

## Učinak simulacije ubrzanog starenja na svojstva poliesterske tkanine

Ana Šaravanja<sup>1,\*</sup>, Tihana Dekanić<sup>1</sup>, Tanja Pušić<sup>1</sup>, Julija Volmajer Valh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija

\*Dopisni autor: [ana.saravanja@tff.unizg.hr](mailto:ana.saravanja@tff.unizg.hr)

Prispjelo: 28. rujna 2023.

UDK 677.019.394:677.494.674

### Izvorni znanstveni rad

*U radu je praćen utjecaj umjetnoga starenja na svojstva standardne poliesterske tkanine. Budući da su stvarni procesi ispitivanja dugotrajni, u ovom radu je proces prirodnog starenja zamijenjen umjetnim starenjem prema normi HRN EN ISO 105-B02:2013. Standardna poliesterska tkanina je podvrgnuta izravnom djelovanju umjetnoga svjetla u vremenu od 85 i 170 sati, pri RH 40%. S ciljem dobivanja uvida u svojstva poliesterske tkanine tijekom izlaganja UV zračenju, poliesterske tkanine su analizirane preko fizikalno-kemijskih, morfološko-taktilnih i mehaničkih svojstava. Vlačna svojstva su starenjem smanjena, što ovisi o duljini i vremenu osunčavanja. FTIR analiza je pokazala na mogući učinak umjetnoga starenja na starene tkanine u području valne duljine oko 2900 cm<sup>-1</sup> gdje se najvjerojatnije dogodila oksidacija na C–H vezi. Fotooksidacijska razgradnja poliesterskih tkanina započinje na površini tkanine zbog spore difuzije kisika u polimernu strukturu, što za posljedicu ima promjene nekih fizičkih svojstava, primjerice gubitak sjaja i hrapavost površine. Produljenjem vremena izlaganja smanjuje se otpornost na lom, oslabljuju mehanička svojstva, a izražena je i krutost tkanine. Utvrđeno je da se različitim vremenom izlaganja mijenjaju i svojstva tkanine sa stajališta sposobnosti upravljanja vlagom.*

**Ključne riječi:** poliesterska tkanina; ubrzano starenje; UV zračenje; FTIR; prekidna sila; FTT; MMT

### Original scientific paper

*In this work, the influence of artificial ageing on the properties of standard polyester fabrics was investigated. Since the actual test procedures are long-lasting, the natural ageing process is replaced in this work by artificial ageing in accordance with the ISO 105-B02:2013 standard. Standard polyester fabric is artificially aged under direct irradiation for 85 and 170 hours at a relative humidity of 40%. With the aim of gaining an insight into the properties of polyester fabrics during exposure to UV radiation, polyester fabrics were analysed through physico-chemical, morphological-tactile and mechanical properties. The tensile properties decrease with ageing, which depends on the duration and time of exposure to irradiation. The FTIR analysis showed the possible effects of artificial ageing on aged fabrics in the wavelength range around 2900 cm<sup>-1</sup>, where oxidation of the C–H bond is most likely to occur. The photooxidative degradation of polyester fabrics starts at the surface of the fabric due to the slow diffusion of oxygen into the polymer structure, leading to changes in some physical properties, such as loss of gloss and roughness of the surface. With increasing exposure time, the breaking strength decreases, the mechanical properties become weaker and the stiffness of the fabric also decreases. It was found that the properties of the fabric in terms of its ability to manage moisture also change with different exposure times.*

**Keywords:** polyester fabric; accelerated ageing; UV radiation; FTIR; breaking force; FTT; MMT

## 1. Uvod

Prirodno starenje tekstilnog materijala je složen proces koji se odvija tokom duljeg vremenskog razdoblja pod utjecajem različitih okolišnih čimbenika poput sunčeve svjetlosti, vlage, temperature i sl. [1, 2]. Ispitivanja u takvim uvjetima su često dugotrajna i iziskuju puno vremena, što s gledišta dobivanja podataka u kontroliranim uvjetima nije prihvatljivo. Promjene do kojih dolazi u tekstilnim materijalima rezultat su kompleksne interakcije između vanjskih utjecaja i strukture samih vlakana. Dok neki materijali mogu imati veću otpornost na starenje od drugih, i obrnuto, činjenica je kako će se vremenom svaki tekstilni materijal degradirati i promijeniti. Simulacija ubrzanoga starenja tekstilnih materijala je postupak koji se koristi kako bi se u kraćem vremenskom roku predvidjeli učinci dugotrajne izloženosti materijala različitim uvjetima [2, 3]. Ovaj postupak u kontroliranim uvjetima omogućuje brzu procjenu i karakterizaciju materijala, stoga se često koristi kako bi se dobili vrijedni podaci na osnovu kojih se osigurava dugotrajnost i kvaliteta proizvoda u primjeni.

Usporedba rezultata simulacija ubrzanoga starenja sa starenjem u prirodnim uvjetima može pružiti korisne uvide u predvidljivost ponašanja tekstilnih materijala tijekom vremena. Međutim, važno je napomenuti kako simulacije uvijek imaju svoje granice i mogu postojati razlike između rezultata dobivenih simulacijom u odnosu na prirodno starenje. Stoga je ponekad potrebno provesti i dugotrajna stvarna ispitivanja kako bi se potvrdila dugoročna izdržljivost tekstilnih materijala.

