



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

Bruno Bartulović

Primjena nusproizvoda tekstilne industrije u graditeljstvu na primjeru tekstilno-cementnog kompozita

Split, veljača 2023.

MATICE HRVATSKE 15, 21000 SPLIT
HRVATSKA / CROATIA
T: +385 (0)21 303 333
F: +385 (0)21 465 117



OIB: 83615500218
IBAN: HR3724070001100579623
E: info@gradst.hr
www.gradst.hr

1 Uvod

Godišnje se u industriji tekstila na globalnoj razini proizvede više od 115 milijuna tona vlakana, od čega oko četvrtinu otpada na pamučna vlakna. Više od 53 milijuna tona vlakana koristi se za proizvodnju odjeće s tendencijom kontinuiranog rasta potražnje uzrokovanih porastom stanovništva i promjenama u potrošačkim navikama. S druge strane, proizvodnja odjeće stvara znatnu količinu otpada. Prema podacima Ailenei i sur. [1], globalna tekstilna industrija godišnje stvara 92 milijuna tona otpada, što predstavlja oko 4% ukupnog svjetskog otpada. Određeni dio otpada se ponovno koristi ili reciklira, pogotovo onaj iz proizvodnog procesa. Međutim najveći dio otpada se spaljuje uz povrat energije ili se deponira na odlagalištima što predstavlja značajan ekološki problem.

Oporaba (uporaba otpada u korisne svrhe) i zbrinjavanje otpada su složeni problemi za čije rješavanje je bitno razlikovati proizvodni otpad od potrošačkog otpada. Proizvodni otpad u industriji tekstila nastaje pri različitim fazama proizvodnog postupka pa tako imamo i različite vrste otpada; otpadne vode, vlakna, prediva i tkanine. Oporaba proizvodnog otpada unutar zatvorenog kruga, tj. unutar tekstilne industrije u kojoj je i nastao, usmjerena je na recikliranje materijala u svrhu proizvodnje novih tekstilnih proizvoda. Najzastupljeniji način oporabe tekstilnog otpada, uz kemijsku, je mehanička reciklaža gdje se gotovo isključivo koristi proizvodni otpad pošto post-potrošački otpad ne zadovoljava kriterije kvalitete. Također, oporaba je uglavnom fokusirana na otpad nastao pri kraju proizvodnog postupka koji je u formi tkanine ili pletiva. Mehanička reciklaža počinje čišćenjem i rezanjem tkanine na manje komade. Tkanina se usitnjava dok ne dođe u vlaknasto stanje koje se može koristiti za procese kao što je ponovno predenje u predu ili za proizvodnju netkanog tekstila.

Međutim, oporaba proizvodnog otpada u korisni nusproizvod zahtijeva logistiku i opremu koja nije uvijek dostupna. Nadalje, postupak recikliranja tekstilnog otpada je kaskadan, tj. sa svakim postupkom ili korakom reciklaže kvaliteta recikliranog materijala opada, a raste količina uložene energije. Mehaničkom reciklažom vlakna se skraćuju te se smanjuje njihova čvrstoća i mekoća [2]. Stoga, tkanine koje uključuju mehanički reciklirani materijal mogu koristiti samo 20-30% recikliranih vlakana prije nego što se kvaliteta tkanine značajno umanji [3].

Obzirom na navedene nedostatke oporabe zatvorenog kruga otvara se pitanje mogućnosti oporabe otvorenog kruga, tj. recikliranje u primjeni različitoj od izvorne. Preusmjeravanje otpada jedne industrije u drugu industriju, gdje se otpad koristi kao sirovina za daljnju proizvodnju, može se opisati kao industrijski metabolizam. Konceptualni okvir osmislio je i predložio Ayres, a odnosi se na proučavanje protoka materijala i energije unutar industrijskih sustava [4]. Naziv proizlazi iz analogije s biološkim metabolizmima, u kojima praktički ne postoji otpad, kao uzorima pri stvaranju održivih industrijskih sustava. Industrijski metabolizam može se uzeti kao odgovarajući okvir za promicanje razvoja kružnih i regenerativnih gospodarskih sustava [5]. Europska komisija predstavila je u ožujku 2020. godine, u sklopu Zelenog plana i u skladu s novom industrijskom strategijom, novi akcijski plan za kružno gospodarstvo [6]. Plan je u žarište stavio resursno intenzivne sektore tekstila i građevinarstva, čime su oni postali primarna polja za svako djelovanje u pogledu smanjenja zagadenja.

U skladu s konceptom industrijskog metabolizma i trenutnim diskursom kružnog gospodarstva, glavni cilj ovog istraživanja je oporabiti tekstilni otpad uz stvaranje građevnog materijala poboljšanih svojstava. Namjera ovoga rada je prikazati prilike i nedostatke u primjeni tekstilnog otpada u razvoju građevnih elemenata i kompozita.

2 Trenutno stanje istraživačkog područja

Tekstili u graditeljstvu tj. arhitekturi i građevinarstvu se koriste kao tkani i netkani geotekstili za filtraciju, zaštitu, stabilizaciju i razdvajanje tla i konstrukcija; kao armaturne mrežice za ojačavanje u sustavima tankoslojnih žbuka; ili kao element za zaštitu od sunca i atmosferilija na zgradama. Relativno novo područje primjene tekstila je u funkciji ojačanja kod kompleksnih betonskih formi koje bi bilo složenije ili nemoguće izvesti uobičajenom čeličnom armaturom.

