

Uspostava i ustrojstvo Laboratorija za termoizolacijska svojstva odjeće

Snježana Firšt Rogale¹ i Dubravko Rogale²

¹ Član suradnik, Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, sfrogale@ttf.unizg.hr

² Redoviti član, Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, dubravko.rogale@ttf.unizg.hr

Sažetak: U sklopu istraživačkog projekta IP-2018-01-6363 Razvoj i toplinska svojstva inteligentne odjeće (ThermIC) financiranog od Hrvatske zaklade za znanost, u Zavodu za odjevnu tehnologiju Tekstilno-tehnološkog fakulteta uspostavljen je Laboratorij za termoizolacijska svojstva odjeće. U laboratoriju je instaliran integrirani mjeriteljski sustav za cjelovita ispitivanja termofizioloških svojstava odjevnih kompozita i odjeće. Većina uređaja koji čine mjeriteljski sustav predstavlja originalna patentirana rješenja. Integrirani mjerni sustav za termofiziološka svojstva odjeće sastoji se od mjernog sustava za određivanje statičkih i dinamičkih toplinskih svojstava kompozita i odjeće (vruće ploče i termalnog manekena), uređaja za mjerenje fizioloških parametara ljudskog tijela pri egzaktnom vrednovanju toplinske udobnosti odjeće, višenamjenskog diferencijalnog konduktometra za tekstilne kompozite i odjeću, uređaja za mjerenja temperaturnih gradijenata u odjevnim kompozitima, uređaja za nedestruktivno mjerenje otpora prolazu topline i propusnosti vodene pare/otpورا prolazu vode (Permetest), termovizijske kamere, te više pomoćnih uređaja i naprava.

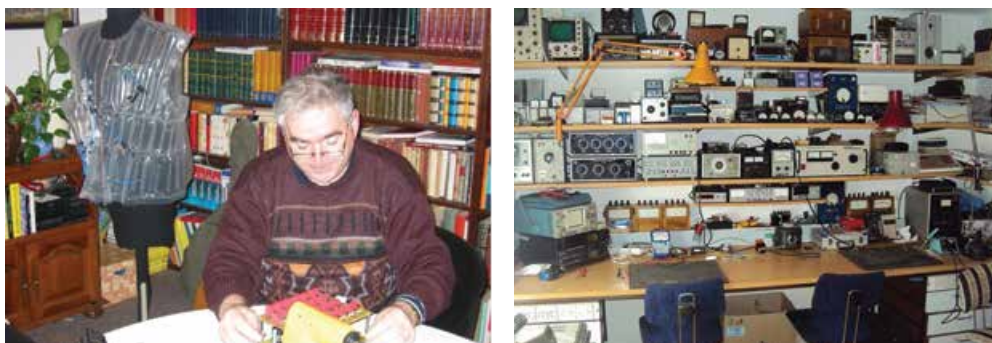
Ključne riječi: odjeća, termoizolacijska svojstva, inovativni mjerni sustavi, Laboratorij za termoizolacijska svojstva odjeće

1. Uvod

U Zavodu za odjevnu tehnologiju Tekstilno-tehnološkog fakulteta uspostavljen je 2002. godine Laboratorij za procesne parametre. U laboratoriju su, pod vodstvom prof. dr. sc. Dubravka Rogalea, kroz istraživačke, stručne i nastavne djelatnosti provedena istraživanja procesnih parametar odjevnog inženjerstva. Voditelj laboratorija bio je ujedno voditelj i glavni istraživač znanstvenih projekata financiranih od Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske *Procesi proizvodnje i dizajn odjeće*

(1996.-2002.), *Procesni parametri proizvodnje i dizajn odjeće* (2002.-2006.) te bilateralnog projekta *Mjerni sustavi i metode u odjevnom inženjerstvu* (2000.-2003.). U sklopu tih projekata laboratorij je opremljen znanstvenom opremom, a dio mjernih sustava bio je rezultat inovativnog rada voditelja laboratorija i suradnika.

2007. godine znanstveno-inovativni tim, pod vodstvom voditelja prof. dr. sc. D. Rogalea, počeo je razvijati inteligentnu odjeću s adaptivnim termoizolacijskim svojstvima. Bila su to prva istraživanja na području razvoja inteligentne odjeće u Hrvatskoj, ali i u svijetu. S obzirom da *Laboratorij za procesne parametre* nije bio opremljen mjernim uređajima i opremom potrebnom za razvoj inteligentne odjeće, ona se je, najvećim dijelom razvijala u osobnom laboratoriju voditelja znanstveno-inovativnog tima, sl. 1.

