

doc. dr. **Tatjana Rijavec**, univ. dipl. inž.
 doc. dr. **Vili Bukošek**, univ. dipl. inž.
 Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta,
 Oddelek za tekstilstvo, Snežniška 5; SI-1000 Ljubljana;
 e-pošta: tatjana.rijavec@ntftex.uni-lj.si, vili.bukosek@ntftex.uni-lj.si

Nova vlakna za 21. stoletje

Članek obravnava najvidnejše razvojne dosežke na področju vlaken v zadnjih nekaj letih: nanovlakna, kemično pajkovo svilo, gensko spremenjen bombaž, vlakna iz polimlečne kisline, inteligentna vlakna, vlakna z negativnim Poissonovim številom, sojina vlakna, vlakna iz ptičjega perja in nova poliestrska vlakna z latentno elastičnostjo.

Ključne besede: nanovlakna, kemična pajkova svila, BioSteel, Bt bombaž, polimlečna kislina, PLA, sojina vlakna, vlakna iz ptičjega perja, optična vlakna, vlakna z negativnim Poissonovim številom, Corterra, Sorona, Securus, polibutilen tereftalat, PBT, politrimetilen tereftalat, PTT, elasterell-p

New Fibres for 21st Century

The article deals with the most prominent achievements in the field of fibres in the last years: nanofibres, man-made spider silk, genetically modified cotton fibres, fibres from polylactic acid, intelligent fibres, fibres with negative Poisson number, soyabean fibres, fibres from bird's feathers and new polyester fibres with latent elasticity.

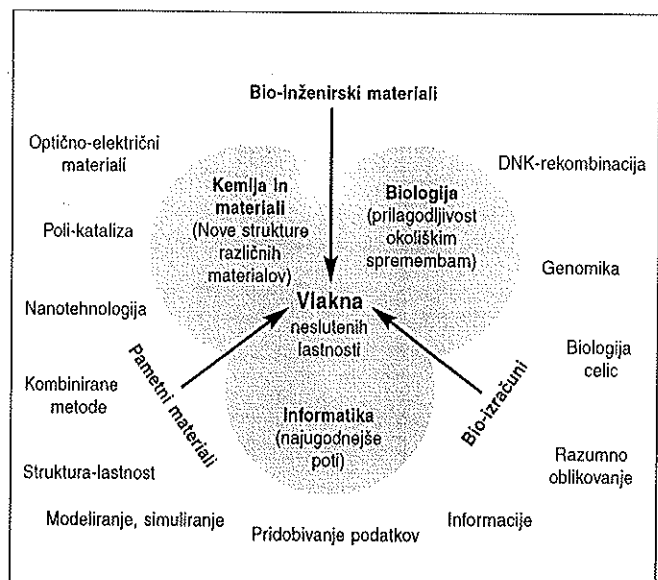
Key words: nanofibres, man-made spider silk, BioSteel, Bt cotton, polylactic acid, PLA, soyabean fibres, feather fibres, optic fibres, auxetic fibres, Corterra, Sorona, Securus, polybutylene terephthalate, PBT, polytrimethylene terephthalate, PTT, elasterell-p

1.0 UVOD

Razvoj novih in izboljšanje znanih vlaken v zadnjem desetletju temelji na razvoju novih tehnologij, od genskega inženiringa, biotehnologije, nanotehnologije, mikroelektronike in informacijske tehnologije, ki skupaj z interdisciplinarnim pristopom znanosti (slika 1) ustvarjajo vlakna novih možnosti.

Prva vlakna, ki so nastala na podlagi novih tehnologij, so že razvita, nekatera med njimi so tudi že na tržišču: nanovlakna iz različnih surovin, gensko spremenjena naravna vlakna (Bt-bombaž), kemična vlakna iz naravno obnovljivih surovin (poliestrska vlakna iz politrimetilentereftalata in polimlečne kisline), inteligentna vlakna, vlakna z negativnim Poissonovim številom idr.

Nekateri stranski proizvodi drugih tehnologij, kot je npr. živilska industrija, postajajo surovinska baza za nova vlakna (sojina vlakna, vlakna iz ptičjega perja).



Slika 1: Interdisciplinarnost znanosti bo omogočila razvoj novih vlaken

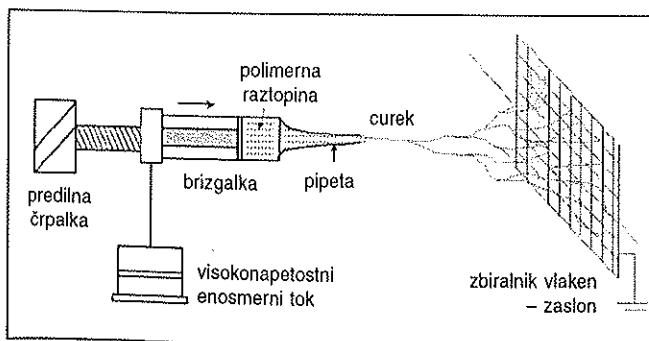
2.0 NANOVLAKNA

Nanotehnologija predstavlja napredno tehnologijo, ki bo v prihodnosti pomembno vplivala na razvoj celotne tekstilne tehnologije ter na vrsto in uporabnost izdelkov. Po pričakovanjih bo omogočala manjšo porabo energije, povečanje učinkovitosti in večjo čistost tekstilne proizvodnje. Vpliv in uporaba nanotehnologije bo zlasti velika na področju proizvodnje vlaken in barvil. Z uvedbo novih postopkov na površini tekstilij bo omogočila njihovo večfunkcionalnost s kombiniranjem različnih lastnosti: vodoodbojnosti, protibakterijske zaščite, zaščite proti plesnim, nanovlakna bomo uporabljali za senzorje in kamuflažo idr.

Že v naslednjih dveh do treh letih naj bi uporaba nanotehnologije na področju proizvodnje nanovlaken in tekstilne tehnologije dosegla 15 milijard \$ neto prometa [1].

