

Ispitivanja toplinskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće

Nikolina Jukl*, Snježana Firšt Rogale, Dubravko Rogale

Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska

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

Pristiglo 18. rujna 2023.

UDK 687:677.017.56

Pregled

Za uspješno tehničko projektiranje odjevnih kompozita i odjeće potrebno je definirati i ispitati, između ostalog, toplinska svojstva. Pregledom literature utvrđeno je da je u tu svrhu razvijen velik broj različitih mjernih uređaja i mjernih sustava pomoću kojih su provedena mnogobrojna istraživanja. U radu su prikazani faktori koji utječu na toplinsku ugodu odjeće, mjerne jedinice te mjerni uređaji i sustavi koji se najčešće koriste u tu svrhu, a navedena su i značajnija istraživanja toplinskih svojstava ugradbenih materijala, odjevnih kompozita i odjeće.

Ključne riječi: *toplinska svojstva, odjevni kompoziti, odjeća, mjerni uređaji i metode*

Review paper

For the successful technical design of composite clothing and clothing, it is necessary to define and test the thermal properties. A review of the literature revealed that a large number of different measuring instruments and measuring systems have been developed for this purpose and numerous studies have been carried out with their help. This paper presents factors that influence the thermal comfort of clothing, and the measurement units, measuring instruments and systems that are most commonly used for this purpose. In addition, other important research work on the thermal properties of embedding materials, composite clothing and clothing is listed.

Keywords: *thermal properties; clothing composites; clothing; measuring instruments and methods*

1. Uvod

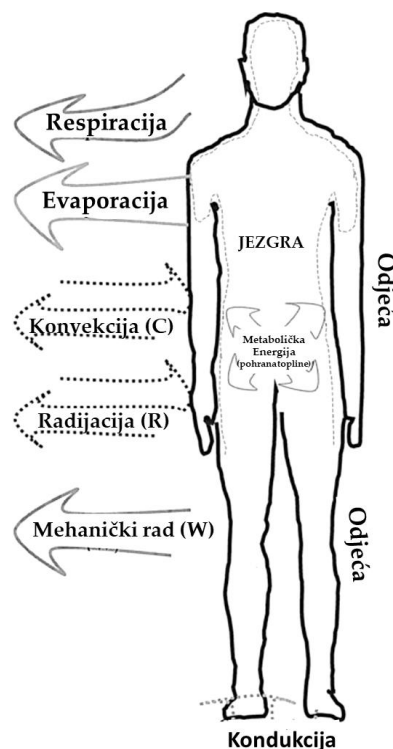
Pri tehničkom projektiranju odjeće potrebno je razmotriti utjecaj ljudske anatomije i fizioloških karakteristika, aktivnosti i okolišnih uvjeta u kojem će se odjevni predmet koristiti, kao i utjecaj vrste ugradbenih materijala i konstrukcije odjevnih kompozita te konstrukcije odjavnog predmeta. Proces tehničkog projektiranja odjeće vrlo je složen pri čemu je najvažnije polazište funkcionalnost odjavnog predmeta i toplinska svojstva. Pri razmatranju parametara koji utječu na funkcionalnost i toplinsku ugodu odjavnog predmeta bitno je razmotriti i utjecaj slojevitosti koja može negativno djelovati na slobodu pokreta nosioca te na masu odjavnog predmeta. Kako bi se objektivno vrednovala toplinska izolacijska svojstva odjevnih kompozita i odjeće koriste se mjerni sustavi i mjerne metode za određivanje parametara kao što su otpor prolazu vodene pare i otpor prolazu topline ugradbenih materijala i odjevnih kompozita, toplinska izolacija odjeće, toplinska vodljivost, temperaturni gradijenti itd. Razvojem i primjenom mjernih uređaja zamjenjuju se subjektivne procjene temeljene na iskustvu pojedinca provođenjem objektivnih istraživanja.

2. Toplinska uroda i faktori koji utječu na nju

Odjeća ima zadovoljavajuća toplinsku izolaciju ako u njoj osjećamo toplinsku ugodu. Toplinska uroda subjektivan je osjećaj, a prema HRN EN ISO 7730:2008 definirana je kao stanje svijesti koje izražava zadovoljstvo sa toplinskim uvjetima okoliša, u kojem se ne javlja potreba za korekcijom okolišnih uvjeta [1]. Na sl.1 prikazana je razmjena toplinske energije između ljudskog tijela i okoliša. Prijenos topline provodi se sve dok se ne uspostavi toplinska ravnoteža. Ljudsko tijelo proizvodi toplinu od oko 75 W tijekom spavanja i 1000 W tijekom napornog vježbanja. Višak topline se prenosi na okoliš konvekcijom i kondukcijom: u zrak 12%, na predmete 3%, zračenjem neodjevenog ljudskog tijela na sobnoj temperaturi na okoliš 60% te isparavanjem 25% [2-4].

Termoregulacijski sustav kod čovjeka pomaže pri održavanju toplinske ravnoteže na način da neprestano izjednačava količinu proizvedene i količinu izgubljene topline, pri čemu se količina izgubljene topline regulira promjenama u protoku krvi (vazokonstrikcija i vazodilatacija) [6]. Raspon optimalne središnje tjelesne temperature iznosi 36,1°C-37,8°C, a održavanje središnje tjelesne temperature u navedenom rasponu uključuje temperature dva paralelna procesa termoregulacije: bihevioralna i fiziološka regulacija temperature, sl.2 [7, 8].

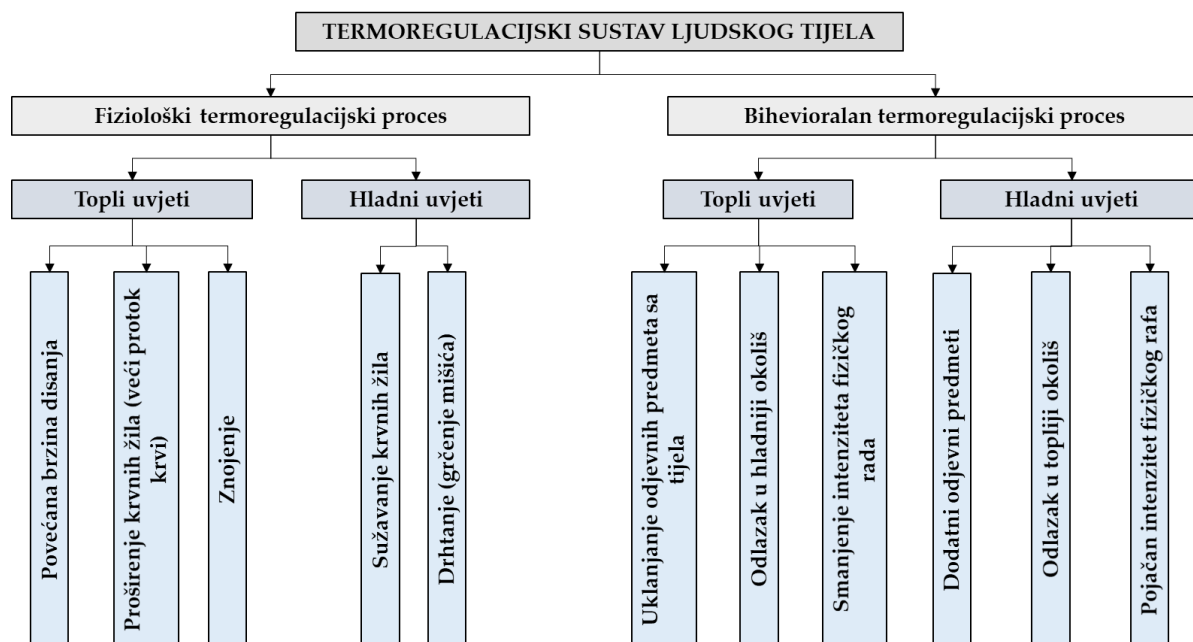
Bihevioralna temperaturna regulacija djeluje kroz svjesno ponašanje i može uključivati sva primjerena sredstva i postupke u cilju očuvanja ili odavanja topline, kao npr. otvaranje prozora ili odijevanje dodatnih slojeva odjeće. Fiziološka regulacija temperature djeluje putem reakcija koje se ne oslanjaju na svjesno i voljno ponašanje [7, 9, 10].



Sl.1 Prikaz razmjene topline između ljudskog tijela i okoliša [5]

Na toplinsku ugodu utječe ljudski faktor, faktor okoliša te faktor odjeće [3, 11-13]. Pri razmatranju utjecaja ljudskih faktora potrebno je uzeti u obzir fizičku aktivnost, spol, dob, zdravstveno stanje i prehranu. Tijekom fizičkih aktivnosti ljudsko tijelo proizvodi toplinu i temperatura tijela raste, a što je veća fizička aktivnost tijelo proizvodi više topline, te je potrebno smanjiti toplinu kako se tijelo ne bi pretjerano zagrijalo te da ne bi došlo do toplinskog udara [2, 9, 13, 14].

Metabolička topline je rezultat pretvorbe kisika i hranjivih tvari, koje čovjek unosi u tijelo, u mehaničku energiju koja se tijekom fizičke aktivnosti pretvara u toplinu. Kontinuirana metabolička proizvodnja topline i termoregulacijski mehanizmi za očuvanje topline održavaju optimalnu središnju temperaturu tijela u blažim hladnim uvjetima [9, 14-16]. Za definiranje metaboličke aktivnosti koristi se mjerna jedinica metabolički ekvivalent (engl. *Metabolic equivalents* – Met), koja predstavlja toplinsku energiju osobe koja je u stanju mirovanja, odnosno energetska potrošnja po jedinici površine [16-18].



Sl.2 Slikovni prikaz termoregulacijskog sustava ljudskog tijela [8]

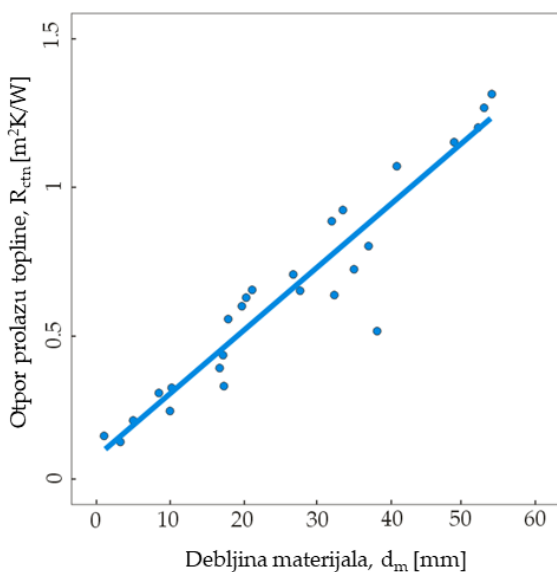
Temperatura zraka, temperatura zračenja i temperatura površina predmeta koji se nalaze u okolišu utječu na toplinsku ugodu. Što je viša temperatura zraka u okolišu ljudsko tijelo gubi manje topline putem procesa konvekcije, kondukcije i radijacije, a temperatura tijela se povećava [2, 10]. Brzina strujanja zraka u okolišu u kojoj se osoba nalazi utječe na gubitak topline konvekcijom i isparavanjem, a s povećanjem brzine strujanja zraka povećava se i gubitak topline [10, 19].

Odjećom se osigurava toplinska ugodu nositelja u okolišu u kojem se on nalazi, a najbitniji je njen utjecaj na izmjenu topline između ljudskog tijela i

okoliša [2, 4, 20-21]. Toplinska vodljivost je svojstvo ugradbenog materijala koje izražava njegovu sposobnost da omogućava protok topline, a toplinska izolacija svojstvo odjeće da zadržava toplinu [22-24]. Odjeća omogućava stanje psihološke, osjetilne i toplinske ugone, što ovisi o debljini ugradbenog materijala, te o vrsti, strukturi i duljini vlakana u kojima je zarobljen zrak, a time i toplina [25-28].

Na sl.3 je prikazan utjecaj debljine ugradbenog materijala na otpor prolazu topline, gdje je jasno vidljivo da se s povećanjem debljine materijala povećava i otpor prolazu topline.

Na toplinska svojstva odjeće utječu i razne obrade kojima se ugradbeni materijal podvrgava, npr. obrade za vodonepropusnost i zrakonepropusnost, te ugrađene membrane [15, 2, 21].



Sl.3 Utjecaj debljine tkanine na otpor prolazu topline [14]

3. Mjerne jedinice za određivanje toplinske izolacije odjeće

Prije 1940-ih godina nije se pridavalo važnost kvantificiranju toplinskih svojstava odjeće [29]. Prva istraživanja na tom području proveli su, u vojne svrhe A. P. Gagge i sur. [30]. Oni su definirali mjerne jedinice i numeričke metode određivanja toplinske ugone. A. P. Gagge definirao je numerički model za određivanje toplinske ravnoteže ljudskog tijela (engl. *2-Node-Model*) [30]. P. O. Fanger definirao je indekse toplinske ugone, revidirao Gaggeovu jednadžbu, te numerički izrazio razmjenu energije ljudskog tijela i okoliša [11]. A.P. Gagge i sur. su

novu predložili jedinstvenu mjernu jedinicu za toplinsku izolaciju pod nazivom Clo. Odredili su njen iznos u korelaciji s dotadašnjim mjernim jedinicama, odnosno 1,0 Clo je definiran kao toplinska izolacija odjeće vrijednosti $0,18 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/kcal}$, što iznosi $0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ [30]. Da bi se postigla jednostavnija percepcija ovih jedinica, treba istaknuti da neodjeveno ljudsko tijelo ima toplinsku izolaciju 0,0 Clo, a vrijednost 1,0 Clo toplinske izolacije predstavlja iznos kada odjeća uravnoteži proizvodnju i gubitak topline. To se odnosi na odjeću u koju je odjevena osoba (pamučno rublje i tipično poslovno odijelo), te osjeća toplinsku ugodu kada sjedi u provjetrovanoj prostoriji, pri metaboličkoj aktivnosti od 1,0 Met, u kojoj je temperatura okoliša 21°C , strujanje zraka $0,1 \text{ m/s}$, te relativna vlažnost zraka manja od 50%.