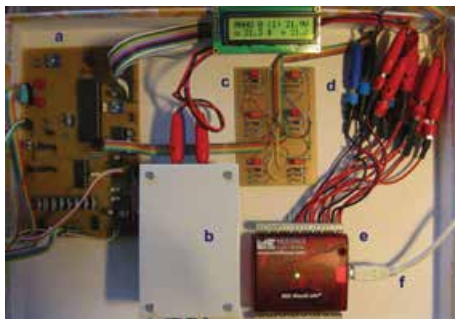


a.

b.

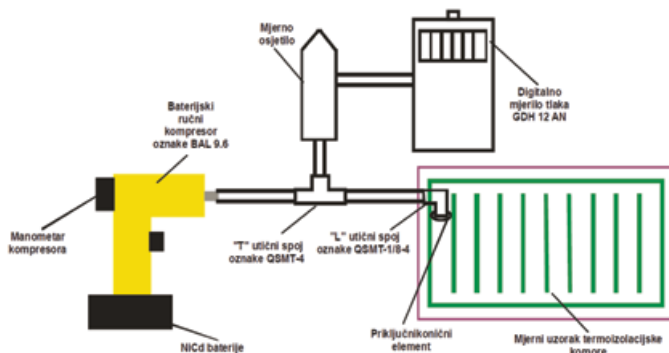
Slika 1: Razvoj inteligentne odjeće (a.) u privatnom laboratoriju D. Rogalea (b.)

U kućnim uvjetima osmišljene su i realizirane sljedeće inovacije: integrirani mjerni sustav za neovisna mjerenja temperature i stanja aktuatora u inteligentnoj odjeći, sl. 2, (autori: D. Rogale, S. Firšt Rogale), uređaj i metoda za određivanje načina funkcioniranja i mjerenja utjecajnih parametara



Slika 2: Integrirani mjerni sustav za neovisna mjerenja temperature i stanja aktuatora u inteligentnoj odjeći

na rad inteligentnog odjevnog predmeta (autori: D. Rogale, S. Firšt Rogale), uređaj za ispitivanja konstrukcijskih svojstava ekspandirajućih termoizolacijskih komora, sl. 3, (autori: S. Firšt Rogale, D. Rogale), te uređaj za mjerenje protoka zraka pri punjenju termoizolacijskih komora inteligentne odjeće (autori: D. Rogale, G. Čubrić) koji su danas sastavni dio mjerne opreme *Laboratorija za termoizolacijska svojstva odjeće*.



Slika 3: Shematski prikaz uređaja za ispitivanja konstrukcijskih svojstava ekspandirajućih termoizolacijskih komora

Razvojem inteligentne odjeće s adaptivnim termoizolacijskim svojstvima javila se potreba za opremom za ispitivanje termoizolacijskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće, čiji je razvoj, realizacija, umjeravanje i patentiranje financiran kroz znanstveni projekt Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske *Inteligentna odjeća i okruženje* (2007.-2011.), tehnologijski projekt financiran od Hrvatskog instituta za tehnologije *Odjeća sa adaptivnim termoizolacijskim svojstvima*, (2009.-2011.), *PoC6_1_189 Diferencijalni toplinski konduktometar za tekstilne kompozite i odjeću* financiran od Svjetske banke kroz HAMAG BICRO, a nastavljen u sklopu istraživačkog projekta IP-2018-01-6363 Hrvatske zaklade za znanost *Razvoj i toplinska svojstva odjeće*, kroz *Kratkoročne financijske potpora istraživanju Sveučilišta u Zagrebu* istog voditelja te autorice ovog rada, ali i kroz osobna sredstva voditelja znanstveno-inovativnog tima.

S obzirom da je oprema nadmašila i prostorno i namjenom *Laboratorij za procesne parametre* javila se opravdana potreba za razdvajanjem i smještanjem opreme u dva laboratorija. Stoga se, prema ideji i na poticaj autorice ovog rada krenulo u uspostavu *Laboratorija za termoizolacijska svojstva odjeće*. Fakultetsko vijeće Tekstilno-tehnološkog fakulteta je na 8. redovitoj sjednici u akad. god. 2020./2021., održanoj 24. svibnja 2021. godine donijelo odluku o osnivanju i ustrojstvu *Laboratorija za termoizolacijska svojstva odjeće*, što je bila jedna od aktivnosti projekta Hrvatske zaklade za znanost *Razvoj i toplinska svojstva odjeće*.

