

## Recikliranje visokoučinkovitih i pametnih tekstilija

**Marijana Pavunc**, mag.ing.techn.text.  
Prof.dr.sc. **Edita Vujasinović**, dipl.ing.  
Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet  
Zavod za materijale, vlakna i ispitivanje tekstila  
Zagreb, Hrvatska  
e-mail: marijana.pavunc@ttf.hr; edita.vujasinovic@ttf.hr  
Prispjelo 8.12.2012.

UDK 677.011:678.028  
Pregled\*

*U posljednjih deset godina bilježi se porast proizvodnje vlakana sa 59 na 85 mil. t godišnje što je rezultat rasta globalne populacije i poboljšanja životnog standarda, ali i rezultat činjenice da danas industrijalizirana i razvijena društva koriste tekstilna vlakna i materijale, osim za proizvodnju odjevnih predmeta, i za širok spektar drugih proizvoda kao što su različite vrste prometala, sportska i zaštitna oprema, sportski rekviziti, a tekstilna vlakna se sve češće koriste kao vlaknima ojačani kompoziti i kao strukturni materijali (geomembrane, ojačani beton i sl.). Posljedica svega toga je povećanje tekstilnog otpada i potrebe za njegovim primjerenim zbrinjavanjem. Iako je recikliranje i uporaba tekstila najbolji i najpoželjniji način zbrinjavanja otpadnih tekstilija, u stvarnosti je primjereno zbrinjavanje otpadnih tekstilija mnogo složenije nego se čini. Posebno se to odnosi na suvremene tekstilne inženjerske ili strukturne materijale bazirane na tekstuilu poput visokoučinkovitih (HP prema engl. High Performance) i pametnih materijala (SM prema engl. Smart Materials). U radu je dan prikaz mogućnosti recikliranja i uporabe složenih i višekomponentnih, tj. visokoučinkovitih i pametnih tekstilija čije je recikliranje iznimno složeno, teško, skupo a ponekad i nemoguće. Može se očekivati da će se u budućnosti kroz obrazovanje i jačanje ekološke svijesti, favoriziranje održivih načina proizvodnje novih tekstilija uz istovremeno iznalaženje primjerenih modela njihovog recikliranja smanjiti tekstilni otpad, uštedjeti energija, očuvati okoliš i zdravlje ljudi. Da bi se to ostvarilo, nužno je u projektiranje i dizajn suvremenih tekstilija ugraditi načela ekodizajna ili tzv. zelenog dizajna (dizajn za recikliranje i dizajn iz recikliranog).*

**ključne riječi:** recikliranje, visokoučinkovita vlakna, vlaknima ojačani kompoziti, pametne tekstilije

### 1. Uvod

Iz godine u godinu proizvodnja tekstilnih vlakana u svijetu konstantno raste. U posljednjih deset godina bilježi se porast proizvodnje vlakana sa 59 na 85 mil. t godišnje [1-2] što je rezultat rasta globalne populacije i

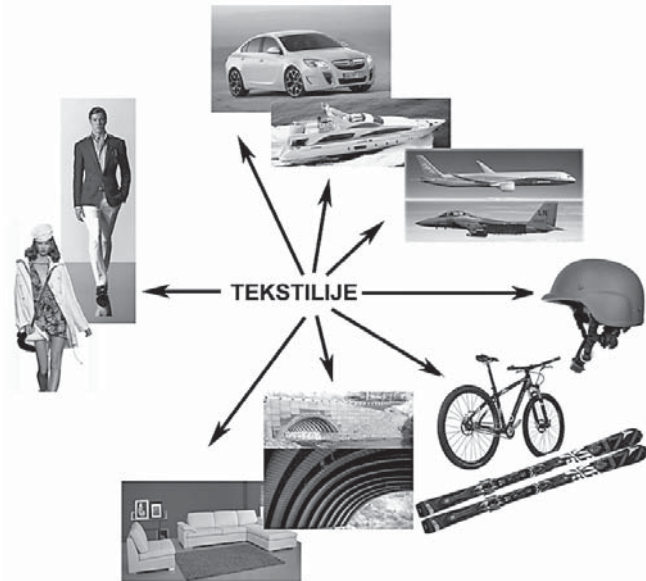
poboljšanja životnog standarda, ali i rezultat činjenice da danas industrijalizirana i razvijena društva koriste tekstilna vlakna i materijale, osim za proizvodnju odjevnih predmeta, i za širok spektar drugih proizvoda [3-6] kao što su različite vrste prometala, sportska i zaštitna oprema, sportski

\*Izlaganje na znanstveno-stručnom savjetovanju Tekstilni dani Zagreb 2012. - Inovativnost i prilagodljivost tehnologija i proizvoda u revitalizaciji tekstilne i odjevne industrije, 30.11.2012., Zagreb

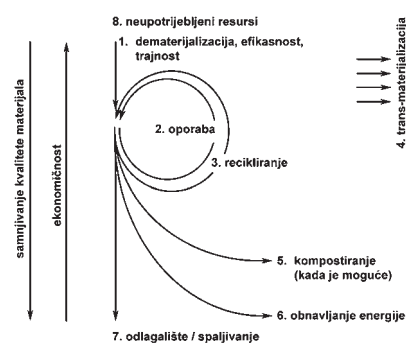
rekviziti, a tekstilna vlakna se sve češće koriste kao vlaknima ojačani kompoziti i kao strukturni inženjerski materijali (geomembrane, ojačani beton i sl.), sl.1.

