

Utjecaj stlačivosti na kontaktnu toplinsku vodljivost romboidno prošivenih materijala za namjensku odjeću

Nikolina Jukl*, Snježana Firšt Rogale, Dubravko Rogale

Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska

*Dopisni autor: nikolina.jukl@ttf.unizg.hr

Pristiglo 16. srpnja 2023.

UDK 677.017.56:536.24

Izvorni znanstveni rad

U radu je određen utjecaj stlačivosti na kontaktnu toplinsku vodljivost romboidno prošivenih materijala za namjensku odjeću, a u cilju određivanja egzaktnih podataka bitnih kod tehničkog projektiranja namjenske odjeće potrebnih toplinskih svojstava. Ispitivanja su izvedena na temelju novouspostavljene mjerne metode na višenamjenskom diferencijalnom konduktometru, koji je realiziran, patentiran, umjeren te instaliran u Laboratoriju za termoizolacijska svojstva odjeće u Zavodu za odjevnu tehnologiju. Navedeni materijali se koriste za izradu toplinskih umetaka i podstave namjenske odjeće, te imaju izvrsna toplinska svojstva. Dva mjerna uzorka su prošivena tehnikom šivanja s kvadratnim korakom komore, dok je treći mjerni uzorak spojen ultrazvučnom tehnikom s tzv. zrcalno protusmjernom putanjom ultrazvučnog spajanja, ali se također, u realnom sektoru, naziva romboidno prošivenim materijalom. S obzirom na tehniku izrade prošiva, odnosno spojeva i korak komore korištenih materijala određeni su geometrijski parametri prošiva / spoja, koji također utječu na toplinska svojstva namjenske odjeće.

Ključne riječi: *tehničko projektiranje odjeće; višenamjenski diferencijalni konduktometar; kontaktna toplinska vodljivost; stlačivost*

Original scientific paper

In this paper, the influence of compressibility on the thermal contact conductivity of diamond-shaped quilted lining for special purpose clothing will be determined with the aim of obtaining the accurate data essential for the technical design of special purpose clothing, the required thermal properties. The tests were carried out on the basis of the newly established measurement method using a multipurpose differential conductometer, developed, patented, calibrated and installed in the Laboratory for thermal insulation properties of clothing at the Department of clothing technology. The materials mentioned are used for the production of thermal inserts and linings for special purpose clothing and have excellent thermal properties. Two specimens were oversewn using the sewing technique with square chamber segments, while the third specimen was joined using the ultrasonic welding technique with the so-called mirror-image trajectory of the ultrasonic welding, but in practice they are also called diamond-shaped quilted lining. The geometric parameters of the seam/weld and chamber segments, which also influence the thermal properties of the materials used, are determined with regard to the sewing or welding technique.

Keywords: technical design of clothing; multipurpose differential conductometer; thermal contact conductivity; compressibility

1. Uvod

Namjenska odjeća je odjeća koja je namijenjena za točno određenu namjenu, kao npr. službe za zaštitu građana (policijski i vatrogasni djelatnici, specijalne postrojbe, liječnici, bolnice i djelatnici hitne pomoći), laboratorijski radnici i znanstvenici, vojska (vojnici i piloti), cestovni radnici i službe za održavanje, poš-tari, radnici na platformama za izvlačenje prirodnih resursa (plin, nafta, voda), astronauti, pomorci i ronici, prerađivačka industrija, farmaceutska industrija i mnoge druge djelatnosti.

Tehničko projektiranje namjenske odjeće složen je proces koji uključuje razmatranje utjecaja ljudske anatomije i fizioloških karakteristika, okoliša i djelatnosti u kojem će se odjevni predmet koristiti. Uz sve navedeno potrebno je razmotriti i utjecaj konstrukcije odjavnog predmeta, te strukture i karakteristike ugradbenih materijala od kojih će se odjevni predmet izraditi, kao i toplinsku ugodu, taktilnu ugodu i dr.

Pri tehničkom projektiranju namjenske odjeće potrebno je proučiti specifične uvjete u kojima će se takav odjevni predmet primijeniti. Na temelju toga započinje proces tehničkog projektiranja, pri čemu je najveći naglasak na funkcionalnosti, kao prvom i temeljnom zahtjevu koji mora biti zadovoljen. Iako vrlo bitni za subjektivan osjećaj fizičke i psihološke ugone nosioca, estetika i dizajn postaju sekundarni elementi pri realizaciji namjenske odjeće.

Na toplinska svojstva odjeće utječe vrsta i trajanje aktivnosti nositelja odjavnog predmeta, njegovo zdravstveno stanje, dob, spol i sl., okolišni uvjeti (temperatura, strujanje zraka, relativna vlažnost zraka) te vrsta i svojstva materijala, konstrukcijski parametri odjeće te slojevitost. Stoga je potrebno odabrati primjerene ugradbene materijale ovisno o namjeni odjavnog predmeta.

2. Ugradbeni materijali za izradu namjenske odjeće

Ugradbeni materijali koji se koriste za izradu toplinskih umetaka i podstave namjenske odjeće za zaštitu od niskih temperatura su materijali visokotehnoloških izvedbi i specifičnih svojstava prilagođenih potrebama korisnika. Za izradu vanjske školjke najčešće se koriste laminirani materijali.

Tekstilni laminirani materijali sastoje se od jednog ili dva sloja tekstilnog materijala te sloja membrane koja daje dišljivost takvim materijalima. Pri izradi tekstilnih laminata membrana može biti naslojena na bilo koji sloj materijala koji sačinjavaju laminat. Tako se ona, u slučaju kada je naslojena na naličje vanjske školjke, a odjevni predmet nema podstavu, nalazi u

izravnom kontaktu sa ljudskim tijelom. Membrana u nekim izvedbama može biti odvojena od materijala za izradu vanjske školjke, kao zaseban sloj. Ona je naslojena na sloj materijala koji se nalazi između podstave i vanjske školjke odjavnog predmeta, čime se stvaraju slojevi zarobljenog zraka. Membrana se može naslojiti i na podstavni materijal čime je postignuto da ona nije u izravnom kontaktu s ljudskim tijelom [1].

R. Plunkett, koji je radio za tvrtku DuPont, 1938. godine razvio je politetrafluoretilen (PTFE) koji je tvrtka kasnije zaštitila pod nazivom Teflon®. Prema zahtjevu američke vojske taj izum je zaštićen kao vojna tajna, te su ga koristili isključivo za vojne potrebe tijekom Drugog svjetskog rata, stoga DuPont nije mogao komercijalizirati svoj proizvod. Tvrtki DuPont je dozvoljena samo jedna prijava patenta 1941. godine kako bi tvrtka ipak zaštitila svoje pravo na korištenje izuma, te njegovu komercijalizaciju po završetku rata. Međutim, tvrtka je i dalje razvijala teflon poboljšanih svojstava radi potreba vojske, koji je po završetku rata bio spreman

B. Gore, koji je radio na razvoju PTFE-a u DuPont-u, nije imao razumijevanja od nadređenih za daljnji razvoj, te je 2008. osnovao vlastitu tvrtku W. L. Gore & Co. Njegova ideja je bila razviti PTFE koji bi imao pojačana svojstva poroznosti, propusnosti zraka i čvrstoće što je dobio postupkom ekspaniranja, te je novorazvijenu membranu nazvao ePTFE. Nastavio je sa razvojem te usavršio tzv. ekspanirani politetrafluoretilen (ePTFE), te ga zaštitio pod imenom Gore-Tex. ePTFE membrane su debljine $< 1 \mu\text{m}$, a 1 cm^2 sadrži preko 1,4 bilijuna pora. Te pore su 20 000 puta manje od kapljice vode, te 700 puta veće od molekule vodene pare. Upravo je to ono što omogućava vodootpornost uz istovremenu dišljivost odjeće. Tzv. microfleece materijali, koriste se kao toplinski izolacijski materijal, koji se može koristiti za izradu gornjeg odjavnog predmeta, kao podstava ili toplinski umetak. Fleece materijali su vrlo udobni, mekani na dodir, te pružaju dobra toplinska svojstva.