Polieterska vlakna su umjetna vlakna i ovisno o sirovini iz koje se dobivaju mogu biti vlakna od poli(etilen-tereftalata) (PET), poli(butilen-tereftalata) (PBT) i poli(1,4-dimetilencikloheksil-tereftalata) (PCDT) [4]. S kemijskog gledišta obično se sastoje od dugolančanih polimera čija su okosnica funkcionalne esterske skupine (-COO-). Najveći udio polieterskih vlakana u tekstilijama prema kemijskoj građi je PET [5-9]. Postaje sve popularniji zbog svojih dobrih performansi i strukturnih svojstava poput čvrstoće i izdržljivosti, otpornosti na gužvanje, skupljanje i abraziju. U posljednjih 20 godina proizvodnja se udvostručila te se procjenjuje da će do 2030. godine dosegnuti 80 milijuna tona [10]. Polietersko vlakno je po prirodi hidrofobno, s reprizom od 0,4 % [11-13]. Podrijetlo svojstva hidrofobnosti je manjak polarnih skupina (-COOH, -OH) u polimerom lancu [14, 15], te sposobnost lakog privlačenja nečistoća, poput ulja, prašine, i sl. [6, 16]. Upravo ih svojstva slabog upijanja i ne zadržavanja vlage čini brzo sušećim tekstilnim materijalom koji se lako održava. U mješavinama s drugim vlaknima poput

pamuka i vune, poboljšavaju određena svojstva kao što su mehanička čvrstoća, dimenzijska i toplinska stabilnost [7, 16-18]. Tekstilije od polieterskih vlakana su sklone ljuštenju, krutosti i nabijanju statičkim elektricitetom [12, 19, 20]. Njegov negativan utjecaj na okoliš očituje se kroz proizvodnju (iz neobnovljivih izvora) i slabu biorazgradivost. U posljednje se vrijeme izrazito naglašava negativan učinak na okoliš kroz prisutnost fragmenta mikroplastike (MP) u vodi i zraku, što ovisi o fazama procesa proizvodnje te uvjetima uporabe i odlaganja [21-23]. Shodno tome s ciljem smanjenja otpuštanja MP čestične tvari, nužno je dugoročno raditi na prevenciji.

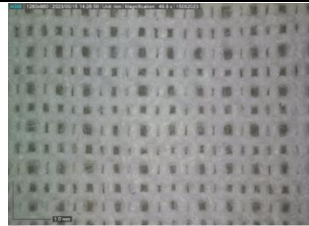
U okviru ovog rada proveden je proces simulacije umjetnoga starenja polieterske tkanine u kontroliranim laboratorijskim uvjetima s ciljem brzog dobivanja podataka i praćenje utjecaja umjetnoga starenja na mehanička, fizikalno-kemijska i morfološko-taktilna svojstva standardne polieterske tkanine.

## 2. Eksperimentalni dio

### 2.1. Materijal

U radu je primijenjena kemijski bijeljena standardna polieterska (PES\_N) tkanina proizvođača CFT, Center for Testmaterials BV, Nizozemska čije su karakteristike prikazane u tab.1.

Tab.1 Svojstva standardne PES tkanine

|   |   |      |
|---|---|------|
| Oznaka proizvođača                        | PN-01   |      |
| Ton boje                                  | Bijeli  |      |
| Plošna masa (g/m <sup>2</sup> )           | 156,0   |      |
| Gustoća (niti/cm)                         | osnova  | 27,7 |
|   | potka   | 20,0 |
| Debljina (mm)                             | 0,35  |      |
| Finoća pređe (tex)                        | osnova  | 30,4 |
|   | potka   | 31,9 |
| Vez                                       | Platno  |      |
| Mikroskopska slika uzorka, povećanje 50 x |  |      |

### 2.2. Priprema i obrada polieterske tkanine

S ciljem otklanjanja utjecaja stršećih niti s rubova materijala, za pripremu ispitnih uzoraka PES tkanine upotrijebljen je ultrazvučni rezač, Ultrasonic cutter TTS400, Sonowave, Italija. Priređene su tkanine dimenzija 30x20 cm.

PES tkanine su izložene simulaciji umjetnoga starenja u trajanju od 85 (85H) i 170 (170H) sati prema normi HRN EN ISO 105-B02:2013: *Tekstil - Ispitivanje postojanosti obojenja - Dio B02: Postojanost obojenja na umjetno svjetlo: ispitivanje na blijeđenje Xenon lampom u uređaju Xenotest 440, SDL Atlas. Kod definiranja uvjeta izlaganja korišteni su uvjeti preporučljivi za Europu (umjerena temperaturna zona). PES tkanina je podvrgnuta direktnom UV zračenju prema normi uz relativnu vlažnost 40 % i zračenje  $42 \pm 2$  W/m<sup>2</sup> u rasponu valnih duljina od 300 do 400 nm. Tkanina je izložena direktnom UV zračenju bez okišnjavanja.*

Oznake uzoraka standardne PES tkanine prije i poslije provedenih postupaka umjetnoga starenja prikazane su u tab.2.

Tab.2 Oznake uzoraka standardne PES tkanine

| Oznaka   | Opis poliesterske tkanine   |
|----------|---|
| PES_N    | Standardna poliesterska tkanina                                       |
| PES_85H  | Standardna poliesterska tkanina umjetno starena u vremenu od 85 sati  |
| PES_170H | Standardna poliesterska tkanina umjetno starena u vremenu od 170 sati |

### 2.3. Metode

Sa svrhom praćenja svojstava standardne i starenih tkanina, prije i poslije ciklusa umjetnoga starenja, provedena je analiza mehaničkih, fizikalno-kemijskih i morfološko-taktilnih svojstava.

Mikroskopsko proučavanje početne standardne te umjetno starenih PES tkanina načinjeno je digitalnim mikroskopom Dino-Lite AM7013 tip Premier uz dva povećanja, 50x i 250x.

Plošna masa tkanina prije i nakon osunčavanja određena je na preciznoj analitičkoj vazi Kern, model ALJ 220-5DNM s točnošću odvage  $\pm 0,1$  mg prema HRN ISO 3801:2003: *Tekstil - Tkanine - Određivanje mase po jedinici duljine i mase po jedinici površine.*

Ispitivanje prekidne sile i prekidnog istezanja provedeno je na dinamometru Textechno H. Stein, Textechno Statigraph. Načinjena su tri mjerenja po uzorku; uz duljinu epruvete 200 mm, razmak stezaljki 100 mm, predopterećenje 5-7 N, te brzinu istezanja 100 mm/min.

Infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom (ATR-FTIR) uz prigušenu totalnu refleksiju primijenjena je za karakterizaciju PES tkanina prije i nakon postupka umjetnoga starenja.