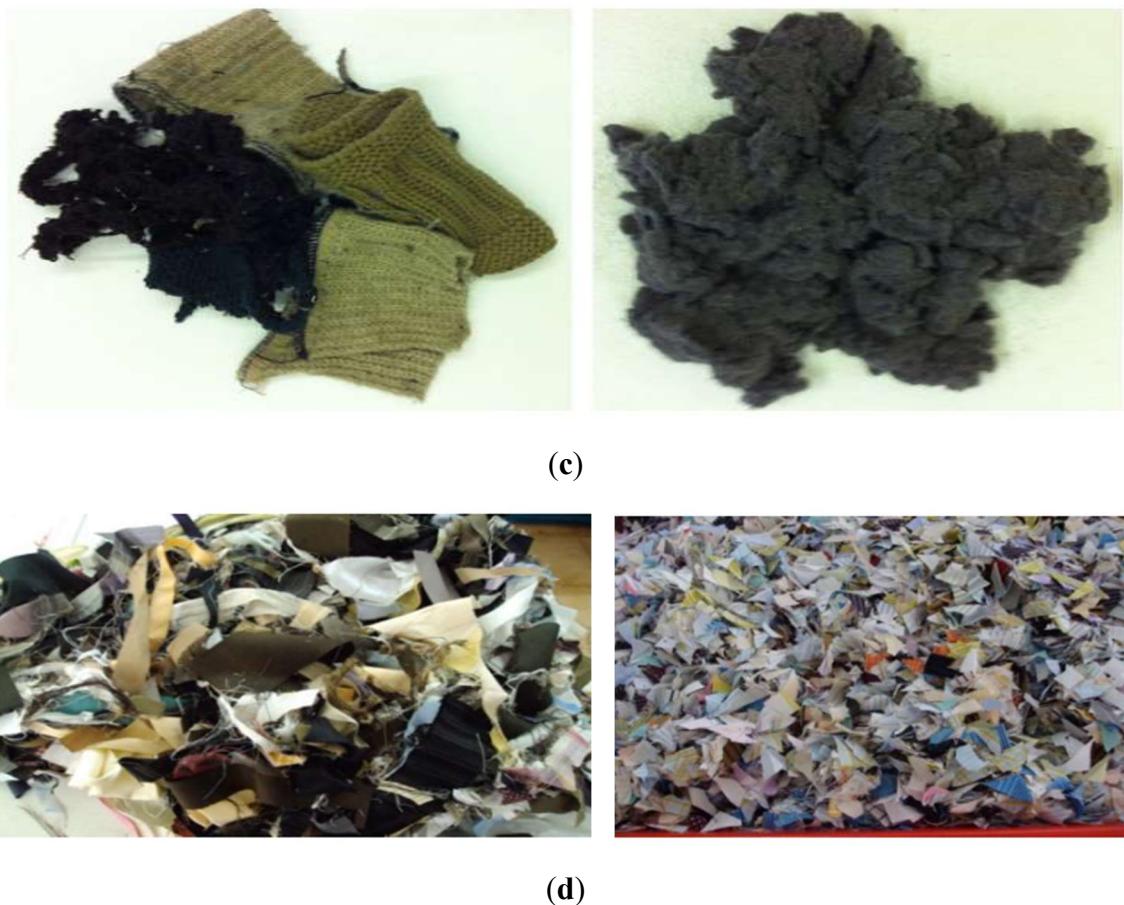
S druge strane, porastom ekološke svijesti, tekstilni otpad i nusproizvodi u graditeljstvu postaju sve zastupljenija tema u znanstvenoj literaturi što je evidentno po broju objavljenih preglednih radova [1–4]. Za razliku od tekstila napravljenih sa specifičnom svrhom u građevinarstvu i arhitekturi, tekstilni otpad nije stvoren da bi ispunio specifičnu ulogu u građevnom elementu već se na temelju karakteristika otpada traži moguća primjena. Trenutno se istražuju brojni načini integracije različitih oblika tekstilnog otpada i nusproizvoda u nove kompozitne materijale i građevne elemente; kao što su npr. mortovi s dodacima otpadnih vlakana, betoni ojačani isjećcima tekstila, glineni blokovi s pamučnom prašinom i glineni blokovi s isjećcima tkanine, tekstilne ispune zidova, termoformirani paneli od polimernih smola primjenjivi za izradu pregradni zidova ili termo-akustičnu izolaciju, termoizolacijski filcevi sa inkapsuliranim tekstilnim otpadom, tekstilni izolacijski paneli na bazi gipsa, ploče vlaknatice s dodatkom tekstilnog otpada, tekstilni kompoziti na bazi hidratiziranog vapna, panel pregrade od lakog betona s teksilnom ispunom, panel ploče na bazi portland cementa s dodacima te kompoziti tekstila i poliuretanske pjene za apsorpciju zvuka. Iz navedenog je jasno da se primjenjuje široki raspon metoda i različitih vezivnih matrica pri uporabi heterogenih oblika tekstilnog otpada u svrhu poboljšanja svojstva materijala ili izrade novi građevnih elemenata. Različite vrste otpada korištenog u provedenim ispitivanjima prikazane su na Slici 1.



(a)



(a)



Slika 1. (a) Otpad korišten od strane Sadrolodabaee i sur.[5] (b) Otpad korišten od strane Brazão Farinha i sur.[6] (c) Otpad korišten od strane Briga-Sá i sur. [7] (d) Otpad korišten od strane Selvaraj i Priyanka [8].

Za analizu i interpretaciju literature nužno je simultano koristiti kategorije veziva (sintetske smole, cement i mineralna veziva), vrste otpada (proizvodni ili potrošački), oblika otpada (proizvodni, potrošački; vlakno, predivo ili tekstil), tretmana (fizički, kemijski) i sastava otpada (biljna, prirodna ili sintetska vlakna).

Obzirom na do sada provedena istraživanja, u ovom pregledu naglasak je na **proizvodnom** tekstilnom otpadu u formi **isječaka tkanine ili pletiva** koji nastaje pri kraju proizvodnog postupka (krojenje i šivanje). U tom trenutku količina uloženog materijala, energije i vremena je najviša, stoga je ova vrsta otpada najvrjednija i logično se postavlja prioritetnim izborom za uporabu. U prilog navedenom ide i činjenica da se 20-25% ukupne količine sirovine koja se iskoristi za proizvodnju generira pri kraju proizvodnog procesa tj. u fazi krojenja i šivanja [9,10]. U slučaju odjeće od pamučnih vlakana, godišnji tekstilni otpad u obliku isječaka iznosi 3,8 milijuna tona [9]. Dodatno, naglasak je na **biljnim vlaknima, točnije pamuku**, koji sačinjava oko 25% svjetske proizvodnje vlakana.

Na godišnjoj razini proizvede se više od 4 milijarde tona **cementa** a njegova svestranost i dostupnost čine ga jednim od najkorištenijih građevnih materijala. Beton se pokazao vrlo pogodnim za prihvatanje različitih vrsta otpadnih materijala: razni reciklirani agregati, otpadno

staklo, ostaci guma, reciklirano drvo, plastični otpad, otpadna metalna i plastična vlakna. Stoga je u ovom radu fokus usmjeren na cement tj. na beton kao matricu za inkorporiranje tekstilnog otpada i stvaranje novog kompozita.

U jednom od najranijih istraživanja tekstilnog otpada u cementnoj matrici iz sredine 1990ih, Aspiras i Manalo [11] otkrili su da se s isjećima proizvodnog tekstilnog otpada od pamuka, poliestera, svile i rajon, duljine 2 cm i 6 cm, u odnosima 1:3, 1:4, 1:5 mase otpadne tkanine prema masi cementa, može proizvesti kompozit koji izgleda poput betona, može se rezati poput drva a nije zapaljiv. **Ispitivanja su pokazala da uzorci s komadima tekstila duljine 6 cm imaju bolje rezultate od uzorka s komadima duljine 2 cm.** Autori smatraju da materijal ima potencijal za izvedbu i laganih panela i obloga. Također, tvrde da se tekstilni otpad u obliku isječaka tkanine koji su ispitali ne može smatrati ni agregatom, ni ojačanjem. Iako, tekstil doprinosi povećanju volumena smjese, što je glavna funkcija agregata, i povećanju vlačnu čvrstoću, što je glavna funkcija ojačanja, zbog svoje vlaknaste prirode.