Romboidno prošivena podstava, sl.1, se također koristi kao toplinski izolacijski materijal, odnosno za izradu toplinskog umetka ili podstave. Izrađena je od dva sloja vanjskog materijala (najčešće podstavni materijal) i poliesterskog punila. Navedena vrsta podstave može biti izrađena i od pet slojeva gdje se uz prethodno navedene slojeve nalaze još dva sloja tzv. blokade, koje služe za sprječavanje izlaska poliesterskih vlakana punila na vanjski sloj [2].

Romboidno prošiveni materijali kod namjenske odjeće mogu se koristiti kao neodvojivi toplinski umetak koji je trajno spojen na odjevni predmet, kao odvojivi toplinski umetak u obliku prsluka ili jakne, te kao podstavni materijal na prsluku, jakni, kaputu i dr., sl.2.



a.



b.

Sl.1 Romboidno prošiveni podstavni materijal a. šivaćim strojem i b. tehnikom ultrazvučnog spajanja [3, 4]



a.



b.



c.

Sl.2 Primjeri upotrebe romboidno prošivenih materijala: a. zaštitni prsluk, b. odvojni toplinski umetak koji služi kao zasebna jakna, c. ušivena podstava jakne [5]

Pri tome mogu biti spojeni na vanjski odjevni predmet pomoću zatvarača, gumbi, metalnih kopči, čičaka i sl.

3. Toplinska svojstva odjeće

Prema HRN EN ISO 7730:2008 toplinska uroda definirana je kao stanje svijesti koje izražava zadovoljstvo s toplinskim uvjetima okoliša [6]. Toplinska uroda postignuta je kada temperatura tijela varira u malim rasponima, a vlažnost kože je niska, te kada su potrebne minimalne fiziološke reakcije za regulaciju tjelesne temperature. Proučavanje toplinske urode temelji se na proučavanju stanja toplinske ravnoteže okoliša i sposobnosti ljudskog tijela da se prilagodi toplinskim uvjetima okoliša ili sposobnost ljudi da prilagode uvjete okoliša, najčešće u zatvorenim prostorima, kako bi ostvarili osjećaj toplinske urode [7]. Kako bi se održala toplinska ravnoteža ljudskog tijela organizam pomoću termoregulacijskog sustava održava stalnu tjelesnu temperaturu tako da neprestano izjednačuje količinu proizvedene topline i količinu izgubljene topline [8]. Termoregulacija gubi učinko-

vitost pri vrlo niskim i vrlo visokim temperaturama okoliša što može uzrokovati toplinski udar ili smrzavanje organizma [8-10].

Prijenos topline je dinamičan proces pri kojem toplina spontano prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature. Prijenos topline vrši se sve dok se ne uspostavi toplinska ravnoteža. Toplina se može prenositi na tri načina [11,12]:

- Vođenjem ili kondukcijom topline - toplinska se energija titranjem i sudarima susjednih atoma prenosi sa mjesta više temperature na mjesta niže temperature. Vođenje je karakteristično za krutine i fluide kada miruju.
- Strujanjem ili konvekcijom topline – karakteristično za fluide (kapljevine i plinove). Čestice se zagrijavanjem počinju kretati, i toplije čestice predaju svoju energiju hladnijim.
- Zračenjem ili radijacijom topline - jedini prijenos toplinske energije koji se odvija bez posredovanja tvari. Toplinska energija tijela pretvara se u elektro-magnetsko zračenje koje tijelo emitira u okolni prostor. Zračena energija ovisi o temperaturi tijela; nema kontakta, a temperatura se mijenja.

Brzina prijenosa topline definirana je kao protok topline po jedinici površine. Količina topline koja se prenosi, odnosno ukupni toplinski tok, može se izračunati prema izrazu [11, 13]:

$$Q = q \cdot A \quad (1)$$

gdje je:

Q – ukupni toplinski tok [W]

q – gustoća toplinskog toka [W/m^2]

A – promatrana površina [m^2]

Odjeća značajno utječe na toplinsku ugodu. To je razlog zbog kojeg se u toplijim razdobljima godine odijeva odjeća od laganijih i prozračnih materijala koja ima izraženu toplinsku vodljivost, a u hladnijim razdobljima od voluminoznih i debljih materijala koji imaju dobru toplinsku izolaciju. Odjećom se osigurava toplinska uгода nositelja u okolišu u kojem se on nalazi [14].

Prijenos topline kod tekstilnih materijala pokazuje da se toplinska energija prenosi između dva medija (objekta) zbog pojave razlike u temperaturama gdje toplina prelazi s medija veće temperature na medij niže temperature. Prijenos topline će se nastaviti sve dok dva medija ne postignu istu temperaturu. Toplina se u tekstilnim materijalima može prenositi kondukcijom, kroz zrak i vlakna, konvekcijom zraka unutar strukture tkanine i zračenjem, od vlakna do vlakna. Prijenos topline kondukcijom odvija se između dva fizička objekta koji su u kontaktu, pri čemu toplinski tok ovisi o razlikama u temperaturama. Što je veća razlika u temperaturama, to je prijenos topline između dvije površine brži [13].

Kod promatranja prijenosa topline odjevnih predmeta i sustava, prijenos topline kondukcijom odvija se između dva materijala ili između materijala i ljudske kože, pri čemu toplina prelazi s ljudskog tijela na odjevni predmet ili odjevni sustav, a zatim u okoliš. Toplina se na taj način prenosi u okoliš pomoću procesa kondukcije i radijacije. Prijenos topline može se odvijati i konvekcijom, ali značajniji utjecaj konvekcije odvija se pri većoj brzini strujanja zraka [11, 13].

Vrlo važni parametri toplinskih svojstava materijala su otpor prolasku topline i toplinska vodljivost. Na navedena toplinska svojstva utječu karakteristike materijala kao što su struktura materijala, gustoća, vlažnost, vrsta materijala i svojstva vlakana, površinska obrada, završna obrada i stlačivost, zrakopropusnost, temperatura okoliša i slično [14]. Toplinska vodljivost je svojstvo materijala koje izražava njegovu sposobnost da omogućava protok topline, a toplinska izolacija svojstvo odjeće da zadržava toplinu [15-17]. Na prijenos topline kroz ugradbeni materijal, odjevni kompozit ili odjeću utječu procesi prijenosa topline

kondukcijom i radijacijom. Prijenos topline kondukcijom određen je debljinom materijala i njegovoj toplinskoj vodljivosti, tj. prijenosu topline s tijela veće temperature na tijelo manje temperature [18]. Brzina prijenosa topline kondukcijom kroz određeni materijal konstantne debljine proporcionalna je temperaturnoj razlici između gornje i donje površine materijala i promatranoj površini okomitoj na pravac prijenosa topline, te obrnuto proporcionalna debljini materijala. Prema Fourierovom zakonu prijenosa topline kondukcijom toplina se prenosi u smjeru niže temperature i tada razlika u temperaturama postaje negativan iznos, tj. s povećavanjem debljine materijala temperatura se smanjuje [19]:

$$q = \frac{Q}{t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{h} \quad (2)$$

gdje je:

q – gustoća toplinskog toka [W/m^2]

Q – brzina prijenosa topline kondukcijom/toplinski tok [W]

t – vrijeme provođenja topline [s]

λ – koeficijent toplinske vodljivosti materijala [W/mK]

A – promatrana površina [m^2]

ΔT – razlika temperatura između dvije strane uzorka [K]

h – debljina materijala [mm]

Koeficijent toplinske vodljivost definira protok topline kroz promatranu površinu u određenom vremenskom trajanju, uzimajući u obzir debljinu materijala i razlike u temperaturama, a definiran je izrazom [18, 20, 21]:

$$\lambda = \frac{Q \cdot h}{A \cdot t \cdot \Delta T} \quad (3)$$

gdje je:

λ – koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]

Q – toplinski tok [W]

h – debljina materijala [m]

A – promatrana površina [m^2]

t – vrijeme provođenja topline [h]

$T_1 - T_2 = \Delta T$ – temperaturna razlika između dvije strane uzorka [K]

Vremenski parametar t u izrazu (3) ne koristi se kod mjernih metoda gdje je uzorak izložen uvjetima okoliša. Npr. kod vruće ploče gdje nema gornje ploče koja stješnjava uzorak, nego se toplina s uzorka prenosi izravno u okoliš, konvekcijom (strujanje zraka). Vremenski parametar koristi se kod primjene mjernih metoda gdje se mjereni parametar mora mjeriti i promatrati kroz određen vremenski period, a koji je uobičajeno definiran normom.

