al strukturu vlakana, ali mehanizam korozije razlikuje se ovisno o vrsti alkalne otopine. U NaOH i KOH otopini razvija se sloj precipitata na površinskom sloju vlakana koji bubri i s vremenom uzrokuje ljuštenje površine. U slučaju  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i cementnih otopina dolazi do nakupljanja precipitata na površini vlakana, ali i nastanka šupljina i pukotina.
- Ugljična vlakna ostvaruju visoku otpornost prema kemijskoj koroziji u alkalnim okolišima.
- RTPF vlakna sastoje se od tri vrste polimera (PET, PA 66, PBT), od kojih PET degradira u prisustvu alkalija.

Nadalje, nedostatak standardiziranih metoda ispitivanja trajnosti vlakana onemogućuje direktnu usporedbu dosad provedenih ispitivanja. Također, ispitivanja ubrzanog starenja vlakana u različitim alkalnim otopinama suviše su agresivna u usporedbi s izlaganjem vlakana u cementnom kompozitu. Tijekom uporabnog vijeka vlakna u cementnoj matrici nisu u potpunosti okružena vodom. Potrebno je stoga razviti metodologiju ispitivanja trajnosti vlakana i modele napredovanja korozije, a sve u svrhu predviđanja dugoročnog ponašanja vlakana u cementnim kompozitima.

## Zahvala

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost u sklopu projekata “Razvoj karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti (DOK-2021-02-4884) i “Cementni kompoziti ojačani otpadnim vlaknima” – ReWire (UIP-2020-02-5242), a koji se provode na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

## Literatura

- [1] A. Bentur and S. Mindess, “Introduction,” *Fibre Reinf. Cem. Compos.*, pp. 21–30, 2020, doi: 10.1201/9781482267747-8.
- [2] A. Baričević, M. Jelčić Rukavina, M. Pezer, and N. Štirmer, “Influence of recycled tire polymer fibers on concrete properties,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 91, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.009.
- [3] B. S. Thomas and R. C. Gupta, “Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber,” *J. Clean. Prod.*, vol. 102, pp. 78–87, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.072.
- [4] Y. Sumra, S. Payam, and I. Zainah, “The pH of Cement-based Materials: A Review,” *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, vol. 35, no. 5, pp. 908–924, 2020, doi: 10.1007/s11595-020-2337-y.



- [5] B. Wei, H. Cao, and S. Song, "Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 9, pp. 4244–4250, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.04.009.
- [6] J. Donnini, F. Bompadre, and V. Corinaldesi, "Tensile behavior of a glass FRCM system after different environmental exposures," *Processes*, vol. 8, no. 9, 2020, doi: 10.3390/pr8091074.
- [7] C. Scheffler, T. Förster, E. Mäder, G. Heinrich, S. Hempel, and V. Mechtcherine, "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, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2009.09.018.
- [8] L. C. Bank, T. R. Gentry, and A. Barkatt, "Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behavior of FRP Composite Structures: Environmental Effects," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 14, no. 6, pp. 559–587, 1995, doi: 10.1177/073168449501400602.
- [9] Y. V. Lipatov, S. I. Gutnikov, M. S. Manylov, E. S. Zhukovskaya, and B. I. Lazoryak, "High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete," *Mater. Des.*, vol. 73, pp. 60–66, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.02.022.
- [10] N. Arabi, L. Molez, and D. Rangeard, "Durability of alkali-resistant glass fibers reinforced cement composite: Microstructural observations of degradation," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 62, no. 3, 2018, doi: 10.3311/PPci.10631.
- [11] B. Holubová, H. Hradecká, M. Netušilová, T. Gavenda, and A. Helebrant, "Corrosion of glass fibres in ultra high performance concrete and normal strength concrete," *Ceram. - Silikaty*, vol. 61, no. 4, pp. 319–326, 2017, doi: 10.13168/cs.2017.0031.
- [12] J. L. Thomason, U. Nagel, L. Yang, and D. Bryce, "A study of the thermal degradation of glass fibre sizings at composite processing temperatures," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 121, no. March, pp. 56–63, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.03.013.
- [13] A. Helebrant, H. Hradecká, B. Holubová, L. Brázda, M. Netušilová, and Z. Zlámalová-Cílová, "Kinetics of processes modeling corrosion of glass fibers mixed into concrete," *Ceram. - Silikaty*, vol. 61, no. 2, pp. 163–171, 2017, doi: 10.13168/cs.2017.0012.
- [14] V. A. Rybin, A. V. Utkin, and N. I. Baklanova, "Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 53, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.06.002.
- [15] Q. Wang, Y. Ding, and N. Randl, "Investigation on the alkali resistance of basalt fiber and its textile in different alkaline environments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, no. xxxx, p. 121670, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121670.
- [16] M. Afroz, I. Patnaikuni, and S. Venkatesan, "Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium," *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 191–203, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.153.