Posljedica svega toga je povećanje tekstilnog otpada, koji, ukoliko nije zbrinut na odgovarajući način, utječe na zagađenje tla, ima i velik utjecaj na ozonski omotač i atmosferu a time i na kvalitetu života. Recikliranje tekstilija i/ili njihovo primjereno zbrinjavanje nameće se stoga kao imperativ. Dodatno, postoje i mnogi drugi utjecajni razlozi koji govore u prilog recikliranja otpadnih tekstilija i otpada iz njihovih proizvodnih procesa. Oni uključuju očuvanje resursa (posebno onih koji nisu obnovljivi poput nafte), smanjenje potrebe za odlagalištima otpada i plaćanjem pripadajućih naknada [7, 8] te mogućnost raspolaganja značajnim količinama novih, najčešće i jeftinijih vlaknatih sirovina za proizvodnju novih tekstilnih proizvoda, često i onih s višom dodanom vrijednosti, kao što su npr. vlaknima ojačani kompoziti [9-13]. Produljeni vijek trajanja (tzv. *engl. life cycle*) tekstilnih vlakana i materijala može stoga smanjiti opterećenje okoliša, uštedjeti energiju i sirovinske resurse, sl.2 [13].

Iako je recikliranje tekstila očigledno najbolji i najpoželjniji način zbrinjavanja otpadnih tekstilija, u stvarnosti je primjereno zbrinjavanje otpadnih tekstilija recikliranjem i ponovnom uporabom mnogo složenije nego što se čini [14, 15]. Osim često spominjane nedovoljne spremnosti javnosti da sudjeluje u recikliranju, ekonomska komponenta, tj. isplativost postupaka je najčešće primarni, iako često skriveni razlog nedovoljnog recikliranja i uporabe otpadnih tekstilija. Dodatno, tome u prilog ide i činjenica da su današnji suvremeni tekstilni i inženjerski ili strukturni materijali bazirani na tekstilu poput visokoučinkovitih (HP) i pametnih materijala, složeni višekomponentni sustavi čije je recikliranje iznimno složeno, teško, skupo a ponekad i nemoguće.



Sl.1 Upotreba tekstila u svakodnevnom životu



Sl.2 Ciklička hijerarhija upotrebe materijala

## 2. Mogućnosti i modeli recikliranja visokoučinkovitih tekstilija

Visokoučinkovite (HP prema *engl. High Performance*) tekstilije kao pojam prisutne su u svjetskoj javnosti više od 40 godina, prvo kao pojam u domeni vlakana visokih mehaničkih i toplinskih svojstava, a danas je to sintagma koja se koristi za zbirno označavanje specijalnih tekstilija ciljanih visokih svojstava u upotrebi, kao što su npr. visokoapsorptivne, antimikrobne, medicinske-biorazgradljive, zaštitne i dr. tekstilije [16, 17].

### 2.1. Recikliranje visokoučinkovitih vlakana

Jedno od prvih, a može se reći danas i najpoznatijih tekstilnih vlakana uz

čije ime se veže prefiks visokoučinkovito ili HP vlakno je aramidno (AR) Kevlar® vlakno [16, 18]. Zbog njegovih visokih mehaničkih i toplinskih svojstava ali i njegove izuzetne sposobnosti apsorpcije udarne energije, AR vlakna, posebice *p*-aramidna Kevlar® vlakna, nezaobilazna su tekstilna sirovina u predmetima osobne zaštitne opreme (PPE prema *engl. Personal Protective Equipment*). Tu je možda najpoznatija balistička zaštitna odjeća, koja je danas već postala sastavni dio standardne opreme policije, vojnika i zaštitara općenito [19, 20]. Jasno je da životni vijek takvih tekstilija i vlakana prije svega nije predvidljiv i dug, a kako se pri tome radi i o relativno skupim vlaknima i cijenjenoj tekstilnoj sirovini, s pravom se nameće potreba njihovog adekvatnog recikliranja, sl.3. Naime, AR vlakna nisu biorazgradljiva i kao takva nisu primjerena za zbrinjavanje odlaganjem [21].

Jedan od najstarijih, ali i najprisutnijih načina recikliranja tekstilija je recikliranje mehaničkim postupcima koji često rezultiraju dobivanjem vlakna nižih fizikalno-mehaničkih svojstava pa njihova primjena nije moguća za iste svrhe, nego je potrebno pronalaženje novih područja primjene, gdje će takva oporabljena vlakna

Tab.1 Prinos oporabljenih sirovina nakon pirolize FRC-a, maseni udio [%]

Kompozit	Kruti ostatak*	Gorivo, vosak**	Plinovi***
Poliesterska matrica / CaCO <sub>3</sub> / stakleno vlakno	45,8	45,7	8,5
Fenolna matrica / MgO, CaCO <sub>3</sub> , stakleno vlakno	90,2	8,8	1,0
Epoksi matrica / stakleno, ugljikovo vlakno	67,4	31,3	1,2
Poliesterska matrica /silansko vezivo / stakleno vlakno	30,0	59,4	10,6
Polipropilenska matrica / silansko vezivo / stakleno vlakno	44,8	46,8	8,4
Polietilen tereftalatna matrica / stakleno vlakno	74,4	13,0	12,6
Vinil esterska matrica / stakleno vlakno	83,4	15,0	1,6

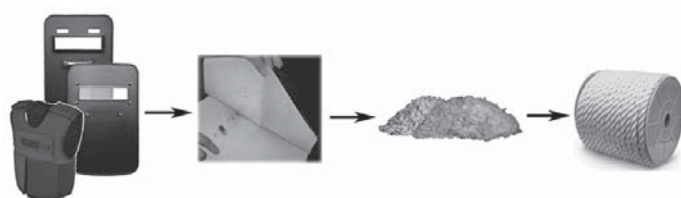
\*Kruti ostatak nakon pirolize je mrvičasti ostatak koji sadrži staklena vlakna i punila, kao i mali udio karboniziranog ostatka dobivenog degradacijom matrice.

\*\*Gorivo i vosak imaju visokokaloričnu vrijednost te se mogu spaliti u svrhu obnavljanja energije.