Tab.1 Toplinska izolacija odjevnih predmeta [1, 7]

Opis odjevnih predmeta	[Clo]	[Tog]
Gaćice	0,03	0,05
Duge gaće	0,10	0,16
Potkošulja	0,04	0,06
Majica	0,09	0,14
Košulja s dugim rukavima	0,12	0,19
Gaćice i grudnjak	0,03	0,05
Košulja s kratkim rukavima	0,15	0,23
Košulja od flanela	0,30	0,47
Kratke hlače	0,06	0,09
Ljetne hlače	0,20	0,31
Zimske hlače	0,28	0,43
Ljetna suknja	0,15	0,23
Zimska suknja	0,25	0,39
Lagana haljina, kratki rukavi	0,20	0,31
Zimska haljina, dugi rukavi	0,40	0,62
Vesta bez rukava	0,12	0,19
Tanka vesta	0,20	0,31
Pulover	0,28	0,43
Debeli pulover	0,35	0,54
Lagana, ljetna jakna	0,25	0,39
Radna jakna	0,30	0,47
Kaput	0,60	0,93
Parka	0,70	1,09
Čarape	0,02	0,03
Debele čarape do gležnja	0,05	0,08
Debele duge čarape	0,10	0,16
Čarape s gaćicama	0,03	0,05
Cipele (tanak đon)	0,02	0,03
Cipele (debeli đon)	0,04	0,06
Čizme	0,10	0,16
Rukavice	0,05	0,08

Druga mjerna jedinica za toplinsku izolaciju je Tog te se koristi za izražavanje vrijednosti toplinskih svojstava ugradbenih materijala i odjeće [31-32]. Definirana je kao alternativa jedinici $\text{m}^2\text{K/W}$, te se više koristi u Europi, dok se Clo više koristi u Americi [33]. Veća vrijednost Tog i Clo jedinice označava bolju toplinsku izolaciju odjeće [34].

U tab.1 prikazane su vrijednosti toplinske izolacije odjevnih predmeta, izražene u Clo i Tog jedinicama, a u tab.2 vrijednosti toplinske izolacije za odjevne kombinacije.

Tab.2 Vrijednosti toplinske izolacije za uobičajene odjevne kombinacije [1, 7]

Odjevna kombinacija	Toplinska izolacija	
	[Clo]	$[\text{m}^2\text{K/W}]$
Donje rublje (gaćice), košulja, hlače, čarape, cipele	0,75	0,12
Donje rublje (gaćice), košulja, hlače, jakna, čarape, cipele	0,85	0,14
Donje rublje s dugim rukavima i nogavicama, termo-jakna, čarape, cipele	1,20	0,185
Donje rublje s kratkim rukavima i nogavicama, košulja, hlače, jakna, termo-jakna i hlače, čarape, cipele	1,55	0,23
Donje rublje s dugim rukavima i nogavicama, termo-jakna i hlače, parka, čarape, cipele, kapa, rukavice	2,20	0,34
Gaćice, podsuknja, čarape, lagana haljina s rukavima, sandale	0,45	0,07
Gaćice, čarape, košulja kratkih rukava, suknja, sandale	0,55	0,09
Gaćice, trenirka (pulover i hlače), duge čarape, tajice	0,75	0,12
Gaćice, potkošulja kratkih rukava, košulja, hlače, pulover na V-izrez, čarape, cipele	0,95	0,15
Gaćice, čarape, bluza, duga suknja, jakna, cipele	1,10	0,17

Metabolički ekvivalent predstavlja omjer brzine metabolizma osobe pri mirovanju i pri fizičkoj aktivnosti. Pomoću Met vrijednosti opisuje se intenzitet aktivnosti kao potrošnju energije u određenom vremenu koja ovisi o dobi osobe, kondiciji, spolu i zdravstvenom stanju [35]. 1 Met označava količinu potrošnje kisika pri mirovanju, što se naziva i osnovni metabolizam. Kod muškaraca ona iznosi oko 250 ml/min , a kod žena oko 200 ml/min . Metabolički ekvivalent se izražava kao potrošnja kisika po jedinici tjelesne mase [17, 36]. Maksimalna potrošnja kisika pojedinca koja se može postići tijekom fizičke aktivnosti označava se s $\text{VO}_{2\text{max}}$, a izražava se pomoću jedinice $\text{mlO}_2/\text{kg/min}$ [20, 39, 40]. Na temelju poznate Met vrijednosti neke fizičke aktivnosti moguće je odrediti i količinu kalorija koje se sagorijevaju tijekom njenog izvođenja. Vrijednosti Met se mogu izračunati u skladu s normom HRN EN ISO 8996:2022 [37].

U tab. 3 prikazane su Met vrijednosti za neke uobičajene aktivnosti.

Tab.3 Prikaz vrijednosti metaboličkog ekvivalenta Met za neke uobičajene aktivnosti [37]

Fizička aktivnost	Met	Wh/m ²
<i>Aktivnosti malog stupnja zamora</i>	< 3	
• Spavanje	0.9	52.4
• Gledanje televizije	1.0	52.8
• Pisanje, rad za stolom, tipkanje	1.8	104.8
• Hodanje (2,7 km/h), po ravnoj površini, lagano, vrlo polako	2.3	133.9
• Hodanje, (4 km/h)	2.9	168.8
<i>Aktivnosti srednjeg stupnja zamora</i>	3 do 6	
• Vožnja bicikla	3.0	174.6
• Hodanje (4,8 km/h)	3.3	192.1
• Gimnastika tjelovježba (laganog ili umjerenog napora)	3.5	203.7
• Hodanje (5,5 km/h)	3.6	209.5
• Vožnja bicikla, (<16 km/h)	4.0	232.8
<i>Aktivnosti visokog stupnja zamora</i>	> 6	
• Opušteno trčanje laganim do umjerenim tempom (engl. <i>jogging</i>)	7.0	407.4
• Tjelovježba (sklekovi, trbušnjaci, zgibovi)	8.0	465.6
• Trčanje, trčanje na mjestu	8.0	465.6

J. Huang i W. Xu u svom radu predlažu novu mjernu jedinicu naziva Com [38]. Prema tvrdnjama autora, kupci odjeće bi temeljem jedinice Com jednostavnije mogli pojmiti značenje toplinske izolacije odjeće s obzirom da ova mjerna jedinica izravno ukazuje pri kojoj temperaturi zraka je moguće postići i održati osjećaj toplinske ugone kada čovjek miruje pri uvjetima okoliša 50% relativne vlažnosti zraka i brzini strujanja zraka od 0,1 m/s. Niža vrijednost Com jedinice uvjetuje i veću toplinsku izolaciju odjeće. Kao razlog definiranja jedinice Com navode činjenicu da bi ona olakšala kupcima odjevnih predmeta percepciju svojstva toplinske izolacije odjevnog predmeta, u odnosu na mjerne jedinice m²K/W, Clo i Met.

Tab.4 Usporedba numeričkih vrijednosti Clo i Com mjernih jedinica u odnosu sa temperaturom okoliša [38]

Ambient temperature [°C]	Thermal insulation of clothing	
	[Clo]	[Com]
21.5	1	22
15.6	2	16
9.7	3	10
3.8	4	4
-2.1	5	-2
-8.0	6	-8
-14.0	7	-14
-20.0	8	-20
-26.0	9	-26
-32.0	10	-32

U tab.4 prikazane su vrijednosti Com i Clo jedinica u ovisnosti o temperaturi okoliša. Na temelju podataka u tablici autori zaključuju da je smanjenjem temperature zraka za približno 6 °C potrebno povećanje toplinske izolacije odjeće za 1,0 Clo kako bi se postigao osjećaj toplinske ugone.

S obzirom da se u navedenom radu provela teoretska rasprava, a daljnjim pregledom literature nisu pronađeni drugi radovi na ovu temu, upitno je istražuje li se ova mjerna jedinica i dalje.

4. Mjerni uređaji za ispitivanje toplinskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće

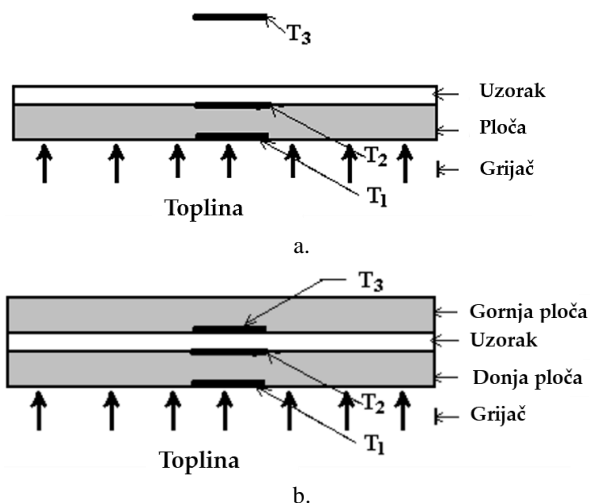
Za ispitivanje toplinskih izolacijskih svojstva pri standardiziranim uvjetima najčešće se koriste mjerni uređaji Togmetar, vruća ploča, Alambeta i toplinski manekeni [12, 39].

4.1. Togmetar

Togmetar je mjerni uređaj koji se koristi za mjerenje temperaturne razlike i protoka topline kroz mjerni uzorak na temelju čega je moguće odrediti njegova toplinska svojstva, a na njemu se izvode mjerenja metodom s jednom pločom i metodom s dvije ploče, sl.4. Uređaj se sastoji od termostatski upravljane donje grijane ploče koja se prekriva referentnim uzorkom poznatog otpora prolazu topline. Također, sastoji se od gornje, tzv. hladne ploče čija se temperatura održava na temperaturi okoliša ili temperaturi nižoj od temperature okoliša. Temperatura se mjeri na obje ploče, a grijač ploča je prilagođen tako da može održavati temperaturu u rasponu od 31 do 35°C. Iznad uređaja struji zrak, a uvjeti okoliša u kojem se provode ispitivanja, definirani normama, su temperatura okoliša 22°C ± 2°C i relativna vlažnost zraka 65% ± 5% [12, 40, 41]. Zrak iznad uzorka za ispitivanje ima značajan utjecaj na rezultate mjerenja, tako da metoda mjerenjem Togmetrom predstavlja mjerenje otpora prolazu topline uzorka uključujući i sloj zraka uz mjernu površinu. Iz tog razloga, kod obje metode mjerenja, provodi se kalibracija mjernog uređaja, kako bi se izmjerila vrijednost otpora prolazu topline zraka R_{air}. Za određivanje otpora prolazu topline zraka, provodi se mjerenje gdje uređaj postiže toplinsku ravnotežu bez smještenog uzorka, a kada se postigne toplinska ravnoteža, određuje se otpor prolazu topline zraka [12, 40]. Da bi se odredio otpor prolazu topline uzorka mjerenje se ponavlja tako da se uzorak postavlja na donju ploču, a uređaj za mjerenje ponovno doseže toplinsku ravnotežu.

Primjenom metode sa jednom pločom, sl.4a, uzorak se nalazi na donjoj grijanoj ploči, a gornji dio se

ostavlja nepokriven te se gornja ploča koristi za mjerenje temperature zraka (T_3). Metoda s jednom pločom uobičajeno se koristi za uzorke materijala koji se na gotovom odjevnom predmetu nalaze u izravnom kontaktu s okolišem.



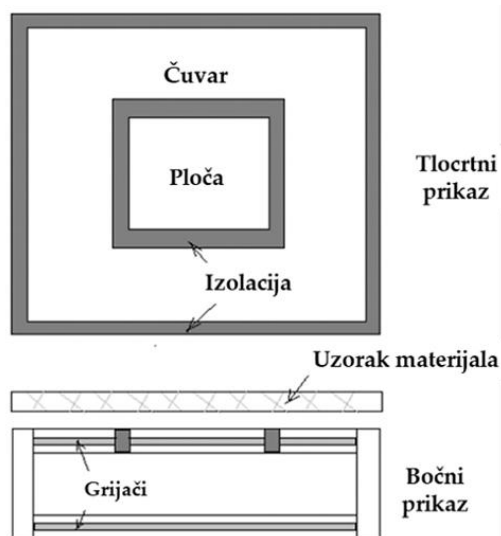
Sl.4 Mjerni uređaj Togmetar: a. metoda s jednom pločom; b. metoda s dvije ploče [12]

Tijekom ispitivanja metodom s dvije ploče, sl.4b, mjerni uzorak se postavlja na referentni materijal poznatog otpora prolazu topline koji se grije pomoću termostatski upravljane grijane donje ploče. Mjerni uzorak postavlja se između gornje i donje ploče, uz određen pritisak koji osigurava jednoličnu debljinu mjernog uzorka na mjernoj površini. Gornja ploča postavlja se na način da se izbjegne stlačivanje uzorka. Pri stacionarnim uvjetima mjerenjem se dobiju tri temperature: temperatura donje grijane ploče T_1 , temperatura između gornje površine referentnog materijala (lica) i donje površine mjernog uzorka (naličja) T_2 te temperatura između gornje površine mjernog uzorka i gornje ploče T_3 [40]. Metoda s dvije ploče koristi se za uzorke materijala koji se nalaze u odjevnom kompozitu ili odjevnom sustavu te koji nisu u izravnom kontaktu s okolišem. Gornja ploča tada pomaže u simulaciji zatvorenog sustava, tj. materijala koji nije u kontaktu s okolišem [40].