Niža vrijednost toplinske vodljivosti kondukcijom znači da je brzina prijenosa topline kroz promatranu

površinu manja, a time je materijal i bolji toplinski izolator jer zadržava toplinu [18, 21].

Otpor prolasku topline može se izračunati na temelju izraza [20, 21]:

$$R = \frac{h}{\lambda} \quad (4)$$

gdje je:

R – otpor prolasku topline [m²K/W]

h – debljina materijala [m]

λ – koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]

Koeficijent prolaska topline definira količinu topline koju materijal gubi po kvadratnom metru površine, pri razlici temperature od jednog stupnja po sekundi.

$$U = \frac{\lambda \cdot A}{\Delta h} = \frac{\lambda \cdot A}{h} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (5)$$

gdje je:

λ – koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]

A – površina materijala okomita na smjer prolaska topline [m²]

h – debljina materijala [m]

Kontaktna toplinska vodljivost predstavlja prijenos topline između dodirnih točaka dva materijala, a to je gustoća toplinskog toka (q_{max}) na dodirnim površinama te se izražava u mjernoj jedinici W/m². Kada su dva materijala, ili npr. dvije mjerne ploče i mjerni uzorak, postavljeni tako da se dodiruju, potpuni površinski kontakt između njih nikada nije u potpunosti ostvaren. Razlog tome je površinska struktura krutih tvari, odnosno njena grubost, koja uzrokuje smanjenje dodirnih točaka, njihove veličine i pojavu zračnih slojeva između dodirnih točaka. Ti zračni slojevi uzrokuju smanjenje toplinske vodljivosti materijala. Što je veći broj kontaktnih točaka, to će kontaktne toplinska vodljivost biti veća. Na kontaktnu toplinsku vodljivost utječe i stlačivost materijala, s obzirom da se povećava broj kontaktnih točaka između materijala, uslijed djelovanja određene sile.

Materijali su tijekom procesa proizvodnje odjeće izloženi različitim naprezanjima: istezanje pri polaganju krojnih slojeva u krojne naslage, izlaganje stlačivosti pri iskrojavanju radi vakuuma koji pomaže u stabilizaciji krojne naslage, te njihova transformacija iz dvodimenzionalnih struktura u trodimenzionalne odjevne predmete tijekom procesa šivanja. Neki dijelovi gotovih odjevnih predmeta su tijekom upotrebe izloženi stlačivosti, kao npr. područje ramena, leđa, laktova i sl., a javlja se zbog nošenja ruksaka ili nekog drugog tereta, stegnutosti remenja, traka i sl., sl.3. Jačina sile koju tkanina, traka i sl. vrše na tijelo ovisi o tipu i obliku tijela, vrsti i strukturi vlakna te strukturi ugradbenih materijala, ali i čvrstoći kojom pritišće teret ili steže traka. Kako bi se postigla željena svojstva odjevnog predmeta potrebno je definirati stlačivost materijala [22].

Stlačivost materijala ima značajan utjecaj na toplinsku vodljivost odjevnih predmeta, a time i na toplinsku ugodu nositelja. Što je veća stlačivost materijala to je veća i toplinska vodljivost, kao rezultat smanjenja debljine materijala. Stlačivost materijala povećava se gustoća vlakana na jedinici površine, a istovremeno se smanjuje količina zraka u strukturi materijala [22].

Osim na toplinsku ugodu stlačivost ima značajnu ulogu pri razmatranju opipa i udobnosti materijala. Ona utječe na osjećaj mekoće i punoće materijala, te je bitno svojstvo koje treba uzeti u obzir pri rukovanju materijalom tijekom proizvodnje odjeće. Pri automatizaciji proizvodnje odjevnih predmeta stlačivost materijala utječe na proces odvajanja jednog sloja materijala iz svežnja i njegovog dovođenja do radne površine pomoću stroja ili uređaja [25].



Sl.3 Prikaz mjesta stlačivosti na odjevnim predmetima [23, 24]

Za potrebe istraživanja stlačivosti materijala razvijeno je više mjernih uređaja nekoliko istraživačkih skupina razvilo je različite metode za određivanje stlačivosti materijala, kao npr. kompresometar za procjenu stlačivosti debljine i otpora materijala na tlačenje ili debljinometar. Među najčešće korištenim mjernim uređajima za određivanje stlačivih svojstava materijala smatraju se FAST i KES mjerni sustavi.

Za određivanje stlačivosti materijala, prema mjernoj metodi i postupku ispitivanja navedenim u normama (HRN EN ISO 5084, DIN 53855/1,2,3, ASTM D 1777), potrebno je prvo definirati debljinu plošnih proizvoda. Debljina materijala definirana je kao razmak između dvije ravne metalne, paralelne ploče razmaknute plošnim proizvodom, pri čemu je gornja ploča pod utjecajem određene sile i naziva se pritiskivač [26]. Mjerni rezultat izravno ovisi o sili koja za vrijeme ispitivanja djeluje na materijal, pri čemu se materijal komprimira, pa je podatak o primijenjenoj sili obavezno navesti pri prezentiranju rezultata ispitivanja.

Prema DIN normi, uz podatak o debljini, potrebno je izračunati i relativnu stlačivost pomoću izraza:

$$s_x = \frac{d_x - d_{10x}}{d_x} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

gdje je:

s_x – relativna stlačivost materijala [%]

d_x – debljina plošnog proizvoda izmjerena uz silu pritiska gornje ploče prema DIN 53855 [mm]

d_{10x} – debljina izmjerena uz 10 puta veći pritisak [mm]

4. Pregled dosadašnjih istraživanja

Neki autori proučavaju utjecaj strukture i vrste materijala te površinskih obrada materijala na svojstva toplinske vodljivosti s ciljem definiranja osjećaja udobnosti materijala u smislu toplo/hladnog osjećaja pri kontaktu s ljudskim tijelom [27-30]. U nekim radovima autori zanemaruju debljinu materijala koja ima vrlo značajan utjecaj na toplinska svojstva. U sličnom istraživanju L. Hes istražuje svojstva toplinske vodljivosti, otpora prolasku topline i taktilni osjet pri kontaktu s tijelom na 15 umjetnih krzna i 16 životinjskih krzna [31]. Za mjerenja su korišteni mjerni uređaji Alambeta i Permetest. Autor zaključuje da umjetna krzna imaju manji otpor prolasku topline, ali pružaju bolji osjet topline pri kontaktu s tijelom. Pri usporedbi propusnosti vodene pare između prirodnih i umjetnih krzna, prirodna krzna imaju manju propusnost i to u prosjeku 5%, ali autor smatra da su njihova toplinska svojstva i dalje vrlo dobra radi druge prednosti koje imaju, a to je visoka apsorpcija vlage.

Računalno kontrolirani mjerni uređaj Alambeta često se koristi za brzo mjerenje prolaznih i stabilnih toplinsko izolacijskih svojstava, odnosno za mjerenje otpora prolasku topline i kontaktnih toplinska svojstva. Alambeta [14] ima poluautomatski način rada, te omogućava i statističku obradu rezultata mjerenja. Također, ima auto-dijagnostiku pomoću koje se smanjuju potencijalne pogreške tijekom provođenja mjerenja. Pomoću navedenog mjernog uređaja moguće je provesti mjerenja toplinske vodljivosti λ [W/mK], otpora prolasku topline R [m²K/W], toplinsku difuziju a [m²s⁻¹], maksimalnu kontaktnu vodljivost q_{\max} [W/m²], toplinsku apsorpciju b [W s^{1/2} m⁻² K⁻¹] i debljinu materijala h [m]. Alambeta se sastoji od dvije mjerne ploče, ili glave, između kojih se postavlja uzorak materijala ili odjevnog kompozita. Obje mjerne ploče su opremljene termoelementima i sensorima koji mjere protok topline. Mjerna metoda odnosi se na mjerenje količine protoka topline (gustoća toplinskog toka) kroz mjerni uzorak materijala. Gornja ploča se zagrijava na zadanu temperaturu koja je konstanta (tzv. vruća ploča), dok se temperatura donje mjerne ploče održava na vrijednosti temperature okoliša (tzv. hladna ploča). Senzori za mjerenje protoka topline mjerenje provode u trenutku dodira mjernih površina ploča-uzorak-ploča, tj. mjere kontaktnu vodljivost mjernog uzorka. Kada se gornja mjerna ploča spusti na mjerni uzorak moguće je izmjeriti protok topline na gornjoj površini mjernog uzorka, u ovisnosti o vremenu [31, 32].