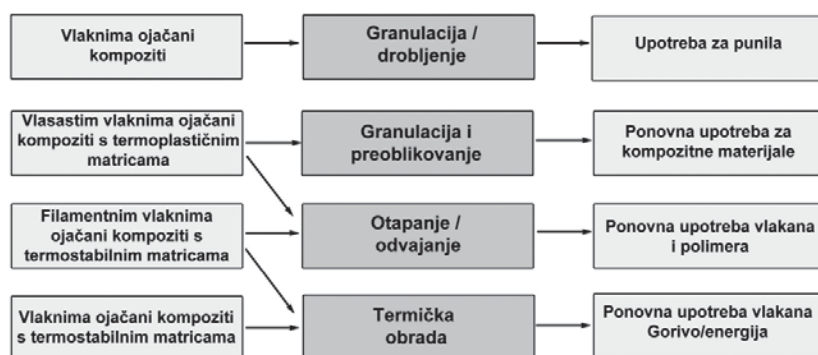
\*\*\*Sastav dobivenih plinova ovisi o upotrijebljenoj matrici. Matrice koje sadrže kisik, kao npr. poliesterska matrica ili fenolna matrica dominantni plinovi su ugljični dioksid i ugljični monoksid, dok je za druge matrice karakterističan visoki postotak vodika i ugljikovodika, kao npr. metana i etana.

imati zadovoljavajuća svojstva i funkciju. Tako npr. Grupa Teijin svoju odjeću za balističku zaštitu obrađuje u jedinicama za recikliranje aramida, pa reciklirana vlakna u obliku pulpe, praha ili kratkih vlakana, sl.3, vraća na tržište za izradu zaštitnih rukavica i užadi, dok se aramid u obliku pulpe često koristi za izradu npr. automobilskih kočnica [15, 22, 23]. Također, od recikliranih aramidnih vlakana

proizvode se i netkane tekstilije koje su svoju primjenu našle u izradi papirne ambalaže i izolacije za zaštitu od topline i sl. Međutim, kako se na tržištu aramidnih tekstilija sve češće izrađuju kompozitne i multikompozitne strukture, recikliranje aramidnih vlakana se dodatno otežava pa je u skladu s time potrebno pronalaženje i razvijanje novih i odgovarajućih procesa za njihovo recikliranje.



Sl.3 Oporaba AR vlakana iz protubalističke odjeće i opreme



Sl.4 Mogućnosti recikliranja vlaknima ojačanih kompozita [24]

## 2.2. Recikliranje vlaknima ojačanih kompozita

Vlaknima ojačani kompoziti (FRC prema *engl. Fibre Reinforced Composites*), zbog brojnih kombinacija različitih vlakana i različitih matrica (polimernih, metalnih i keramičkih) te geometrije vlakana u matrici postali su vodeći inženjerski materijali 21. stoljeća. Moguće ih je dizajnirati prema ciljanim ili željenim svojstvima u upotrebi. Zbog svoje heterogenosti, FRC su iznimno kompleksan materijal za recikliranje. Neki od mogućih načina recikliranja FRC-a prikazani su na sl.4.

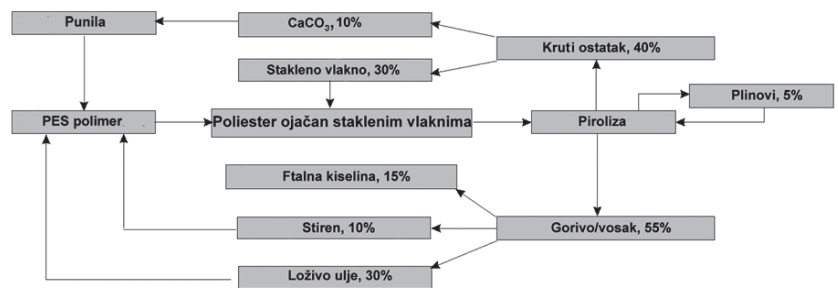
Jedna od mogućnosti recikliranja FRC-a je jednostavno mehaničko procesiranje mljevenjem kompozita u granule ili prah koji se potom kao sirovina može ugraditi u termostabilne matrice ili u cement za proizvodnju novih kompozitnih materijala koji svoju upotrebu pronalaze ponajprije u građevinskoj industriji. Istraživanja su pokazala da, ako se FRC drobljenjem ili mljevenjem usitne na čestice veličine manje od 20 μm, one predstavljaju učinkovito punilo u izradi mortova i betona visoke čvrstoće, a mogu se upotrijebiti i u industriji bojila [25, 26]. Veće čestice i ostaci od usitnjavanja FRC-a mogu se iskoristiti i kao dodatak ili zamjena za fosilna goriva, budući da pokazuju slična svojstva kao i niskokvalitetni ugljen pa se mogu miješati s različitim smolama za izradu briketa sličnih ugljenu. Na taj se način, tj. spaljivanjem koji je jedan od inače nepopularnih načina recikliranja materijala FRC kao problematični materijali za recikliranje uspješno ponovno iskorištavaju za dobivanje energije. Recikliranje vlaknima ojačanih kompozitnih materijala s termoplastičnim matricama mnogo je lakše od recikliranja onih koji u svojoj strukturi imaju termootporne matrice. Ovi kompoziti se jednostavno zagrijavanjem mogu preoblikovati pa se kao jedan od mogućih načina njihovog recikliranja provodi taljenjem i ponovnim preoblikovanjem u novi proizvod [27].