4.2 Vruća ploča

Suha vruća ploča koristi se za određivanje otpora prolazu topline, a sastoji se od grijane ploče, tzv. čuvara i donje ploče, sl.5. Čuvar je metalna ploča u čije je udubljenje ugrađena grijana ploča koja se koristi za ispitivanje, a njezina temperatura se održava zasebnim sustavom za grijanje, koji ju održava na temperaturi jednakoj onoj na ploči za mjerenje. Čuvar osigurava da sva proizvedena toplina ravnomjerno prolazi kroz uzorak, odnosno da ne dolazi do rasipanja i gubitka topline sa strane, što je

bitno kako bi rezultati mjerenja bili točni i precizni. Obje ploče imaju stalnu temperaturu u rasponu u kojem se kreće temperatura kože na ljudskom tijelu, odnosno u rasponu od 33°C do 36°C , a koja se održava pomoću grijača smještenih ispod mjerne površine i koji osiguravaju da se toplina provodi prema gore, samo uzduž smjera debljine uzorka [12, 42]. Prije mjerenja na uzorku provodi se kalibracijsko mjerenje pri kojem se mjeri električna snaga potrebna za održavanje zadane temperature mjerne ploče, odnosno određuje se konstanta vruće ploče. Mjerni uređaj se pokreće bez postavljenog uzorka kako bi se odredio otpor prolazu topline prazne mjerne površine i zraka iznad mjerne površine na udaljenosti 500 mm iznad ploče. Prije provođenja mjerenja na uzorku on mora biti kondicioniran pri okolišnim uvjetima u kojima će se provoditi mjerenje. Nakon provedbe kalibracijskog mjerenja na mjernu površinu postavlja se mjerni uzorak te se uređaj ponovno pokreće. Izmjereni otpor prolazu topline sastoji se od otpora prolazu topline mjernog uzorka i otpora prolazu topline zraka iznad materijala koji nije zanemariv [12, 43].



Sl.5 Tlocrtni i bočni prikaz uređaja vruća ploča s čuvarima [12]

Prema normi ASTM D 1518-85 mjernom metodom vruće ploče određuje se ukupan prijenos topline uzrokovan kombiniranim djelovanjem kondukcije, konvekcije i zračenja na tekstilne i druge ugradbene materijale, koji imaju otpor prolazu topline u rasponu od 0,7 do 14 $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$, a debljina im nije veća od 50 mm [12, 42, 44].

Metoda vruće ploče koja može simulirati znojenje, prema normi HRN EN ISO 11092:2014 [45], je identična metodi mjerenja na suhoj vrućoj ploči. Uzorak veličine 50,8x50,8 cm kondicioniran je na uvjetima temperature okoliša 20°C i relativnoj vlažnosti zraka 65% te se postavlja na perforiranu

površinu grijane ploče koja je prekrivena PTFE membranom koja propušta paru, ali sprječava vlaženje uzorka vodom. Ploča i membrana simuliraju znojenje ljudskog tijela. Održava se konstantna temperatura ploče na $35 \pm 0,5$ °C pri relativnoj vlažnosti zraka od 40% i brzini strujanja zraka 1 m/s. Voda koja prolazi kroz ploču i membranu isparava, a električna energija koja je potrošena na održavanje temperature ploče predstavlja parametar otpora prolazu vodene pare. Otpor prolazu vodene pare uzorka određuje se mjerenjem gubitka topline isparavanjem, pomoću izraza, a trajanje jednog mjerenja je od jedan do dva sata što je i najveći nedostatak ove mjerne metode [12, 43, 46].

4.3. Alambeta

Alambeta je uređaj za mjerenje debljine ugradbenih materijala, toplinske vodljivosti, toplinske difuzije, toplinske apsorpcije, otpora prolazu topline, omjera između maksimalne i konstantne gustoće protoka topline i konstantne gustoće protoka topline na mjestu dodira gornje i donje mjerne glave, sl. 6 [12, 47].



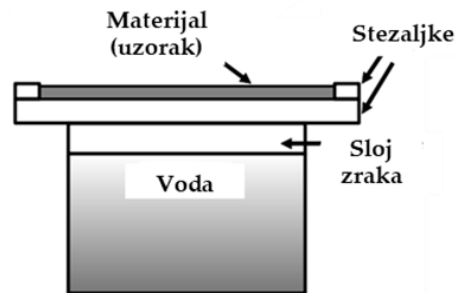
Sl.6 Alambeta mjerni instrument [48]

Instrument se sastoji od dvije mjerne glave između kojih se postavlja uzorak za ispitivanje. Obje mjerne glave su opremljene senzorima za protok topline. Donja glava za mjerenje je podešena na temperaturu okoliša, a gornja, grijana glava, održava konstantnu temperaturu. Kada se gornja mjerna glava spusti na uzorak može se mjeriti protok topline na gornjoj i donjoj površini uzorka za ispitivanje. Osnovni princip mjerenja podrazumijeva mjerenje i obradu protoka topline u ovisnosti o vremenu [12, 47].

4.4. Uređaj za određivanje propusnosti vodene pare tzv. metodom čaše

Isparavanje je važan mehanizam pomoću kojeg tijelo gubi višak topline. Dva su oblika isparavanja: u obliku pare koja sa tijela prelazi na ugradbeni materijal i sa ugradbenog materijala u okoliš, te u obliku znoja

[49, 50]. Na sl.7 prikazano je određivanje propusnosti vodene pare tzv. metodom čaše. Prije samoga ispitivanja provodi se vaganje mase uzorka.



Sl.7 Prikaz ispitivanja propusnosti vodene pare tzv. metodom čaše [46]

Nakon propisanog vremena ponovno se provodi vaganje mase uzorka čime se dobije podatak o količini vodene pare koju je uzorak upio. Ispitivanja se provode u standardiziranim uvjetima za ispitivanje, a uzorak se učvrsti u posudi. Ispod njega se nalazi destilirana voda, a između vode i uzorka se nalazi zračni prostor visine 10 mm. Indeks propusnosti vodene pare izračunava se na temelju svojstva uzorka da propušta vodenu paru (WVP). Vrijednost propusnosti vodene pare je recipročna vrijednosti otpora prolazu vodene pare, pa je veći otpor negativan za nositelja [47, 50, 51].

4.5. Permetest

Permetest je uređaj za nedestruktivno određivanje otpora prolazu topline i vodene pare, sl.8. Najveće prednosti su mu brzo i nedestruktivno provođenje mjerenja, a sastoji se od kućišta s elektroničkim elementima, te tzv. zračnog tunela. Okrugla mjerna glava učvršćena je na zračni tunel, a sastoji se od kružne i porozne vruće ploče promjera 8 cm, te se može okomito pomicati kako bi se umetnuo uzorak materijala. Mjerni uređaj patentirao je L. Hes s Technical University of Liberec, Department of Textile Evaluation [52]. Mjerenja otpora prolazu vodene pare se provode pri temperaturi okoliša 20-25°C i relativnoj vlažnosti zraka 40-50 %.



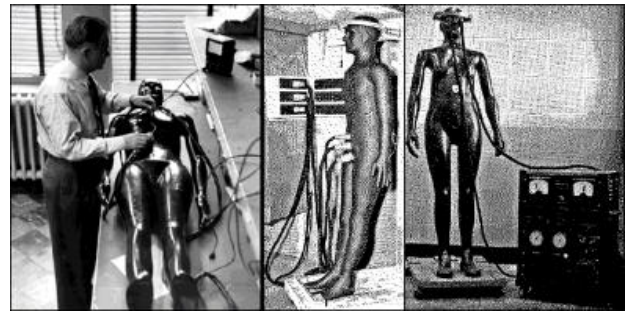
Sl.8 Uređaj za nedestruktivno mjerenje otpora prolazu topline, propusnost vodene pare i otpora prolazu vodene pare, tzv. Permetest

4.6. Toplinski manekeni

Toplinski manekeni, sl. 9, su mjerni sustavi u obliku ljudskog tijela koji se koriste za određivanje toplinskih izolacijskih svojstava odjeće, a razlikuju se po svojoj veličini, obliku, broju segmenata, načinu upravljanja i načinu mjerenja. U odjevnom inženjerstvu se koriste pri tehničkom razvoju odjevnih sustava točno određenih toplinskih svojstava odjeće [39, 53-54]. Uz razvoj toplinskih manekena, razvijaju se i specijalni mjerni instrumenti koji simuliraju prijenos topline na pojedinačnim dijelovima tijela ovisno o primjeni, npr. za ispitivanje otpora prolazu topline za obuću, rukavice, kacige i sl. Kao primjer mogu se navesti slijedeći anatomske oblikovani mjerni uređaji [55]:

- toplinski torzo za mjerenje toplinske izolacije odjeće, sl.9a.
- toplinska stopala za mjerenje toplinske izolacije obuće, sl.9b.
- toplinske ruke za mjerenje toplinske izolacije rukavica, sl.9c.
- toplinske glave za mjerenje toplinske izolacije raznih pokrivala za glavu, sl.9d.

Prvi toplinski maneken razvijen je 1940-ih godina u SAD-u za potrebe američke vojske, sl.10. Bio je izrađen od bakra, a sastojao se od jednog segmenta, te je korišten za mjerenja u statičkom modu. Jedan toplinski izvor bio je zadužen za grijanje cjelokupnog manekena, a toplina se prenosila tijelom pomoću ventilatora. Pri razvijanju manekena i na temelju rezultata mjerenja, postalo je jasno da on mora biti sposoban reagirati na toplinsko okruženje i podražaje kao što bi reagiralo i ljudsko tijelo, a kako bi se to postiglo trebalo je unaprijediti tehničku izvedbu manekena i učiniti ga pokretljivim kako bi mogao simulirati ljudsko kretanje, kao npr. hodanje, trčanje, penjanje, sjedenje i dr.



Sl.10 Prikaz prvih toplinskih manekena izrađenih u potpunosti od bakra [57]

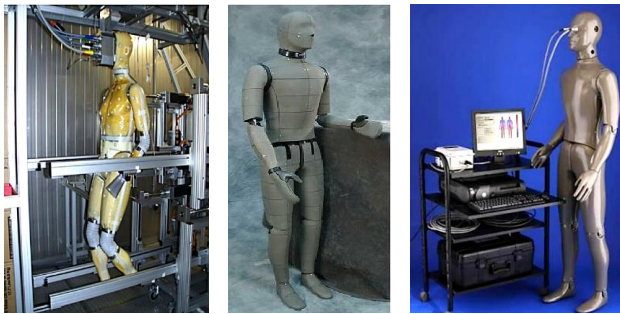
S povećanjem broja segmenata od kojih se sastoji toplinski maneken, mjerenja su mogla biti preciznija [39, 54, 56].

Za izradu manekena koriste se plastika i aluminij, a znatan napredak u razvoju toplinskih manekena omogućila je pojava digitalnog načina upravljanja sustavom za mjerenje i mjernih tehnika s poboljšanjem preciznosti mjerenja. Daljnji razvoj toplinskih manekena odnosi se na ostvarivanje mogućnosti simulacije znojenja koje je bitno za održavanje tjelesne temperature čovjeka. 1989. godine izrađen je i prvi toplinski maneken anatomske ženskoga oblika tijela. Glavni razlog razvoja je bio taj što u ženskoj odjeći potencijalno postoji više varijacija, odnosno modela odjevnih predmeta, konstrukcija, materijala, slojeva i sl. Razvijeni su i toplinski manekeni s anatomske oblikom dječjeg tijela kako bi se dodatno proširilo njihovo područje primjene na dječju odjeću. Posljednje unapređenje toplinskih manekena odnosi se na simulaciju disanja. Svi toplinski manekeni izrađeni u novije vrijeme imaju najmanje 15 segmenata koji su toplinski neovisni, kao što su npr. glava, prsa, leđa, šake, podlaktice, bedra, natkoljenice, potkoljenice, stopala [39, 53, 57].

Toplinski maneken Sam (engl. *Sweating Agile Thermal Manikin*) je višesegmentni, anatomske obli-

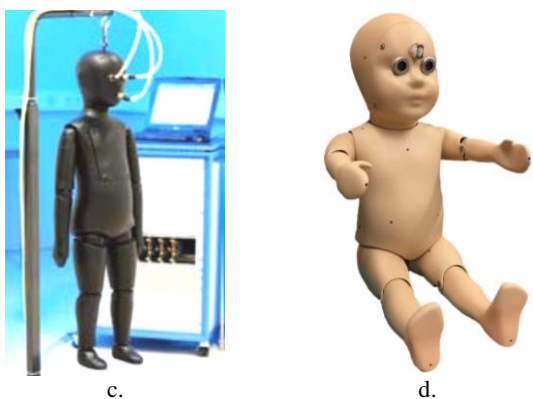
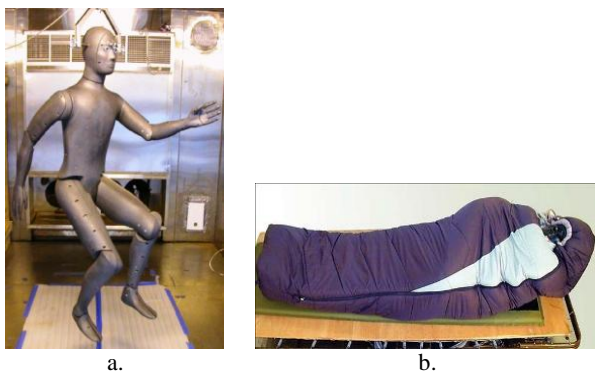


Fig.9 Anatomically shaped measuring instruments for measuring thermal insulation: a. thermal torso; b. thermal foot; c. thermal hand and d. thermal head [58]



Sl.11 Toplinski manekeni: a. Sam, b. Adam, c. Newton [57-59]

kovani toplinski maneken izrađen od nehrđajućeg čelika i aluminija, s pomičnim spojevima u području kukova, koljena, ramena i laktova, što omogućava simulaciju ljudskih pokreta kao npr. hodanje, trčanje, penjanje i sl., ali i statičkih položaja kao što su stajanje, sjedenje i dr., sl.11a. Na segmentima ima ukupno 125 zona za znojenje, odnosno rupa kroz koju prolazi tekućina koja simulira znojenje [57]. Višesegmentni toplinski maneken Adam proizveden je u Americi, sl.11b. Sva potrebna oprema za rad manekena nalazi se unutar tijela manekena (baterije, rezervoar s vodom, napajanje, kontrola i prikupljanje podataka), a primarna namjena mu je za testiranje klimatskih uvjeta okoliša u automobilima, avionima i slično [58].