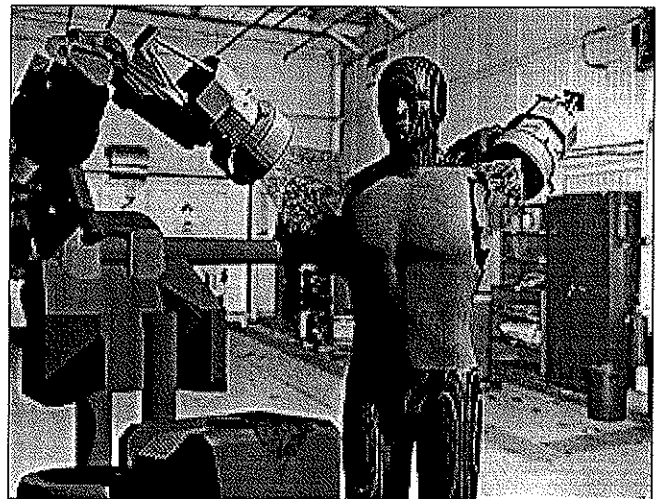
Nanovlakna [2, 3, 4] so ultrafina vlakna s premerom pod 100 nanometrov do nekaj 10 nanometrov. Do sedaj najfinejša mikrovlakna dosegajo premer pod 10 mikrometrov do nekaj mikrometrov in so po finosti primerljiva z degumirano pravo svilo; konvencionalna vlakna, na primer bombaž, volna in različna druga naravna ter kemična vlakna pa so premera nad 10 mikrometrov do nekaj 100 mikrometrov. Pri ekstremno finih nanovlaknih pridejo posebno do izraza velika specifična površina, gibkost in natezna trdnost vlaken. Te lastnosti se lahko učinkovito izkoristijo za filtracijo, v biomedicini, za zaščitni tekstil, jadra, nanokompozite in na področjih elektronike in optike. Nanovlakna omogočajo razvoj materialov, ki bodo do 10-krat močnejši in trpežnejši od jekla pri enaki masi.

Nanovlakna izdelujejo pretežno po postopku elektrospredanja (*electrospinning*) (sliki 2 in 3), ki je poceni in enostaven. Polimerno tekočino (raztopino ali talino) v cevki izpostavijo visoki električni napetosti. Ko je električna napetost polimerne tekočine dovolj visoka, da preseže njeno površinsko napetost, kovinska šoba ali igla brizgne tekoči curek proti kovinskemu zbiralniku, ki je elektroda nasprotnega naboja, in kjer se curek razprši v množico finih in najfinejših vlakenc. Med potjo so električno nabiti tekoči curki izpostavljeni upogibnim in razteznim deformacijam, zaradi česar se



Slika 2: Shema postopka elektrospredanja

stanjšajo v fina vlakna nanometrskih prečnih dimenzij. Za izdelavo kakovostnih nanovlaken stalnega premera in ravne, gladke površine je potrebno optimirati tehnološke parametre, to je: izbiro primerne polimera (vsi polimeri niso primerni za elektrospredanje nanovlaken), optimalna koncentracija in temperatura predilne tekočine ter električna napetost. Postopek elektrospredanja pa z izbiro ustreznih tehnoloških parametrov omogoča tudi neposredno izdelavo poroznih vlaken.



Slika 3: Elektrospredanje z neposredno izdelavo oblčila s pomočjo lutke

Po postopku elektrospredanja se lahko izdelujejo nanovlakna iz polimerov, ki so topni v hlapnem topilu, in tudi iz polimernih talin. Tako izdelana nanovlakna se po morfologiji in lastnostih precej razlikujejo od mikrovlaken in konvencionalnih vlaken.

Nanovlakna so zaradi velike specifične površine, nizke gostote in visoke poroznosti zelo zanimiva za tekstilne namene. Lastnosti, ki jih omogočajo mikrovlakna, neprepustnost za vodo in veter, nanovlakna prekašajo.

Toray Industries Inc. iz Tokia je razvil poliamidno nanofilamentno prejo Miramatte skupne dolžinske mase 44 dtex z več kot 1,4 milijona nanofilamentov, finoče posameznih filamentov okrog 3 ntex in premera posameznih filamentov 20–200 nm. Z uporabo teh vlaken je Toray izdelal poliamidno tekstilijo, ki ima več kot 1.000-krat večjo površino, kot jo omogočajo konvencionalna poliamidna vlakna. Nova tekstilija iz te preje ima zato odlično vpojnost neprijetnih vonjev in 2–3-krat večjo sposobnost absorpcije vlage kot običajna poliamidna tekstilija, celo večjo kot bombaž! Zelo pomembno pa je tudi dejstvo, da imajo nanopoliamidna vlakna veliko sposobnost absorpcije vlage na površini (1.000-krat večjo kot konvencionalna poliamidna vlakna, ki imajo zanemarljivo sposobnost površinske absorpcije vlage in jo vežejo praktično v celoti v notranjosti vlaken. Razmerje med površinsko vezano vlago in v notranjosti vlaken vezano vlago je za poliamidna vlakna 1/1.000.)

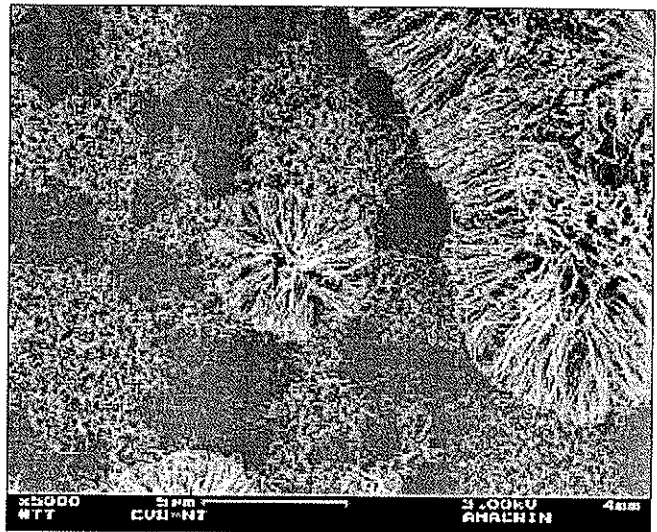
Vlakna Miramatte, ki jim dodajo trikrat večjo količino anorganskih delcev kot standardnim poliamidnim vlaknom, so neprosojna in neprepustna za UV svetlobo, zaradi česar so primerna za izdelavo zelo tankih tkanin. Anorganski delci niso razporejeni le v notranjosti vlaken, ampak tudi površinsko. To jim da posebno neenakomerno površino z značilnim otipom, ki spominja na otip finega ptičjega perja. Vlakna bodo uporabna za oblačila in različne tipe filtrov. Toray načrtuje trženje tekstilij iz PA nanovlaken v naslednjih 2–3 letih [5].