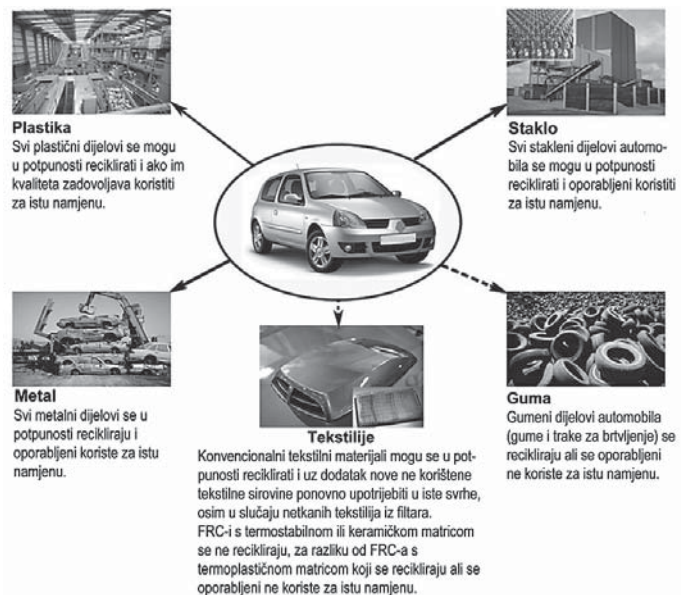
Druga mogućnost je toplinska obrada otpadnih FRC-a. Ova obrada je primjenjiva ako vlakna i matrica imaju različita termička svojstva i otpornosti. Toplinska obrada kao metoda recikliranja FRC-a može uključivati jednostavno sagorijevanje polimerne matrice, pri čemu se oslobađa korisna energija uz istovremeno očuvanje otpornih HP vlakana. Pritom je naravno poželjna što niža temperatura toplinske obrade kako bi se maksimalno očuvala ishodišna svojstva HP vlakana [28]. Npr. pirolizom FRC-a polimerni matriks u kompozitu razgrađuje se na manje organske spojeve i molekule, tab.1 [29] koji se mogu iskoristiti kao sirovina u industriji ili kao gorivo dok su HP vlakna istovremeno očuvana. Ova metoda recikliranja uspješno se primjenjuje na kompozite ojačane HP ugljikovim (CF) i staklenim (GF) vlaknima, sl.5 [30].

Recikliranje FRC-a otapanjem pokazalo se kao učinkovita metoda za određene vrste kompozita, uključujući i one s ugljikovim i aramidnim vlaknima [29, 31, 32]. Tijekom takvog procesa polimerna matrica se najprije otapa u pogodnom otapalu što je vrlo često pri povišenim temperaturama, potom slijedi odvajanje vlakana od otopine filtracijom. Na ovaj je način moguće odvojiti i reciklirati, tj. ponovno koristiti obje komponente FRC-a. Postoje međutim dva ograničavajuća čimbenika ovakvog recikliranja FRC-a. Prvi je vezan na topljivost polimerne matrice, a drugi činjenicom da korištenje i rukovanje znatnim količinama otapala može rezultirati rizicima za zdravlje i sigurnost okoliša.

Imajući na umu sve izneseno, jasno je da bi sadašnja i buduća istraživanja o mogućnosti recikliranja FRC-a trebala usmjeriti prema razvoju novih, inovativnih procesa separacije i recikliranja vlaknima ojačanih kompozitnih materijala, kao i na projektiranje i razvoj kompozitnih materijala koji bi se lakše reciklirali. Jedna od industrija koja koristi znatne količine FRC-a, ali i mnogo ulaže



Sl.5 Shematski prikaz procesa recikliranja staklenim vlaknima ojačanog poliestera pirolizom



Sl.6 Mogućnosti recikliranja automobila

upravo u takva istraživanja, je automobilska industrija, za koju bi npr. bilo idealno kada bi se automobil mogao izraditi od u potpunosti recikliranih materijala i materijala koji se lako recikliraju, sl.6.

Zbog sve veće usmjerenosti prema zaštiti okoliša, bilo kroz smanjenje korištenja energije, zaštite atmosfere ili smanjenja broja i kapaciteta odlagališta, svaki novi projekt i proizvod koji koristi vlaknima ojačane kompozite u Europskoj uniji mora razmotriti njihov cjeloživotni ciklus, tj. upotrebu i odlaganje nakon završetka njihovog životnog ciklusa. Tako su još od 2000. godine u Europskoj direktivi 2000/53/EC [33, 34] definirane kvote za zbrinjavanje vozila na kraju njegovog životnog vijeka. Ova direktiva donesena je u svrhu povećanja stope recikliranja vozila na kraju

njihovog životnog vijeka, ali i povećanja stope upotrebe recikliranih sirovina u novim proizvodima te kako bi svi sudionici u ovom lancu sa značajnom ekonomskom dobiti više pazili na okoliš. Od tada pa do danas gotovo sve države članice EU donijele su zakone za primjenu Direktive. Za razliku od metala, stakla i plastike, tekstilne komponente koje se koriste za izradu vozila, sl.6, teško se i ekonomski neučinkovito recikliraju ili nisu pogodne za recikliranje i ponovnu upotrebu. Intenzivna istraživanja usmjerena su primjerice na mogućnost zamjene staklenim vlaknima ojačanih kompozita u vozilima s biorazgradljivim kompozitnim materijalima kako bi se ublažio i smanjio njihov utjecaj na okoliš [35] na kraju životnog ciklusa vozila. Upotreba biljnih vlakana u takvim kompozitima

ima kao rezultat ekonomski, socijalni i ekološki efekt. Iako je jedan od velikih nedostataka biljnih vlakana nejednoličnost i prevelika oscilacija u kvaliteti u usporedbi sa široko upotrebljivanim staklenim vlaknima, biljna vlakna odlikuju se mnogim prednostima. Biljna vlakna su biorazgradljiva, jeftinija i lakša od staklenih vlakana te ih je lako oporabiti nakon prvotne upotrebe. Biljna vlakna drastično smanjuju masu kompozita uz zadržavanje mehaničkih svojstava, a pokazuju i veću sigurnost u slučaju sudara jer nisu krta i ne lome se. Zbog šuplje stanične strukture dobri su zvučni i toplinski izolatori. Za razliku od staklenih vlakana ne utječu negativno na zdravlje korisnika (dermatološki i respiratorni problemi). Budući da su poljoprivredni proizvod, biljna vlakna lako su dobavljiva i dostupna u cijelom svijetu. Suvremena, ekološka proizvodnja nije u sukobu s održivim razvojem i zahtijeva malo energije (otprilike četiri puta manje nego za proizvodnju iste mase staklenih vlakana), a takva biljna vlakna lako se recikliraju, kompostiraju ili oporabljaju spaljivanjem bez značajnijeg utjecaja na okoliš [36].