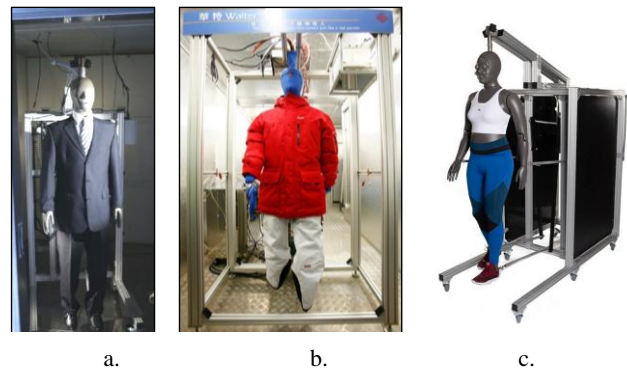
Sl.12 Toplinski manekeni: a. Nemo; b. Charlie; c. Charlene; d. Baby Ruth [55, 60]

Toplinski maneken Newton se primjenjuje kod ispitivanja toplinskih svojstava odjeće i vreća za spavanje, sl.11c. Veći broj pokretnih elemenata (gležanj, lakat, koljena, ruke i kukovi) omogućavaju mu sposobnost simulacije različitih čovjekovih kretnji [59].

Toplinski maneken Nemo je namijenjen za testiranje opreme i odjeće za ronioce, vojnih odijela za marince te ostale zaštitne odjeće, sl.12a. Izrađen je od aluminija i ima 23 segmenta. Testiranje se provodi na način da se toplinski maneken potpuno uranja u vodu i to do dubine od tri metra [60].

Toplinski maneken Charlie je razvijen sa svrhom testiranja vreća za spavanje, sl.12b. Daljnjim unapređivanjem razvijen je i toplinski maneken Charlie 3 koji se sastoji od 16 segmenata [60].

Charlene, sl.12c, je anatomski toplinski maneken s oblikom i fizičkim karakteristikama djeteta. Izrađen je od polimernih materijala i ima više segmenata, a primjenjuje za testiranje posteljine za dječje krevete. Toplinski maneken koji se sastoji od jedanaest segmenata, tzv. Baby Ruth, sl.12d, razvijen je kako bi se omogućila procjena toplinske izolacije odjeće za bebe, posteljine, automobilske sjedalice i sl. [55].



Sl.13 Toplinski manekeni: a. Sherlock; b. Walter; c. Liz [55, 60, 61]

Toplinski maneken Sherlock može simulirati znojenje, sl.13a. Ima više segmenata te se može postaviti u razne položaje. Predviđen je za testiranje raznih vrsta stolaca kao npr. uredski stolci, automobilska sjedišta, sjedala u avionima itd. [60].

I toplinski maneken Walter može simulirati znojenje, sl.13b. Ono što ga razlikuje od ostalih manekena s tom mogućnosti je to što je djelomično izrađen od tkanine, odnosno više slojeva i membrane. Također ima ugrađen sustav cirkulacije vode u cijelom tijelu, koji simulira cirkulaciju krvi kod ljudi, te postiže simulaciju znojenja na svim dijelovima tijela i to s velikom preciznošću [60].

Anatomski oblikovan prema ženskom tijelu, toplinski maneken Liz izrađen je pomoću 3D CAD računalnog sustava za modeliranje i skeniranjem stvarnih osoba kako bi toplinski maneken bio fiziološki što sličniji

ženskom tijelu, sl.13c. Kako je izrada ovog toplinskog manekena temeljena na toplinskom manekenu Newton, i Liz ima sposobnost simulacije znojenja.

4.7. Integrirani mjerni sustav za ispitivanje toplinskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće

Na Sveučilištu u Zagrebu Tekstilno-tehnološkom fakultetu instaliran je integrirani mjerni sustav za ispitivanje toplinskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće. Mjerni sustav sastoji se od uređaja za ispitivanje zrakopropusnosti, Permetesta, vruće ploče, toplinskog manekena, višenamjenskog diferencijalnog konduktometra, uređaja za ispitivanje diferencijalnih gradijenata temperatura te uređaja za mjerenje fizioloških parametara ljudskog tijela pri egzaktnom vrednovanju toplinske udobnosti odjeće. Navedeni mjerni sustav već je detaljno opisan u časopisu *Tekstil* [62].

5. Dosadašnja istraživanja toplinskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće

Znanstvenici i drugi stručnjaci iz područja odjevnog inženjerstva provode ispitivanja toplinskih svojstava ugradbenih materijala, odjevnih kompozita i odjeće korištenjem različitih mjernim uređajima, a na temelju propisanih normi.

M. Matusiak ispituje odnose toplinskih izolacijskih svojstava odjevnih kompozita i njihovih pojedinih slojeva koji se koriste za zimsku odjeću, na mjernom uređaju Alambeta [63]. Rezultati su potvrdili pretpostavke autora da toplinska svojstva odjevnih kompozita ovise o konfiguraciji pojedinih slojeva, a autor zaključuje da je moguće približno definirati svojstva odjevnog kompozita na temelju svojstva pojedinačnih slojeva materijala. U drugom radu G. Kosiuk i M. Matusiak ispituju utjecaj broja slojeva materijala u odjevnom kompozitu na njegov otpor prolazu topline [64]. Mjerenja su provedena na mjernom uređaju Permetest, a rezultati su potvrdili pretpostavke autora da se s povećanjem broja slojeva materijala koji sačinjavaju odjevni kompozit povećava i otpor prolazu topline. A. Das i sur. na vrućoj ploči istražuju utjecaj različitih načina prijenosa topline na otpor prolazu topline [65]. Mjerenja su provedena na vrućoj ploči, na pet odjevnih kompozita različitih kombinacija slojeva ugradbenih materijala. Prema autorima, otpor prolazu topline odjevnih kompozita povećava se s povećanjem debljine zarobljenog sloja zraka između slojeva materijala, a otpor prolazu topline svih odjevnih kompozita, pri bilo kojoj debljini sloja zraka, najveći je u načinu prijenosa topline bez konvekcije. P. Lizak i sur. proučili su utjecaj pletene strukture materijala

izrađenog od polipropilenskog vlakna na prijenos topline koji je eksperimentalno izmjeren na šest uzoraka materijala, a svaki uzorak ispitan je na tri mjerna uređaja: Alambeta, Togmetar i mjerni uređaj PSM2 [66]. Prema autorima, rezultati su pokazali da ovisnost između promatranih svojstava i otpora prolazu topline nije velika, te da je uređaj Alambeta najobjektivnija metoda za mjerenje toplinskih parametara pletenih materijala radi brzine mjerenja i reproducibilnosti rezultata. Sličnim istraživanjem bave se i D. Kopitar i sur. s time da proučavaju utjecaj mehaničke obrade materijala kalenderom (kalandiranje) na polipropilensku netkanu strukturu, te otpor prolazu topline [67]. F. Z. H. Tabarestani i sur. objektivnom i subjektivnom metodom istražuju utjecaj ugradbenog materijala, koji se koristi kao toplinski izolator u odjevnom kompozitu za izradu rukavica za zaštitu od hladnoće, na njegov otpor prolazu topline [68]. Primjenom sloja toplinskog izolatora povećao se otpor prolazu topline rukavica radi povećanja debljine odjevnog kompozita i volumena sloja zraka koji je zarobljen između slojeva materijala. Prema autorima, s povećanjem brzine strujanja zraka povećava se i gubitak topline putem konvekcije, te postoji visoka korelacija rezultata objektivnog i subjektivnog ispitivanja. D. Atalie i sur. bave se proučavanjem utjecaja razine uvijenosti potke na toplinsku vodljivost tkanog pamučnog materijala [69]. Mjerenja su pokazala da se s povećanjem razine uvijenosti potke povećava i toplinska vodljivost materijala, što znači da se otpor prolazu topline smanjuje. S. Mohapatra i sur. proučavaju toplinsku vodljivost materijala izrađenih od poliestera [70]. Autori promatraju utjecaj strukture materijala na toplinsku vodljivost te zaključuju da ona značajno utječe na nju. Sličnim istraživanjem bavi se i Z. E. Kanat [71].

Neki autori proučavaju utjecaj strukture i vrste materijala te površinskih obrada materijala na svojstva toplinske vodljivosti i toplinske apsorpcije s ciljem definiranja osjećaja udobnosti materijala u smislu toplo/hladnog osjećaja pri kontaktu s ljudskim tijelom [71-75]. 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 prolazu topline i taktilni osjet pri kontaktu s tijelom na 15 umjetnih krzna i 16 životinjskih krzna [76]. Za mjerenja su korišteni mjerni uređaji Alambeta i Permetest. Autor zaključuje da umjetna krzna imaju manji otpor prolazu 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. Stlačivost materijala ima značajnu

ulogu pri prijenosu topline s ljudskog tijela na odjevni predmet, kao i na uporabna svojstva gotovih odjevnih predmeta. Toplinska vodljivost materijala ovisi o njegovom svojstvu da upija toplinu, odnosno o toplinskoj apsorpciji za koju se smatra da definira taktilni osjećaj toplo/hladno pri kontaktu. A. Begum i V. Subramanjam proučavaju stlačivost pletiva izrađenih u osnovinom pletivu i s različitim duljinama očica [77]. Prema autorima, na stlačivost materijala utječu duljina očica i gustoća pletiva. D. Alimaa i sur. provode slično istraživanje na materijalima izrađenim od vlakana sirovinskog sastava kašmir i teksturiranog materijala sirovinskog sastava poliester [78]. Prema autorima, na stlačivost materijala utječe struktura materijala, što se odnosi na njegovu masu, vrstu vlakana od kojeg je izrađen, te duljine očica. A. Asayesh i sur. proveli su slično istraživanje u kojem proučavaju utjecaj vrste tkanja i gustoće potke na stlačivost materijala [79]. K. A. Asanovic i sur. bave se proučavanjem stlačivosti tkanih materijala [80]. Prema autorima, najbolja svojstva stlačivosti pokazali su materijali sirovinskog sastava mješavine pamuka i poliestera izrađeni u keper vezu, a najlošija svojstva materijali sirovinskog sastava pamuk, izrađeni u platnenom vezu. Slično istraživanje proveo je i J. O. Ukponmwan koji proučava i učinak habanja u mokrim i vlažnim uvjetima na ponašanje materijala pri stlačivanju [34]. Radi njihove široke primjene, mnogi autori bave se proučavanjem stlačivosti tzv. spacer materijala [81-83]. U radovima proučavaju 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 spacer materijala.

Proučavanjem diferencijalnih gradijenata temperatura u odjeći, koji pružaju detaljan uvid o utjecaju pojedinih slojeva ugradbenih materijala koji sačinjavaju odjevni kompozit od kojeg se izrađuje odjevni predmet, bavi se mali broj autora. W. E. Mell i J. Lawson su proveli studiju o numeričkom modelu provođenja topline kroz ugradbene materijale koji su namijenjeni za izradu zaštitne odjeće za vatrogasce [84]. Odjeća se sastojala od vanjskog sloja, odnosno sloja vanjske školjke, te dva unutarnja sloja. Prvi sloj do tijela je tzv. toplinski sloj, a između njega i vanjske školjke nalazio se treći sloj paraprozupnog materijala. Između slojeva nalazili su se zračni jastuci. Predviđanja pada temperatura između unutarnjih slojeva odjevnog sustava numeričkim modelom razlikovala su se od rezultata dobivenih eksperimentalnim mjerenjem za $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Kod predviđanja pada gradijenta temperature između vanjskih uvjeta i zračnog jastuka nakon vanjske školjke numeričkim modelom dobivene su temperature i do 24°C veće od temperatura do-

bivenih eksperimentalnim mjerenjem. Autori zaključuju da su ta istraživanja bila vrlo uspješna, međutim, upitno je da li se rezultati dobiveni numeričkim modelom i eksperimentalnim mjerenjem s tako velikim razlikama mogu zaista smatrati uspješnim. Autori ne navode uvjete u kojima su proveli eksperimentalna mjerenja, odnosno parametre koje su koristili pri numeričkom modelu. Na sličan način i D. Miedzińska numeričkom metodom istražuje utjecaj slojeva zraka koji se nalaze u strukturi materijala, između slojeva odjevnog kompozita namijenjenog za izradu zaštitne odjeće za vatrogasce, na raspodjelu temperature kroz slojeve [85]. U radu je prikazana usporedba distribucije diferencijalnih gradijenata temperatura mjernog uzorka odjevnog kompozita. Mjerenja su pokazala vidljiv utjecaj promjena oblika zračnih komora i povećanja debljine zračnih komora na povećanje temperaturnih gradijenata. Sličnim istraživanima bave se M. Schmid i sur. [86]. Utjecaj debljine zračnih slojeva na otpor prolazu topline na jednoslojnim i dvoslojnim materijalima istražuje i D. Gupta i sur. [87]. Mjerenja provode na mjernim uređajima Alambeta i Permetest (proizvođač Sensora) i FX 3300 (proizvođač Testex) za mjerenje zrakopropusnosti ugradbenih materijala i odjevnih kompozita, ali ne prikazuju diferencijalne gradijente temperatura. Prema autorima, otpor prolazu topline izrazito se povećava s dodavanjem sloja materijala u odjevni kompozit, kao i s povećanjem sloja zraka između slojeva materijala, a on se može mijenjati regulacijom slojeva zraka između slojeva materijala. Y. Sun i sur. proveli su slično istraživanje, ali koriste numeričke modele [88]. E. Onofrei i sur. u svojim istraživanjima prikazuju numerička predviđanja raspodjele temperature u materijalu ovisno o vremenu [89]. Istraživanje provode na materijalima koji se koriste za izradu odjeće za zaštitu od topline, te odjevnim kompozitima koji se sastoje od tri sloja materijala. Određena je debljina pojedinačnih slojeva, a korištena je suha vruća ploča. M. Venkataraman i sur. navode da je toplinska vodljivost približno konstantna za materijale i obrnuto proporcionalna njihovoj debljini [90]. Autori navode da se s povećanjem debljine materijala, kao i brojem slojeva, a zbog povećane količine zarobljenog zraka, povećava i otpor prolazu topline. N. Pan proučava gubitak topline ovisno o temperaturi okoliša [22]. Navodi da se ljudsko tijelo ponaša kao unutarnji izvor topline u odjevnom sustavu čime se uspostavljaju diferencijalni gradijenti temperatura između unutarnje mikroklimе odjeće i okoliša. Ovisno o temperaturi okoliša, koja može biti veća, manja ili jednaka od temperature tijela, predznak diferencijalnog gradijenta temperatura se mijenja. J.-Y. Xu i sur. proučava utjecaj višeslojne zaštitne odjeće koja se sastoji od vanjskog sloja, sloja za pohranu topline, PCM sloja i vanjske školjke na toplinsku ugodu, s time da PCM sloj i sloj za pohranu