Na novi patentirani tehnologiji za izdelavo specialnih vlaken bo z nadzorom nanostrukture, to je molekulske orientacije na nanonivoju z optimiranjem pogojev tečenja, Toray raziskal možnosti izdelave nanofilamentnih prej iz poliestra (PES), polipropilena (PP) in novih polimerov, kot je polimlečna kislina (PLA) [6].

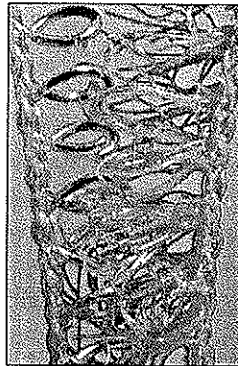
Celulozna nanovlakna za industrijske vlaknovine za suho in mokro filtracijo, za zaščitna oblačila, za poljedeljske izdelke kot so absorbenti pesticidov in gnojil ter za biorazgradljive kompozite, razvijajo na ameriški Cornell University; izdelavo nanovlaken premera pod 100 nm visoke trdnosti omogoča postopek elektropredenja z uporabo novih topil za celulozo; surovina so lahko tudi odpadki bombažnih predilnic [7, 8].

Nanos nanovlaken na tekstilno blago (*nanocoating*) omogoča 100-odstotno neprepustnost za vodo. Ameriško podjetje Nano-Tex je z nanašanjem nanovlaken (nanoviskerjev) na bombažno oziroma sintetično blago doseglo odbojnost tekstilnih materialov za vodo oziroma olja, ki pa so prepustni za vodno paro, so odporni proti drgnjenju in se ne mečkajo. Za nanos potopijo blago v vodno raztopino nanovlaken, ki se vežejo na blago. Nad kosmičasto nanovlakensko površino blaga nastane zračna blazina, ki odbije vodo ali druge tekoče nečistoče. Mehanizem spominja na imitacijo odboja vode s površine gosjega perja [9].

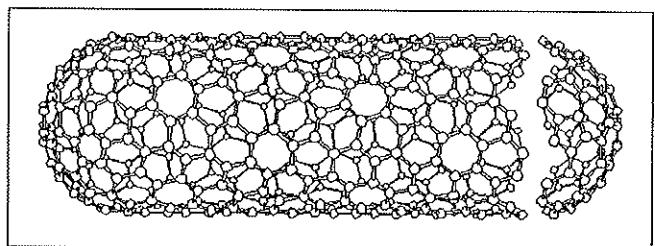
Ogljikova nanovlakna so pomembna za različna področja uporabe – od filtracije, izdelave kompozitov, za zaščitna oblačila idr. Otip ogljikovih nanovlaken spominja na bombaž, le barva je črna. Trdnost ogljikovih nanovlaken je lahko za več 100-krat višja od trdnosti jekla. Odkritje postopka izdelave votlih ogljikovih nanovlaken (*carbon nanotubes*) (slika 4) leta 1991 je pospešilo razvoj ogljikovih nanovlaken. Votla ogljikova nanovlakna namenjajo za polnila v kompozitih za izboljšanje mehanskih lastnosti, za električne vodnike, toplotne vodnike in tudi za super močna sprijemna zapenjala (velcro, slika 5) [10]. Votla ogljikova nanovlakna so ekstremno fina z izrednimi mehanskimi lastnostmi, visoko električno prevodna, so visoko toplotno prevodna in kemično stabilna, kar je posledica kemične sestave in popolne heksagonalne urejenosti kovalentno vezanih ogljikovih atomov. Ogljikovi atomi so urejeni v koncentrično oblikovane grafitne plasti (slika 6).



Slika 4: Votla ogljikova nanovlakna



Slika 5: Sprijemna (velcro) zapenjala iz nanovlaken



Slika 6: Struktura votlega ogljikovega nanovlakna

3.0 RAZVOJ VLAKEN Z UPORABO GENESKE TEHNOLOGIJE

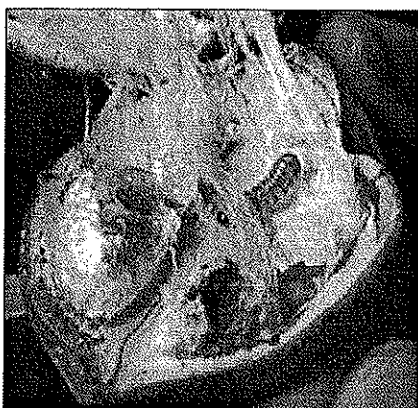
3.1 Gensko spremenjen bombaž

V 80-ih letih prejšnjega stoletja je ameriška multinacionalna Monsanto začela z gensko tehnologijo razvijati bombaž, ki naj bi bil odporen proti škodljivcem [11] (slika 7). Gensko spremenjeni bombaž, Bollgard bombaž (Bt bombaž), so dobili z uvedbo insekticidnega proteina gena *cry1Ac* iz bakterije *Bacillus thuringiensis* v bombažno seme za povečano odpornost proti škodljivcem. *Bacillus thuringiensis* je aerobna gram pozitivna bakterija v zemlji, ki je sposobna proizvajati štiri vrste toksinov v kristalni proteinski obliki, med katerimi je delta-endotoksin najpomembnejši. *B. thu-*

ringiensis je bil leta 1961 v ZDA registriran kot mikrobnno pesticidno sredstvo. Z razvojem genskega inženiringa je bilo možno izolirati dejavni gen in prenesti sekvence tega gena v genski material drugih organizmov, tudi bombaža. Gensko spremenjeni bombaž vsebuje v genomu *cryIAC* gen in je sposoben sam proizvajati kristalni toksični protein. Bombaževčeva uš ali molj pri požiranju delov bombaževca vnese v telo tudi omenjeni toksin, ki povzroči njeno smrt. Toksin ni strupen za čebele, zelene mrežekrilce in pikapolonice. Rastlino zavaruje pred specifičnimi vrstami gosenic, ne pa pred listnimi ušmi.

Za vzgojo Bt bombaževca je potrebno za okrog 50 % manj pesticidov, s čimer je zagotovljeno manjše onesnaževanje zemlje, vode in zraka. Manjša poraba pesticidov bo dolgoročno vplivala tudi na manjše alergične reakcije kmetovalcev [12]. Pridelek Bt bombaža je za povprečno 10–15 % do celo 25–30 % večji od gensko nespremenjenega bombaža (Non-BT) pri istem hibridu.