Selvaraj i Priyanka [12] istražili su utjecaj 1-5% mase otpadnih sintetskih i polusintetskih tkanina prema masi cementa, dimenzija isječaka 2 x 2 cm na svojstva betona. Rezultati istraživanja pokazuju da tkanina u betonu smanjuje tlačnu čvrstoću zbog gubitka kohezije ali povećava vlačnu čvrstoću pri cijepanju i savijanju. Čvrstoća na savijanje povećavala se do najveće količine dodatka tkanine, koja je iznosila 5% po masi cementa. Čvrstoća na cijepanje bila je najveća za uzorak s 1% tkanine i padala je s povećanjem količine tkanine do točke gdje je uzorak tkanine od 5% bio lošiji od referentne mješavine. Osim toga, povećanjem količine tkanine znatno je povećana apsorpcija energije udarca. Uzorak s 5% isječaka tkanine prema težini cementa postigao je više od dva puta veću udarnu čvrstoću od referentne mješavine. Obzirom na iskazana svojstva autori zaključuju da se ovaj beton može koristiti u strukturalne svrhe u gredama izloženima vlačnim i udarnim opterećenjima. **S druge strane, beton je pokazao visoko upijanje vode, koje je raslo s povećavanjem udjela tkanine.** Autori su preporučili upotrebu vodo-odbojnog premaza u slučaju vanjske primjene. Povećano upijanje i redukciju tlačne čvrstoće s povećanjem poliesterskog tekstilnog otpada primijetili su i Anglade i sur. [13]. Dodatno, Anglade i sur. [13] su ispitivali beton s 3-12% poliesterskog otpada na masu cementa. Osim prethodno navedenog, primijetili su poboljšanje akustičkih i termoizolacijskih svojstava u odnosu na uzorak bez tkanine.

Sathiyaraj i Manishankar [14] istražili su karakteristike betona s isjećima tekstilnog otpada poliestera i viskoze, prosječne duljine 2-6 cm, u omjeru do 1-4% prema masi cementa. Autori su odabrali otpad od poliestera i viskoze zbog dostupnosti sirovine i razine vodoupojnosti, u odnosu na druge dostupne tekstilne. Tlačna čvrstoća uzorka povećala se do 2% dodatkom tekstilnog otpada. Vlačna čvrstoća pri savijanju i cijepanju povećala se do 3% dodatkom tekstilnog otpada. **Istraživanje navodi na zaključak da do 2% otpada u odnosu na masu cementa poboljšava tlačnu, vlačnu i čvrstoću na cijepanje.**

Qin i sur. su ispitali svojstva betona ojačanog vlaknima i tkaninom od polipropilena [15] i najlona [16] u iznosu 0,9 kg/m³. Vlakna su duljine 19 mm, a tkanina je duljine 30 mm i širine 3 mm. Beton s isjećima polipropilenske otpadne tkanine povećao je tlačnu čvrstoću za 6,15% u odnosu na referentni uzorak, dok su vlakna marginalno povećala čvrstoću. Najljonska tkanina je povećala tlačnu čvrstoću za 5,37% u odnosu na referentni beton, a 10,74% u odnosu na beton

ojačan najlonskim vlaknima. **Ovo istraživanje indicira da je možda suvišno, štoviše, kontraproduktivno usitniti tkaninu do razine vlakana u svrhu ojačanja betona.** Do sličnog rezultata došli su i Jayasinghe i sur.[17] prilikom eksperimentiranja s mortom za cementne blokove. Uzorak od isječaka otpadne tkanine dimenzija 1 x 2,5 cm imao je nešto lošije tlačne čvrstoće, ali znatno bolje vlačne čvrstoće na savijanje u odnosu na uzorak od otpada istog sastava ali usitnjenog do razine vlakna. Treba napomenuti da je u ovom slučaju [17] tekstilni otpad korišten u vrlo visokoj količini od 25% zamjene agregata i da su u konačnici uzorci s otpadom prošli lošije od referentnog uzorka bez ikakvog otpada; ali su ipak ispunili uvjete čvrstoće za upotrebu u zidanim konstrukcijama. Reduciranje tekstila u vlakna uzrokovalo je poteškoće u usitnjavanju i izazvalo dodatne troškove.

Osim primjene tekstilnog otpada u betonu, jedan od pravaca istraživanja je korištenje tekstilnog otpada u cementnoj žbuci gdje se koriste sitnije frakcije agregata. Konkretno, postoji sve veći interes za ojačanje cementnih mortova za žbukanje tekstilnim vlaknima [6,18], a posebno žbuka s povećanim temoizolacijskim svojstvima [19,20]. Što se tiče mehaničkih svojstava, najčešći je slučaj da otpadna tekstilna vlakna smanjuju tlačnu čvrstoću cementnog morta, a poboljšavaju čvrstoću na savijanje. [19,20]. Ipak, učinak vlakana uvelike ovisi o sastavu, vrsti, duljini i postupku recikliranja; posebno u slučaju recikliranih vlakana gdje konzistentnost svojstava može biti neujednačena. Tako u studiji utjecaja tekstilnih, akrilnih i staklenih vlakana u cementnom mortu Brazão Farinha i sur. [6,21] **nisu uspjeli poboljšati tlačnu i vlačnu čvrstoću ali su zato poboljšali svojstva otpornosti na udarac.** Primijećeno je da mortovi ojačani vlaknima imaju niži modul elastičnosti i bolje ponašanje prije i nakon sloma od referentnog morta, što ukazuje da ugradnja ovih vlakana potiče veću deformabilnost i sprječava propagaciju pukotina.

Kalkan and Gündüz [22] su postigli povećanje tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće pri cijepanju laganog morta od plovućca i perlita pri udjelu otpadnih vlakana od 1% prema ukupnoj masi mješavine. No, s većim udjelom tekstilnih vlakana došlo je do smanjenja čvrstoće. **Autori studije su primijetili da pamučna vlakna imaju bolju vezu s mortom od sintetičkih zbog hrapavije površine** [22]. Gunathilaka i sur. [23] su ispitali tlačnu čvrstoću morta s pretežito pamučnim otpadnim vlaknima i pretežito poliesterskim otpadnim vlaknima. Riječni pjesak zamijenjen je u iznosu 5-25% s intervalima prirasta od 5%. Za obje vrste vlakana, uočili su značajno smanjenje tlačne čvrstoće u odnosu na referentnu mješavinu s povećanjem količine vlakana. Uzorci pamuka pokazali su se znatno boljima od uzorka izrađenih od poliesterskih vlakana. Razlog je slabo stvaranje hidrata kalcijevog silikata oko agregata i poliesterskih vlakana zbog glatke površine poliesterskih vlakana. Iako je u navedenim istraživanjima [22,23] riječ o vlaknima može se pretpostaviti da bi slično vrijedilo i za tkanine tj. **bolja veza bila bi između cementa i pamučne nego poliesterske ili neke druge sintetske tkanine glatke površine** (pod uvjetom da je riječ o istom tipu tkanine).