topline zamjenjuju mjesta [91]. Pri tome analizira diferencijalne gradijente temperatura između tijela ispitanika, višeslojne zaštitne odjeće i okoliša, u ovisnosti o vremenu. Na temelju dobivenih temperaturnih gradijenata pokazano je da PCM sloj uglavnom apsorbira toplinu okoliša, ali i toplinu ljudskog tijela, što povećava toplinsku ugodu. B. Yu i sur. također istražuju utjecaj debljine pojedinog sloja u odjeći na toplinska svojstva, ali ne prikazuju diferencijalne gradijente temperatura između slojeva, nego ukupan pad temperature u ovisnosti o vremenu mjerenja [92]. V. Dupade i sur. proučavaju utjecaj pozicije pojedinačnih slojeva materijala u odjevnom kompozitu na otpor prolazu topline, pri temperaturama okoliša koje se spuštaju ispod 0°C [93]. Autori provode istraživanje na vrućoj ploči, na dva odjevna kompozita od kojih je jedan dvoslojni i jedan troslojni, a oba sačinjavaju netkani materijali. Prema autorima, otpor prolazu topline netkanog odjevnog kompozita povećava se s porastom temperature okoliša, a utvrđeno je i se toplinska vodljivost pojedinačnih slojeva materijala smanjuje u smjeru od tijela prema okolišu. Autori također navode da na protok topline i otpor prolazu topline kroz pojedinačne slojeve materijala ne utječe njihova pozicija u odjevnom kompozitu ako je prijenos topline konvekcijom izrazito nizak.

Mnogi autori se bave utjecajem odjeće na toplinsko-fiziološku ugodu čovjeka pri različitim okolišnim uvjetima, ali ne ispituju pri tome utjecaj diferencijalnih gradijenata temperatura između pojedinih slojeva u odjevnom sustavu [94]. Na toplinsku ugodu značajno utječu i svojstva vezana uz prijenos vlage, stoga su u nastavku navedena neka značajna istraživanja koja se bave proučavanjem prijenosa vlage u materijalima i odjevnim predmetima. U području istraživanja utjecaja vodene pare na toplinsku ugodu odjevnih predmeta ističe se L. Hes koji se već dugi niz godina bavi proučavanjem mjernih metoda, te konstrukcijom uređaja koji omogućuju egzaktno mjerenje svojstava vezanih uz prijenos vlage [41, 95]. Izradio je i patentirao uređaj za mjerenje toplinskih svojstava materijala Alambeta. Također je izradio i patentirao Permetest koji se koristi za mjerenje otpora prolazu vodene pare i topline. L. Hes i sur. većinom se bave proučavanjem toplinskih svojstava materijala i odjevnih predmeta, te svojstava vezanih uz prijenos vlage, a dokazali su i da je moguće provesti mjerenje propusnosti vodene pare polimernih folija različitih debljina na mjernom uređaju Permetest, kao i procjenu svojstva hlađenja kod mokrih materijala [96-98]. M. K. Imrith i sur. također proučavaju utjecaj debljine, ali i poroznost materijala na toplinska svojstva materijala i odjevnih kompozita, pri čemu koriste mjerni uređaj Alambeta i Permetest [99]. I. Salopek Čubrić i sur. istražuju promjene otpora prolazu vodene pare, mase i debljine materijala sa specijalnim završnim poliuretanskim prema-

zom nakon izlaganja vremenskim uvjetima u trajanju od tri mjeseca, u razdoblju ljeta i zime [100]. Autori zaključuju da masa i debljina materijala utječu na vrijednosti otpora prolazu vodene pare, te da se uzorcima nakon izloženosti ljetnim vremenskim uvjetima otpor prolazu vodene pare smanjio za 11,4%, a debljina za 3,2%. Nakon izloženosti zimskim uvjetima otpor prolazu vodene pare smanjio se za 16,7%, a debljina za 3,16%. A. Razzaque i sur. također provode istraživanja vezano uz utjecaj završnih obrada laminiranih materijala, te na otpor prolazu vodene pare [101, 102]. J. Arabuli i sur. ispituju svojstva propusnosti vodene pare i otpora prolazu vodene pare govedih koža namijenjenih izradi profesionalne obuće [50]. Rezultati pokazuju da kod istovrsnih obrada uzorak velura manje debljine ima manji otpor prolazu vodene pare u odnosu na uzorak velura veće debljine, te da propusnost vodene pare ovisi o obradi lica ispitivane kože. Slična istraživanja proveli su J. Akalović i sur., te Z. Skenderi i sur. [103, 104].

Neki autori provode kompleksnija istraživanja u kojima istražuju i otpor prolazu topline i otpor prolazu vodene pare. Tako se u svojim radovima skupina autora sa Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta bavi istraživanjem utjecaja konstrukcijskih karakteristika pređa, svojstava pletiva i naslojenih materijala na otpor prolazu vodene pare i topline [105-109]. Također, istražuju promjenu otpora prolazu vodene pare i topline materijala uslijed starenja, preciznije izlaganja realnim klimatskim uvjetima u zimskom i ljetnom periodu godine [110-111]. Pri tome se koriste tzv. suhom vrućom pločom i vrućom pločom sa simulacijom znojenja. U većini navedenih radova istražuju otpor prolazu vodene pare i otpor prolazu topline pređa ili materijala pri specifičnim uvjetima okoliša za radnu, sportsku, specijalnu ili konvencionalnu odjeću. Autori na temelju rezultata navedenih istraživanja zaključuju da postoji značajan utjecaj konstrukcijskih parametara materijala na otpor prolazu vodene pare, te završnih obrada materijala i zraka zarobljenog u strukturi materijala na smanjenje otpora prolazu topline. Također, zaključuju da razlike u otporu prolazu topline između materijala na gotovim odjevnim predmetima nisu velike, te da naslojavanje materijala uzrokuje prosječno povećanje njegovog otpora prolazu topline za 143%, kao i povećanje njegove mase. Proučavanjem utjecaja konstrukcijskih karakteristika materijala na njihov otpor prolazu topline i svojstva vezana uz prijenos vodene pare bave se i L. Hes i sur. [112-114]. Na temelju rezultata autori zaključuju kako se povećanjem vlage u materijalu i pri realnim uvjetima korištenja toplinska uгода znatno smanjuje u odnosu na mjerenja provedena na suhim uzorcima, te da masa i kompozicija materijala utječu na toplinska svojstva odjevnih kompozita. Prema autorima, prijenos topline kondukci-

jom i apsorpcija topline povećavaju se u mokrom stanju materijala, te postoji izravan međusobni utjecaj količine vlage u materijalu i propusnosti vodene pare, kao i fizioloških svojstava materijala. L. Hes i M. de Arujo također istražuju propusnost vodene pare mokrih pamučnih materijala, te utjecaj slojeva zraka između kože i materijala na ukupni relativni protok topline (engl. *cooling effect*) [115]. I H. Özdemir u svom radu određuje otpor prolazu topline i vodene pare za materijale koji se uobičajeno koriste za izradu odjeće [116]. Rezultati su pokazali da materijali različitog sirovinskog sastava i različitog omjera, u ovom slučaju poliestera i pamuka, imaju različite otpore prolazu topline i vodene pare. Prema autorima, materijal koji je najbolji izolator, odnosno ima najveći otpor prolazu topline, je materijal sirovinskog sastava 65% poliestera i 35% pamuk. Autori također zaključuju da je materijal koji ima najveću propusnost vodene pare, odnosno najmanji otpor prolazu vodene pare, onaj sirovinskog sastava 33% poliestera i 67% pamuk. M. B. Sampath i sur. istražuju utjecaj završnih obrada materijala na toplinska izolacijska svojstva pletenih materijala različitih sirovinskih sastava i omjera [117]. Mjerenja su pokazala da završna obrada materijala ima značajan utjecaj na njegova toplinska izolacijska svojstva jer povećava toplinsku vodljivost i apsorpciju topline, kao i otpor prolazu vodene pare. B. B. Yilma te B. Mijović i sur. provode slično istraživanje u kojem istražuju utjecaj toplinskih svojstava materijala i njihove završne obrade na ukupni prijenos topline i vodene pare [118-119]. J. Fan i H. Wu razmatraju kombinacije vatelina različitih karakteristika u dva odjevna kompozita i njihov utjecaj na otpor prolazu topline i vlage kroz odjevne kompozite [120]. Prema autorima, istraživanje je pokazalo da je utjecaj pozicije vatelina u odjevnom kompozitu značajan za praktičnu implementaciju, te da je moguće optimizirati performanse odjevnog predmeta koristeći iste materijale, ali postavljajući ih na različite pozicije. G. Kosiuk i M. Matusiak proučavaju utjecaj prošiva kod prošivenih materijala, kao npr. materijali koji se koriste za poplune, na otpor prolazu topline i otpor prolazu vodene pare pri čemu koriste mjerne uređaje Alambeta i Permetest [121]. Na temelju rezultata autori zaključuju da veličina kvadratnih prošiva, vrsta šava, te debljina konca i igle koji se koriste za šivanje utječu na otpor prolazu topline, a uzorci prošiveni cik-cak ubodom pokazuju bolje rezultate kod mjerenja otpora prolazu vodene pare. L. Hes i sur. istražuju utjecaj ugradnje pojedinih slojeva materijala u odjevni kompozit koji se, u ovom radu, koristi za muško poslovno odijelo na otpor prolazu topline i vodene pare [52]. Mjerenja su pokazala da otpor prolazu topline odjevnog kompozita nije jednak zbroju otpora prolazu topline pojedinih slojeva materijala od kojih je odjevni kompozit izrađen, već su

manjih vrijednosti. Otpor prolazu vodene pare odjevnog kompozita relativno odgovara zbroju vrijednosti otpora prolazu vodene pare pojedinačnih slojeva. Slično istraživanje provode i R. A. Angelova i sur. [122]. U svom radu S. H. Eryuruk istražuje utjecaj odjevnih kompozita i njihovih različitih kombinacija na toplinska svojstva odjevnih kompozita [123]. Mjerenja su pokazala da različiti slojevi u odjevnom kompozitu, kao i različite kombinacije odjevnih kompozita, značajno utječu na toplinska svojstva materijala. Autor zaključuje da toplinska vodljivost materijala koji se koristi kao toplinska zaštita, te materijala koji se koristi kao vanjska školjka, ima značajan utjecaj na toplinsku vodljivost odjevnog kompozita. Također, autor zaključuje da se s povećanjem debljine odjevnog kompozita povećao se i otpor prolazu topline i vodene pare. Sličnim istraživanjem bave se i B. Sentil Kumar i T. Murugan [124]. Kako bi se uspješno predvidjela toplinska izolacijska svojstva gotovih odjevnih predmeta potrebno je smisljeno povezati rezultate istraživanja toplinskih svojstava pojedinačnih ugradbenih materijala i odjevnih kompozita s istraživanjima koja se odnose na proučavanje toplinskih svojstava gotovih odjevnih predmeta koji su izrađeni od njih. Mnogi autori se bave ispitivanjem toplinskih svojstava zaštitne odjeće za ekstremno hladne vremenske uvjete te toplija podneblja [125-126]. Kod hladnih uvjeta je zanimljivo to što odjeća mora ograničiti i spriječiti prijenos topline s ljudskog tijela u okoliš te pružiti zaštitu od vjetera, a da pri tome ne ograničava ili smanjuje pokretljivost nosioca. Također, bitno je osigurati toplinsku ugodu kroz slojevitost, sa što manjim povećanjem mase odjevnog predmeta ili odjevnog sustava. Kod toplijih podneblja potrebna su drugačija toplinska svojstva materijala i odjevnih predmeta. Potrebna su visoka toplinska vodljivost materijala koja će osigurati da se toplina s tijela brzo prenese u okoliš, odnosno potreban je što manji otpor prolazu topline materijala i što manja toplinska izolacija odjevnih predmeta [127-129]. Vrlo je bitno osigurati i brzo odvođenje vlage s ljudskog tijela na materijal, te s materijala u okoliš. M. Matusiak i W. Sybilska proveli su istraživanje u kojem su analizirali odnos između otpora prolazu topline materijala i toplinske izolacije na gotovim odjevnim predmetima [130]. Ispitivanja su provedena na Alambeti i ženskom toplinskom manekenu. Prema autorima, rezultati su pokazali snažnu korelaciju između otpora prolazu topline materijala i toplinske izolacije gotovih odjevnih predmeta, s time da su rezultati dobiveni mjerenjem na Alambeti mnogo niži od rezultata dobivenih mjerenjem na toplinskom manekenu, što autori objašnjavaju pojavom dva zračna sloja pri ispitivanju na manekenu: između manekena i odjeće, te vanjskog sloja zraka uz površinu odjevnog predmeta. M. Konarska i sur. provode istraživanje na