Bt bombaž se zaradi manjše potrebe po pesticidih in večjega pridelka zelo dobro uveljavlja [13, 14]. Od leta 1996 ga sejejo v ZDA, Argentini, Avstraliji, na Kitajskem, v Mehiki in Južni Afriki. Svetovni delež setvenih površin z Bt bombažem je bil leta 1996 le 12 %, leta 1998 že 23 %, leta 2000 pa 39 %.

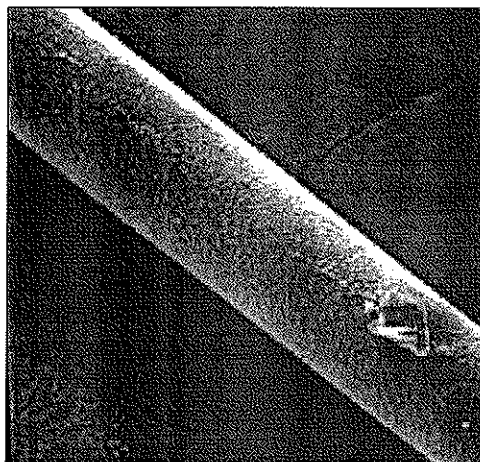


Slika 7: Odprti bombažni plod z gosenico bombaževčevega molja *Pectinophora gossypiella*

3.2 Kemična pajkova svila BioSteel®

V kanadski firmi Nexia Biotechnologies Inc. in US Army Soldier Biological Chemical Command so leta 2002 uspeli razviti prvo kemično pajkovo svilo (*man-made spider silk*), ki so jo zaščitili z blagovno znamko BioSteel® (slika 8) [15, 16, 17, 18]. Industrijski postopek predenja vlaken BioSteel razvija Acordis Speciality Fibres Ltd., Coventry iz Velike Britanije.

Tehnologija izdelave kemične pajkove svile temelji na genski tehnologiji rekombinacije pajkove svile, tako da so segment DNA za beljakovine pajkove svile uvedli v genski material celic mlečnih žlez koze. Mlečne celice so prevzele gene za pajkovo svilo in začele proizva-



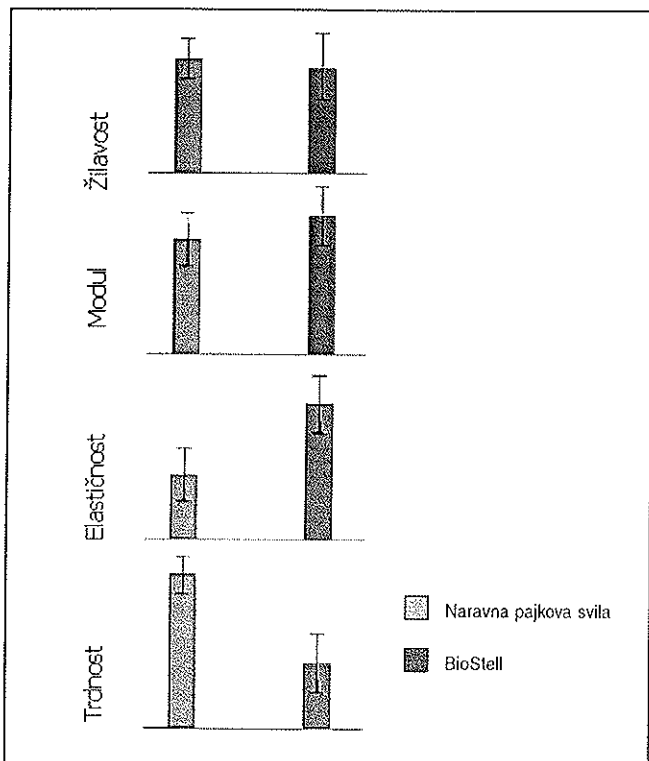
Slika 8: Vzдолžni videz vlakna BioSteel

jati zelene proteine v mleku. Kasneje so z metodo *in vitro* vbrizganja uvedli individualne pajkove gene v celico kozjega jajčeca. Tako so dobili gensko spremenjeno kozo, katere mleko je vsebovalo beljakovine pajkove svile. Iz vodne raztopine rekombiniranih beljakovin pajkove svile so izdelali vlakna, primerljivega modula elastičnosti in žilavosti, kot je naravna pajkova svila, a so bolj elastična ter za okrog polovico nižje trdnosti (slika 9). Poleg genske rekombinacije pajkove svile vključujejo pri proizvodnji vlaken tudi modifikacije v predilnem procesu. Tako dobijo vlakna neenakomerne vzdolžne debeline in tudi z različnimi dodatki.

Vlakna BioSteel so visokotrдна in raztegljiva vlakna z modulom elastičnosti 40–45 GPa, so žilava, nizke gostote in netopna v vodi. Stabilizirana so proti gorenju in UV svetlobi. V nateznem poskusu se pri začetnem obremenjevanju obnašajo toga, ker imajo visok modul elastičnosti, podobno kot aramidna vlakna, toda tik pred polziščem postanejo zelo raztegljiva in zniža se jim upor proti raztezanju; končno nastopi pretrg pri raztezk, ki je primerljiv s pretržnim raztezkom poliamidnih (PA 6.6) vlaken.

Poleg izjemnih mehanskih lastnosti ne gre pozabiti, da so vlakna BioSteel biorazgradljiva. Vse te lastnosti skupaj z biodružljivostjo so dobrodošle pri uporabi vlaken BioSteel v medicini za fine šive, kirurške mreže, umetne kite in vezi (izdelki BioSteel-M). Ocenjujejo, da se bo z BioSteelom kirurško šivanje izboljšalo in da bodo šivi varnejši v primerjavi s sedanjimi iz svile, poliamidnih oziroma polipropilenskih vlaken, a istočasno dovolj trdni in brazgotine ran bodo manjše.