Pomoću Alambete moguće je mjeriti i omjer maksimalnog i stacionarnog protoka topline, te stalnu gustoću protoka topline na dodirnim površinama (kontaktna toplinska vodljivost). Određivanje kontaktne toplinske vodljivosti se provodi nakon uspostave toplinske ravnoteže, za razliku od prethodno opisane metode gdje je autor određivao kontaktnu toplinsku vodljivost pri prvom kontaktu mjerne ploče i materijala. Na kontaktnu toplinsku vodljivost utječe i stlačivost materijala, s obzirom da se stlačivošću materijala povećava broj kontaktnih točaka između materijala.

M. Matusiak i S. Kowalczyk na mjernom uređaju Alambeta ispituju odnos između toplinskih svojstava ugradbenih materijala i odjevnih kompozita koji su od njih izrađeni [33]. Mjerali su toplinsku vodljivost, otpor prolasku topline, toplinsku apsorpciju, debljinu materijala te maksimalni protok topline pri kontaktu. Autori su zaključili da je otpor prolasku topline dvoslojnih odjevnih kompozita približno jednak zbroju otpora prolasku topline pojedinačnih slojeva materijala, ali to nije slučaj kod višeslojnih odjevnih kompozita gdje se razlika vrijednosti povećava s povećanjem broja slojeva materijala. Isto je primijećeno i kod rezultata mjerenja toplinske vodljivosti.

P. Lizak i sur. proučavali su utjecaj pletene strukture materijala izrađenog od polipropilenskog vlakna na prijenos topline koji je eksperimentalno izmjeren na šest uzoraka, a svaki uzorak ispitan je na tri mjerna uređaja: Alambeta, Togmetar i mjerni uređaj PSM2 [14, 34]. Rezultati su pokazali da ovisnost između promatranih svojstava strukture materijala i otpora prolasku topline nije velika, te zaključuju da je uređaj Alambeta najobjektivnija metoda za mjerenje toplinskih parametara pletenih tkanina radi brzine mjerenja i reproducibilnosti rezultata.

D. Atalie i sur. istražuju utjecaj uvijenosti pređe potke na toplinsku vodljivost tkanog materijala [35]. Mjerenja su pokazala da se s povećanjem uvijenosti pređe potke povećava i toplinska vodljivost materijala.

S. Mohapatra i sur. istražuju toplinsku vodljivost materijala izrađenih od poliestera [36], te zaključuju da struktura materijala, odnosno vrsta vlakna, gustoća materijala i duljina očica pletenog materijala, značajno utječe na toplinsku vodljivost. U istraživanju su korišteni mjerni uređaji Permetest i Alambeta. Prema autorima toplinska vodljivost materijala povećala se s smanjenjem debljine materijala. Isto je primijećeno i pri većim duljinama očica kod pletenog materijala. Sličnim istraživanjem bavi se i Z. E. Kanat koji također dolazi do sličnih zaključaka [37].

D. Rogale i sur. bave se i proučavanjem toplinske izolacije vanjske školjke, toplinskih umetaka i odjevnih sustava, kao i višeslojnih toplinskih umetaka ugrađenih u namjensku odjeću koja je namijenjena za upotrebu pri hladnim uvjetima [38]. Mjerenja su provedena na toplinskom manekenu, a rezultati su pokazali da se s povećanjem mase odjevnog sustava, ali i njegove debljine povećava i toplinska izolacija. Mnogi autori proučavaju utjecaj stlačivosti materijala na njegova toplinska svojstva. Tako A. Begum i V. Subramanjam proučavaju stlačivost materijala izrađenih, prema načinu tvorbe očica, u osnovinom pletivu i s različitim duljinama očica [39]. Prema autorima, na stlačivost materijala utječu duljina očica i površinska gustoća vlakana.

Alimaa i sur. provode slično istraživanje na materijalima izrađenim od vlakana sirovinskog sastava kašmir i teksturiranog materijala sirovinskog sastava poliester [40]. Prema autorima, na stlačivost materijala utječe struktura materijala, što se odnosi na njegovu masu, vrstu vlakna od kojeg je izrađena, te duljine očica. A. Asayesh i sur. proveli su slično istraživanje u kojem proučavaju utjecaj vrste tkanja i gustoće potke na stlačivost materijala [41].

K. A. Asanovic i sur. bave se proučavanjem stlačivosti tkanih materijala [42]. Prema autorima, najbolja svojstva stlačivosti pokazali su materijali sirovinskog sastava mješavine pamuka i poliester izrađeni u keper vezu, a najlošija svojstva materijali sirovinskog sastava pamuk, izrađeni u platnom vezu. Slično is-

traživanje proveo je i J. O. Ukponmwan koji proučava i učinak habanja u mokrim i vlažnim uvjetima na ponašanje materijala pri stlačivosti [43].

Radi široke primjene tzv. spacer materijala, mnogi autori bave se proučavanjem njihove stlačivosti [41, 44, 45]. Istražuju utjecaj njihove strukture, debljine, slojevitosti odjevnog kompozita kojeg sačinjava i spacer materijal, šavova i prošiva, te drugih parametara na stlačivost. U svim radovima autori zaključuju da navedeni parametri imaju izražen utjecaj na stlačivost tzv. spacer materijala.

M. Venkataraman navodi da je toplinska vodljivost približno konstantna za materijal i da je obrnuto proporcionalna njegovoj debljini [46]. Povećanjem debljine materijala, kao i broja slojeva, a zbog povećane količine zarobljenog zraka, smanjuje se toplinska vodljivost.

L. Schacher i sur. proučavaju utjecaj stlačivosti pri određivanju toplinske vodljivosti poliesterske tkanine od mikrovlakana [27]. Mjerenje debljine je provode, kao i ispitivanje stlačivosti, na KES-FB4 mjernom uređaju. Rezultati su pokazali malu razliku vrijednosti toplinske vodljivosti između dva materijala, što autori objašnjavaju malom razlikom u poroznosti strukture oba materijala. Rezultati su također pokazali da poliesterski materijal izrađen od mikrovlakana daje topliji osjećaj pri kontaktu, ovisno o primijenjenom tlaku.

G. Gnauthayan i sur. se bave istraživanjem otpora prolasku topline višeslojnih netkanih tekstilija izrađenih od poliesterskog vlakna [47]. Ispitan je utjecaj varijacije gustoće vlakana, oblik poprečnog presjeka vlakana, pozicioniranje unutar slojeva, te stlačivosti na otpor prolasku topline. Ispitivanja su provedena na vrućoj ploči. Kontrolom debljine uzoraka tijekom ispitivanja autori su htjeli izbjeći utjecaj zraka na rezultate kako bi se mogli fokusirati na utjecaj gustoće vlakana i pozicioniranje netkanih materijala, pa su uvijek mjerili pri istoj debljini. Mjerenja su pokazala da su troslojne netkane strukture imale bolji otpor prolasku topline od jednoslojnih struktura i to ne radi pojave zračnog sloja između slojeva materijala, koji je u ovom istraživanju eliminiran, već radi smanjenog gubitka topline putem kondukcije koji se događa radi boljeg zarobljavanja zraka u pojedinačnim slojevima materijala, a to utječe i na gubitak topline radijacijom i konvekcijom. Na temelju rezultata autori zaključuju da se mješavinom šupljikavih i čvrstih, ispunjenih vlakana postižu najbolja svojstva materijala u smislu otpora prolasku topline i ponašanja pri različitim vrijednostima sile pritiska, odnosno opterećenja i stlačivosti materijala.

Troslojni odjevni kompozit predmet je istraživanja utjecaja stlačivosti na otpor prolasku topline koje provode Shabaridharan Karunamoorthy i A. Das [48]. Istraživanje je provedeno na tri mjerna uređaja:

Alambeta, vruća ploča i mjernom uređaju koji su izradili autori ovog rada. Mjerenja na novoizrađenom uređaju su provedena pri tri tlačnom opterećenju od 100 Pa, 1400 Pa i 2100 Pa, nakon čega je provedena statistička obrada rezultata. Usporedbom rezultata zaključeno je da se otpor prolasku topline smanjuje u rasponu 68,82-89%, u odnosu na rezultate dobivene mjerenjem na vrućoj ploči.