Slično automobilske industriji, u zrakoplovnoj industriji, bilo vojnoj ili civilnoj, iskazuje se sve veća potražnja za FRC-om kao konstrukcijskim materijalom. S obzirom na trend porasta broja zrakoplova i svemirskih letjelica, ali i sve veći udio FRC-a u njihovoj strukturi, sl.7, s pravom se nameće pitanje kako primjereno zbrinuti i/ili reciklirati zrakoplov na kraju njegovog životnog ciklusa.

Boeing, jedna od vodećih kompanija u području zrakoplovne industrije, inicirala je 2006. godine osnivanje AFRA udruge (prema *engl. Aircraft Fleece Recycling Association*) čija je misija razvijanje i pronalaženje ekološki i ekonomski prihvatljivih modela recikliranja zrakoplova na kraju njihovog životnog ciklusa, te iznalaženje mogućnosti uporabe svih zrakoplovnih strukturnih materijala, a posebno ugljikovih vlakana iz kom-

**Boeing 787**

■ Ugljikovim vlaknima ojačani kompozit - 50%

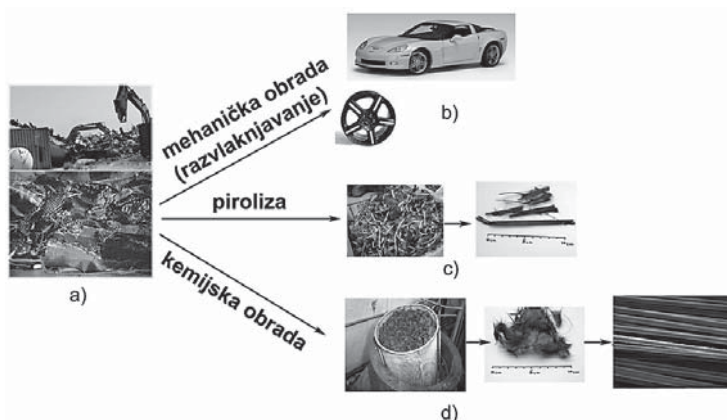


**Boeing 777**

■ Ugljikovim vlaknima ojačani kompozit - 20%



Sl.7 Upotreba vlaknima ojačanih kompozita u Boeing avionima



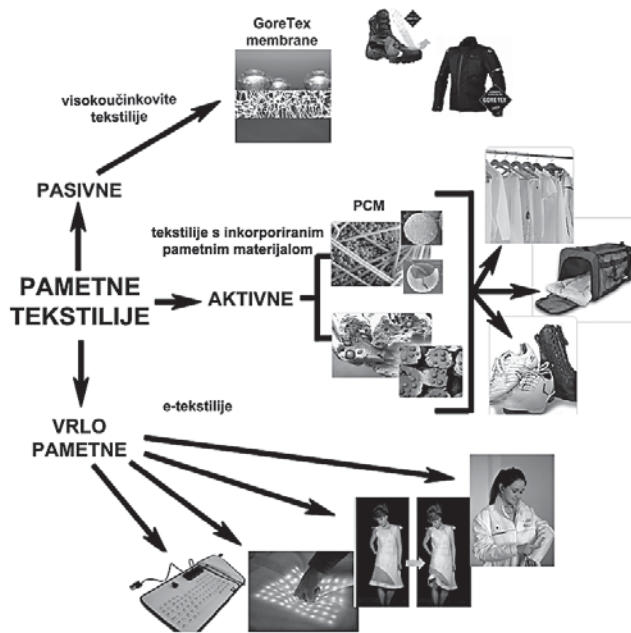
Sl.8 Mogućnosti recikliranja HP CF ojačanih kompozita

pozitnih struktura, vodeći se pri tome težnjom da reciklirana HP ugljikova (CF) vlakna maksimalno očuvaju svoja ishodišna svojstva kako bi se mogla ponovno upotrijebiti u kompozitnim materijalima za izradu zrakoplova [25, 37, 38]. Kao rezultat njihovih napora i interdisciplinarnih istraživanja koja su napravljena u suradnji s vodećim sveučilištima poput North Carolina State University (SAD) i Nottingham University (UK) te vodećim tvrtkama u području recikliranja kao što su Milled Carbon Ltd (UK) i Adherent Technologies Inc (SAD), definirani su modeli recikliranja HP ugljikovim vlaknima ojačanih kompozitnih struktura koje se koriste u izradi zrakoplova, sl.8. Recikliranje FRC-a iz zrakoplova je dvostupanjski postupak, sl.8, gdje se

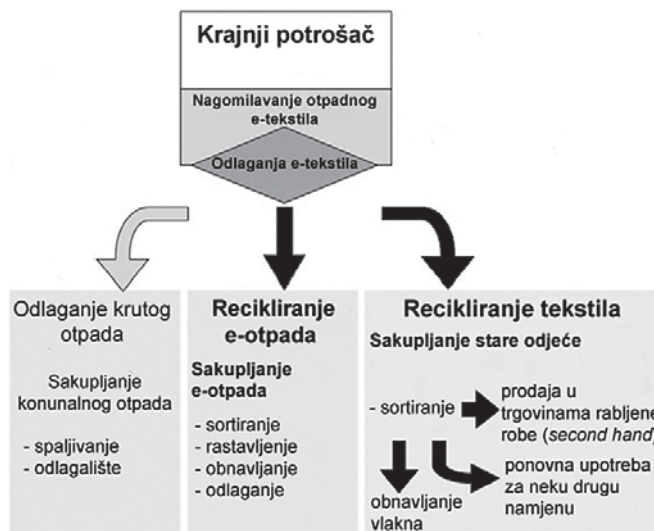
u prvom koraku mehanički odvajaju FRC, sl.8.a, od drugih materijala koji su korišteni u konstrukciji zrakoplova, dok se u drugom koraku oporavljaju HP CF vlakna čija je kvaliteta dovoljno dobra da se mogu ponovno upotrijebiti kao sirovina u izradi FRC-a za potrebe zrakoplovne, automobilske, sl.8.b, ili neke druge industrije koja koristi FRC poput npr. elektroničke, gdje se reciklirana CF vlakna mogu iskoristiti za izradu kućišta mobilnih telefona i prijenosnih računala, sl.8c i d [38].