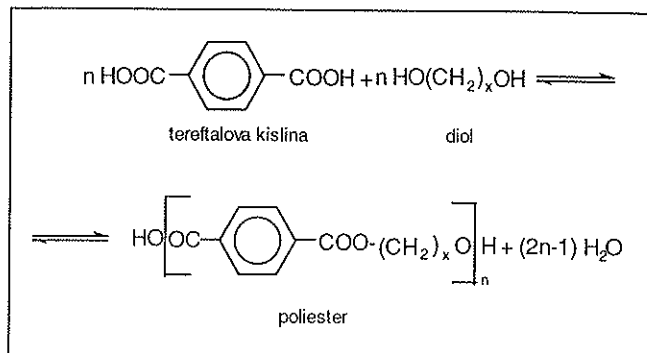
Za tehnične namene je potrebno vlakna BioSteel dodatno zaščititi, da se njihove lastnosti dalj časa ohranijo nespremenjene. V ta namen bodo vlakna BioSteel vgrajevali v ustrezne matrice, ki jih bodo varovale pred nezaželenimi učinki iz okolja. Za ribiške mreže razvijajo dvokomponentna vlakna z jedrom iz vlaken BioSteel in plašča iz ksilana, ki bo zaščitil BioSteel pred vodo. Zaradi odlične žilavosti načrtujejo uporabo vlaken BioSteel tudi v vojaške namene za protibalistične oklepe.



Slika 9: Primerjava lastnosti naravne pajkove svile z BioSteelom

3.3 Corterra® in Sorona® poliestrska politrimetilentereftalatna vlakna

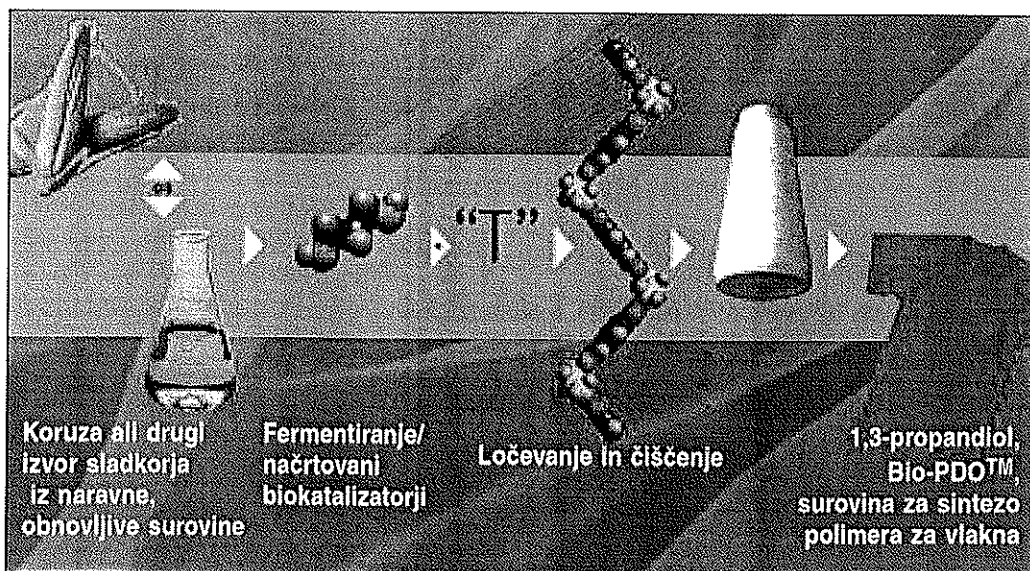
Poliestrska vlakna iz politrimetilentereftalata (PTT) so začeli proizvajati konec 90-ih let. Sinteza polimera je bila patentirana že leta 1941, vendar njegova proizvodnja ni bila možna zaradi dragega 1,3-propandiola, ki je osnovna surovina za PTT. Konec 90-ih let je Shell Chemicals razvil metodo za pridobivanje kakovostnega 1,3-propandiola s kontinuirnim hidriranjem in formiliranjem etilen oksida. Proces poteka pod pritiskom pri povišani temperaturi v mešanici etilen oksida, vodika in ogljikovega monoksida v topilu. Najprej nastane vmesni produkt 1,3 hidrosipropanol, ki ga pretvorijo v 1,3 propandiol. Le-ta v procesu polikondenzacije s čisto tereftalovo kislino daje polimer politrimetilentereftalat (slika 10), ki vsebuje tudi 2,5–3 % oligomerov, in sicer največ nehlapnega cikličnega dimera. Polimer PTT in vlakna iz njega proizvajajo pri Shell Chemicals pod blagovno znamko Corterra. Vlakna oblikujejo po postopku iz taline.



Slika 10: Sintezna reakcija poliestrov iz tereftalove kisline in diola: (Diol: $x = 2$ /etilenglikol/, $x = 3$ /1,3-propandiol/, $x = 4$ /1,4-butandiol/ Poliester: $x = 2$ /polietilentereftalat (PET) ali 2GT/, $x = 3$ /politrimetilentereftalat (PTT) ali 3GT/, $x = 4$ /polibutilentereftalat (PBT) ali 4GT.

Kemična odpornost Corterra vlaken je podobna poliestrskim vlaknom iz polietilentereftalata. Barvajo jih z disperzijskimi barvili brez carrierjev. Nekatere lastnosti so podane v preglednici 1 [19,20].

Corterra vlakna proizvajajo kot POY preje, na trgu so gladke, teksturirane, visokotrdne filamentne preje in predivo. Uporabljajo jih za oblačila za šport in rekreacijo, za preproge, za vlaknovine za notranjo opremo stanovanj in avtomobilov. Izdelki iz Corterra vlaken se odlikujejo po lahki negi, raztegljivosti, mehkoosti, prijetnem otipu in briljantnih barvah. Združujejo dobre lastnosti poliamidnih 6 vlaken (dobra elastična povratnost, podobno obnašanje pri gorenju) in poliestrskih vlaken iz PET (podobna kemična odpornost). Dobre elastične lastnosti so razlog za uveljavitev Corterra vlaken za opllašene preje, v katerih konkurirajo elastanskim prejam (Lycra), ker elastičnost razvijejo šele pri visokih temperaturah, na primer pri barvanju.