Neki autori su izradili pamučne materijale na način da su poboljšali njihovu toplinsku vodljivost na način da su izradili materijale različite poroznosti i debljine. Također, bilo je pokušaja regulacije toplinske vodljivosti pamučnih materijala naslojavanjem drugih materijala na njega ili završnim obradama u smislu specijalnih premaza. Na taj način moguće je poboljšati toplinsku vodljivost i apsorpciju vlage te njeno odvođenje u okoliš. U nekim istraživanjima zabilježen je porast toplinske vodljivosti od 151% nakon nanošenja sloja premaza koji sadrži ugljikove nanocjevčice (engl. *multi-wall carbon nanotubes*, MWCNT) [49].

5. Eksperimentalni dio

Utjecaj stlačivosti na kontaktnu toplinsku vodljivost romboidno prošivenih materijala za namjensku odjeću određen je pomoću višenamjenskog diferencijalnog konduktometra. Za ispitivanje su korištene tri vrste romboidno prošivenih materijala, od kojih su dva prošivena tehnikom šivanja, a treći tehnikom ultrazvučnog spajanja. Razlika je i u izgledu prošiva. Prva dva uzorka kvadratni korak komore, a treći je izrađen zrcalno protusmjernom putanjom ultrazvučnog spajanja, sl.4.

Na sl.5 prikazani su geometrijski parametri korištenih materijala.

Debljina korištenih materijala određena je pomoću Dino-Lite digitalnog mikroskopa. Pomoću mikroskopa se pri povećanju u rasponu 50-200 puta, ovisno o debljini materijala i njegovim karakteristikama, odredila debljina romboidno prošivenih materijala.

Nakon što se pomoću mikroskopa dobila uvećana slika materijala, u programskoj podršci zvanjoj Dino Capture se na dobivenoj slici pet puta izmjerila debljina materijala, te se izračunom aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti odredila prosječna debljina materijala.

Višenamjenski toplinski konduktometar korišten u ovim istraživanjima [50], prikazan je na sl.6. Sva mjerenja koja se provode na višenamjenskom diferencijalnom konduktometru su nedestruktivna [51, 52].

Za određivanje otpora prolasku topline koristi se stacionarno stanje strujanja topline od mjernog valjka prema mjernoj bazi. Otpor prolasku topline određuje se izrazom:

$$R_{ct0} = \frac{(T_s - T_a) \cdot A}{H_0} \quad (7)$$

gdje je:

R_{ct0} – otpor prolasku topline prazne površine mjernog uređaja zajedno s graničnim slojem zraka uz površinu [m^2K/W]

A – površina mjerne ploče [m^2]

T_s – površinska temperatura baze mjerne ploče [$^{\circ}C$]

T_a – temperatura ambijenta [$^{\circ}C$]

H_0 – električna snaga potrebna za održavanje zadane temperature mjerne ploče [W]



a.

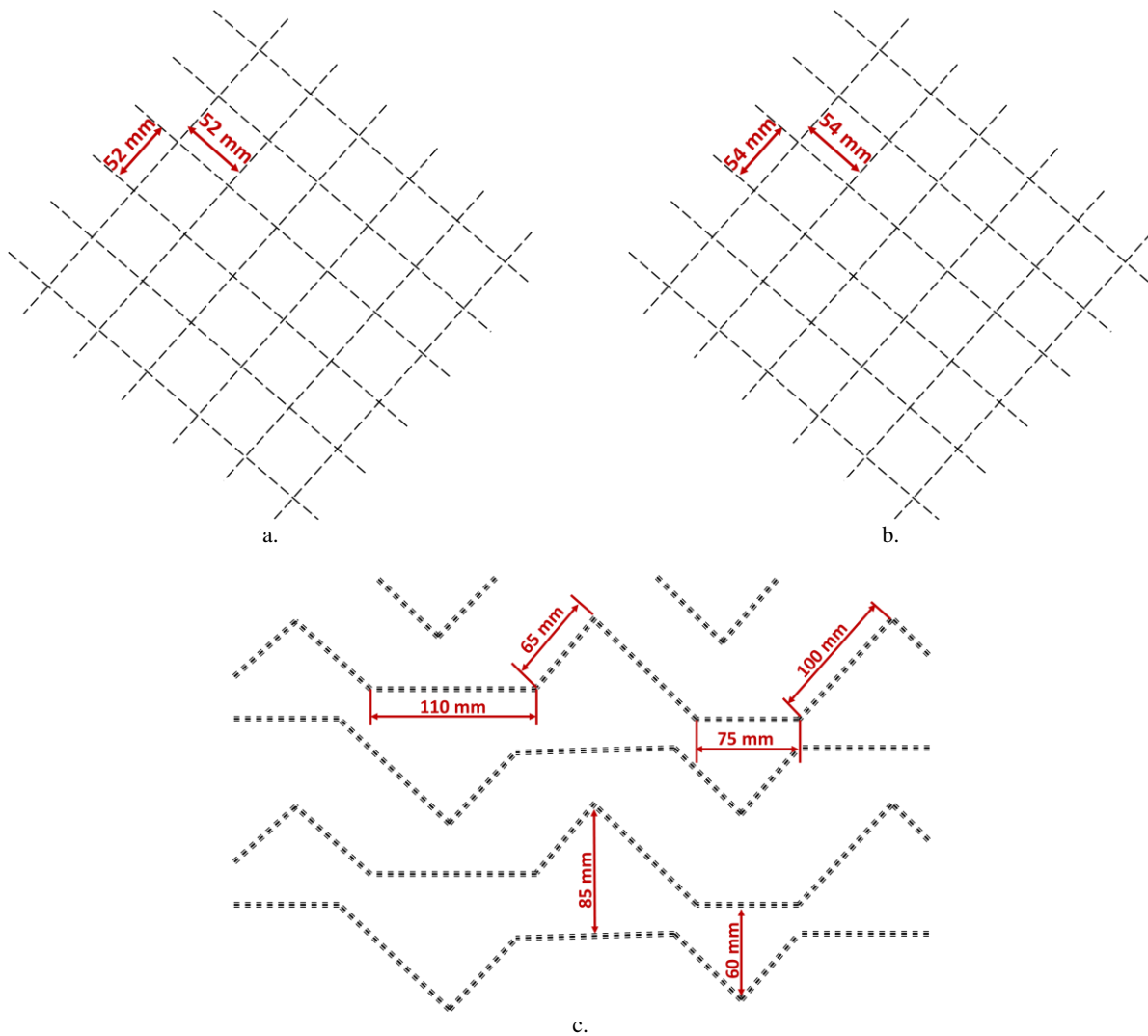


b.



c.

Sl.4 Materijali korišteni u eksperimentalnom dijelu rada: a. materijal oznake M1; b. materijal oznake M2; c. materijal oznake M3



SI.5 Prikaz geometrijskih parametara romboidno prošivenih materijala: a. kvadratni korak komore dimenzija 52x52 mm materijala M1; b. kvadratni korak komore dimenzija 54x54 mm materijala M2; c. zrcalno protusmjerna putanja ultrazvučnog spajanja materijala M3

U trenutku uspostave toplinske ravnoteže (stacionarnog stanja) izračunava se potrebna snaga mjernog valjka za održavanje toplinske ravnoteže mjernog valjka, H_0 , pomoću izraza:

$$H_0 = \frac{U_g^2 \cdot P_{PWM}}{R_g} \quad (8)$$

gdje je:

- U_g – napon stabiliziranog izvora kojim se napajaju neinduktivni točkasti grijači mjerne ploče [V]
- P_{PWM} – udio širine PWM impulsa na izlazu sučelja
- R_g – ukupni električki otpor neinduktivnih točkastih grijača [Ω]

Općeniti izraz za izračun otpora prolasku topline (R_{ct} ili R_{ct0}) primjenom šest prikazanih potrebnih parametara, a koji se mjere ili su određeni konstrukcijom konduktometra, poprima oblik izraza:



SI.6 Višenamjenski diferencijalni konduktometar

$$R_{ct} = \frac{(T_s - T_a) \cdot R_g}{U_g^2 \cdot P_{PWM}} \quad (9)$$

Mjerni sustav regulira električnu snagu pri održavanju parametara kod uspostave termodinamičke ravnoteže na temelju koje je moguće izmjeriti utjecaj stlačivosti na kontaktnu toplinsku vodljivost [52]. Karakteristike materijala prikazane su u tab.1.