### 3. Pametne tekstilije i problem njihovog recikliranja

Pametni materijali zajednički je naziv za različite vrste materijala kojima je svojstveno da mogu osjetiti neki



Sl.9 Pametne tekstilije



Sl.10 Model recikliranja e-tekstilija

vanjski podražaj ili stimulans (mehanički, termički, kemijski, električni, magnetni i sl.) i promjenom svojih svojstava, izgleda ili strukture odgovoriti na takav podražaj [39-41]. Analogijom, pametne, a često u žargonu nazvane i inteligentne tekstilije, sl.9, su različite tekstilije koje osjećaju vanjski podražaj i odgovaraju na njega, a ovisno o načinu reagiranja mogu se podijeliti u sljedeće skupine [40]: pasivne - koje mogu samo osjetiti vanjske uvjete (tj. visokoučinkovite tekstilije); aktivne - koje osjećaju i reagiraju (odgovaraju) na vanjske

uvjete (tekstilije s inkorporiranim pametnim materijalom); vrlo pametne ili inteligentne tekstilije - koje osjećaju vanjski stimulans, reagiraju na njega, ali se i prilagođavaju vanjskim uvjetima prema unaprijed programiranim načinima (e-tekstilije).

Gledano u kontekstu održivog razvoja, pametne/inteligentne tekstilije u idealnom slučaju ne bi smjele imati negativan utjecaj na okoliš, trebale bi generirati obnovljive izvore energije, same po sebi biti oporabive i/ili biorazgradljive. Međutim, kao i u većini

slučajeva praksa i stvarnost su daleko od idealnog. Trenutačno su istraživači više okupirani problemima gdje, kako i koji pametni materijal inkorporirati u tekstiliju i proizvesti tržišno tražen i cijenjen visokosofisticirani tekstilni proizvod ciljane namjene nego, kako ga po isteku njegova životnog vijeka adekvatno zbrinuti ili reciklirati. Ipak, budući da se radi o proizvodima čija količina iz godine u godinu značajno raste, nužno je usmjeriti napore i u domenu recikliranja pametnih tekstilija to više što je vrlo malo istraživanja napravljeno u tom području [42-44].

Kompleksnost problematike recikliranja inteligentnih tekstilija, sl.10, najbolje možda dolazi do izražaja kod e-tekstilija ako se ima na umu da su iste ostvarene kroz sinergiju konvencionalnih tekstilnih materijala s elektroničkim komponentama i/ili uređajima koji se u većoj ili manjoj mjeri koriste i u svakodnevnom životu, a koji su ugrađeni ili pridodani u konvencionalni tekstilni proizvod [42].

Trenutno ne postoje tehnike i načini recikliranja tekstilija s integriranim elektroničkim komponentama pa se može pretpostaviti da glavina odbačenih e-tekstilija završava na odlagalištima komunalnog otpada i tako potencijalno predstavlja opasnost za okoliš i zdravlje ljudi. Naime, komunalni otpad se u pravilu zbrinjava odlaganjem ili spaljivanjem, što zbog opasnih tvari iz elektroničkih komponentata nije primjeren način zbrinjavanja e-tekstilija [45, 46]. U slučaju e-tekstila postoje stoga dva potencijalno moguća modela recikliranja, sl.10. Po prvom, e-tekstilni proizvodi mogli bi se smatrati elektroničkim otpadom te bi se mogli reciklirati prema shemi za recikliranje elektroničkog otpada što je regulirano primjerice Europskom WEEE Direktivom (WEEE- Waste Electrical and Electronic Equipment) [47]. Međutim, pošto ova direktiva ne obuhvaća e-tekstilne proizvode postoji velika mogućnost da će mnoge specijalizirane kompanije koje se bave recikliranjem elektroničkog otpada odbiti recikliranje e-tekstila.



Druga mogućnost recikliranja e-tekstila je da se reciklira kao konvencionalni tekstil, tj. prodajom u dućanima s rabljenom robom (*engl. second hand*) dućanima ili usitnjavanjem i pretvorbom u novi proizvod. Međutim, prije provedbe takvog mehaničkog procesa recikliranja potrebno je ukloniti sve elektroničke komponente koje sadrže potencijalno opasne supstancije kako ne bi došlo do njihovog transfera u novi proizvod i negativnih posljedica na ljudsko zdravlje i okoliš [42, 48]. Uklanjanje elektroničkih komponenata produljuje i poskupljuje čitav postupak pa ni kompanije koje se bave recikliranjem tekstila nisu spremne za recikliranje e-tekstilija. Jasno je stoga da bez intervencije države ili zakonodavnih organa kroz novi zakon o gospodarenju otpadom i zaštiti okoliša, akumulirane otpadne pametne tekstilije predstavljaju potencijalnu opasnost za okoliš a ne doprinos održivom razvoju.

#### 4. Zaključak

Može se očekivati da će se u budućnosti, obrazovanjem i jačanjem ekološke svijesti, favoriziranjem održivih načina proizvodnje novih tekstilija uz istovremeno iznalaženje primjerenih modela recikliranja tekstilija smanjiti tekstilni otpad, uštedjeti energija, očuvati okoliš i zdravlje ljudi. Da bi se to ostvarilo, nužno je u projektiranje i dizajn novih tekstilija ugraditi principe ekodizajna ili tzv. zelenog dizajna (dizajn za recikliranje i dizajn iz recikliranog) koji ima za cilj smanjenje utjecaja na okoliš novo dizajniranog i projektiranog proizvoda smanjenjem energije i novih sirovina potrebnih za njegovu proizvodnju, ali i otpada koji se generira na kraju životnog ciklusa takvog proizvoda. Iako su dizajneri, inženjeri i proizvođači novih tekstilija u svom radu vođeni u prvom redu težnjom za stvaranjem tekstilija koje će naći svoje mjesto na tržištu i dobro se prodavati sutra, važno je da imaju na umu da je na njima i odgovornost kako zbrinuti takve tekstilije prekosutra.