Eldin i El-Tahan [24] proveli su ispitivanje ojačanja **cementnih kocki, prizmi i ploča slojevima različitih vrsta pamučnih** (ne otpadnih) tkanina koje se tipično koriste pri izradi odjeće. Zaključili da vlačna čvrstoća na savijanje ovisi o svojstvima tkanine; prvenstveno ovisi o njezinoj vlačnoj čvrstoći, koja pak ovisi o strukturi tkanine. Kompoziti sa slojevima pamučne tkanine pokazali su se običavajućim u opterećenjima na vlak i na savijanje. Potvrdili su

koncept korištenja tkanina predviđenih za odjeću kao potencijalnog materijala za pojačanje ili ojačanje u cementnim ili betonskim elementima. Također, sugeriraju su da bi obzirom na rezultate dobivene s pamučnim tkaninama uz nedostatke pamuka, tkanine od drugih (sintetskih) materijala mogле imati i bolja mehanička svojstava.

Promatramo li tekstilni otpad s aspekta materijalnog sastava evidentno je da umjetna vlakna i tkanine mogu imati bolja mehanička svojstva od biljnih, ali **postoje određene prednosti pamuka** i drugih biljnih celuloznih vlakana koje ih čine poželjnima: poput relativno niske cijene, visoke čvrstoće i niske gustoće, obnovljivosti, smanjene energije potrebne za proizvodnju i značajno manje emisije CO₂ [25]. Ovo je pogotovo važno ako uzmememo u obzir da je riječ o otpadnom materijalu.

S druge strane, **nedostaci sirovih pamučnih vlakana** slični su onima drugih celuloznih ili biljnih vlakana. Glavni nedostatak je velika varijabilnost mehaničkih svojstava. Kvaliteta biljnih vlakana ovisi o geografskim i klimatskim uvjetima, kvaliteti tla, uvjetima vremenskog izlaganja, metodama ekstrakcije, vremenu žetve i zrelosti biljke [26]. Celulozna vlakna imaju značajne varijacije u kemijskom sastavu, promjeru, duljinu i površinskoj hrapavosti, što dovodi do značajne raspršenosti mehaničkih svojstava vlakana [27]. Visoka apsorpcija vlage [28,29] i niže temperature obrade također se navode kao nedostaci biljnih vlakana [26,30]. Apsorpcija uzrokuje bubrenje vlakana a niže temperature reduciraju izbor mogućih matrica.

Tekstilni pamučni otpad neke od prethodno navedenih nedostataka sirovih biljnih vlakana u određenoj mjeri sanira. Pamuk se ocjenjuje prema kvaliteti vlakana, a za izradu odjeće koriste se najkvalitetnija vlakna. Zatim se vlakna miješaju u svrhu homogenizacije, smanjujući prirodne varijacije u svojstvima vlakana. Postupak homogenizacije umanjuje problem velike varijabilnosti mehaničkih svojstava biljnih vlakana. Osim toga, budući da je otpad obrađen i homogeniziran kao dio industrijskog procesa izrade tkanina, štedi se energija koja bi inače bila potrebna za obradu sirovih vlakana.

U pogledu trajnosti materijala, upotreba biljnih vlakana u cementnim kompozitima predstavlja izazov budući da biljna vlakna degradiraju u alkalnom okruženju [31,32]. Dva glavna mehanizma koja uzrokuju propadanje biljnih vlakana u cementu su agresivno alkalno djelovanje i mineralizacija vlakana. U prvom mehanizmu, degradacija vlakana u cementnoj matrici događa se kao posljedica otapanja lignina i hemiseluloznih komponenti vlakana putem alkalne vode u porama cementne matrice. U drugom mehanizmu, mineralizacija vlakana uzrokovana je migracijom proizvoda hidratacije na stjenke vlakana i u stanice vlakana [31,33,34].

Dva su općeprihvaćena pristupa za povećanje trajnosti cementnog kompozita s biljnim vlaknima. Prvi uključuje modificiranje površine vlakana upotrebom fizičkih ili kemijskih sredstava dok drugi podrazumijeva redukciju lužnatosti matrice uvođenjem mineralnih dodataka tj. pucolnaskih materijala poput letećeg pepela, silikatne prašine ili metakaolina u cement.

Krojni tekstilni otpad nastaje na kraju proizvodnog procesa i do tog trenutka je podvrgnut alkalnoj kemijskoj obradi sličnoj onima koja se koriste za poboljšanje svojstava vlakana kao što su vodikov peroksid, natrijev hidroksid i kalcijev hidroksid [26,28,33,35]. Poznato je da

sirova vlakna pamuka ometaju hidrataciju [36,37] ali pranje, mercerizacija i izbjeljivanje pamučnog tekstila ostavlja gotovo čista celulozna vlakna koja ne ometaju hidrataciju cementa. Štoviše, čini se da čista celulozna vlakna djeluju kao nukleacijski agensi cementa [30]. Međutim, ovi postupci mogu povećati zadržavanje vode s posljedicom slabljenja veze matrice i vlakna što posljedično smanjuje mehanička svojstva [28,38,39]. Pozzi [40] je dobio slabije rezultate s recikliranim vlaknima tretiranima s 5% NaOH nego s istim ali netretiranim vlaknima, **što navodi na zaključak da kod recikliranih vlakana alkalni tretman nije uvijek idealan izbor za poboljšanje svojstava kompozita.** Kako su otpadni isječci tkanine tj. pletiva već oprani, mercerizirani i izbijeljeni u procesu proizvodnje nema potrebe za dodatnim alkalnim tretmanima. Dodatno, učinak višekratnog izbjeljivanja na tzv. Single Jersey pletivo uzrokuje gubitak mase pletiva i lošiji performans na testu trganja [39]. Nadalje, kao mogući postupak anuliranja nedostataka vlakana u literaturi se navodi tretman sredstvima za poboljšano prijanjanje i smanjeno upijanje vode kao npr. silanskim [41], ili polimerskim otopinama [42] u svrhu poboljšanja prijanjanja matrice i tekstila.

U slučaju vanjske primjene trajnost kompozita je od iznimne važnosti zbog izloženosti vremenskim prilikama. U istraživanjima s ciljem razvoja ploča od cementnih vlakana koje se mogu koristiti za vanjsko oblaganje koristi se samo cementna pasta bez primjene agregata [5,40,42,43]. Otpad je u obliku vlakna koje se kemijski tretira [40] ili se formira u netkani tekstil izrađen u potpunosti [42] ili uz djelomičnu primjesu otpadnih vlakana [5,43]. Prema Sadrolodabae [5,43] dodatak silikatne prašina portland cementu može značajno poboljšati trajnost kompozita od biljnih vlakana u usporedbi s onima od čistog portland cementa. Nakon ubrzanog starenja uzorci sa 30% zamjenom cementa sa silikatnom prašinom pokazali su najbolja svojstva; kako u tlačnoj, tako i u vlačnoj čvrstoći i žilavosti. Pucolani vežu oslobođeno vapno nastalo pri hidrataciji cementa i stvaraju produkte hidratacije vezivnih svojstava. Zamjena cementa sa silikatnom prašinom u postotku od 10% do 30% može sprječiti gubitak čvrstoće kompozita uslijed starenja [43].