tri odjevna sustava namijenjena za upotrebu u vrlo hladnim vremenskim uvjetima [131]. U radu nisu navedene osnovne karakteristike materijala od kojih su izrađeni odjevni predmeti. Rezultati su pokazali da se s povećanjem brzine strujanja zraka u klima komori smanjuje i toplinska izolacija, a način kontrole prijenosa električne energije za zagrijavanje toplinskog manekena nema veći utjecaj. Sličnim istraživanjem bave se i J. Fan i J. H. Keighley te Y. Key i sur. [132]. M. Konarska i sur. također provode istraživanje o subjektivnoj percepciji toplinske ugone. Istraživanja su provedena na tri odjevna sustava namijenjena za jednokratno korištenje u medicini, objektivnim mjerenjem na toplinskom manekenu i subjektivnom metodom [133]. X-Q. Dai i G. Havenith proveli su istraživanje utjecaja svojstva zrakopropusnosti i otpora prolazu vodene pare materijala korištenih za izradu jakni na ventilaciju, te na prijenos topline i vlage [134]. Korišten je toplinski maneken Newton, a pri mjerenju su postavljene različite brzine strujanja zraka, pri čemu je toplinski maneken bio statičan ili u pokretu. Rezultati su pokazali da se već pri početku kretanja tijela i gibanja zraka ventilacija povećava, što je imalo velik utjecaj na otpor prolazu vodene pare, ali ne i na toplinsku izolaciju odjevnih sustava. Utjecaj znojenja na toplinsku izolaciju odjeće je značajan, stoga su u radu J. Fan i sur. proveli ispitivanje na 12 odjevnih sustava, na toplinskom manekenu koji simulira znojenje pri različitim razinama [135]. U radu nisu navedeni detaljni podaci o korištenim materijalima. Na temelju rezultata autori zaključuju da se toplinska izolacija odjeće smanjuje tijekom znojenja, i to između 2-8%, a to smanjenje povezano je s akumulacijom vode unutar odjevnog sustava. Proučavanjem prijenosa vodene pare bave se i F. Fung i sur. koji su proveli mjerenje otpora prolazu vodene pare na Permetestu i toplinskom manekenu Tore, te su dokazali da je mjerenjem otpora prolazu vodene pare materijala moguće predvidjeti otpor prolazu vodene pare gotovih odjevnih predmeta [136]. B. Holland istražuje toplinsku izolaciju sedam različitih vreća za spavanje te subjektivnu percepciju toplinske ugone pri istim uvjetima [137]. Istraživanje provodi na ženskom toplinskom manekenu, a u radu nisu navedene karakteristike materijala od kojih su izrađene vreće za spavanje. Usporedba rezultata pokazuje da su dobiveni rezultati identični, a manje vrijednosti dobivene subjektivnom procjenom korisnika autor objašnjava subjektivnim osjećajem koji se javlja pri pojavi tzv. hladnih točaka, npr. hladna stopala. Sličnim istraživanjem bave se K. Jussila i sur. koji provode objektivno i subjektivno istraživanje toplinske izolacije na zaštitnoj odjeći koju koriste rudari u Finskoj, Švedskoj, Norveškoj i Rusiji [138]. Cilj istraživanja koje su proveli A. V. M. Oliveira i sur. bio je određivanje toplinske izolacije devet odjevnih

sustava, u statičkom i dinamičkom modu mjerenja na ženskom toplinskom manekenu Maria i usporedba dobivenih rezultata [139]. Rezultati su pokazali da su vrijednosti dobivene mjerenjem u dinamičkom modu uvijek manje od vrijednosti dobivenih mjerenjem u statičkom modu. U drugom radu A. V. M. Oliveira i sur. bave se komparativnom analizom metoda mjerenja toplinske izolacije odjeće s toplinskim manekonom pri čemu su razmatrane serijska, paralelna i globalna metoda mjerenja na 30 odjevnih predmeta i devet odjevnih sustava [140]. Rezultati su pokazali da serijska metoda uvijek daje najviše vrijednosti toplinske izolacije, te da je globalna metoda jedina prikladna za korištenje u svim modelima upravljanja manekenom.

5.1. Ispitivanja toplinskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće u Laboratoriju za termoizolacijska svojstva odjeća

U Laboratoriju za termoizolacijska svojstva odjeća Zavoda za odjevu tehnologiju Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkom fakultetu, pod vodstvom D. Rogalea, realizirano je više mjernih uređaja, od kojih su neki i patentirani [141-144].

Provedena su istraživanja toplinskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće u sklopu znanstvenih i tehnoloških projekata, a iz navedenih istraživanja proizašli su i mnogobrojni znanstveni radovi, diplomski i doktorski radovi.

Na toplinskom manekenu su provedena istraživanja u sklopu tri doktorska rada na kojima je mentor bio D. Rogale [31, 145, 146]. G. Čubrić je istraživao toplinska svojstva komora ugrađenih u inteligentnu odjeću s adaptivnim termoizolacijskim svojstvima [145, 147]. Također su ispitivana toplinska svojstva inteligentnog odjevnog predmeta s aktivnom termičkom zaštitom zajedno sa vanjskom školjkom. Mjerenja su provedena sa aktivnim i neaktivnim toplinsko izolacijskim komorama, u statičkom i dinamičkom operativnom radu manekena. G. Majstorović se u doktorskom radu bavi proučavanjem toplinske izolacije vanjske školjke, toplinskih umetaka i odjevnih sustava namjenske i inteligentne odjeće, kao i višeslojnih toplinskih umetaka ugrađenih u namjenske odjeće namijenjene za upotrebu pri hladnim uvjetima [31, 147-152].

I. Špelić provodi objektivno istraživanje na navedenom toplinskom manekenu, te subjektivno istraživanje o utjecaju konstrukcijskih parametara (konstrukcijski dodatak komocije odjevnog predmeta i duljina kroja odjevnog predmeta) na toplinska svojstva muških jakni, kao i istraživanje subjektivne percepcije toplinske ugone [146, 153-155].

Provedena su simultana mjerenja pri određivanju otpora prolazu topline kroz jedan ili više slojeva odjev-

nih kompozita i temperaturnih gradijenata slojeva kompozita [32] kao i istraživanja otpornosti prolasku topline različitih kombinacija muške odjeće [156] i mjerenje toplinske vodljivosti u ovisnosti o stlačivosti [157]. U sklopu doktorskog rada N. Jukl istražuje utjecaj vrste ugradbenih materijala i konstrukcije odjevnih kompozita na zbirna toplinska svojstva odjeće.

6. Zaključak

Ispitivanja toplinskih svojstava ugradbenih materijala, odjevnih kompozita i odjeće složen je proces koji uključuje cijeli niz toplinskih parametara. Promatranjem jednog ili nekoliko parametara toplinskih svojstava nije moguće uspješno predvidjeti toplinska svojstva odjeće. Iako postoji velik broj razvijenih mjernih uređaja i metoda, i dalje postoji potreba za unapređenjem postojećih i izradom novih mjernih uređaja koji će povezati kompleksne parametre toplinskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće. Do sada već postoji velik broj provedenih istraživanja no pokazalo se da je potrebno objединiti mjerne metode i uređaje koji će zajedničkom primjenom omogućiti bolje poimanje toplinskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće, a što će omogućiti i uspješnije i egzaktne tehničko projektiranje novih odjevnih predmeta prema zahtjevima potrošača.



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.

Literatura:

- [1] 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.
- [2] Havenith, G. Interaction of clothing and thermoregulation. *Exogenous Dermatology* **2002**, 5, 221-230
- [3] Tannam, M. Human Thermoregulatory Response to Infrared Radiant Heating, Doctoral thesis, Trinity College Dublin, Dublin, Ireland, 2012.
- [4] Holopainen, R. A human thermal model for improved thermal comfort. Doctoral thesis, VTT Technical Research Centre of Finland, Aalto University, Espoo, Finland, 2012.
- [5] Fabbri, K. *Indoor thermal comfort perception*. 1st ed.; Springer International Publishing: Heidelberg, Germany, 2015.
- [6] Termoregulacija. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/termoregulacija> (pristupljeno: 15/02/2023).
- [7] De Dear, R.; Brager, G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, *ASHRAE Transactions* **1988**, 104, 145-167.
- [8] Flouris, AD. Human Thermoregulation. In *Heat Stress in Sport and Exercise*, 1st ed.; Périard, JD, Racinais, S., Eds.; Springer International Publishing: Heidelberg, Germany, 2019, 98-112.
- [9] Rakovac, M. Središnja temperatura tijela u procjeni anaerobnog praga pri progresivnom testu opterećenja. Doktorski rad, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Medicinski fakultet, Zagreb, 2011.
- [10] Périard, JD.; Eijssvogels, TM.; Daanen HA. Exercise under heat stress: thermoregulation, hydration, performance, *Physiological reviews* **2021**, 101, 1873-1979, DOI: 10.1152/physrev.00038.2020
- [11] Fanger, PO. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*, 1st ed.; Danish Technical Press: Copenhagen, Denmark, 1970, 5-24
- [12] Uttam D. Objective measurement of heat transport through clothing. *International Journal of Engineering Research and Development* **2012**, 12, 43-47
- [13] Firšt Rogale, S.; Rogale, D.; Knezić, Ž. Važnost navođenja toplinske izolacije na ušivnim etiketama kod prodaje odjeće. U *Organizacija proizvodnje modne odjeće s osvrtom na planiranje i distribuciju prodaje*, 1. izdanje; Ujević, D., Knego, N., (Eds.) Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet & Sveučilište u Zagrebu Ekonomski fakultet, Zagreb, Hrvatska, 2022, 26-47
- [14] Havenith, G.; Holmér, I.; Parsons, K. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy and buildings* **2002**, 34, 581-591

- [15] Epstein, Y.; Moran, DS. Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial health* **2006**, *44*, 388-398, DOI: 10.2486/indhealth.44.388
- [16] Hu, R.; Liu, Y.; Shin, A.; Huang, S.; Ren, X.; Shu, W.; Cheng, J.; Tao, G.; Xu, W.; Chen, R.; Luo X. Emerging materials and strategies for personal thermal management, *Advanced Energy Materials* **2020**, *10*, 1-23, DOI: 10.1002/aenm.201903921
- [17] Shea, C.; Khawaja, A.R.; Khalid, S.; Ghulam, N. Association of metabolic equivalent of task (MET) score in length of stay in hospital following radical cystectomy with urinary diversion: a multi-institutional study. *International Urology and Nephrology* **2021**, *73*, 1305-1310.
- [18] Gagge, AP.; Burton, AC.; Bazett, HC. A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment. *Science* **1941**, *94*, 428-430.
- [19] Sahta I. et al. The control of human thermal comfort by the smart clothing. In Proceedings of the 4th International interdisciplinary scientific conference society, health, welfare, Riga, Latvia (22-23/11/2014).
- [20] Salloum, M.; Ghaddar, N.; Ghali, K. A new transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models. *International journal of thermal sciences*, **2007**, *46*, 371-384, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.017
- [21] Supuren G.; Oglakcioglu, N.; Ozdil, N.; Marmaralı, A. Moisture management and thermal absorptivity properties of double-face knitted fabrics. *Textile Research Journal* **2011**, *81*, 1320-1330, DOI: 10.1177/0040517511402122
- [22] Pan, N. Unique thermal properties of clothing materials. *Global Challenges* **2019**, *3*, 1-47.
- [23] 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*, 2142-2153, DOI: 10.1016/j.buildenv.2007.12.012
- [24] Oliveira, A.V.; 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*, 679-688, DOI: 10.1007/s00421-008-0824-5
- [25] 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*, 10-34, DOI: 10.1016/j.mtphys.2021.100342
- [26] Jendritzky, G.; de Dear R.; Havenith, G. UTCI—why another thermal index?. *International journal of biometeorology* **2012**, *56*, 421-428, DOI: 10.1007/s00484-011-0513-7
- [27] Kwon, J.; Choi, J. The relationship between environmental temperature and clothing insulation across a year. *International journal of biometeorology* **2012**, *56*, 887-893, DOI: 10.1007/s00484-011-0493-7
- [28] Najjaran, A.; Fotoohabadi, A.; Shiri, A. Determining heat transfer coefficient of human body. *Frontiers in Heat and Mass Transfer* **2013**, *4*, 1-5, DOI: 10.5098/hmt.v4.1.3003
- [29] Gonzalez, RG; Stroschein, LA.; Levell, CA.; Endrusick, TL.; Santee, W. *Relative applications of integrating environment, clothing and personal equipment on military operations*. Technical report: U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine: Natick, Massachusetts 1989.
- [30] Gagge, AP; Stolwijk, JA; Saltin B. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures. *Environmental Research* **1969**, *3*, 209-229, DOI: 10.1016/0013-9351(69)90037-1
- [31] Majstorović G. Determination of thermal properties of special purpose and intelligent clothing during their technical design. Doctoral Thesis, University of Zagreb Faculty of textile technology, Zagreb, Croatia, 2015.
- [32] Firšt Rogale, S.; Rogale, D.; Knezić, Ž.; Jukl, N. Measurement Method for the Simultaneous Determination of Thermal Resistance and Temperature Gradients in the Determination of Thermal Properties of Textile Material Layers. *Materials* **2021**, *14*, 1-20, DOI: 10.3390/ma14226853
- [33] Ghosh, S.K.; Bairagi, S.; Bhattacharyya, R.; Monda, M.M. Study on Potential Application of Natural Fibre Made Fabrics as Thermal Insulation Medium. *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics* **2016**, *16*, 8-13.
- [34] Ukponmwan, J.O. Compressibility analysis of dry abraded woven fabrics. *Textile Research Journal* **1994**, *64*, 756-760, DOI: 10.1177/0040517594064012
- [35] Heydenreich, J.; Schutz, Y.; Melzer, K.; Kayser, B. Comparison of conventional and individualized 1-MET values for expressing maximum aerobic metabolic rate and habitual