#### Literatura:

- [1] Wilson A.: At key industry events in Europe this fall, "Sustainability" dominated agendas, *International Fiber Journal* 25 (2011) 12, ISSN 1049-801X 1-123
- [3] CIRFS: Statistical Year Book 2011, dostupno na <http://www.cirfs.org>, od 01.10. 2012.
- [4] Čunko R.: Tekstilije - važna komponenta u suvremenoj proizvodnji automobila, *Tekstil* 55 (2006.) 6, 279-290
- [5] Čunko R., K. Varga: Primjena keramike za dobivanje tekstilija visokih svojstava, *Tekstil* 55 (2006.) 6, 267-278
- [6] Firšt Rogale S. et al.: Constructing a Prototype of an Intelligent Article of Clothing with Active Thermal Protection /Realizacija prototipa inteligentnog odjevnog predmeta s aktivnom termičkom zaštitom, *Tekstil* 56 (2007.) 10, 593-609/610-626
- [7] Šelaj A. et al.: Application of Nickel- Titanium alloys (NiTi-NOL) in smart textiles and clothes / Primjena slitina nikla i titanija (NiTi-NOL) u pametnim tekstilijama i odjeći, *Tekstil* 60 (2011.) 4, 123-131/132-141
- [8] Council Directive 1999/31/EC on landfill of waste
- [9] Council Directive 2008/1/EC concerning integrated pollution prevention and control
- [10] Tong L., P.A. Mouritz, K.M. Bannister: 3D fibre reinforced polymer composites, Elsevier, ISBN 0-08-043938-1, Oxford, (2002)
- [11] Shent H., R.J. Pahg, E. Forssberg: A review of plastic waste recycling and the flotation of plastic, *Resources, Conservation and Recycling* 25 (1999) 2, 25-109
- [12] Joshi S.V. et al.: Are natural fiber composites environmentally superior to glass fibre reinforced composites?, *Composites – Part A*, 35 (2004) 9, 371-376
- [13] Satyanarayana K.G., G.Z. Arizaga, F. Wypych: Biodegradable composites based on lignocellulose fibers – an overview, *Progress in Polymer Science* 34 (2009) 11, 982-1021
- [14] Goodship V.: Managment, recycling and reuse of waste composites, Woodhead Pub. Ltd., ISBN

- 978-1-84569-462-3, Oxford, (2010)
- [15] Wang Y.: Recycling of textiles, Woodhead Pub. Ltd., ISBN 978-1-85573-752-9, Cambridge, (2005)
- [16] Hawley J.: System analysis of textile recycling, Proceedings of the 9<sup>th</sup> Annual Conference on Recycling of Fibrous, Textile and Carpet Waste, Georgia, May 2004, University of Missouri, SAD, (2004)
- [17] Hearle J.W.S.: High-performance fibres, Woodhead Publishing Ltd., ISBN 0-8493-1304-X, Cambridge (2011)
- [18] Sikkema D.J., M.G. Northolt, B. Pourdeyhimi: Assessment of New High-Performance Fibers for Advanced Applications, *MRS Bulletin* 28 (2003) 8, 579-584
- [19] Yang H.H.: Kevlar Aramid Fiber, John Wiley & Sons, ISBN 0-4719-3765-7, Chichester, (1993)
- [20] Scott R.A.: Textiles for protection, Woodhead Pub., ISBN 978-1-85573-921-5, Cambridge, (2005)
- [21] Dragčević Z., E. Vujasinović, Z. Orehovec: Protective Clothing against Nuclear, Biological and Chemical Threats in Functional Protective Textiles (Ed. S. Bischof Vukušić), University of Zagreb, Faculty of Textile Technology, ISBN-978-953-7105-45-1, Zagreb, (2012.), 329-374
- [22] DuPont: KEVLAR®, Material Safety Data Sheet, dostupno na: <http://msds.dupont.com/msds>, od 20.11.2012.
- [23] Teijin: Reduce, reuse, recycle – the Teijin Aramid way, dostupno na: <http://www.teijinaramid.com/2012/06/reduce-reuse-recycle-the-teijin-aramid-way/>, od 19.11.2012.
- [24] Vujasinović E.: Recycling in the Area of High-Performance Textile Materials & Protective Clothing in Functional Protective Textiles (Ed. S. Bischof Vukušić), University of Zagreb, Faculty of Textile Technology, ISBN-978-953-7105-45-1, Zagreb, (2012.), 439-466
- [25] ...: Next generation recycling machines, dostupno na: <http://www.bio-based.eu>, od 19.11.2012.
- [26] Kojima F., A. Furukawa: Recycling of resin mateix composite