Prema dostupnoj i prikazanoj literaturu jasno je da postoje potencijalne koristi u istraživanju primjene različitih oblika otpadnog tekstila u cementnim matricama za distinkтивne primjene. Generalno se može zaključiti da se tekstilni otpad u betonu uglavnom koristi u funkciji vlknastog ojačanje – mikrovlakna ili makrovlakna (25-60mm). Otpadni tekstil može se koristiti kao djelomična zamjena za agregat no uglavnom je ispitivan u količinama do 5% težine prema cementu ili ukupne mase mješavine u svrhu ojačanja. Može se zaključiti da postoje instance kada dodatak tekstila može povećati tlačnu čvrstoću ali je suprotno češći slučaj. Dodatak tekstila povećava čvrstoću na savijanje i cijepanje kao i energiju loma te umanjuje propagaciju pukotina. Tekstilni otpad u betonu povećava upijanje vode što dovodi do manje područja moguće primjene. Otpad u obliku tekstila može poboljšati svojstva betona više nego otpad istog materijala u vlknastom obliku. Navedeni su prednosti i nedostaci pamučnih vlakana te prednosti koje proizvodni tekstilni pamučni otpad ima u odnosu na sirova vlakna. U pregledu su prikazani načini prilagodbe cementne matrice i tretmana biljnih vlakana u svrhu produljenja trajnosti i poboljšanja mehaničkih svojstava tekstilnih kompozita.

3 Planirana tema istraživanja doktorske disertacije

Jedan od mogućih načina ublažavanja posljedica proizvodnje tekstila na prirodni okoliš je korištenje proizvodnog otpada pamučne pletene odjeće u betonu u svrhu ojačanja. Na ovaj način smanjila bi se količina tekstilnog otpada ali i vlakana koja bi se inače iskoristila u svrhu ojačanja. Dodatno, postoji i mogućnost ekonomске uštede. Unatoč visokoj kvaliteti ovoga otpada u odnosu na druge tipove otpada, velika količina i nedostatak opreme za recikliranje proizvođačima predstavlja problem. Ne postojanje literature koja se specifično bavi proizvodnim pamučnim pletenim otpadom čini ga primarnim kandidatom za istraživanje uporabe, poboljšanja i razvoja cementnih kompozita.

U pogledu znanstvenog doprinosa, istraživati će se svojstva koja nisu istražena (ili nisu dovoljno istražena) u dostupnoj literaturi. Ispitati će se utjecaj vrste cementa, mineralnih dodataka, aditiva za poboljšanje karakteristika kompozita u svježem i očvrslom stanju. Dodatno, ispitati će se utjecaj veličine i količine isječaka pletiva, način ugradnje/polaganja pletiva u kompozit, utjecaj različitih frakcija agregata, vrste agregata i maksimalnog zrna agregata na kvalitetu kompozita. Pitanje trajnosti tekstilnog kompozita nedovoljno je istraženo u literaturi. Stoga se planira ispitati utjecaj tekstilnih isječaka na trajnost cementnog kompozita mjerjenjem plinopropusnosti, vodoupojnosti, vodonepropusnosti te otpornost na habanje.

Objedinjeni rezultati dobiveni navedenim ispitivanjima iskazati će karakteristike kompozita i ukazati na prednosti primjene tekstilnog otpada i optimalne mogućosti primjene u graditeljstvu.

3.1 Ispitivanje tekstilno-cementnih kompozita standardiziranim laboratorijskim metodama

Ispitivanja koja će se provoditi u svrhu istraživanja utjecaja i svojstava tekstilno-cementnog kompozita izvoditi će se standardiziranim (normiranim) laboratorijskim metodama na svježim i očvrslim uzorcima betona i morta (estriha). Na svježim uzorcima provoditi će se: određivanje konzistencije slijeganjem ili na potresnom stoliću, određivanje gustoće, određivanje količine zraka u betonu/mortu. Na očvrslim uzorcima ispitivati će se: tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje, gustoća, vodoupojnost, dubina prodora vode pod tlakom, plinopropusnost, otpornost na habanje, otpornost na smrzavanje i odmrzavanje. Planira se na uzorcima mortova iz dijagrama sila-pomak odrediti specifična energija loma, koja je pokazatelj doprinosa tekstila na duktilnost kompozita.

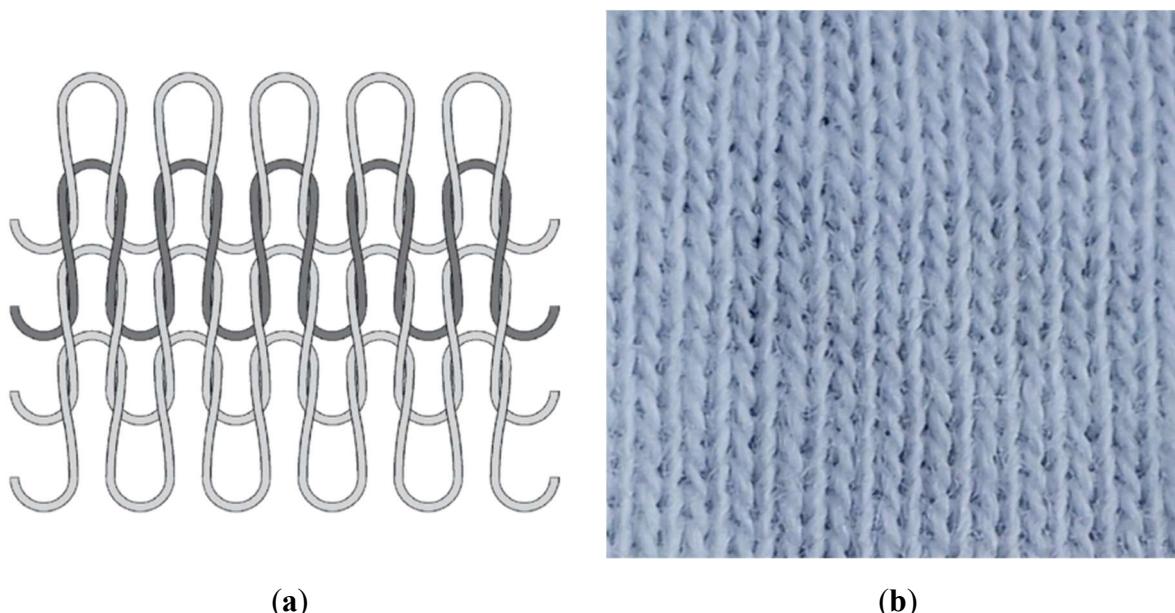
Objedinjeni rezultati dobiveni navedenim metodama iskazati će karakteristike kompozita i ukazati na optimalne mogućosti primjene u graditeljstvu kroz in-situ izvedene te predgotovljene montažne i polumontažne elemente.