Na uređaju FTT (Fabric Touch Tester) SDL Atlas analizirana su opipna svojstva PES uzoraka kroz proračunavanje fizikalnih svojstava lica i naličja tkanine.

Mjerenje prijenosa vlage kroz uzorak određeno je na uređaju Moisture Management Tester MMT290,

tvrtke SDL Atlas. Klasifikacija prijenosa vlage nakon modifikacije umjetnim starenjem provedena je prema normi AATCC 195-2017 *Liquid Moisture Management Properties of Textile Fabrics.*

Ispitivanje otpornosti na habanje provedeno je prema HRN EN ISO 12947- 2:2017: *Tekstil - Određivanje otpornosti na habanje plošnog tekstila metodom po Martindaleu - 2. dio: Određivanje prekida uzorka* i HRN EN ISO 12947-3:2008: *Tekstilije - Određivanje otpornosti na habanje plošnog tekstila metodom po Martindaleu - 3. dio: Određivanje gubitka mase* pomoću Mesdan Lab habalice.

### 3. Rezultati i rasprava

Učinak umjetnoga starenja standardne PES tkanine promatran je kroz različite metode: određivanjem promjena u plošnoj masi i u vlačnim svojstvima, analizom funkcionalnih skupina iz FTIR spektara, određivanjem sposobnosti upijanja vlage, otpornosti na habanje te praćenjem karakteristika tkanina kroz mjerenje opipa i udobnosti.

Mikroskopska analiza PES uzoraka prikazana je na sl.1. kroz prikaz površina standardne i umjetno starenih PES tkanina uz dva povećanja.

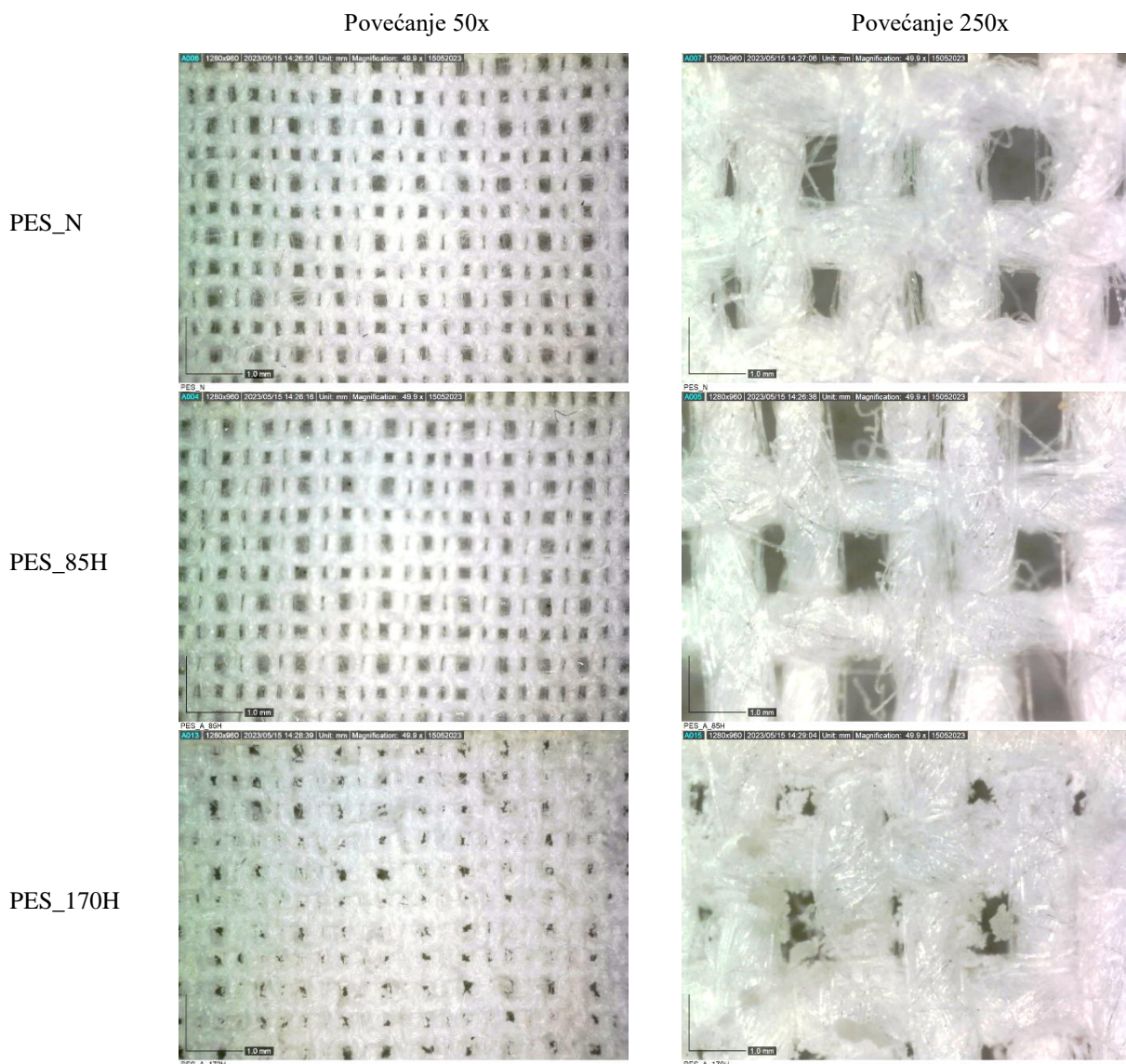
Pomoću Dino-Lite digitalnog mikroskopa zorno se mogu vidjeti pore poliesterskih tkanina, kao i promjene koje uzrokuje umjetno starenje (sl.1). Kod PES\_N i PES\_85H nisu uočljive promjene u pogledu veličina pora tkanina. Naprotiv, tkanina starena 170 sati (PES\_170H), pokazuje značajne i vidljive promjene kod oba povećanja. Pore su zatvorenije, slabije se raspoznaju, što se može pripisati određenoj degradaciji površine materijala.