Slika 11: Biokemična sinteza 1,3 propandiola – Bio-PDO™

Preglednica 1: Primerjava lastnosti različnih PES vlaken: PTT, PET, PBT in elasterell-p

Lastnost	PTT	PET	PBT	Elasterell-p (T 400)
Gostota vlaken (g/cm ³)	1,35	1,39	1,32	1,36
Gostota amorfnih področij (g/cm ³)		1,335	1,286	
Gostota kristalinih področij (g/cm ³)		1,455	1,390	
Temp. steklastega prehoda (°C)	50	74	20–40	65
Tališče iz DSC (°C)	228–230	253–255	221–226	229
Temperatura termofiksiranja (°C)	160	177–188	182–188	160–177
Temperatura barvanja (°C)	100	125–130	100	100–130
Spec. pretržna napetost (cN/dtex)	2,29	3,795	2,38	3,35
Pretržni raztezek (%)*	41	16,5	37	27
Elastični raztezek (%)	27	21	28	37–68
Modul elastičnosti (cN/dtex)	13,24	42,36	16,42	35,3
Razkodranje (<i>yarn crimp extension</i>) (%)**	246	213	233	275
Oblika kodrov	neppravilna	neppravilna	neppravilna	pravilna, spiralna
Živahnost preje	se suka	se suka	se suka	mirna

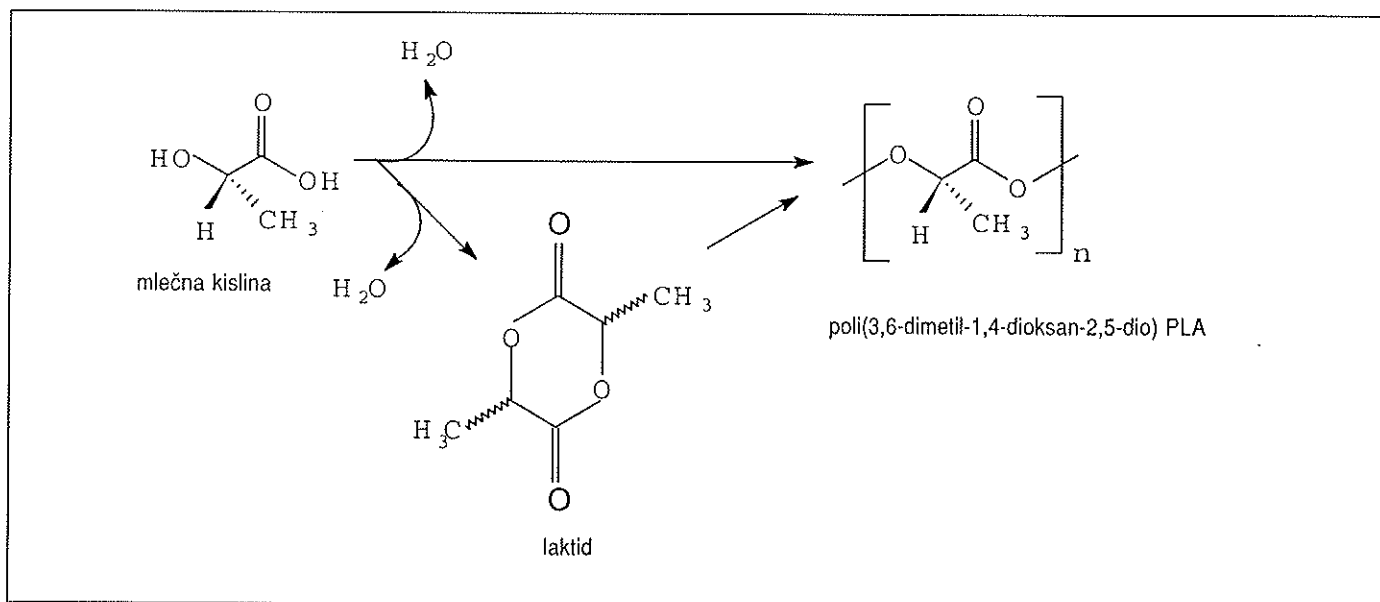
* predstavlja raztezek po razkodranju

** Razkodranje izmerjeno po ASTM D1774: Predeno finoče 5000 den so najprej obdelali pri vrenju, da so se razvili kodri. Nato so izmerili dolžino preje pri obremenitvi 2,5 g (L2,5). Siedilo je ciklično obremenjevanje predena 3-krat do mase, ki povzroči izravnane kodrov (do 1030 g), in merjenje te dolžine preje (L1030). Kodravost = $(L1030-L2,5)/(L2,5) \cdot 100$ (%).

DuPont razvija PTT polimer in vlakna pod imenom Sorona. V letu 2003 je proizvodnjo 1,3 propandiola (3GT) na bazi petrokemičnih surovin (nafte) začel zapirati in v letu 2004 začenja s tržno proizvodnjo 1,3 propandiola, proizvedenega z biokemično metodo fermentacije koruznega škroba, podobno kot je pri proizvodnji vina (slika 11). Biosintezo 1,3 propandiola je razvil DuPont v dolgotermnem sodelovanju z Genencor International. Monomer so patentno zaščitili z imenom Bio-PDOTM. Biokemična sinteza vključuje uporabo gensko spremenjenih mikroorganizmov, katerih encimi prevedejo koruzni škrob v 1,3-propandiol. Surovina za sintezo PTT je v tem primeru naravna, obnovljiva in ni več vezana na nafto [21].

3.4 Vlakna iz polimlečne kisline (PLA)

Mlečna kislina je naravna, biorazgradljiva organska snov, ki se nahaja v telesih živali, rastlin in mikrobov. Polimlečna kislina se kot taka ne nahaja v naravi, ampak jo industrijsko pridobivajo s polimerizacijo mlečne kisline. Mlečno kislino za sintezo polimlečne kisline pridobivajo iz gensko spremenjenih koruznih zrn (slika 12). PLA je termoplastičen polimer s tališčem okrog 175 °C. Proizvajajo ga ameriški Cargill Dow LLC (Nature Works[®]), Mitsui Toatsu Chemical (Lacea[®]), Shimadzu Chemical (Lacty[®]), Unitika (Terramac[®]).



Slika 12: Sinteza polimlečne kisline (PLA)

Proizvodnjo vlaken iz PLA polimera je 1997. leta patentiral Cargill Dow LLC pod blagovno znamko Ingeo™ [22], ki jih že proizvajata japonski Toray in ameriški Fiber Innovation Technology, Inc. (F.I.T.). Kanebo proizvaja PLA vlakna pod blagovno znamko Lactron® [23].

Vlakna oblikujejo po postopku iz taline. So okroglega ali profiliranega (trilobalnega) prereza. Imajo visok do srednji lesk. Izdelujejo tudi dvokomponentna vlakna tipa plašč/jedro v sestavi sintetični polimer/PLA.