Tekstilni otpad predviđen za buduća istraživanja dala je lokalna tvornica, Galeb dalmatinska trikotaža d.d., koja uglavnom proizvodi odjevne predmete poput donjeg rublja. Otpadni komadi nastali su u procesu krojenja, u kojem se s veće površine tkanine izrežu komponente odjeće u potrebnom obliku. Dobiveni otpad u potpunosti je izrađen od pređe od pamučnih vlakana i sastoji se od uglavnom dvije vrste pletiva u nepoznatom omjeru; Single Jersey i Fine rib. Oba

pletiva su tzv. desna-desna kulirna pletiva (slika 3). Pletivo je tekstilni plošni proizvod sastavljen od redova i nizova očica. Očica je osnovna jedinica pletiva. Očice nastaju tako da se nit dovodi u valovit oblik, tj. kulira se, a zatim isprepliće s drugom niti pri čemu najprije nastaju poluočice, a zatim isprepletanjem sljedećih niti nastaju očice. Jedno od najznačajnijih svojstava pletiva za odjeću je njegova elastičnost, a time i rastezljivost u smjeru redova i nizova. Desno-desno kulirno pletivo je zbog svoje strukture nekoliko puta rastezljivije u smjeru redova nego u smjeru nizova. [44]

Pletiva su elastični ortotropni materijali koji se u pogledu strukturalnih karakteristika definiraju kao ortotropne ploče s dvije međusobno okomite ravnine elastične simetrije. Te ravnine elastične simetrije su ravnine ortotropije, a njihovi presjeci su glavne osi u smjeru redova, odnosno u smjeru nizova pletiva. [44]

Glavne karakteristike pletiva prikazane su u tablici 1. Omjer vrsta tkanina u seriji koju je dostavio proizvođač nije poznat.

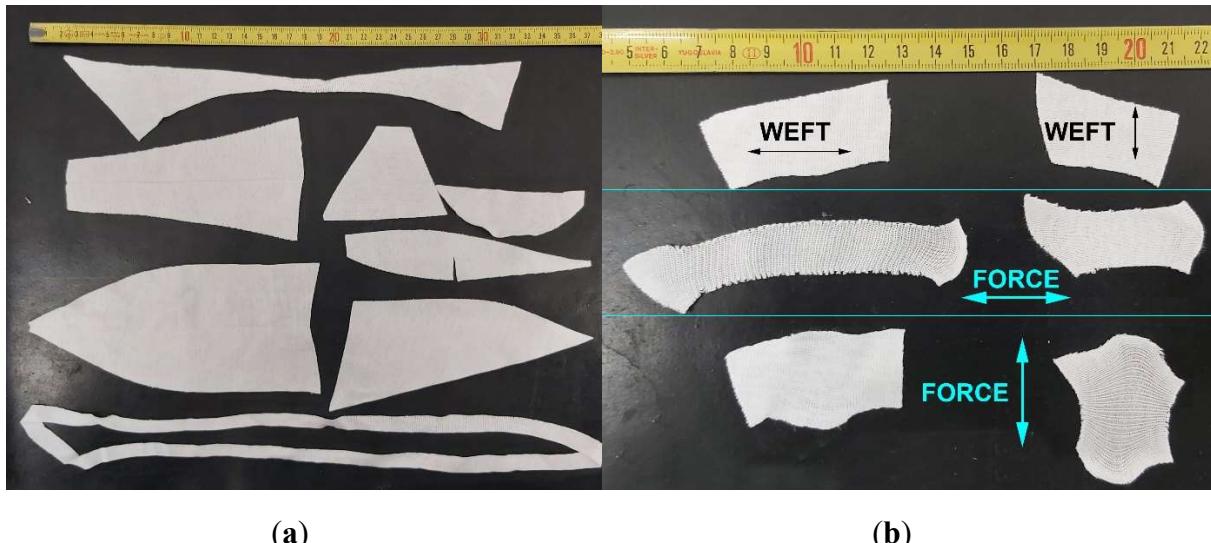


Slika 3. (a) Shema desno-desno kulirnog pletiva [25] (b) Fotografija desno-desno kulirnog pletiva

Ispitivan parametar <i>(Primjenjena metoda)</i>	Single Jersey	Fine rib
Sirovinski sastav: <i>(Kvalitativna)</i>	100% pamuk	100% pamuk
Finoča prede (tex; Nm, Ne): <i>(HRN ISO 7211-5:2003)</i>	20 tex x 1; Nm 50/1; Ne 30/1	20 tex x 1; Nm 50/1
Površinska masa, sušeno (g/m²): <i>(HRN EN 12127:2003)</i>	154	180
Gustoča, (na 10 cm): <i>(HRN EN 14971:2008)</i>	nizovi: 150 redovi: 214	nizovi: 120 redovi: 180

Tablica 1. Svojstva pletiva

Karakteristično za proizvodni pamučni pleteni otpad je njegova elastičnost zbog stila pletenja i nepravilnog odsječenog oblika s nejednaka površina što je posljedica proizvodnog procesa (slika 4.). Pletivo je dodatno usitnjeno na oko 2×6 do 8 cm kako bi se homogenizirali komadi tkanine i omogućilo lakše miješanje u betonu. Pletivo je usitnjeno bez obzira na uzorak pletenja. Trajna promjena oblika nakon primjene sile prikazana je na Slici 3. Sitotaw i Adamu [45] istražili su svojstva vlačne čvrstoće i istezanja u smjeru redova i nizova za Single Jersey i Fine Rib pletiva proizvedena od pamučnog prediva finoće 35 Ne. Utvrdili su da su maksimalna sila prekida (N) i produljenje (%) obrnuto proporcionalni. Veća sila se javlja kod niskih postotaka istezanja pri prekidu, a vrijedi i obrnuto. Penava i sur [44] su ispitivali četiri vrste glatkog kulirnog desno-desnog pletiva izrađenog s različitim finoćama pamučnih jednostrukih pređa. Prema podatcima od proizvođača pamučni otpad trebao bi imati svojstva kao i pletivo označeno U20 u ispitivanjima Penava i sur. [44].



Slika 4. (a) Oblik i veličina izrezaka iz tvornice (b) Veličina usitnjjenih izrezaka i utjecaj smjera sile u odnosu na smjer pletenja.

3.2 Smjernice za primjenu nusproizvoda tekstilne industrije u graditeljstvu na primjeru tekstilno-cementnog kompozita - metoda studije slučaja

Metoda studije slučaja (eng. *Case Study*) je istraživački pristup koji uključuje detaljno ispitivanje određenog slučaja ili situacije te detektiranje određenih zakonitosti na temelju rezultata promatranja više slučajeva. Metoda studije slučaja je važan alat za znanstveno istraživanje u arhitekturi. Ova metoda se koristi za dubinsko proučavanje pojedinačnih slučajeva ili primjera u stvarnom svijetu, često u kontekstu određene arhitektonske prakse ili fenomena. U kontekstu implementacije novog materijala u različite građevinske elemente, metoda studije slučaja će se koristiti kako bi se razumjeli izazovi i mogućnosti uključeni u proces od projektiranja do reciklaže elementa. Primjenom ove metode, dobiti će se bolje razumijevanje procesa implementacije i identificirati načine optimiziranja primjene i poboljšanja održivosti u zgradarstvu.