S ciljem boljeg povezivanja učinka umjetnoga starenja na svojstva PES tkanina načinjena je analiza promjena u plošnim masama, tab.3.

Tab.3 Plošna masa (Q) i gubitak mase ( $\Delta Q$ ) umjetno starenih PES tkanina

| Uzorak   | Q (g/m <sup>2</sup> ) | $\Delta Q$ (%) |
|----------|-----------------------|----------------|
| PES_N    | 164,08                | -              |
| PES_85H  | 160,35                | 2,27           |
| PES_170H | 164,06                | 0,12           |

Rezultati pokazuju da direktnim izlaganjem UV zračenju dolazi do određenih promjena i gubitaka na masi, u većem ili manjem postotku. Prethodno razmotreni rezultati potvrđuju da proces umjetnoga starenja utječe na blagu degradaciju tkanina. Produljenjem vremena umjetnoga starenja, zapažene su površinske promjene pređe; lokalna zadebljanja pojedinih vlakana [24], što se može pripisati blagom povećanju mase u odnosu na PES\_85H. Razlog lokalnog zadebljanja poliesterskih vlakana tijekom starenja je fenomen



SI.1 Digitalne mikroskopske slike standardne i umjetno starenih PES tkanina, pri povećanjima 50 i 250x

poznat kao *annealing*, u kojem dolazi do preuređivanja molekula u polimernim lancima, što dovodi do promjena u strukturi i svojstvima vlakana. Molekularno opuštanje i preraspodjela unutar polimernih lanaca uzrokovali su povećanje debljine, odnosno promjer poliesterskih vlakana, što je u skladu s nekim ranijim istraživanjima [25, 26].

Vlačna svojstva su važna s gledišta proučavanja strukturalnih značajki te su kroz ovaj rad proučavana uz dva vremena izlaganja. U tab.3 su prikazane vrijednosti prekidnih sila i produljenja prije i nakon procesa starenja.

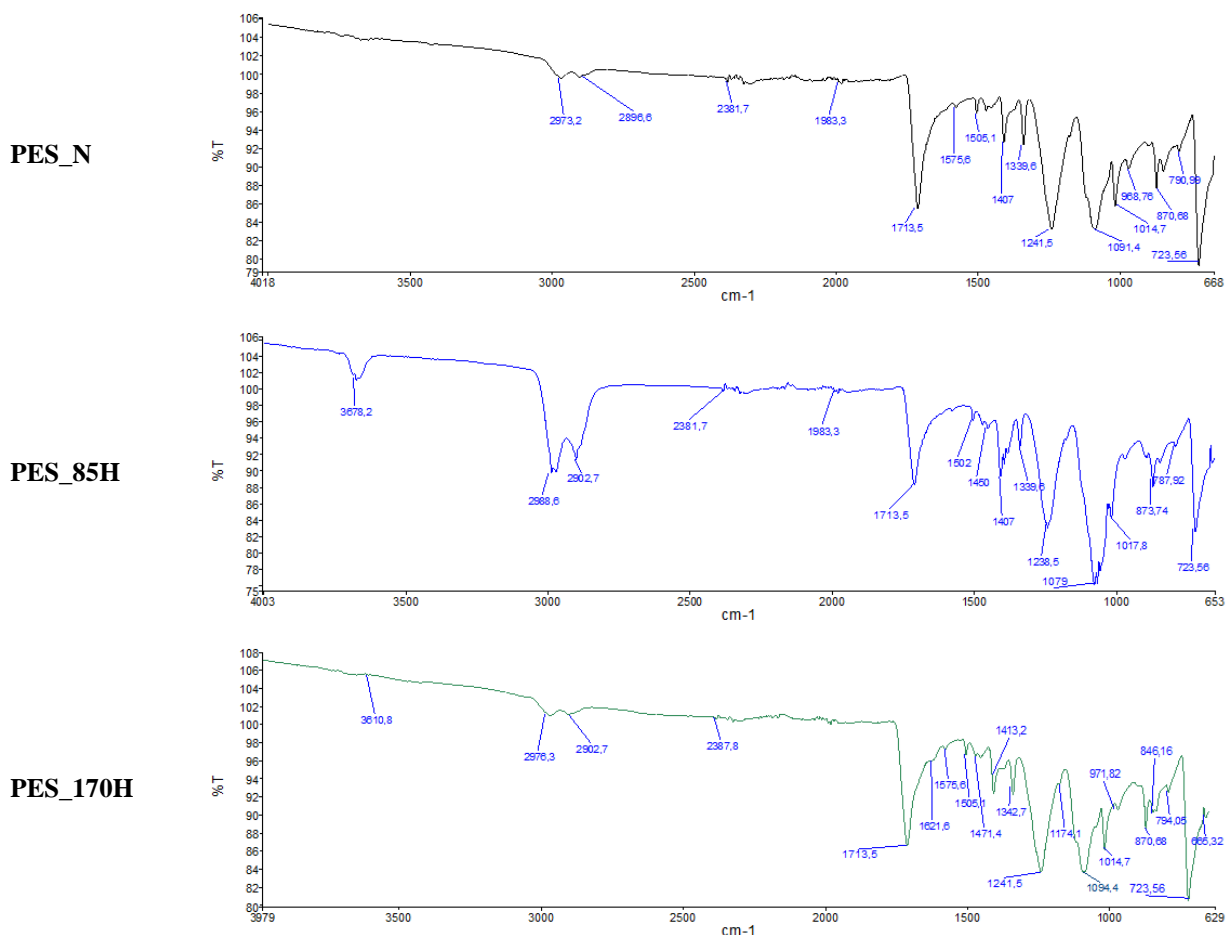
Prema rezultatima iz tab.4 standardna PES tkanina ima prekidnu silu ( $F_p$ ) 945,08 N, što pokazuje dobru uređenost polimerne strukture. Proces umjetnoga starenja dovodi do promjena u mehaničkim svojstvima, što potvrđuju vrijednosti prekidnih sila (650,28 N nakon 85 sati osunčavanja, te 456,05 N nakon 170 sati sunčanja). Umjetno starenje je uzrokovalo smanjenje prekidne sile od 31,19 % kroz 85 sati,