6. Rezultati

Na višenamjenskom diferencijalnom konduktometru ispitan je utjecaj stlačivosti na kontaktnu toplinsku vodljivost romboidno prošivenih materijala za namjensku odjeću. Prema mjernoj metodi za ispitivanje na višenamjenskom diferencijalnom konduktometru postavljena je vrijednost sile na dinamometru prema DIN 53855/1, DIN 53855/2, DIN 53855/3 i ASTM D 1777, s time da je specifičan tlak konduktometra prilagođen površini mjerne baze konduktometra. Temeljem tog izračuna sila pritiska valjka konduktometra iznosila je 0,95 N i 9,5 N. Provedena je statistička analiza rezultata primjenom jednofaktorske analize varijance (ANOVA) pri opterećenju od 0,95 N i 9,5 N za sve tri romboidno prošivene podstave, sl.7.

Statistička analiza potvrdila je da između promatranih rezultata postoji značajna razlika, što ukazuje da stlačivost ima utjecaj na kontaktnu toplinsku vodljivost.

Smanjenje debljine materijala primjenom veće sile tlačenja, odnosno njegovo svojstvo stlačivosti, utječe na povećanje kontaktne toplinske vodljivosti na način da se povećava broj i površina dodirnih točaka između vlakana i mjernih ploča, čime je omogućen i veći, tj. brži protok topline između mjerne baze, materijala i mjernog valjka. Stlačivanjem materijala povećava se gustoća vlakana na jedinici površine te broj kontaktnih točaka, a istovremeno se smanjuje količina zraka u strukturi materijala.

Kontaktna toplinska vodljivost pri sili od 0,95 N iznosi 2,05 W/m²K za M1, 21,55 W/m²K za M2 te 12,61 W/m²K za M3, sl.8.

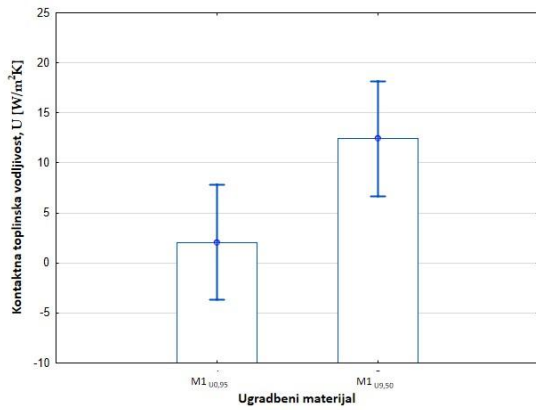
Kontaktna vodljivost pri stlačenom stanju, odnosno pri sili od 9,5 N iznosi 12,41 W/m²K za M1, 27,27 W/m²K za M2 te 24,70 W/m²K za M3, sl.9.

Rezultati izračuna stlačivosti romboidno prošivenih materijala, sl.9, a pokazali su da najveću stlačivost ima materijal najveće debljine pri sili od 0 N M1 (78,23%), zatim M3 (45,79%), a najmanju M2 (28,24%), koji ima najmanju debljinu pri sili od 0 N. Može se zaključiti da što je veća debljina materijala i što je više prošiva postoji više zračnih jastuka koji doprinose otporu prolazu topline, sl. 10a.

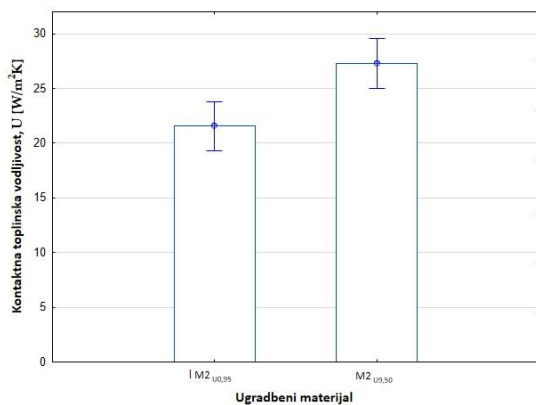
Međutim, što je veća stlačivost, to je manja debljina materijala, a zračni jastuci kod prošiva se također smanjuju pa dolazi do veće kontaktne vodljivosti, sl. 10b.

Tab.1 Karakteristike korištenih romboidno prošivenih materijala

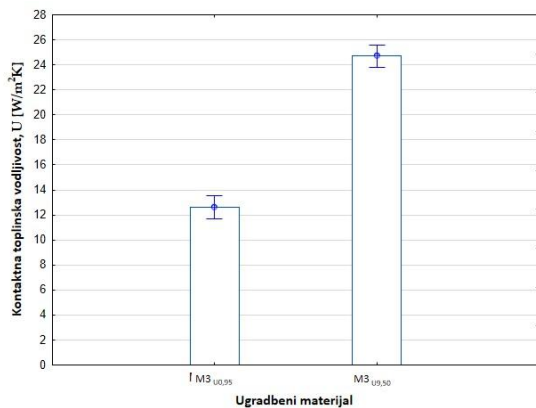
Oznaka uzorka	Sirovinski sastav		Plošna masa [g/m ²]	Debljina materijala, d _m [mm]		
				Sila = 0 N	Sila = 0,95 N	Sila = 9,5 N
M1	Podstavni materijal:	100% poliester	260	9,65	5,88	4,60
	Blokada:	100% poliester				
	Punilo:	100% poliester				
	Blokada:	100% poliester				
	Podstavni materijal:	100% poliester				
M2	Podstavni material:	100% poliester	316	1,43	1,31	0,37
	Membrana:	100% polipropilen				
	Punilo:	100% polipropilen				
	Podstavni materijal:	100% poliester				
M3	Podstavni materijal:	100% poliester s kvadratno utkanim ugljičnim nitima	368	3,41	1,90	0,87
	Membrana:	100% polipropilen s točkastim aluminijskim naslojem				
	Punilo:	100% poliester				



a.



b.

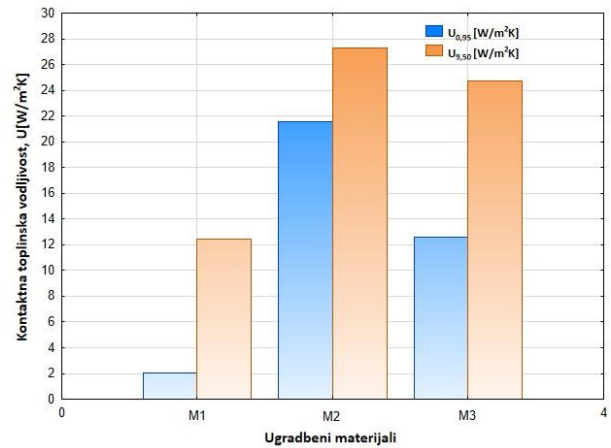


c.