- activity related energy expenditure. *Nutrients* **2019**, 11, 1-16, DOI: 10.3390/nu11020458
- [36] Park, S.; Shoemaker, C.; Haub, M. How to measure exercise intensity of gardening tasks as a physical activity for older adults using metabolic equivalents. In *Proceedings of the XXVII International Symposium on Horticultural Practices and Therapy for Human*, Seoul, Korea (31/03/2008).
- [37] ISO 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment — Determination of metabolic rate, Geneva, Switzerland, 2021.
- [38] Huang, J.; Xu, W. A new practical unit for the assessment of the heat exchange of human body with the environment. *Journal of Thermal Biology* **2006**, 31, 318-322, DOI: /10.1016/j.jtherbio.2005.12.008
- [39] Pamuk, O. Thermal Manikins: An Overview, e-Journal of New World Sciences Academy. *Natural and Applied Sciences* **2008**, 3, 124-132.
- [40] Jonston, J.H. Nano-structured calcium silicate phase change materials for packaging temperature sensitive products. In *Nanocomposites and polymers with analytical methods*, 1st ed.; Cuppoletti, J., Ed.; InTechOpen: London, UK, 2011; 1-14.
- [41] Dolezal, I.; Hes, L.; Bal, K. A non-destructive single plate method for measurement of thermal resistance of polymer sheets and fabrics. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* **2019**, 25, 562-567, DOI: 10.1080/10803548.2018.1477247
- [42] Matusiak, M. Thermal Comfort Index as a Method of Assessing the Thermal Comfort of Textile Materials. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* **2020**, 18, 45-50.
- [43] Kim, HA. Moisture Vapor Permeability and Thermal Wear Comfort of Eco-Friendly Fiber Embedded Woven Fabrics for High-Performance Clothing. *Materials* **2021**, 14, 1-24, DOI: 10.3390/ma14206205
- [44] ASTM D 1518-85:2003 Standard Test Method For Thermal Transmittance Of Textile Materials, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2003.
- [45] ISO 11092:2014. Textiles — Physiological effects — Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test), Geneva, Switzerland, 2014.
- [46] McCullough, E.A.; Kwon, M.; Shim, H. A comparison of standard methods for measuring water vapour permeability of fabrics. *Measurement Science and Technology* **2003**, 14, 1402-1408, DOI: 10.1088/0957-0233/14/8/328
- [47] Regent, A. Analiza dišljivosti i vodonepropusnosti radne odjeće za zaštitu od kiše. *Tekstil* **2019**, 68, 99-105.
- [48] Tesinova, P.; Atalie, D. Thermal Comfort Properties of Sport Fabrics with Dependency on Structure Parameters and Maintenance. *Fibers and Polymers* **2022**, 23, 1150-1160, DOI: 10.1007/s12221-022-4160-x
- [49] Kaziur, P.; Mikołajczyk, Z.; Kłonowska, M.; Woźniak, B. Design Methodology and Technology of Textile Footwear. *Materials* **2022**, 15, 1-18, DOI: 10.3390/ma15165720
- [50] Ghezal, I.; Moussa, A.; Ben Marzoug, I.; El-Achari, A.; Campagne, C.; Sakli, F. Investigating Waterproofness and Breathability of a Coated Double-Sided Knitted Fabric. *Coatings* **2022**, 12, 1-18, DOI: i.org/10.3390/coatings12101572
- [51] Marolleau, A.; Salaün, F.; Dupont, D. Gidik, H.; Ducept, S. A New Method for Measuring Water Vapour Transfers Through Fabrics. *Fibers and Polymers* **2020**, 21, 646-656, DOI: 10.1007/s12221-020-8996-7
- [52] Hes, L.; Bal, K.; Dolezal, I. Principles of clothing comfort and their use in evaluation of sensorial and thermal comfort of men's casual jacket, *Fibers and Polymers*, **2021**, 22 (10), 2922-2928, DOI: 10.1007/s12221-021-0425-z
- [53] Holmér I. Thermal manikins in research and standards. In *Proceedings of the 3rd International Meeting on Thermal Manikin Testing 3IMM at the National Institute for Working Life*, Stockholm, Sweden (12-13/10/1999).
- [54] Fan J. Simulation of perspiration in sweating fabric manikin-Walter. In: *Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards*, 1st ed. Brebbia, CA., Conti, ME., Tiezzi, E., Eds.; The Hong Kong Polytechnic University: Hong Kong, China, 2006.
- [55] Thermetrics. Dostupno na: <https://thermetrics.com> (pristupljeno: 20/01/2022).
- [56] Firšt Rogale, S; Rogale, D.; Dragčević, Z.; Nikolić, G. *Inteligentna odjeća*, Sveučilište u Zagrebu, Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska, 2014.
- [57] Psikuta; A. Development of an 'artificial human' for clothing research. Doctoral thesis, De Montfort University, Leicester, UK, 2019.

- [58] Burke, R.; Rugh, J.; Farrington, R. ADAM—the Advanced Automotive Manikin. In *Proceedings of the 5th International meeting on thermal manikins and modelling* (5I3M), Strasbourg, France (29-30/09/2003).
- [59] Burke, R.; Curran, A.; Hepokoski, M. Integrating an active physiological and comfort model to the Newton sweating thermal manikin. In *Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Ergonomics*, Boston, USA (02-03/09/2009).
- [60] Mohamad, G.A. The role of tests and manikin in defining fabrics thermal characteristics. *International Design Journal* **2015**, *5*, 995-1001, DOI: 10.21608/idj.2015.92697
- [61] Mandal, S.; Annaheim, S.; Camenzind, M.; Rossi, R. Evaluation of Thermophysiological comfort of clothing using manikins. In *Manikins for Textile Evaluation*, Nayak, R., Padhye, R., Eds.; Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2017, 115-140
- [62] Firšt Rogale, S.; Rogale, D.; Knezić, Ž.; Fajt, S. Integrirani mjeriteljski sustav u Laboratoriju za termoizolacijska svojstva odjeće. *Tekstil* **2020**, *71*, 11-22
- [63] Matusiak, M.; Kowalczyk, S. Thermal-insulation properties of multilayer textile packages. *Autex Research Journal* **2014**, *14*, 299-307, DOI: 10.2478/aut-2014-0030
- [64] Kosiuk, G.; Matusiak, M. Analysis of the Heat Resistance of Multilayer Clothing Packages, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* **2021**, *2*, 95-99, DOI: 10.5604/01.3001.0014.6089
- [65] Das, A.; Alagirusamy, R.; Kumar, P.K. Study on heat transmission through multilayer clothing assemblies under different convective modes. *Journal of the Textile Institute* **2012**, *103*, 777-786, DOI: 10.1515/aut-2011-110205
- [66] Lizák, P.; Mojumdar, SC. Thermal properties of textile fabrics. *Journal of thermal analysis and calorimetry* **2013**, *112*, 1095-1100.
- [67] Kopitar, D.; Skenderi, S.; Mijović, B. Study on the Influence of Calendaring Process on Thermal Resistance of Polypropylene Nonwoven Fabric Structure. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics* **2014**, *7*, 1-11.
- [68] Tabarestani, F.; Mousazadegan, F.; Ezazshahabi, N. Assessment of the thermal insulation properties of multilayered mittens considering the airflow speed. *International Journal of Clothing Science and Technology* **2021**, *33*, 218-231, DOI: 10.1108/IJCST-01-2020-0007
- [69] 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*, 180-194, DOI: 10.1108/RJTA-11-2017-0049
- [70] 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*, 50-55, DOI: 10.5604/01.3001.0014.9297
- [71] 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.
- [72] 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*, 84-95, DOI: 10.1108/09556220010371711
- [73] Gunesoglu, S.; Meric Kaplangiray, B.; Gunesoglu, C. Thermal contact properties of 2-yarn fleece knitted fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* **2005**, *13*, 46-50.
- [74] 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*, 199-208, DOI: 10.1080/15440478.2017.1414650
- [75] Manasoglu, G.; Celen, R.; Kanik, M.; Ulcay, Y. An Investigation on the Thermal and Solar Properties of Graphene-Coated Polyester Fabrics. *Coatings* **2021**, *11*, 1-15, DOI: 10.3390/coatings11020125
- [76] 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, 150-167.
- [77] Begum, A.; Subramaniam, V. Compressibility of plain weft knitted fabrics. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* **1994**, *19*, 158-188.
- [78] 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*, 7-10, DOI: 10.4188/jte.46.7
- [79] 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, 32-38, DOI: 10.1080/00405000.2017.1320817
- [80] 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, 1393-1400, DOI: 10.1007/s12221-017-5536-1
- [81] 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, 1489-1504, DOI: 10.1177/1528083718769936
- [82] Asayesh, A.; Amini, M. Analysis of the compression performance of weft-knitted spacer fabrics for protective applications in view of the surface layer structure. *Fibers and Polymers* **2021**, 22, 3469-3478, DOI: g/10.1007/s12221-021-0248-y
- [83] 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, 231-239, DOI: i.org/10.1177/24723444221118980
- [84] Mell, W.E.; Lawson, J. A Heat Transfer Model for Firefighters' Protective Clothing. *Fire Technology* **2000**, 36, 39-68, DOI: 10.1023/A:1015429820426
- [85] Miedzińska, D. Numerical modelling of temperature gradient in layered structure of textiles for firemen clothing. In Proceedings of the Applied Inverse Problems Conference New York, USA (08-12/08/2019).
- [86] Schmid, M.; Annaheim, S.; Camenzind, M.; Rossi, RM. Determination of critical heat transfer for the prediction of materials damages during a flame engulfment test. *Fire and Materials* **2016**, 40, 1036-1046, DOI: 10.1002/fam.2362
- [87] Gupta, D.; Srivastava, A.; Kale, S. Thermal properties of single and double layer fabric assemblies. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* **2013**, 38, 387-394.
- [88] Sun, Y.; Chen, X.; Cheng, Z.; Feng, X. Study of heat transfer through layers of textiles using finite element method. *International Journal of Clothing Science and Technology* **2010**, 22, 161-173.
- [89] Onofrei E. et al. Modeling of heat transfer through multilayer firefighter protective clothing. *Industria Textila* **2014**, 65, 277-283.
- [90] Venkataraman, M.; Mishra, R.; Militky, J. Comparative Analysis of High Performance Thermal Insulation Materials. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology* **2017**, 2, 401-409, DOI: 10.15406/jteft.2017.02.00062
- [91] Yu Xu, J.; Chai Sun, Y.; Xiao, X.; Xi Chen, R. Influence of layer configuration on protecting effect of thermal protective clothing containing PCM. *Advanced Materials Research* **2013**, 796, 639-642, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.796.639
- [92] Yu B.; Chang Q.; Zhao, T.; Wang, L. Determination for Thickness of the Multilayer Thermal Insulation Clothing Based on the Inverse Problems. *Mathematical Problems in Engineering* **2019**, 24, 1-7. DOI: 10.1155/2019/5193729
- [93] Dupade, V.; Kumari, R.; Premachandran, B.; Seenivasan Rengasamy, R.; Talukdar, P. Effect of layering sequence and ambient temperature on thermal insulation of multilayer high bulk nonwoven under extreme cold temperatures. *Journal of Industrial Textiles* **2022**, 51, 2709S-2730S.
- [94] Dotti, F.; Ferri, A.; Moncalero, M.; Colonna, M. Thermo-physiological comfort of soft-shell back protectors under controlled environmental conditions. *Applied ergonomics* **2016**, 56, 144-152, DOI: 10.1016/j.apergo.2016.04.002
- [95] Dolezal, I.; Hes, L. P-TEST-computerized instrument for testing of the water vapour and thermal resistance of fabrics. In Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Rio de Janeiro, Brazil (09-11/6/2003).
- [96] Hes, L.; Bernardo, C.; Queirós, M. A new method for the determination of water vapour permeability of polymer films based on the evaluation of the heat of evaporation. *Polymer testing* **1996**, 15, 189-201, DOI: 10.1016/0142-9418(95)00031-3
- [97] Hes, L. Optimisation of shirt fabrics' composition from the point of view of their appearance and thermal comfort. *International Journal of Clothing Science and Technology* **1999**, 11, 105-119, DOI: 10.1108/09556229910276250
- [98] Hes, L.; Ursache, M. Effect of composition of knitted fabrics on their cooling efficiency at simulated sweating. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* **2011**, 36, 281-284.