Fizikalne lastnosti PLA vlaken so podobne PA 6 in PES vlaknom. Natezna trdnost 45–55 cN/tex, pretržni raztezek 20–35 %, modul elastičnosti 7,5–9 GPa. Pri 10-odstotnem raztežku je elastični povratek 64 %. V vreli vodi se krčijo 8–15 %, navzamejo 0,4–0,6 % zračne vlage. Barvajo se z disperzijskimi barvili.

S kopolimerizacijo osnovnega homopolimera se vlaknom zniža kristaliničnost, ki je za homopolimerna PLA vlakna okrog 80 %. Tališče vlaken PLA je 175–180 °C, temperatura steklastega prehoda 58 °C. Gostota vlaken je 1,25–1,27 gcm⁻³ in so lažja od PES/PET vlaken.

PLA vlakna se počasneje biorazgradijo kot bombažna in viskozna vlakna. Zaradi biorazgradljivosti so primerne za agrotekstilije, vlaknovine, higienske izdelke in embalažo.

4.0 INTELIGENTNA VLAKNA

Inteligentna ali pametna vlakna (*intelligent fibres, smart fibres*) so vlakna iz specialnih, na stimulacijo občutljivih polimerov ali nanokapsul, ki se s spreminjanjem mikrostrukture in lastnosti odzivajo na okolico: na spremembo temperature, na spremembo mehanske sile, na svetlobne spremembe, na spremembo v koncentraciji elektrolitov in pH ter spremembo električnega in magnetnega polja. Inteligentna vlakna omogočajo uravnavanje telesne temperature, ali omogočijo nevidnost za IR detekcijo, preprečujejo zamazanje izdelkov, sprožijo samoočiščenje npr. talnih oblog, preprečujejo navzemanje neprijetnih vonjav, skrbe za varnost, na primer pri vožnji z avtomobilom, skrbe za protibalistično zaščito, so biološko aktivna (bioaktivna), elektroprevodna in drugo.

Tehnološko najpogosteje izdelujejo inteligentna vlakna s premazovanjem vlaken s polimeri, občutljivimi na zunanje stimulacije ali z vgradnjo takih polimerov v vlakna po postopku s plazmo.

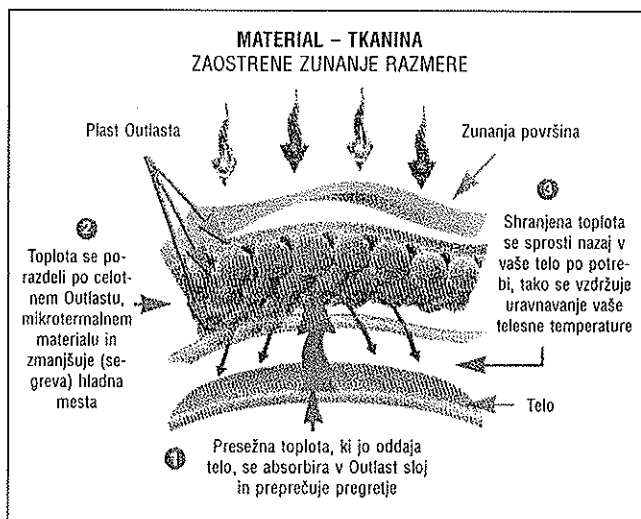
4.1 Vlakna s PCMs (*Phase Change Materials*)

Večina danes razvitih polimerov, ki razpoznavajo pogoje okolja, je občutljivih na spremembo temperature. Pri določeni temperaturi so podvrženi faznemu prehodu, zato jih označujejo kot PCMs (*Phase Change Materials*). Uporabo vlaken s PCMs predvidevajo za zaščito

pred mrazom in vročino, za športna oblačila, medicinske in higienske izdelke. Tehnologijo PCMs je razvila NASA in jo patentno zaščitila. 1987 so uporabo PCMs prvič preskusili v vlaknih.

Kapaciteta absorpcije toplote je za PCMs mnogo večja kot za vlakna. Za parafinski PCMs je absorpcija toplote okrog 200 kJ/kg in pri tem ostane temperatura parafina nespremenjena, kilogram standardnih vlaken pa se pri absorpciji le 1 kJ toplote segreje za eno stopinjo. Z absorpcijo toplote se prekinjejo medmolekulske vezi v PCMs, ki preide v tekoče stanje.

PCMs materiali omogočajo uravnavanje telesne temperature z dinamičnim shranjevanjem in sproščanjem toplote v temperaturnem območju blizu temperature kože, od 29 do 35 °C, s spreminjanjem agregatnega stanja iz trdega v tekoče in nazaj. Gre za različne parafinske voske: likosan, oktadekan, heptadekan, heksadekan [24]. Vlakna, blago ali pene z vgrajenimi PCMs shranijo sproščeno telesno toploto in jo telesu vrnejo, ko jo le-to rabi glede na fizično aktivnost in zunanjo temperaturo, tako da telo ohranja stalno telesno temperaturo. Z vgrajenimi PCMs mikrokapsulami so danes na trgu le PAN in PES vlakna. Gateway Technologies Inc. ima zaščiteno tehnologijo PCMs, ki jih na vlakna največkrat površinsko nanašajo (zaščitena blagovna znamka Outlast) (slika 13).



Slika 13: Vgradnja Outlast sloja s PCMs v oblačilo (izsek)

4.2 Vlakna z dimenzijskim spominom (*Shape Memory Polymers*)

Polimerne materiale, ki se na spremembo okolja (temperature, pH ...) odzovejo s spremembo dimenzij, označujemo kot SMP (*Shape Memory Polymers*):

- Nekatere SMP polimere, kot so poli-N-izopropilakrilamidi (PNIPAAm), vzbudi sprememba temperature tako, da se dimenzijsko spreminjajo. Pri določeni ravnotežni temperaturi se polimer navzame vode iz

okolice in zelo nabrekne, se pretvori v gel, pri čemer se mu povečajo dimenzije. Pri zvišanju temperature gel izloči vodo in se skrči.