- [17] V. Velpari, B. E. Ramachandran, T. A. Bhaskaran, B. C. Pai, and N. Balasubramanian, "Alkali resistance of fibres in cement," *J. Mater. Sci.*, vol. 15, no. 6, pp. 1579–1584, 1980, doi: 10.1007/BF00752141.
- [18] B. E. Ramachandran, V. Velpari, and N. Balasubramanian, "Chemical durability studies on basalt fibres," *J. Mater. Sci.*, vol. 16, no. 12, pp. 3393–3397, 1981, doi: 10.1007/BF00586301.
- [19] V. Pastsuk et al., "Selection of basalt fiber with resistance to concrete alkaline environment," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 11, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03677-z.
- [20] P. Corvaglia D'appolonia, "Durability of fibers in aggressive alkaline environment," *ICCM Int. Conf. Compos. Mater.*, no. January 2009, 2009, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/289835802>.
- [21] S. L. Gao, E. Mäder, A. Abdkader, and P. Offermann, "Sizings on alkali-resistant glass fibers: Environmental effects on mechanical properties," *Langmuir*, vol. 19, no. 6, pp. 2496–2506, 2003, doi: 10.1021/la020778t.
- [22] M. Ryvolová, L. Svobodová, and T. Bakalova, "Validation of an Image Analysis Method for Evaluating the Chemical Resistance of Glass Fibers to Alkaline Environments," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 1, 2022, doi: 10.3390/ma15010161.
- [23] V. van Zijl, Gideon P.A.G., Slowik, A Framework for Durability Design with Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 240-FDS. 2017.
- [24] J. Orlowsky, M. Raupach, H. Cuyppers, and J. Wastiels, "Durability modelling of glass fibre reinforcement in cementitious environment," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 38, no. 276, pp. 155–162, 2005, doi: 10.1617/14248.
- [25] T. Overkamp, B. Mahltig, and Y. Kyosev, "Strength of basalt fibers influenced by thermal and chemical treatments," *J. Ind. Text.*, vol. 47, no. 5, pp. 815–833, 2018, doi: 10.1177/1528083716674905.
- [26] DI RUOCCO GIACOMO, "Basalt Fibers: the Green Material of the Xxi-Century, for a Sustainable Restoration of Historical Buildings," *Vitr. - Int. J. Archit. Technol. Sustain.*, vol. 2, pp. 25–39, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2016.7022>.
- [27] A. Spelter, S. Bergmann, J. Bielak, and J. Hegger, "Long-term durability of carbon-reinforced concrete: An overview and experimental investigations," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 8, 2019, doi: 10.3390/app9081651.
- [28] F. Micelli and M. A. Aiello, "Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments," *Compos. Part B Eng.*, vol. 159, pp. 490–501, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.03.005.

- [29] O. Onuaguluchi and N. Banthia, "Durability performance of polymeric scrap tire fibers and its reinforced cement mortar," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 50, no. 2, 2017, doi: 10.1617/s11527-017-1025-7.
- [30] R. Rostami, M. Zarrebini, M. Mandegari, D. Mostofinejad, and S. M. Abtahi, "A review on performance of polyester fibers in alkaline and cementitious composites environments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, p. 117998, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.117998.
- [31] R. Rostami, M. Zarrebini, M. Mandegari, K. Sanginabadi, D. Mostofinejad, and S. M. Abtahi, *The effect of concrete alkalinity on behavior of reinforcing polyester and polypropylene fibers with similar properties*, vol. 97. Elsevier Ltd, 2019.
- [32] D. Raghavan, H. Huynh, and C. F. Ferraris, "Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite," *J. Mater. Sci.*, vol. 33, no. 7, pp. 1745–1752, 1998, doi: 10.1023/A:1004372414475.