Pri izradi dijela disertacije koja će metodom studije slučaja analizirati implementaciju novog materijala u različite građevinske elemente biti će napravljeni sljedeći koraci:

1. **Definirati će se istraživačko pitanje:** Koji su izazovi i mogućnosti uključeni u implementaciju novog održivog materijala u različite građevinske elemente?
2. **Identificirati slučajeve:** Studija slučaja elemenata zgrada s dodacima nusproizvoda tekstilne industrije u cementu će se, u odnosu na utvrđena svojstva novog građevnog materijala, fokusirati na: **estrih, zidne obloge, pregradne blokove, elemente izgubljene oplate, vertikalne konstrukcije izvedene tehnologijom 3D printanja.**
3. **Prikupiti će se i analizirati podatci:** Biti će prikupljeni podatci iz trenutnog stanja prakse, tržišta i građevinske operative te normi koji će prikazati **proizvodnju, ugradnju, utjecaje na element, očekivani vijek trajanja, kasniju demontažu i recikliranje** za elemente koji su uvriježeni u graditeljstvu te obraditi specifične aspekte primjene elemenata s dodacima nusproizvoda tekstilne industrije u cementu. Analiza prikupljenih podataka će pomoći u identificiranju zajedničkih tema i obrazaca u procesu implementacije, kao i izazova i mogućnosti koji su se pojavili.
4. **Izvući će se zaključci:** Na temelju analize, izvući će se zaključci o izazovima i mogućnostima uključenim u implementaciju novog materijala u različite građevinske elemente. To će pomoći u identificiranju najboljih praksi i naučenih lekcija koje bi bile smjernice u budućim primjenama ovog novog građevnog kompozita.

3.3 Laboratorij, oprema i mjerena

Provođenje eksperimenata planira se na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu u okviru Laboratorija za materijale i Laboratorija za implementaciju suvremenih tehnologija u arhitekturi.

4 Literatura

1. Okeyinka, O.M.; Oloke, D.A.; Khatib, J.M. A Review on Recycled Use of Solid Wastes in Building Materials. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* **2015**, *9*, 1502–1511.
2. Rubino, C.; Liuzzi, S.; Martellotta, F.; Stefanizzi, P. Textile Wastes in Building Sector: A Review. *Modelling, Measurement and Control B* **2018**, *87*, 172–179, doi:10.18280/mmc-b.870309.
3. Rahman, S.S.; Siddiqua, S.; Cherian, C. Sustainable Applications of Textile Waste Fiber in the Construction and Geotechnical Industries: A Retrospect. *Clean Eng Technol* **2022**, *6*, 100420, doi:10.1016/j.clet.2022.100420.
4. Tran, N.P.; Gunasekara, C.; Law, D.W.; Houshyar, S.; Setunge, S.; Cwirzen, A. Comprehensive Review on Sustainable Fiber Reinforced Concrete Incorporating Recycled Textile Waste. *J Sustain Cem Based Mater* **2022**, *11*, 41–61, doi:10.1080/21650373.2021.1875273.
5. Sadrolodabaei, P.; Claramunt, J.; Ardanuy, M.; de la Fuente, A. Mechanical and Durability Characterization of a New Textile Waste Micro-Fiber Reinforced Cement Composite for Building Applications. *Case Studies in Construction Materials* **2021**, *14*, e00492, doi:10.1016/j.cscm.2021.e00492.
6. Brazão Farinha, C.; de Brito, J.; Veiga, R. Incorporation of High Contents of Textile, Acrylic and Glass Waste Fibres in Cement-Based Mortars. Influence on Mortars' Fresh, Mechanical and Deformability Behaviour. *Constr Build Mater* **2021**, *303*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124424.
7. Briga-Sá, A.; Nascimento, D.; Teixeira, N.; Pinto, J.; Caldeira, F.; Varum, H.; Paiva, A. Textile Waste as an Alternative Thermal Insulation Building Material Solution. *Constr Build Mater* **2013**, *38*, 155–160, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.037.
8. R. Selvaraj; R. Priyanka Study on Recycled Waste Cloth in Concrete. *International Journal of Engineering Research and* **2015**, *V4*, 891–895, doi:10.17577/ijertv4is090437.
9. Johnson, S.; Echeverria, D.; Venditti, R.; Jameel, H.; Yao, Y. Supply Chain of Waste Cotton Recycling and Reuse: A Review. *AATCC Journal of Research* **2020**, *7*, 19–31, doi:10.14504/ajr.7.S1.3.
10. Dobilaite, V.; Mileriene, G.; Juciene, M.; Saceviciene, V. Investigation of Current State of Pre-Consumer Textile Waste Generated at Lithuanian Enterprises. *International Journal of Clothing Science and Technology* **2017**, *29*, 491–503, doi:10.1108/IJCST-08-2016-0097.
11. F. F. Aspiras and Manalo J. R. I. Utilization of Textile Waste Cuttings as Building Material. *J Mater Process Technol* **1995**, *1–4*, 379–384.
12. R. Selvaraj; R. Priyanka Study on Recycled Waste Cloth in Concrete. *International Journal of Engineering Research and* **2015**, *V4*, 891–895, doi:10.17577/ijertv4is090437.
13. Anglade, J.; Benavente, E.; Rodríguez, J.; Hinostroza, A. Use of Textile Waste as an Addition in the Elaboration of an Ecological Concrete Block. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* **2021**, *1054*, doi:10.1088/1757-899X/1054/1/012005.
14. Sathiyaraj, S.M.C. Experimental Investigation of Textile Wastes Used in Concrete. *IJSRD* **2019**, *7*, 659–660.
15. Qin, Y.; Zhang, X.; Chai, J.; Xu, Z.; Li, S. Experimental Study of Compressive Behavior of Polypropylene-Fiber-Reinforced and Polypropylene-Fiber-Fabric-Reinforced Concrete. *Constr Build Mater* **2019**, *194*, 216–225, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.042.
16. Qin, Y.; Zhang, X.; Chai, J. Damage Performance and Compressive Behavior of Early-Age Green Concrete with Recycled Nylon Fiber Fabric under an Axial Load. *Constr Build Mater* **2019**, *209*, 105–114, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.094.
17. Jayasinghe, I.; Basnayake, B.; Amarathunga, K.; Dissanayake, P. Environmental Conservation Efforts in Developing Textile Waste Incorporated Cement Blocks. *Tropical Agricultural Research* **2010**, *21*, 126, doi:10.4038/tar.v21i2.2594.
18. Pinto, J.; Peixoto, A.; Vieira, J.; Fernandes, L.; Morais, J.; Cunha, V.M.C.F.; Varum, H. Render Reinforced with Textile Threads. *Constr Build Mater* **2013**, *40*, 26–32, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.099.
19. Lazaar, M. Recycling Textile Waste to Enhance Building Thermal Insulation and Reduce Carbon Emissions : Experimentation and Model-Based Dynamic Assessment. **2023**.
20. de Oliveira, E.M.; Machado de Oliveira, E.; de Oliveira, C.M.; Dal-Bó, A.G.; Peterson, M. Study of the Incorporation of Fabric Shavings from the Clothing Industry in Coating Mortars. *J Clean Prod* **2021**, *279*, 123730, doi:10.1016/j.jclepro.2020.123730.
21. Sathiparan, N.; Rupasinghe, M.N.; H.M. Pavithra, B. Performance of Coconut Coir Reinforced Hydraulic Cement Mortar for Surface Plastering Application. *Constr Build Mater* **2017**, *142*, 23–30, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.058.
22. Kalkan, Ş.O.; Gündüz, L. Structural Strength Properties of Waste Textile Fiber Reinforced Cementitious Lightweight Composites Mortars. *Sakarya University Journal of Science* **2022**, *26*, 1180–1195, doi:10.16984/saufenbilder.1107127.