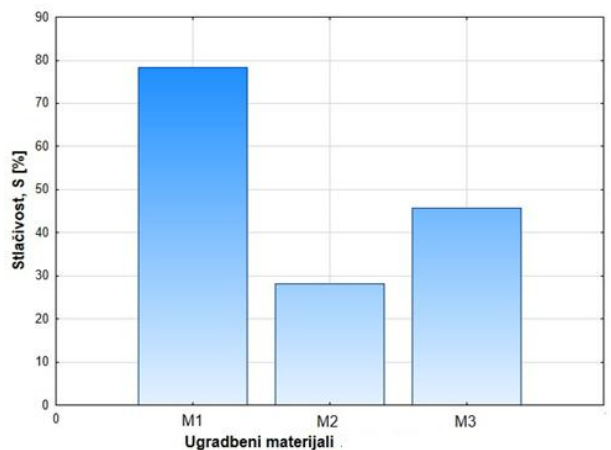
SI.7 Raspon srednjih vrijednosti rezultata određivanja kontaktne toplinske vodljivosti romboidno prošivenih materijala pri opterećenju od 0,95 N i 9,50 N s naznačenim varijacijama za: a. materijal M1, b. materijal M2, c. materijal M3

7. Zaključak

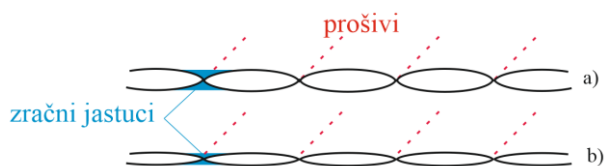
Jedan od bitnih parametara pri tehničkom projektiranju odjeće je toplinska uroda, te je potrebno pravilno odabrati ugradbene materijale koji omogućavaju zadovoljavajuću toplinsku izolaciju. U radu je ispitan utjecaj stlačivosti na kontaktnu toplinsku vodljivost romboidno prošivenih različitih geometrijskih para-



SI.8 Rezultati mjerenja kontaktna toplinska vodljivost pri opterećenjima od 0,95 N i 9,50 N provedenih na romboidno prošivenim materijalima



SI.9 Rezultati određivanja stlačivosti romboidno prošivenih materijala



SI.10 Poprečni presjek romboidno prošivene podstave: a. pri manjoj stlačivosti; b. pri većoj stlačivosti

metara. Provedena su istraživanja kontaktne toplinske vodljivosti pri određenim stupnjevima stlačivanja. Temeljem provedenih istraživanja utjecaj stlačivosti na kontaktnu toplinsku vodljivost romboidno prošivenih materijala za namjensku odjeću, prikazanih u ovom radu, može se zaključiti da romboidno prošiveni materijal s najizraženijom voluminoznošću (M1) koju mu daje punilo, ima najveću stlačivost jer se

između vlakana, nalazi velika količina zarobljenog zraka. Primjenom sile i tlačenjem materijala vlaknima je omogućeno nalijeganje u slobodan prostor između njih, a uz to se smanjuje i količina zarobljenog zraka, što ujedno uzrokuje i povećanje kontaktne toplinske vodljivosti koja se znatno povećala pri primjeni deseterostruko veće sile tlačenja. Romboidno prošiveni materijali koji imaju manje izraženu voluminoznost i debljinu (M2 i M3) pokazuju najmanju sposobnost stlačivanja. Povećanje kontaktne toplinske vodljivosti pri primjeni veće sile, odnosno pri većem stlačivanju materijala, jasno je izraženo kod svih materijala i odjevnog kompozita, što potvrđuje utjecaj kontaktne površine pri mjerenju toplinske vodljivosti, strukture materijala, količine zarobljenog zraka u materijalu, te debljine i stlačivosti materijala i odjevnog kompozita. Dobiveni rezultati potvrdili su da stlačivost ima značajan utjecaj na kontaktnu toplinsku vodljivost romboidno prošivenih materijala za namjensku odjeću, odnosno na toplinska svojstva odjeće. Također je utvrđeno da struktura materijala te količina zarobljenog zraka unutar materijala ima velik utjecaj na toplinska svojstva odjeće.

Zahvala

Istraživanja su izvedena u sklopu projekta HRZZ IP-2018-01-6363 Razvoj i toplinska svojstva inteligentne odjeće (ThermIC), financiranog od Hrvatske zaklade za znanost.

Dio rezultata prikazanih u radu proizašao je iz projektnog zadatka „Ispitivanje kontaktne toplinske vodljivosti i stlačivosti romboidno prošivenih materijala ugrađenih u namjensku odjeću“ izrađenog u okviru poslijediplomskog doktorskog studija Tekstilna znanost i tehnologija Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta u akad. god. 2022./2023. prihvaćenog 10. srpnja 2023. od strane Vijeća doktorskog studija Tekstilna znanost i tehnologija na Tekstilno-tehnološkom fakultetu.

Literatura:

- [1] Sęk, J. *GORE-TEX® Technical Garments for the Workplace*. Techniczne Wroby Włókiennicze **2009**, 17, pp. 32-36.
- [2] de Silva, H.T. *Development of thermal insulating textiles*, Doctoral thesis, Hochschule Niederrhein, Germany, **2013**.



- [3] Tkaniny Man. Dostupno na: <https://tkaninyman.pl/380.podszewka-pikowana-czarny.html> Pristupljeno: 10/4/2023.
- [4] Ultrasonic. Dostupno na: <https://ultrasonicpik.pl/pl/p/PUMI-Pikowana-7x7-zakonczona-podszewka-Tkanina-odziezowa-Wierzchniowa-na-Kurtki-Bezrekawniki-Kamizelki-Torebki-Wodoodporna-Material-odziezowy/265> Pristupljeno: 3/6/2023.
- [5] Workwear as a Service. Dostupno na: <https://www.cws.com/en/workwear>, Pristupljeno: 11/11/2022.
- [6] ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Geneva, Switzerland, **2005**.
- [7] Epstein, Y.; Moran, D.S. Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial Health* **2006**, 44, pp. 388-398. <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.388>
- [8] Termoregulacija. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/termoregulacija> Pristupljeno: 15/02/2023.
- [9] Kenny, G.P.; Flouris, A.D. The human thermoregulatory system and its response to thermal stress. In *Protective Clothing: Managing Thermal Stress*, 1st ed.; Wang, F., Gao, C., Eds.; Woodhead Publishing Series in Textiles; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, **2014**, pp. 319–365.
- [10] Lim, CL. Fundamental concepts of human thermoregulation and adaptation to heat: a review in the context of global warming. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2020**, 17, pp. 77-95. <https://doi.org/10.3390/ijerph17217795>
- [11] Tannam, M. *Human Thermoregulatory Response to Infrared Radiant Heating*, Doctoral thesis, Trinity College Dublin, Dublin, Ireland, 2012.
- [12] Grodzinsky, E.; Sund Levander M. Thermoregulation of the Human Body, In *Understanding Fever and Body Temperature*, 1st ed.; Grodzinsky, E., Sund Levander, M., Eds.; Springer International Publishing: Heidelberg, Germany, **2020**, pp. 49-65.
- [13] Zhang C.; Wang F. Comfort management of fibrous materials. In *Handbook of fibrous materials*, 1st ed.; Hu, J., Kumar, B., Lu, J. Eds.