- SMP so tudi ionski polikarboksilni polimeri (PKP) z vezanimi šibkimi karboksilnimi skupinami, ki so občutljive na pH in elektrolite. Pri znižanju pH vrednosti karboksilne skupine izgubijo naboj (vežejo vodikov proton), s tem se zmanjša odboj med polimeri, ki privede do skrčenja gela (kolapsa). Dodatek soli v gel zmanjša učinkovito razdaljo delovanja odbojnih sil, kar spet privede do skrčenja gela (kolapsa). SMP se po obstoječi tehnologiji nanašajo le na površino vlaken kot film, ki se za dobro reverzibilno delovanje ne sme poškodovati.
- Tretja generacija razvitih SMP so polietilenglikoli (PEG), ki so v gumi podobnem stanju in nikoli ne kristalizirajo izdatno. Z razliko od PNIPAAm in PKP polimerov, so se PEG zaradi elastičnosti sposobni upirati napetosti pri nabrekanju brez nevarnosti, da bi pri tem nastale površinske razpoke. Na bombaž, poliestrska ali druga vlakna nanosen PEG omogoča vnaprej določeno temperaturno prilagajanje in reverzibilno krčenje vlaken oziroma tekstilij.

Možnosti uporabe SMP materialov preučujejo za nadzorovano odmerjanje zdravil, hrane, parfumov, herbicidov, medicinske in higienske tekstilije, kot so otroške plenice, zdravilno spodnje perilo, ki pomaga celiti rane, kompresijski povoji, obliži, plenice za inkontinenco, sanitarne brisače, nogavice, agrotekstilije in drugo. Vlakna z SMP se skrčijo pri izpostavljenosti tekočini (vodi, krvi, ...), na primer SMP materiali kot kompresijski povoji, ki se pri stiku s krvjo skrčijo in zaustavijo krvavitev [25].

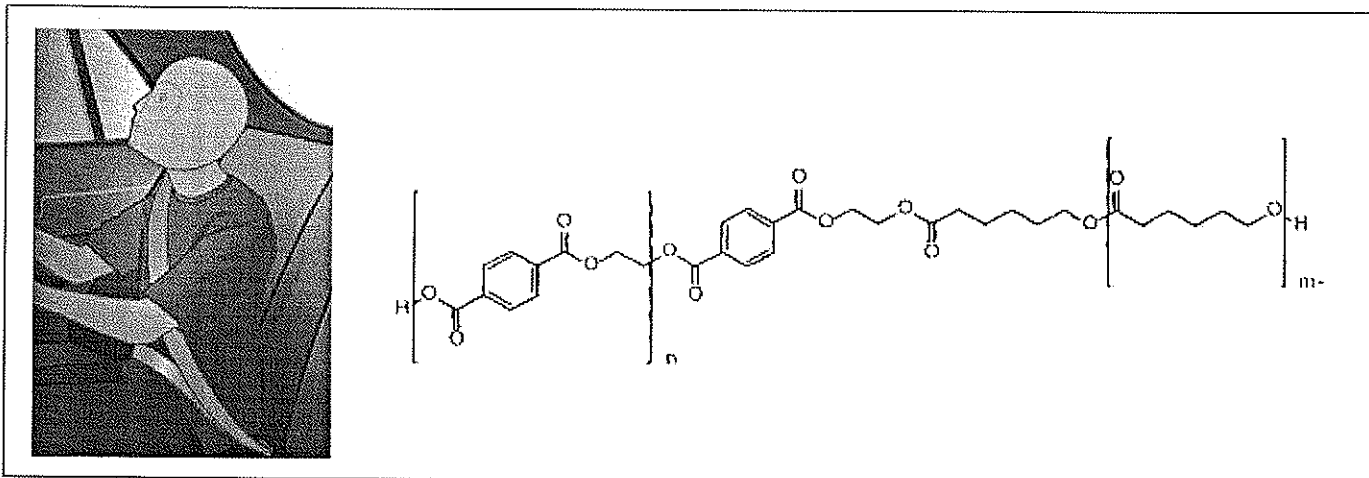
Predvidevajo uporabo SMP za oblačila, ki jih ne bo potrebno likati, ker se po raztezanju in deformacijah povrnejo v začetno obliko in dimenzije pri določeni vnaprej programirani temperaturi. Podjetje European Space Agency je razvilo srajco, ki se pri nošenju pri telesni temperaturi sama poravna [26].

V skupino vlaken z dimenzijskim spominom sodijo tudi patentirana vlakna Securus® (Honeywell) [27, 28], ki so prva visokozmogljivostna vlakna s tovrstnimi načrtovanimi lastnostmi. Namenjena so za avtomobilске varnostne pasove (slika 14).

So blok kopolimerna vlakna iz polietilentereftalata in polikaprolaktona (PET-PCL).

Iz taline kopolimera PET-PCL so izdelana vlakna Securus po posebni tehnologiji reaktivne ekstruzije. Poleg visoke trdnosti in visokega modula elastičnosti so sposobna hitre absorpcije udarne sile. Varnostni pasovi iz vlaken Securus so sposobni absorbirati 3-krat več energije kot standardni obstoječi varnostni pasovi. »Inteligentni« odziv predstavlja možnost raztežka vlaken do določene vrednosti pri vnaprej definiranem območju obremenitve. Vlakna Securus so sposobna tristo-penjskega odziva na napetost v območju 0–24 cN/tex napetosti oziroma med 0–15-odstotnim raztežkom. Pri nizkih napetostih do ≈8,8 cN/tex (do ≈2 % raztežka) visok modul elastičnosti vlaken omogoča, da varnostni pas pritiska potnika k sedežu. Med prometno nesrečo je ta funkcija zadrževanja potnika zelo pomembna, ker sproži mehanizem blokiranja varnostnega pasu. V tej prvi stopnji se vlakna Securus obnašajo podobno kot standardna poliestrska vlakna. Drugo stopnjo predstavlja območje višje napetosti, 8,8–13,2 cN/tex (2–9 % raztežka), v katerem se modul elastičnosti vlaken Securus izredno zniža in s tem omogoči izravnavanje obremenitve. Na tej stopnji je možen nadzorovan premik potnika naprej, s čimer se zmanjša sila, ki ji je potnik izpostavljen. V tretji stopnji, ki preseže obremenitev 13,2 cN/tex (nad 9–15 % raztežka), modul elastičnosti znatno naraste in zadrži potnika v sedežu, dokler vlakna ne uspejo absorbirati vse energije, ki se sprosti pri trku vozila v prometni nesreči.

V primerjavi s standardnimi poliestrskimi varnostnimi pasovi omogočajo pasovi Securus s programiranim obnašanjem večjo zaščito potnika predvsem z zmanjšano obremenitvijo prsnega koša in tudi glave pri manjših osebah in otrocih.



Slika 14: Inteligentna vlakna Securus za varnostne pasove (a) in kopolimer PET-PCL (b)