2. Integrirani mjeriteljski sustav za cjelovita ispitivanja termofizioloških svojstava odjevnih kompozita i odjeće

U *Laboratoriju za termoizolacijska svojstva odjeće*, sl. 4, integrirani su mjeriteljski sustavi za cjelovita ispitivanja termoizolacijskih svojstava odjevnih kompozita i odjeće [1].



Slika 4: Laboratorij za termoizolacijska svojstva odjeće

Integrirani mjeriteljski sustav sastoji se od sustava za određivanje statičkih i dinamičkih toplinskih svojstava kompozita i odjeće (vruće ploče i termalnog manekena) smještenih u termoizolacijsku komoru.

sklopu projekta Hrvatske zaklade za znanost *Razvoj i toplinska svojstva odjeće*, a za potrebe mjerenja na uređaju za mjerenje fizioloških parametara ljudskog tijela pri egzaktnom vrednovanju toplinske udobnosti odjeće, višenamjenskog diferencijalnog konduktometra za tekstilne kompozite i odjeću, uređaja za mjerenja temperaturnih gradijenata u odjevnim kompozitima, uređaja za nedestruktivno mjerenje otpora prolazu topline i propusnosti vodene pare/otpora prolazu vode) konstruirana je termoizolacijska komora za niske temperature, sl. 5. Temperatura zraka u komori se može spustiti od sobne do -15°C uz regulaciju brzine strujanja zraka. Opremljena je i pokretnom trakom za mjerenja termofizioloških stanja odjeće pri niskim temperaturama i različitim tjelesnim fizičkim opterećenjima.



Slika 5: Termoizolacijska komora za niske temperature

Dio integriranog mjernog sustava je i termovizijska kamera VarioCam Jenoptik, sl. 6, koja se koristi za određivanje raspodjele temperatura na odjeći te na površini mjernih uređaja za određivanje toplinskih svojstava pri njihovom umjeravanju.



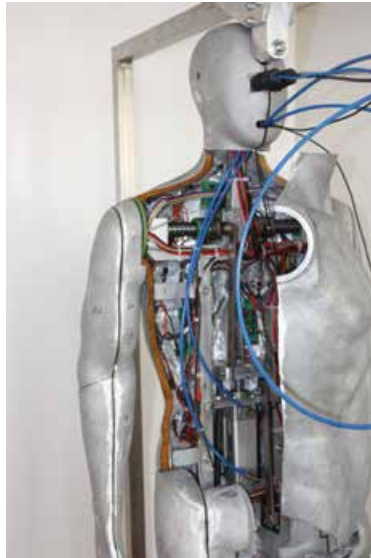
Slika 6: Termovizijska kamera VarioCam Jenoptik

2.1. Mjerni sustav za određivanje statičkih i dinamičkih toplinskih svojstava kompozita i odjeće

Mjerni sustav za određivanje statičkih i dinamičkih toplinskih svojstava kompozita i odjeće, koji se sastoji od mjernog sustava za određivanje toplinskih svojstava odjevnih kompozita (vruća ploča, sl. 5) i mjernog sustava za određivanje toplinskih svojstava odjeće (termalni maneken, sl. 6) smješteni su u istu klima komoru i rade pod istim ispitnim uvjetima.



Slika 7: Vruća ploča



Slika 8: Unutrašnjost termalnog manekena s pneumatsko-poluznim sustavom, točkastim grijačima, senzorima i mikrokontrolerskim pločicama

U komori se mogu regulirati uvjeti okoliša (temperatura, strujanje zraka i relativna vlažnost zraka) kao i temperatura vruće ploče i termalnog manekena. Mjerni sustav je uspješno uveden u rad, umjeren i ispitan, za njega je dobiven patent pri Državnom zavodu za intelektualno vlasništvo Republike Hrvatske pod oznakom PK20130350. Mjerenja vrijednosti termoizolacijskih svojstava kompozita i odjeće se izvode, za razliku od drugih sustava, pri istim uvjetima okoliša prema standardu ISO 15831, ali se uvjeti mogu regulirati i van područja koje propisuje standard te se na taj način mogu izvoditi mjerenja u realnim uvjetima. Na mjernom sustavu se izvode vrlo opsežna ispitivanja toplinskih svojstava odjeće s posebnim fokusom na namjensku zaštitnu odjeću za vojsku, policiju i specijalne službe te istraživanja toplinskih svojstva inteligentne odjeće. Utvrđeno je da mjerni sustav ima izuzetnu primjenjivost za određivanje toplinskih svojstava već gotovih odjevnih predmeta, ali može poslužiti i za projektiranje novih vrsta odjevnih predmeta od kojih se očekuje točno određena razina toplinske zaštite.