23. Gunathilaka., D.P.D.U.; Jayathilaka, C.S.; Somarathna, H.M.C.C. Feasibility of Cement Mortar System with Textile Waste. *International Conference on Engineering - 2022* **2022**, 112–117.
24. Eldin, M.M.; El-tahan, E. Performance of Cotton Woven Fabrics Structures in Reinforcing of Cement Elements. **2017**.
25. Peled, A.; Mobasher, B.; Bentur, A. *Textile Reinforced Concrete*; 2017; ISBN 9781482282481.
26. Juradin, S.; Boko, I.; Netinger Grubeša, I.; Jozić, D.; Mrakovčić, S. Influence of Harvesting Time and Maceration Method of Spanish Broom (*Spartium Junceum L.*) Fibers on Mechanical Properties of Reinforced Cement Mortar. *Constr Build Mater* **2019**, 225, 243–255, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.207.
27. Yan, L.; Kasal, B.; Huang, L. A Review of Recent Research on the Use of Cellulosic Fibres, Their Fibre Fabric Reinforced Cementitious, Geo-Polymer and Polymer Composites in Civil Engineering. *Compos B Eng* **2016**, 92, 94–132, doi:10.1016/j.compositesb.2016.02.002.
28. Ferreira, S.R.; Silva, F.D.A.; Lima, P.R.L.; Toledo Filho, R.D. Effect of Fiber Treatments on the Sisal Fiber Properties and Fiber-Matrix Bond in Cement Based Systems. *Constr Build Mater* **2015**, 101, 730–740, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120.
29. Rocha Ferreira, S.; Rodrigues Sena Neto, A.; de Andrade Silva, F.; Gomes de Souza, F.; Dias Toledo Filho, R. The Influence of Carboxylated Styrene Butadiene Rubber Coating on the Mechanical Performance of Vegetable Fibers and on Their Interface with a Cement Matrix. *Constr Build Mater* **2020**, 262, 120770, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120770.
30. Ardanuy, M.; Claramunt, J.; García-Hortal, J.A.; Barra, M. Fiber-Matrix Interactions in Cement Mortar Composites Reinforced with Cellulosic Fibers. *Cellulose* **2011**, 18, 281–289, doi:10.1007/s10570-011-9493-3.
31. Merta, I.; Poletanovic, B.; Kopeck, K. Durability of Natural Fibres within Cement-Based Materials- Review. *Concrete Structures* **2017**, 2000–2003.
32. Hasan, K.M.F.; Horváth, P.G.; Alpár, T. Lignocellulosic Fiber Cement Compatibility: A State of the Art Review. *Journal of Natural Fibers* **2021**, 00, 1–26, doi:10.1080/15440478.2021.1875380.
33. Toledo Filho, R.; Scrivener, K.; England, G.L.; Ghavami, K. Durability of Alkali-Sensitive Sisal and Coconut Fibres in Cement. *Cem Concr Compos* **2000**, 22, 127–143.
34. Toledo Filho, R.D.; Silva, F. de A.; Fairbairn, E.M.R.; Filho, J. de A.M. Durability of Compression Molded Sisal Fiber Reinforced Mortar Laminates. *Constr Build Mater* **2009**, 23, 2409–2420, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012.
35. Juradin, S.; Boko, I.; Netinger Grubeša, I.; Jozić, D.; Mrakovčić, S. Influence of Different Treatment and Amount of Spanish Broom and Hemp Fibres on the Mechanical Properties of Reinforced Cement Mortars. *Constr Build Mater* **2021**, 273, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121702.
36. Pereira, C.; Caldeira Jorge, F.; Ferreira, J.M.F. Adsorption of Cations from a Cement Suspension onto Lignocellulosic Substrates and Its Influence on Cement Setting. *Journal of Wood Chemistry and Technology* **2005**, 25, 231–244, doi:10.1080/02773810500366672.
37. Monteiro, H.; Caldeira, F.; Pinto, J.; Varum, H. Recycling Textile Residues into Cement Composites. *Environ Eng Manag J* **2018**, 17, 1863–1868, doi:10.30638/EEMJ.2018.185.
38. Hsieh, Y.L.; Thompson, J.; Miller, A. Water Wetting and Retention of Cotton Assemblies as Affected by Alkaline and Bleaching Treatments. *Textile Research Journal* **1996**, 66, 456–464, doi:10.1177/004051759606600707.
39. Alam, M.R.; Islam, M.R. Pre-Post Bleaching Behaviors of Cotton Knits Using Reductive and Oxidative Bleaches. *International Journal of Polymer and Textile Engineering* **2020**, 7, 42–53, doi:10.14445/23942592/ijpte-v7i1p106.
40. Pozzi, P. Recycling of Textile Fibers for the Production of Fibre-Reinforced Cement. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* **2019**, 6, 221–228.
41. Ahmad, R.; Hamid, R.; Osman, S.A. Physical and Chemical Modifications of Plant Fibres for Reinforcement in Cementitious Composites. *Advances in Civil Engineering* **2019**, 2019, doi:10.1155/2019/5185806.
42. Ventura, H.; Álvarez, M.D.; Gonzalez-Lopez, L.; Claramunt, J.; Ardanuy, M. Cement Composite Plates Reinforced with Nonwoven Fabrics from Technical Textile Waste Fibres: Mechanical and Environmental Assessment. *J Clean Prod* **2022**, 372, doi:10.1016/j.jclepro.2022.133652.
43. Sadrolodabaei, P.; Claramunt, J.; Ardanuy, M.; de la Fuente, A. Effect of Accelerated Aging and Silica Fume Addition on the Mechanical and Microstructural Properties of Hybrid Textile Waste-Flax Fabric-Reinforced Cement Composites. *Cem Concr Compos* **2023**, 135, 104829, doi:10.1016/j.cemconcomp.2022.104829.
44. Penava, Ž.; Penava, D.Š.; Vrličak, Z. Utjecaj Anizotropije I Finoće Prede Na Modul Elastičnosti Kulirnog Desno-Desnog Pletiva. *Tekstil* **2014**, 63, 283–291.
45. Sitowaw, D.B.; Adamu, B.F. Tensile Properties of Single Jersey and 1×1 Rib Knitted Fabrics Made from 100% Cotton and Cotton/Lycra Yarns. *Journal of Engineering (United Kingdom)* **2017**, 2017, doi:10.1155/2017/4310782.