Tab.4 Prekidna sila ( $F_p$ ) i istežanje ( $\epsilon_p$ ) PES tkanina

| Uzorci              | PES_N     | PES_85H | PES_170H |        |
|---------------------|-----------|---------|----------|--------|
| $F_p$<br>(N)        | 1         | 976,66  | 654,70   | 506,83 |
|                     | 2         | 936,11  | 656,13   | 474,61 |
|                     | 3         | 922,47  | 640,02   | 386,72 |
|                     | $\bar{x}$ | 945,08  | 650,28   | 456,05 |
| $\epsilon_p$<br>(%) | 1         | 48,02   | 47,01    | 45,79  |
|                     | 2         | 47,88   | 49,95    | 43,91  |
|                     | 3         | 48,02   | 47,01    | 38,32  |
|                     | $\bar{x}$ | 47,97   | 47,99    | 42,67  |
| $\Delta F$ (%)      | -         | 31,19   | 51,74    |        |

a dvostruko nakon 170 sati (51,74 %). Do promjena u vlačnim svojstvima dolazi produljenim vremenom starenja jer ono uzrokuje ne samo blagu degradaciju prede, u vidu blago stršećih vlakana i lokalnog zadebljanja, već se povećava i krtost poliesterske tkanine.

FTIR spektri potvrđuju strukturu tkanina i nove nastale grupe tijekom i nakon procesa osunčavanja, sl.2.



SI.2 FTIR spektri uzoraka

Početak vrpce označava funkcionalne skupine, u ovom slučaju istezanje -OH skupine starene PES tkanine s karakterističnim vrhom 3678,2 cm<sup>-1</sup>. Kod standardne PES tkanine se ne detektira -OH skupina. Na FTIR vrpčama su vidljivi vrhovi za poliester: C=O 1713,5 cm<sup>-1</sup>; 1407 cm<sup>-1</sup>; 1241,5 cm<sup>-1</sup>; 1091,4 cm<sup>-1</sup>; 870,66 cm<sup>-1</sup>. Vrh 1505,19 cm<sup>-1</sup> karakterističan je za aromatski prsten. Uočavaju se promjene u području oko 2900 cm<sup>-1</sup> gdje dolazi do oksidacije na C-H vezi [27-29]. Kod vrpce PES tkanine starene 170 sati vidljive su lagane promjene vrhova u području oko 970 cm<sup>-1</sup>. Kako FTIR pruža informacije o promjenama u kemijskom sastavu i strukturi, dobiveni spektri pokazuju kako nakon umjetnoga starenja do vremena od 170 sati nije došlo do značajnijih promjena kemijskog sastava.

Ocjenjivanje opipnih svojstava razrađeno je kroz analizu svojstava ispitnih tkanina na uređaju FTT čije su značajke navedene u tab.5. Opipna svojstva PES uzoraka definirana su kroz analizu fizikalnih svojstava lica i naličja tkanine. Osim opipa vrednovana je i ukupna udobnost tkanine poput mekoće, topline i glatkoće. Prednosti FTT uređaja su što objektivno vrednuje kvalitetu uzoraka te mjeri 18 indeksa za navedena svojstva (kompresiju, toplinska svojstva, površinsko trenje, debljinu, krutost, hrapavost povr-

šine). Zahvaljujući inovativnom dizajnu na uređaju je moguće mjeriti sva površinska i mehanička svojstva uzoraka jednim testom - mekoću, toplinu, glatkoću i ukupni osjećaj dodira ruke.

Tab.5 Značajke FTT uređaja

|            |  |
|------------|--|
| Savijanje  | BAR - Prosječna krutost pri savijanju  |
|            | BW - Rad pri savijanju                 |
| Kompresija | CW - Rad pri kompresiji                |
|            | CRR - Stopa oporavka kompresije        |
|            | CAR - Prosječna krutost pri kompresiji |
|            | RAR - Prosječna krutost pri oporavku   |
|            | T - Debljina                           |

Standardna PES tkanina ima određenu krutost pri savijanju koja se mijenja tijekom umjetnoga starenja, tab.6. U smjeru osnove srednja vrijednosti pri savijanju (BARa) iznosi 0,20 gF mm/rad. U smjeru potke ona je 633,02 gF mm/rad (BARE). S gledišta učinka umjetnoga starenja evidentno je da dolazi do povećanja srednje vrijednosti u oba smjera. Savijanje se povećava nakon izlaganja umjetnom starenju, instrumentalni rezultati ukazuju da je potreban veći rad za savijanje dok se subjektivno primjećuje i krutost materijala, što znači da je slabija sposobnost oporavka tkanine.

**Tab.6** Savijanje i kompresija standardne i starenih polieterskih tkanina

| Uzorak   | Savijanje |        |       |         | Kompresija |        |                         |        |         |
|----------|-----------|--------|-------|---------|------------|--------|-------------------------|--------|---------|
|          | BARa      | BARe   | BWa   | BWe     | T          | CW     | CRR                     | CAR    | RAR     |
|          | gF mm/rad |        |       |         | mm         | gf mm  | gf/(cm <sup>2</sup> mm) |        |         |
| PES_N    | 0,20      | 80,67  | 8,26  | 633,02  | 0,39       | 787,19 | 0,38                    | 387,09 | 2289,19 |
| PES_85H  | 3,29      | 113,16 | 13,46 | 1010,06 | 0,34       | 331,65 | 0,66                    | 999,46 | 3811,01 |
| PES_170H | 2,11      | 195,61 | 10,81 | 1682,34 | 0,38       | 539,80 | 0,53                    | 733,88 | 2037,83 |

\*a-smjer osnove; e-smjer potke

Parametar analize BW, rada pri savijanju, u smjeru osnove i potke numerički je proporcionalan – povećava se i u smjeru osnove i u smjeru potke. Debljina standardne PES tkanine (0,39 mm) se neznatno smanjila nakon umjetnoga starenja, dok se vrijednost stope oporavka kompresije (CRR) povećala djelovanjem umjetnoga zračenja. Umjetnim starenjem nakon 85 sati povećava se vrijednost, dok produživanjem izlaganja (PES\_170H) se smanjuje no i dalje je veća vrijednost u odnosu na standardnu tkaninu.