- Wiley-VCH: Weinheim, Germany, **2020**, pp. 857-887.
<https://doi.org/10.1002/9783527342587.ch31>
- [14] Lizák, P.; Mojumdar, SC. Thermal properties of textile fabrics. *Journal of thermal analysis and calorimetry* **2013**, 112, pp. 1095-1100.
<https://doi.org/10.1007/s10973-013-3013-7>
- [15] Lan, X.; Wang, Y.; Peng, J.; Si, Y.; Ren, J.; Ding, B.; Li, B. Designing heat transfer pathways for advanced thermoregulatory textiles. *Materials Today Physics* **2021**, 17, 100342.
<https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.10034>
- [16] Kurazumi, Y.; Tsuchikawa, T.; Ishii, J.; Fukagawa, K.; Yamato, Y.; Matsubara, N. Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection. *Building and Environment* **2008**, 43, pp. 2142-2153.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.12.012>
- [17] Oliveira, AV.; Quintela, D. Measurements of clothing insulation with a thermal manikin operating under the thermal comfort regulation mode: comparative analysis of the calculation methods. *European journal of applied physiology* **2008**, 104, pp. 679-688.
<https://doi.org/10.1007/s00421-008-0824-5>
- [18] Uttam, D. Objective measurement of heat transport through clothing. *International Journal of Engineering Research and Development* **2012**, 12, pp. 43-47.
- [19] Skenderi, Z.; Mihelić-Bogdanić, A.; Mijović, B. Thermophysiological wear comfort of footwear. *Koža & Obuća* **2017**, pp. 12-21.
- [20] Aboalasaad, A.; Skenderi, Z.; Kolčavová, B.; Khalil, A. Analysis of factors affecting thermal comfort properties of woven compression bandages. *Autex Research Journal* **2020**, 20, pp. 178-185.
<https://doi.org/10.2478/aut-2019-0028>
- [21] Ertekin, M.; Marmaralı, A. Analysis of thermal comfort properties of fabrics for protective applications. *The Journal of The Textile Institute*, **2018**, 109, pp. 1091-1098.
<https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1402425>
- [22] Murthyguru I. Novel approach to study compression properties in textile. *Autex Research Journal* **2005**, 5, 176-193.
<https://doi.org/10.1515/aut-2005-050401>
- [23] Direct Action. Dostupno na: <https://promotion.directactiongear.com/Halifax/3-days-patrol-backpack-40-1.html> Pristupljeno: 15/02/2023.
- [24] Sve više posla: HGSS imao tri puta više intervencija nego lani. Dostupno na: <https://www.24sata.hr/news/sve-vise-posla-hgss-imao-tri-puta-vise-intervencija-nego-lani-482652/galerija-448217> Pristupljeno: 14/04/2022.
- [25] Zadekhast, R.; Asayesh, A. The effect of fabric structure on the compression behavior of rib weft knitted fabrics. *Fibers and Polymers* **2021**, 22 (10), pp. 2878-2884.
<https://doi.org/10.1007/s12221-021-0337-y>
- [26] Čunko, R. *Ispitivanje tekstila: fizikalne i instrumentale metode karakterizacije osnovnih svojstava tekstilija*, 1st ed.; University of Zagreb Faculty of textile technology: Zagreb, Croatia, 1989.
- [27] Schacher, L.; Adolphe, D.; Drean, J. Comparison between thermal insulation and thermal properties of classical and microfibre polyester fabrics. *International Journal of Clothing Science and Technology* **2000**, 12, pp. 84-95.
<https://doi.org/10.1108/09556220010371711>
- [28] Gunesoglu, S.; Meric Kaplangiray, B.; Gunesoglu, C. Thermal contact properties of 2-yarn fleece knitted fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* **2005**, 13, pp. 46-50.
- [29] Akcagun, E.; Baczek, M.; Hes, L. Thermal insulation and thermal contact properties of wool and wool/PES fabrics in wet state. *Journal of Natural Fibers* **2019**, 16, pp. 199-208.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1414650>
- [30] Manasoglu, G.; Celen, R.; Kanik, M.; Ulcay, Y. An Investigation on the Thermal and Solar Properties of Graphene-Coated Polyester Fabrics. *Coatings* **2021**, 11, pp. 1-15.
<https://doi.org/10.3390/coatings11020125>
- [31] Hes, L. Analysing the thermal properties of animal furs for the production of artificial furs. In: *Biologically inspired textiles*, 1st ed.; Abbott, A., Ellison, M., Eds.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2008, pp. 150-167.
- [32] Kaziur, P.; Mikołajczyk, Z.; Kłonowska, M.; Woźniak, B. Design Methodology and Technology of Textile Footwear. *Materials* **2022**, 15, pp. 1-18.
<https://doi.org/10.3390/ma15165720>

- [33] Matusiak, M.; Kowalczyk, S. Thermal-insulation properties of multilayer textile packages. *Autex Research Journal* **2014**, 14, pp. 299-307.
<https://doi.org/10.2478/aut-2014-0030>
- [34] Lizák, P.; Murárová, A.; Mojumdar, S.C. Heat transfer through a textile layer composed of hollow fibres. *J Therm Anal Calorim* **2012**, 108, pp. 851-857.
<https://doi.org/10.1007/s10973-012-2391-6>
- [35] Atalie, D.; Tesema, AF.; Rotich, GK. Effect of weft yarn twist level on thermal comfort of 100 per cent cotton woven fabrics. *Research Journal of Textile and Apparel* **2018**, 22, pp. 180-194.
<https://doi.org/10.1108/RJTA-11-2017-0049>
- [36] Shradhanjali M.; Thangavelu, V.; Vasanth Kumar, D.; Jebastin Rajwin, A.; Ramesh Babu, V.; Prakash, C.; Shah, A.; Reetuparna, R. Study of Thermal Comfort Properties of Different Kinds of Polyester Knitted Fabrics. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* **2021**, 5, pp. 50-55.
<https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.9297>
- [37] Kanat, E.; Özdil, N.; Marmaralı, A. Prediction of thermal resistance of the knitted fabrics in wet state by using multiple regression analysis. *Textile and Apparel*, **2014**, 24, 291-297.
- [38] Rogale, D.; Majstorović, G.; Firšt Rogale, S. Comparative analysis of the thermal insulation of multi-layer thermal inserts in a protective jacket. *Materials* **2020**, 13, pp. 1-13.
<https://doi.org/10.3390/ma13122672>
- [39] Begum, A.; Subramaniam, V. Compressibility of plain weft knitted fabrics. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* **1994**, 19, 158-188.
- [40] Alimaa, D.; Matsuo, T.; Nakajima, M.; Takahashi, M.; Yamada, EY. Pressure-thickness relation and compression mechanism of plain and rib knitted fabrics. *Journal of textile engineering* **2000**, 46, pp. 7-10.
<https://doi.org/10.4188/jte.46.7>
- [41] Asayesh, A.; Mirgoli, F.; Gholamhosseini, A. An investigation into the effect of fabric structure on the compressional properties of woven fabrics. *The Journal of The Textile Institute* **2017**, 109, pp. 32-38.
<https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1320817>
- [42] Asanović, K.A.; Mihailović, T.V.; Cerović, D.D. Evaluation of the quality of clothing fabrics in terms of their compression behaviour before and after abrasion. *Fibers and Polymers* **2017**, 17, pp. 1393-1400.
<https://doi.org/10.1007/s12221-017-5536-1>
- [43] Ukponmwan, J.O. Compressibility analysis of dry abraded woven fabrics. *Textile Research Journal* **1994**, 64, pp. 756-760.
<https://doi.org/10.1177/0040517594064012>
- [44] Datta, M.K.; Behera, B.K.; Goyal, A. Prediction and analysis of compression behaviour of warp-knitted spacer fabric with cylindrical surface. *Journal of Industrial Textiles* **2019**, 48, pp. 1489-1504.
<https://doi.org/10.1177/1528083718769936>
- [45] Lou, G.; Chen, S. Investigation of the Mechanical Properties of Three-Dimensional Polyurethane Composites Reinforced with Warp-Knitted Spacer Fabrics. *AATCC Journal of Research* **2022**, 5, pp. 231-239.
<https://doi.org/10.1177/24723444221118980>
- [46] Venkataraman, M.; Mishra, R.; Militky, J. Comparative Analysis of High Performance Thermal Insulation Materials. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology* **2017**, 2, pp. 401-409.
<https://doi.org/10.15406/jteft.2017.02.00062>
- [47] Gnanauthayan, G.; Rengasamy, RS.; Kothari, V. Heat insulation characteristics of multi-layer nonwovens. *Research Journal of Textile and Apparel* **2018**, 22, pp. 94-108.
<https://doi.org/10.1108/RJTA-06-2017-0028>
- [48] Karunamoorthy, Shabaridharan; Das, A. Study on thermal resistance of multilayered fabrics under different compressional loads. *The Journal of the Textile Institute* **2014**, 105, pp. 538-546.
<https://doi.org/10.1080/00405000.2013.827388>
- [49] Abbas, A.; Zhao, Y.; Zhou, J.; Wang, X.; Lin, T. Improving thermal conductivity of cotton fabrics using composite coatings containing graphene, multiwall carbon nanotube or boron nitride fine particles. *Fibers and Polymers* **2013**, 14, pp. 1641-1649.
<https://doi.org/10.1007/s12221-013-1641-y>
- [50] Rogale, D.; Firšt Rogale, S.; Knezić, Ž.; Vujasinović, E.; Čubrić, G.; Špelić, I. Multi-purpose differential conductometer for textile composites and clothing. State Intellectual Property Office, approved consensus patent from the State Intellectual Property Office on 08/03/2020, PK2017164.

- [51] Rogale, D.; Firšt Rogale, S.; Knezić, Ž.; Vujašinović, E.; Čubrić, G.; Špelić, I. Multi-purpose differential conductometer for textile composites and clothing. In *Annual 2018*, 1st ed.; Rogale, D., Žiljak, V., Eds.; Croatian Academy of Engineering; Zagreb, Croatia, **2018**, pp. 184-189.
- [52] Rogale, D.; Firšt Rogale, S.; Knezić, Ž.; Jukl, N.; Majstorović, G. Measurement Methods of the Thermal Resistance of Materials Used in Clothing. *Materials* **2023**, 16(10), 3842. <https://doi.org/10.3390/ma16103842>