- materials, *Advances in composite materials* 6 (1997) 7, 215-225
- [27] ...: Recycling Advanced Composites, dostupno na: <http://www.cwc.org/industry/ibp953rpt.pdf>, dana: 22.11.2012.
- [28] Kennerley K. et al.: The properties of glass fiber from the thermal processing of scarp termoset composites, *Journal of vinyl additive technology* 3 (1997) 1, 58-63
- [29] Baille C.: Green Composites – polymer composites and the environment, Woodhead Pub. Ltd. ISSN 1855737396, Cambridge, (2004)
- [30] Williams P.T.: Recycling tricky materials using pyrolysis, *Materials Works* 11 (2003) 1, 24-26
- [31] Vernyi B.: Recycling composite materials, *Encyclopedia of composites*, VCH Publishing ISBN 0-89573-732-9, New York, (1990), 24-27
- [32] ...: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, Wiley – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, ISBN 9873527306732, Weinheim, (2005)
- [33] Council Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles
- [34] Reuter M.A. et al.: Fundamental limits of the recycling of end-of-life vehicles, *Materials engineering* 19 (2006) 4, 433-445
- [35] Joshi S.V. et al.: Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?, *Composites-Part A*, 35 (2004) 9, 371-376
- [36] Mohanty A.K., M. Misra, L.T. Drzal (ur.): *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, Taylor & Francis, ISBN 0-8493-1741-X, Boca Raton, (2005)
- [37] Carberry W.: Airplane recycling efforts benefit boeing operators, *Boeing AERO Magazine*, (2008), 6-13
- [38] Carberry W., P. Yount, L. Harmon: *Aircraft & Composite Recycling*, Boeing environmental technotes, 12 (2007) 1, 1-4
- [39] Chao G.: *Smart clothing-technology and application*, CRC Press, ISBN 978-1-4200-8852, Boca Raton, (2010)
- [40] Tao X.: *Smart fibres, fabrics and clothing*, Woodhead Pub. Ltd., ISBN 0-8493-1172-1, Cambridge, (2000)
- [41] Addington D.M., D.L. Schodek: *Smart Materials and New Technologies*, Architectural Press, ISBN 0-7506-6225-5, SAD, (2005)
- [42] Köhler A.R., L.M. Hilty, C. Bakker: Prospective Impacts of Electronic Textiles on Recycling and Disposal, *Journal of Industrial Ecology* 15 (2011) 4
- [43] Kumar A. et al.: Smart polymers: Physical forms and bioengineering applications, *Progres in Polymer Science* 32 (2007), 1205-1237
- [44] Tatano T. et al.: Shoe manufacturing wastes: Characterisation of properties and recovery options, *Resources, Conservation and Recycling* 66 (2012), 66-75
- [45] Jang Y.C., T.G. Townsend: Leaching of lead from computer printed wire boards and cathode ray tubes by municipal solid waste landfill leachates, *Environmental Science & Technology* 37 (2003) 20, 4778-4784
- [46] Gullett B.K., W.P. Linak: Characterization of air emissions and residual ash from open burning of electronic wastes during simulated rudimentary recycling operations, *Journal of Material Cycles and Waste Management* 9 (2007), 69-79
- [47] Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE), *Official Journal of the European Union* 197
- [48] McCann J., D. Bryson: *Smart clothes and wearable technologie*, Woodhead Publishing Ltd. ISBN 978-1-84569-357-2, Cambridge, (2009)



## SUMMARY

### Recycling of high performance and smart textiles

*M. Pavunc, E. Vujasinović*

Textile fibre production has been increasing in the last ten years from 59 to 85 million tons a year. The increase in fibre production, on one hand, is the result of global population growth and living standard improvement, and on the other hand, the result of the fact that today industrialized and developed societies use textile for a wide range of products other than clothing such as different types of vehicles, sports and protective equipment, and the textile fibers, like fibre reinforced composites, are increasingly being used as structural materials (geomembrane, reinforced concrete etc.). The consequence of all this is the textile waste increase and the need for its adequate disposal. Although the best way of textile waste disposal is recycling, in reality, the appropriate disposal of textile waste is much more complex than it seems to be. This applies especially to the advanced textile engineering or structure materials based on textiles such as high performance (HP) and smart materials (SM). This paper gives an overview of the possibilities of recycling and reuse of high performance and smart textiles the recycling of which is extremely complex, difficult, expensive and sometimes impossible. It is expected that in the future, through education and environmental awareness, sustainable production of new textiles together with finding adequate models of their recycling will reduce textile waste, save energy, preserve the environment and human health. In order to achieve this it is necessary that the principles of eco-design or green design (design for recycling and design from recycling) are incorporated in design of modern textiles.

**Key words:** recycling, high performance fibers, fibre reinforced composites, smart textiles

*University of Zagreb, Faculty of Textile Technology*

*Department of Materials, Fibres and Textile Testing*

*Zagreb, Croatia*

*e-mail: marijana.pavunc@ttf.hr*

*Received December 8, 2012*

### Recycling von Hochleistungs- und intelligenten Textilien

Die Textilfaser-Produktion hat in den letzten zehn Jahren von 59 auf 85 Millionen Tonnen pro Jahr zugenommen. Einerseits muss man die Zunahme der Faserherstellung auf das globale Bevölkerungswachstum und das Lebensstandard, und andererseits auf die Tatsache zurückführen, dass heute industrialisierte und entwickelte Gesellschaften Textilfasern und Textilmaterialien außer für die Kleidungsherstellung auch für eine breite Palette von anderen Produkten, wie z.B. verschiedenen Typen von Fahrzeugen, Sport- und Schutzausrüstung und Sportgeräten verwenden. Textilfasern werden zunehmend, als verstärkte Faserverbundwerkstoffe, als Baumaterialien (Geomembranen, Stahlbeton, usw.) verwendet. Die Folge davon ist die Zunahme von Textil-Abfällen und die Notwendigkeit für eine angemessene Entsorgung. Obwohl der beste Weg der Textil-Entsorgung das Recycling ist, ist in Wirklichkeit die sachgerechte Entsorgung von Textil-Abfällen sehr viel komplexer als es zu sein scheint. Dies gilt insbesondere für die fortgeschrittene Textiltechnik oder auf Textilien beruhende Strukturmaterialien wie Hochleistungs-(HP) und intelligente Materialien (SM). Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Möglichkeiten des Recyclings und der Wiederverwendung von Hochleistungs- und intelligenten Textilien, deren Recycling extrem komplex, schwierig, teuer und manchmal unmöglich ist. Zukünftig wird erwartet, dass durch Bildung und Umweltbewusstsein, nachhaltige Produktion von neuen Textilien zusammen mit der Gewinnung geeigneter Modelle ihrer Recycling textile Abfälle reduziert, Energie gespart, die Umwelt und menschliche Gesundheit geschont werden. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, dass die Prinzipien des Öko-Designs oder des Grün-Designs (Design für Recycling und Design aus Recycling) in das Design von modernen Textilien integriert werden.