**Tab.7** Opijna svojstva standardne i starenih PES tkanina

| Uzorak   | Glatkoća | Mekoća | Toplina | Ukupni osjećaj dodira |
|----------|----------|--------|---------|-----------------------|
| PES_N    | 5,0      | 4,0    | 4,0     | 4,0                   |
| PES_85H  | 4,0      | 3,0    | 3,0     | 3,0                   |
| PES_170H | 3,0      | 3,0    | 3,0     | 3,0                   |

Ukupni osjećaj dodira (tab.7) pokazuje ocjenu 4,0 za standardnu PES tkaninu, dok za starene tkanine ocjena iznosi 3,0. Modifikacija umjetnim starenjem utječe na strukturalne značajke, a MMT u nastavku će ukazati na sposobnost upravljanja vlagom.

S ciljem određivanja sposobnosti upravljanja vlage standardne i starenih PES tkanina, odrađena su mjerenja prema AATCC TM 195-2017, tab.8. Dobiiveni rezultati su prikazani srednjim vrijednostima uz standardnu devijaciju ( $\sigma$ ) i koeficijent varijacije (CV) za svako pojedino svojstvo: prirast apsorpcije (AR, *Absorption Rate*), maksimalni promjer vlaženja

(MWR, *Maximum Wetted Radius*), vrijeme vlaženja (WT, *Wetting Time*), gornja površina (T, *Top surface*) i donja površina (B, *Bottom surface*), brzina razlijevanja (SS, *Spreading Speed*), akumulativna sposobnost jednosmjernog prijenosa (R, *Accumulative One-way Transport Capability*) te ukupna sposobnost upravljanja vlagom (OMMC, *Overall Moisture Management Capability*) [30,31]. Vrijeme vlaženja, WT, označava vrijeme potrebno da se gornja i donja površina ispitnog uzorka počnu vlažiti. Rezultati u tab.8 ukazuju da ono kod standardne PES tkanine za gornju površinu iznosi 3,1667 s, a za donju površinu 3,2917 s. Kod starenih se vrijeme vlaženja smanjuje; PES\_85H za gornju površinu iznosi 2,6930 s, a 2,7867 s za donju. Tkanina PES\_170H daje vrijednosti 2,6873 s za gornju i 2,4060 s za donju površinu. Razlog nešto duljeg vremena vlaženja kod PES\_N leži u činjenici, potvrđenoj ranijim istraživanjima [32, 33] da standardna tkanina sadrži male količine doradnih sredstava na bazi silikona, čije prisustvo doprinosi hidrofobnim svojstvima PES\_N uzorka. Ukupna sposobnost upravljanja vlagom za PES\_N iznosi 0,6120, dok kod starenih 85 sati 0,5982 i za 170 sati 0,5103. Akumulativna sposobnost jednosmjernog prijenosa standardne polieterske tkanine iznosi 202,564 %, a tijekom umjetnoga starenja se smanjuje. Kod starene tkanine u vremenu 85 sati iznosi 173,4659 % i daljnjim starenjem (170 sati) vrijednost se smanjuje na 39,9414 %. Učinak umjetnoga starenja utječe na sposobnost upravljanja vlagom materijala.

**Tab.8** Sposobnost upravljanja vlagom PES\_N, PES\_85H i PES\_170H prema AATCC TM 195-2017

| Uzorci   | WT        |        | AR      |         | MWR     |        | SS       |          | R (%)  | OMMC     |        |
|----------|-----------|--------|---------|---------|---------|--------|----------|----------|--------|----------|--------|
|          | T (s)     | B (s)  | T (%/s) | B (%/s) | T (mm)  | B (mm) | T (mm/s) | B (mm/s) |        |          |        |
| PES_N    | $\bar{x}$ | 3,1667 | 3,2917  | 34,4271 | 41,1210 | 20,00  | 21,66    | 3,9519   | 4,0047 | 202,5640 | 0,6120 |
|          | $\sigma$  | 0,2287 | 0,1801  | 12,2941 | 17,6693 | 0      | 2,88     | 0,1006   | 0,1739 | 5,5194   | 0,0510 |
|          | CV        | 0,0722 | 0,0547  | 0,3571  | 0,4297  | 0      | 0,133    | 0,0255   | 0,0434 | 0,0272   | 0,0830 |
| PES_85H  | $\bar{x}$ | 2,6930 | 2,7867  | 42,4327 | 45,2494 | 28,33  | 30,00    | 4,7087   | 4,8121 | 173,4659 | 0,5982 |
|          | $\sigma$  | 0,1894 | 0,2850  | 4,5773  | 7,1913  | 2,89   | 0        | 0,5782   | 0,5083 | 58,9471  | 0,0698 |
|          | CV        | 0,0703 | 0,1023  | 0,1079  | 0,1589  | 0,10   | 0        | 0,1228   | 0,1056 | 0,3283   | 0,1171 |
| PES_170H | $\bar{x}$ | 2,6873 | 2,4060  | 61,2508 | 67,7321 | 30,00  | 30,00    | 5,4423   | 5,7808 | 39,9414  | 0,5103 |
|          | $\sigma$  | 0,1080 | 0,1430  | 1,4358  | 1,1797  | 0      | 0        | 0,1392   | 0,2278 | 8,9739   | 0,0067 |
|          | CV        | 0,0402 | 0,0595  | 0,0234  | 0,0174  | 0      | 0        | 0,0256   | 0,0394 | 0,2247   | 0,0131 |