- [99] Imrith, M.K.; Rosunee, S.; Unmar, R. Engineering UPF and comfort parameters of knitted fabrics and validation using statistical techniques. *Research Journal of Textile and Apparel* **2022**, 27, 306-328, DOI: 10.1108/RJTA-02-2022-0024
- [100] Salopek Čubrić, I.; Potočić Matković, V.M.; Skenderi, Z.; Tarbuk, A. Impact of substrate on water vapor resistance of naturally weathered coated fabrics. *Textile Research Journal* **2017**, 87, 1541-1553, DOI: 10.1177/0040517516657055
- [101] Razzaque A.; Tesinova, P.; Hes, L.; Salacova, J.; Abid, H. Investigation on hydro-static resistance and thermal performance of layered waterproof breathable fabrics. *Fibers and Polymers* **2017**, 18, 1942-1930, DOI: 10.1007/s12221-017-1154-1
- [102] Razzaque A.; Tesinova, P.; Hes, L. Enhancement of hydrostatic resistance and mechanical performance of waterproof breathable laminated fabrics. *Autex Research Journal* **2019**, 19, 44-53, DOI: 10.1515/aut-2018-0015
- [103] Akalović, J.; Skenderi, Z.; Firšt Rogale, S.; Zdraveva, E. Vapor Permeability of Bovine Leather for Making Professional Footwear. *Leather and Footwear* **2018**, 67, 12-17.
- [104] Skenderi, Z.; Firšt Rogale, S.; Akalović, J.; Zdraveva, E. Toplinski otpor govede kože i kompozitnih laminata za profesionalnu obuću. *Koža & Obuća* **2019**, 68, 26-29.
- [105] Salopek, Čubrić I.; Skenderi, Z. Approach to the prediction of thermophysiological comfort. In *DAAAM International Scientific Book*, 1st ed.; Katalinić, B., Ed.; DAAAM International: Vienna, Austria, 2010, 81-88.
- [106] Skenderi, Z.; Salopek Čubrić, I. Comprehensive overview of the transfer properties of clothing materials. In *Proceedings of the Textile Science and Economy, Zrenjanin, Srbija (06-07/11/2011)*.
- [107] Salopek Čubrić, I.; Skenderi, Z.; Mihelić-Bogdanić, A.; Andrassy, M. Experimental study of thermal resistance of knitted fabrics. *Experimental thermal and fluid science* **2012**, 38, 223-228.
- [108] Skenderi, Z.; Salopek Čubrić, I. Effect of finishing treatments on heat resistance of one- and two-layered fabrics. *Fibers and polymers* **2014**, 15, 1635-1640, DOI: 10.1007/s12221-014-1635-4
- [109] Salopek Čubrić, I.; Skenderi, Z.; Havenith, G. Impact of raw material, yarn and fabric parameters, and finishing on water vapor resistance. *Textile research journal* **2013**, 83, 1215-1228, DOI: 10.1177/0040517512471745
- [110] Basho, M.; Skenderi, Z.; Tomljenović, A.; Kazani, I. Thermo-Physiological Properties of Knitted Fabrics. In *Proceedings of the Joint International Conference 10th Textile Conference & 4th Conference on Engineering and Entrepreneurship*, Tirana, Albania (19-20/10/2023)
- [111] Potočić Matković, V.M.; Salopek Čubrić, I.; Skenderi, Z. Thermal resistance of polyurethane-coated knitted fabrics before and after weathering. *Textile Research Journal* **2014**, 84, 2015-2025, DOI: 10.1177/0040517514537368
- [112] Atmaca, M.; Yildiz, Z.; Ceviz, N.; Hes, L. Thermal comfort of woolen fabrics depending on physical properties. *Journal of Natural Fibers* **2016**, 13, 714-725, DOI: 10.1080/15440478.2015.1102791
- [113] Bajzik, V.; Hes, L.; Dolezal, I. Changes in thermal comfort properties of sports wear and underwear due to their wetting. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* **2016**, 41, 161-166.
- [114] Boughattas, A.; Hes, L.; Azeem, M.; Fayala, F.; Benltoufa, S. Thermo-physiological properties of woven structures in wet state. *Industria Textila* **2018**, 69, 298-303, DOI: 10.35530/IT.069.04.1452
- [115] Hes, L.; de Araujo, M. Simulation of the effect of air gaps between the skin and a wet fabric on resulting cooling flow. *Textile Research Journal* **2010**, 80, 1488-1497, DOI: 10.1177/0040517510361797
- [116] Özdemir, H. Thermal Comfort Properties of Clothing Fabrics Woven with Polyester/Cotton Blend Yarns. *Autex Research Journal* **2017**, 17, 135-141, DOI: 10.1515/aut-2016-0012
- [117] Sampath, MB.; Aruputharaj, A.; Senthilkumar, M.; Nalankilli, G. Analysis of thermal comfort characteristics of moisture management finished knitted fabrics made from different yarns. *Journal of industrial textiles* **2012**, 42, 19-33, DOI: 10.1177/1528083711423952
- [118] Mijović, B.; Salopek Čubrić, I.; Skenderi, Z. Measurement of thermal parameters of skin-fabric environment. *Periodicum biologorum* **2012**, 112, 69-73.

- [119] Berhanu, B.; Lübben, JF; Tadesse, MG. Effect of Plasma Surface Modification on Comfort Properties of Polyester/Cotton Blend Fabric. *Materials Research* **2021**, 24, 1-11, DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2021-0021
- [120] Wu, H.; Fan, J. Study of heat and moisture transfer within multilayer clothing assemblies consisting of different types of battings. *International Journal of Thermal Sciences* **2008**, 47, 641-647, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2007.04.008
- [121] Kosiuk, G.; Matusiak, M. Effect of Quilting on Selected Thermal-Insulation Properties of Textile Multilayer Packages. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* **2020**, 2, 50-56, DOI: 10.5604/01.3001.0013.7314
- [122] Angelova, R.; Reiners, P.; Borisova, E.; Kyosev, Y. The effect of the transfer abilities of single layers on the heat and mass transport through multilayered outerwear clothing for cold protection. *Textile Research Journal* **2018**, 88, 1125-1137, DOI: 10.1177/0040517517697642
- [123] Eryuruk, S. Effect of fabric layers on thermal comfort properties of multilayered thermal protective fabrics. *Autex Research Journal* **2019** 19, 271-278, DOI: 10.1515/aut-2018-0051
- [124] Senthil Kumar, B.; Murugan, T. Thermal property analysis of tri layer composite fabric towards the utility of sleeping bag. *Research Journal of Textile and Apparel* **2022**, 26, 124-137, DOI: 10.1108/RJTA-04-2020-0032
- [125] Tang Y.; Yu, H.; Wang, Z.; Luo, M.; Zhang, K.; Jiao, Y.; Li, C. Typical winter clothing characteristics and thermal insulation of ensembles for older people in China. *Building and Environment* **2020**, 182, 107-127, DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107127
- [126] Zemzem, M.; Hallé, S.; Vinches, L. Thermal insulation of protective clothing materials in extreme cold conditions. *Safety and Health at Work* **2023**, 14, 107-117, DOI: 10.1016/j.shaw.2022.11.004
- [127] Kuklane, K.; Toma, R.; Lucas, RA. Insulation and evaporative resistance of clothing for sugarcane harvesters and chemical sprayers, and their application in PHS model-based exposure predictions. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2020**, 17, 1-18, DOI: 10.3390/ijerph17093074
- [128] Švecova, J.; Strohmmandl, J.; Fišer, J.; Toma, R.; Hajna, P.; Havelka, A. A comparison of methods for measuring thermal insulation of military clothing. *Journal of Industrial Textiles* **2020** 51, 632-648, DOI: 10.1177/1528083719886559
- [129] Huang, Q.; Deng M.; Li J. Effects of ambient temperature step changes on the heat storage and release in thermal protective clothing. *Textile Research Journal* **2022**, 92, 4342-4356, DOI: 10.1177/00405175221101012
- [130] Matusiak, M.; Sybilska, W. Thermal resistance of fabrics vs. thermal insulation of clothing made of the fabrics. *The Journal of the Textile Institute* **2016**, 107, 842-848, DOI: 10.1080/00405000.2015.1061789
- [131] Konarska M.; Sołtyński, K.; Sudoł-Szopińska, I.; Młóżniak, D.; Chojnacka, A. Aspects of standardisation in measuring thermal clothing insulation on a thermal manikin. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* **2026**, 14, 58-63.
- [132] Fan, J.; Keighley, J. An investigation on the effects of body motion, clothing design and environmental conditions on the clothing thermal insulation by using a fabric manikin. *International Journal of Clothing Science and Technology* **1991**, 3, 6-13, DOI: 10.1108/EB002981
- [133] Konarska M.; Soltynski, K.; Sudoł-Szopińska, I.; Chojnacka, A. Comparative evaluation of clothing thermal insulation measured on a thermal manikin and on volunteers. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* **2007**, 15, 73-79.
- [134] Dai, X.Q.; Havenith, G. The interaction of clothing ventilation with dry and evaporative heat transfer of jackets: the effect of air and vapor permeability. *International Journal of Clothing Science and Technology* **2016**, 28, 570-581, DOI: 10.1108/IJCST-12-2015-0135
- [135] Fan, J.; Chen, Y.; Zhang, W. Clothing thermal insulation when sweating and when non-sweating. In *Environmental Ergonomics Book Series*, 1st ed.; Yutaka, T., Tadakatsu, O., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2005; Volume 3, 437-443.
- [136] Fung, F.; Gao, C.; Hes, L.; Bajzik, V. Water vapor resistance measured on sweating thermal manikin and Permetest skin model in the vertical orientation. *Communications in Development and Assembling of Textile Products* **2020**, 1, 65-73, DOI: 10.25367/cdatp.2020.1.p65-73
- [137] Holland, B. Comfort temperatures for sleeping bags. In *Proceedings of the Third International Meeting on Thermal Manikin Testing 3IMM*, Stockholm, Sweden (12-13/10/1999).
- [138] Jussila, K.; Rissanen, S.; Aminoff, A.; Wahlström, J.; Vaktkskjold, A.; Talykova, Lj.; Remes, J.; Mänttäre, S.; Rintamäki, H. Thermal

- comfort sustained by cold protective clothing in Arctic openpit mining—a thermal manikin and questionnaire study. *Industrial health* **2017**, 55, 537-548, DOI: 10.2486/indhealth.2017-0154
- [139] Oliveira, A.V.; Gaspar, A.; Quintela, D. Dynamic clothing insulation. Measurements with a thermal manikin operating under the thermal comfort regulation mode. *Applied Ergonomics* **2021**, 42, 890-899, DOI: 10.1016/j.apergo.2011.02.005
- [140] Oliveira, A.V.; Branco, V.; Gaspar, A.; Quintela, D. Measuring thermal insulation of clothing with different manikin control methods: Comparative analysis of the calculation methods. In *Proceedings of the 7th International Thermal Manikin and Modelling Meeting*, Coimbra, Portugal (03-05/09/2008).
- [141] Rogale, D., Nikolić, G. Measuring System for Determination of Static and Dynamic Thermal Properties of Composite and Clothing. State Intellectual Property Office, approved consensus patent from the State Intellectual Property Office on 28/08/ 2015, PK20130350.
- [142] 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.
- [143] Rogale, D.; Firšt Rogale, S.; Knezić, Ž. Measurement equipment and method for the simultaneous determination of thermal resistance and temperature gradients of layers of composite clothing, patent application from the State Intellectual Property Office on 27/07/2021, P20211208A.
- [144] Rogale, D.; Firšt Rogale, S.; Špelić, I. Development of the Measuring System for Analysing the Thermal Properties of Clothing. In *Book of proceedings of 7th International Textile, Clothing and Design Conference – Magic World of Textiles*, Dubrovnik, Croatia (05-08/10/2014).
- [145] Čubrić, G. Design of heat isolation chambers for thermo adaptive clothing. Doctoral Thesis, University of Zagreb Faculty of textile technology, Zagreb, Croatia, 2012.
- [146] Špelić, I. Impact of construction parameters on thermal properties of clothing. Doctoral Thesis, University of Zagreb Faculty of textile technology, Zagreb, Croatia, 2016.
- [147] Čubrić, G.; Salopek Čubrić, I.; Rogale, D.; Firšt Rogale, S. Mechanical and Thermal Properties of Polyurethane Materials and Inflated Insulation Chambers. *Materials* **2021**, 14, 1-14, DOI: 10.3390/ma14061541
- [148] 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, 1-13, DOI: 10.3390/ma13122672
- [149] Rogale, D.; Firšt Rogale, S.; Majstorović, G.; Čubrić, G. Thermal properties of thermal insulation chambers. *Textile Research Journal* **2020**, 91, 953-961, DOI: 10.1177/0040517520966718
- [150] Rogale, D.; Špelić, I., Firšt Rogale, S.; Majstorović, G. Utvrđivanje toplinskog otpora PA i PES tekstilnih tvorevina u ovisnosti o broju i kombinaciji slojeva. U *Zborniku radova 5. znanstveno-stručnog savjetovanja Tekstilna znanost i gospodarstvo*, Zagreb, Hrvatska (26/01/2012).
- [151] Firšt Rogale, S.; Rogale, D.; Majstorović, G. Thermoinsulation Properties of Intelligent Clothing with Adaptive Thermal Protection, In *Proceedings of the 6th International Textile, Clothing and Design Conference – Magic World of Textiles*, Dubrovnik, Croatia (07-10/10/2016).
- [152] Majstorović, G.; Rogale, D.; Firšt Rogale, S. Investigation of the Thermal Properties of Laminated Materials, In *Proceedings of the 5th International Conference: Development Trends and Innovative Approach in Textile Industry Textile Design, Technology and Management*, Beograd, Srbija (10/06/2016).
- [153] Špelić, I.; Rogale, D.; Mihelić-Bogdanić, A. The laboratory investigation of the clothing microclimatic layers in accordance with the volume quantification and qualification. *Journal of The Textile Institute* **2018**, 110, 23-36.
- [154] Špelić, I.; Rogale, D.; Mihelić-Bogdanić, A.; Petrak, S.; Mahnić, M. Changes in Ensembles' Thermal Insulation According to Garment's Fit and Length Based on Athletic Figure. *Fibers and polymers* **2018**, 19, 1278-1287, DOI: 10.1007/s12221-018-1074-8
- [155] Špelić, I.; Rogale, D.; Mihelić-Bogdanić A. The Study on Effects of Walking on the Thermal Properties of Clothing and Subjective Comfort. *Autex Research Journal* **2020**, 20, 228-243, DOI: 10.2478/aut-2019-0016

- [156] Firšt Rogale, S.; Benić, M.; Rogale, D. Istraživanje otpornosti prolasku topline različitih kombinacija muške odjeće, U *Zborniku radova 10. znanstveno – stručnog savjetovanja Tekstilna znanost i gospodarstvo*, Zagreb, Hrvatska (24/01/2017).
- [157] 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, DOI: 10.3390/ma16103842