Tab.9 Promjena mase uslijed višestrukih ciklusa habanja

| Uzorak         | m (g)*   | m <sub>1</sub> (g) | m (g)*        | m (g)*        | m (g)*        | m (g)*        | m (g)*        | m (g)*        |
|----------------|----------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Ciklusi</b> |          |                    | <b>10 000</b> | <b>20 000</b> | <b>30 000</b> | <b>40 000</b> | <b>50 000</b> | <b>60 000</b> |
| PES_N          | 164,6252 | 0,1808             | 164,6252      | 164,6243      | 164,6241      | 164,5890      | 164,5847      | 164,5836      |
| PES_85H        | 164,7942 | 0,1750             | 164,7941      | 164,7950      | 164,7943      | 164,6216      | -             | -             |
| PES_170H       | 164,7791 | 0,1879             | 164,6602      | 164,6557      | 164,6401      | -             | -             | -             |

\*m - masa uzorka+nosača u gramima, m<sub>1</sub> – masa uzorka u gramima

Rezultati otpornosti na habanje, tab.9, prikazuju ciklus tijekom kojeg dolazi do prekida prve niti uzorka (crveno označeno), kao i nastali gubitak mase. Kod standardne PES tkanine prekid se događa nakon 60 000 ciklusa, pri čemu je gubitak mase 0,03 %. Kod PES\_85H prekid prve niti događa se kod 40 000 ciklusa uz gubitak mase od 0,10 %. Tkanina starena 170 sati daje gotovo identičan gubitak mase (0,11 %), međutim prekid se događa pri ciklusu od 30 000 okretaja, što također potvrđuje negativan utjecaj umjetnoga starenja na strukturu niti osnove i potke u tkanini.

#### 4. Zaključak

Učinak simulacije ubrzanog starenja na svojstva PES tkanine istražen je kroz uvjete izlaganja uobičajene za Europu (umjerena temperaturna zona). Vrijeme izlaganja od 85 i 170 sati je približno ekvivalentno vremenu izlaganja 850 i 1700 sati u prirodnim uvjetima, utjecalo je na promjene svojstava PES tkanina; na molekularnoj razini starenjem dolazi do oksidacije polimernog lanca, cijepanja veza i stvaranja novih molekula. Na starenim tkaninama povećana je krutost materijala, vlačna svojstva se smanjuju proporcionalno duljini izlaganja, brži je prekid niti pri manjem broju ciklusa s većim gubitkom mase, što negativno utječe na niti osnove i potke. Vidljiva je promjena u području oko 2900 cm<sup>-1</sup> gdje je najvjerojatnije došlo do oksidacije na C–H vezi. Kod vrpce starene polieterske tkanine od 170 sati, primjetne su lagane promjene vrhova u području oko 970 cm<sup>-1</sup>. S gledišta udobnosti i sposobnosti upravljanja vlagom, standardna PES tkanina je ocijenjena kao „tkanina sa sposobnošću upravljanja vlagom“ (ocjena 3), starena (85 sati) je ocijenjena ocjenom 4 i definirana kao „tkanina sa sposobnošću upravljanja vlagom“ i starena (170 sati) kao „brzo apsorbirajuća i brzo sušuća tkanina“, ocjena 3. Osunčavanje uzrokuje fotooksidacijsku razgradnju polietera koja prvo počinje na površini materijala uslijed spore difuzije kisika u polimer. S obzirom da je u početku ona ograničena na površinski sloj, za posljednju ima promjene fizičkih svojstava, poput hrapavosti povr-

šine i gubitka sjaja. S vremenom uzrokuje smanjenje otpornosti na lom, te oslabljuje mehanička svojstva.

#### Zahvala



Rad doktorandice Ane Šaravanje izrađuje se i sufinancira dijelom u okviru aktivnosti na HrZZ DOK-2021-02-6750 „Projektu razvoja karijere mladih istraživača - osposobljavanje doktoranada“ i dijelom u okviru istraživačkog projekta HrZZ IP-2020-02-7575, InWaShed-MP“ Hrvatske zaklade za znanost. Dio eksperimentalnih rezultata proizašao je iz Erasmus+ mobilnosti u svrhu stručne prakse na Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija u trajanju 2 mjeseca.

Dio istraživanja proveden je na opremi kupljenoj u okviru projekta KK.01.1.1.02.0024 Modernizacija infrastrukture Znanstveno-istraživačkog centra za tekstil (MI-TSRC).

Dio rezultata prikazanih u radu proizašao je iz projektnog zadatka „Učinak simulacije ubrzanog starenja na svojstva polieterske tkanine“ izrađenog u okviru poslijediplomskog doktorskog studija Tekstilna znanost i tehnologija Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta u akad. god. 2022./2023., prihvaćenog (25. 9. 2023.) od strane Vijeća doktorskog studija Tekstilna znanost i tehnologija na Tekstilno-tehnološkom fakultetu.

#### Literatura:

- [1] White, J.R. Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect. *Comptes Rendus Chimie* **2006**, 9 (11–12), 1396–1408, DOI: 10.1016/j.crci.2006.07.008.
- [2] Cruz, R.; Correia, L.; Dushimimana, A.; Cabral-Fonseca, S.; Sena-Cruz, J. Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing. *Materials* **2021**, 14, 1533. DOI: 10.3390/ma14061533

- [3] Meng, J.; Wang, Y. A Review on Artificial Aging Behaviors of Fiber Reinforced Polymer-matrix Composites. *MATEC Web of Conferences* **2016**, 67, 06041-50603, DOI: 10.1051/mateconf/20166706041
- [4] Šaravanja, A.; Pušić, T.; Dekanić, T. Microplastics in Wastewater by Washing Polyester Fabrics. *Materials* **2022**, 15, 2683. <https://doi.org/10.3390/ma15072683>
- [5] ... Poliesterska vlakna, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/poliesterska-vlakna>, pristupljeno 12. 8. 2023.
- [6] Čunko, R.; Andrassy, M. *Vlakna*, Zrinski d.d., Čakovec, 2005.
- [7] Barot, A.; Panchal, T.; Patel, A.; Patel, C. Polyester the workhorse of polymers: A review from synthesis to recycling. *Archives of Applied Science Research* **2019**, 11, 2, 1-19
- [8] Smelik, A. Polyester: A Cultural History. The Journal of Design, *Creative Process & the Fashion Industry* **2023**, 15 (2), 279-299, DOI: 10.1080/17569370.2023.2196158
- [9] Palacios, M.; Van der Meer, Y.; Seide, G. Analysis of the polyester clothing value chain to identify key intervention points for sustainability. *Environmental Sciences Europe* **2021**, 33 (2), 1-25, DOI: 10.1186/s12302-020-00447-x
- [10] ... PET polyester recycling gathering momentum, *Innovation in Textiles* dostupno na: <https://www.innovationintextiles.com/pet-polyester-recycling-gathering-momentum/>, pristupljeno 12. 9. 2023.
- [11] Acierno, D.; Graziosi, L.; Patti, A. Puncture Resistance and UV aging of Nanoparticle-Loaded Waterborne Polyurethane-Coated Polyester Textiles. *Materials* **2023**, 16, 6844. DOI: 10.3390/ma16216844
- [12] Kim, H. R.; Song, W. S. Optimization of enzymatic treatment of polyester fabrics by lipase from Porcine Pancreas. *Fibers and Polymers* **2008**, 9 (4), 423-430.
- [13] Kim, H. R.; Song, W. S. Optimization of Papain Treatment for improving the Hydrophilicity of Polyester Fabrics. *Fibers and Polymers* **2010**, 11, 67-71.
- [14] Lee, S. H.; Song, W. S. Surface modification of polyester fabrics by enzyme treatment. *Fibers and Polymers* **2010**, 11 (1), 54-59, DOI: 10.1007/s12221-010-0067-z
- [15] Zimmermann, W.; Leggewie, C.; Agrawal, P.; Power, A.; Brinkmann, T.; Klein, M. *Biokatalytische Modifikation von Polyesterfaser-Oberflächen zur Herstellung innovativer Textilien*, Projektentblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Leipzig 2015.
- [16] Čorak, I.; Pušić, T.; Tarbuk, A. Enzimi za hidrolizu poliestera. *Tekstil* **2019**, 68 (7-9), 142-151.
- [17] Kausar, A. Review of fundamentals and applications of polyester nanocomposites filled with carbonaceous nanofillers. *Journal of Plastic Film & Sheeting* **2019**, 35 (1), 22-44, DOI: 10.1177/8756087918783827
- [18] Kim, H. R.; Song, W. S. Lipase treatment of polyester fabrics. *Fibers and Polymers* **2006**, 7 (4), 339-343.
- [19] Dekanić, T.; Soljačić, I.; Pušić, T. Uklanjanje mrlja s tekstila i kože. *Tekstil* **2009**, 58 (3), 75-92.
- [20] Abo El-Ola, S. M.; Elsayed, M.; El-bendary, M. Optimum conditions for surface modification of PET by lipase enzymes produced by Egyptian bacilli in comparison with standard one. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* **2013**, 38, 165-172.
- [21] Gaylarde, C.; Baptista-Neto, J. A.; Monterdo da Fonsera, E. Plastic microfibre pollution: how important is clothes' laundering?. *Heliyon* **2021**, 7 (5), 1-10, DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07105
- [22] Hernandez, E.; Nowack, B.; Mitrano, M. D. Polyester Textiles as a Source of Microplastics from Households: A Mechanistic Study to Understand Microfiber Release During Washing. *Environmental Science & Technology* **2017**, 51 (12), 7036-7046, DOI: 10.1021/acs.est.7b01750
- [23] Issac, M. N.; Kandasubramanian, B. Effect of microplastics in water and aquatic systems. *Environmental Science and Pollution Research* **2021**, 28, 19544-19562, DOI: 10.1007/s11356-021-13184-2
- [24] Katić Križmančić, I.; Salopek Čubrić, I.; Potočić Matković, V.M.; Čubrić, G. Changes in Mechanical Properties of Fabrics Made of Standard and Recycled Polyester Yarns Due to Aging. *Polymers* **2023**, 15, 4511. DOI: 10.3390/polym15234511
- [25] Girard, M.; Combeaud, C.; Billon, N. Effects of annealing prior to stretching on strain induced crystallization of polyethylene terephthalate. *Polymer* **2021**, 230, 124078. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124078;
- [26] Salopek Čubrić, I.; Čubrić, G.; Katić Križmančić, I.; Kovačević, M. Evaluation of changes in polymer material properties due to aging in different environments. *Polymers* **2022**, 14, 1682, DOI:10.3390/polym14091682

- [27] Cecen, V.; Seki, V.; Sarikanat, M.; Tavman, I.H. FTIR and SEM analysis of polyester-and epoxy-based composites manufactured by VARTM process. *Journal of Applied Polymer Science* **2008**, 108 (4), 2163-2170, DOI: 10.1002/app.27857
- [28] Pereira, A. P. S.; Silva, P. M. H.; Lima, E. P.; Paula, A. S. Processing and characterization of PET composites reinforced with geopolymer concrete waste. *Materials Research* **2017**, 20, 411-420, DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0734
- [29] Volmajer Valh, J.; Stopar, D.; Selaya Berodia, I.; Erjavec, A.; Šauperl, O.; Fras Zemljič, L. Economical Chemical Recycling of Complex PET Waste in the Form of Active Packaging Material. *Polymers* **2022**, 14, 3244. DOI: 10.3390/polym14163244
- [30] M290 Moisture Management Tester, Instruction Manual, Rev. 1.4 (06/18), [www.sdlatlas.com](http://www.sdlatlas.com)
- [31] Tarbuk, A.; Flinčec Grgac, S.; Dekanić, T. Wetting and wicking of hospital protective textiles, *Advanced Technologies* **2019**, 8 (2), 5-15, DOI: 10.5937/savteh1902005T
- [32] Šaravanja, A.; Dekanić, T.; Pušić, T.; Kaurin, T.; Grgić, K.; Čurlin, M. Surface properties of polyester fabrics. Proceedings of the GAMS 2022 International Conference, Paris, France (2022), DOI: 10.26799/cp-gams-2022
- [33] Kaurin, T.; Pušić, T.; Čurlin, M. Biopolymer Textile Structure of Chitosan with Polyester. *Polymers* **2022**, 14, 3088. DOI: 10.3390/polym14153088