Tekstilna tvorevina veličine veće od $0,4 \times 0,6$ m se polaže na pravokutnu površinu vruće ploče, sl. 5 koja je najčešće zagrijana do konstantne temperature koja odgovara temperaturi kože na ljudskom tijelu (tj. 34°C), ali se može podesiti bilo koja temperatura koju mogu osigurati grijači čija je sveukupna snaga koju dovode mjernoj površini do 280 W. Temperatura ploče se mjeri pomoću više digitalnih senzora umetnutih direktno ispod površine ploče. Senzorski elementi mjere promjene temperature, koja se postiže zagrijavanjem 32 neinduktivna mikrogrijača smještena u dva polja,

ravnomjerno postavljenih ispod grijane površine kako bi se osigurala ravnomjerna distribucija topline, odnosno temperature cijele ploče. Svakim poljem mjerne ploče upravlja zaseban mikrokontrolerski sustav tako da radom mjerne ploče, odnosno održavanjem konstantne temperature upravljaju dva mikrokontrolera povezana mjernim protokolom preko digitalnog međusklopa s PC računalom.

Termalni maneken sastoji se od 24 segmenta ljudskog tijela unutar kojeg su instalirani električni grijači, senzori temperature, 14 mikrokontrolerskih sklopova i pneumatski sustav za pokretanje ruku i nogu. Namijenjen je određivanju statičkih i dinamičkih toplinskih svojstava odjeće, simulira hodanje na način da se protufazno pokreću obje ruke i noge. Brzina gibanja ekstremiteta se može mijenjati u širokom rasponu i točno namjestiti brzina pokretanja od 45 ± 2 dvostruka koraka/min i 45 ± 2 dvostruka pokreta rukama/min kod hoda, što odgovara normi HRN EN ISO 15831.

Vrućom pločom i termalnim manekenom se upravlja i izvode mjerenja pomoću računalnih programa preko digitalnog međusklopa LabVIEW. Vruća ploča je povezana sa računalnim programom za upravljanje i mjerenje na vrućoj ploči računalnim programom za upravljanje parametrima u klima komori. Termalni maneken je povezan sa računalnim programom za upravljanje manekenom, računalnim programom za mjerenje na termalnom manekenu, te računalnim programom za upravljanje parametrima u klima komori. Tijekom održavanja konstantnih temperatura mjerne površine vruće ploče, odnosno manekena, mjeri se električna snaga potrebna za zagrijavanje mjerne površine uređaja. Tijek mjerenja se prati na zaslonima monitora te se mjerni rezultati, koji se pohranjuju u bazu podataka, naknadno mogu analizirati i statistički obraditi.

2.2. Uređaj za mjerenje fizioloških parametara ljudskog tijela pri egzaktnom vrednovanju toplinske udobnosti odjeće

Toplinska udobnost pri nošenju odjeće može se odrediti subjektivnim izričajem nositelja ili egzaktnim mjerenjima fizioloških parametara: temperature kože (izmjerene metodom 4, 8 ili 12 mjesta pri čemu se izračunava srednja ponderirana temperatura), relativne vlažnosti kože (znojenja) i frekvencije otkucaja srca. Uređaj za mjerenje fizioloških parametara ljudskog tijela pri egzaktnom vrednovanju toplinske udobnosti odjeće prikazan je na sl. 9.

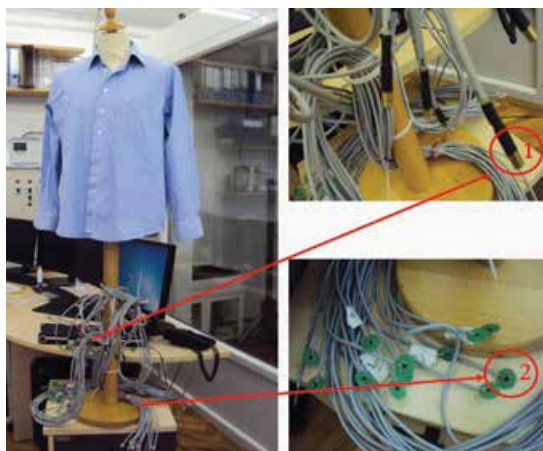
Uređaj se sastoji od četiri modula: modula za mjerenje temperature kože nositelja odjevnog sustava koji može mjeriti temperaturu kože na 4, 8 ili 12 mjesta te izračunavati srednju ponderiranu temperaturu kože; modula za mjerenje relativne vlažnosti kože (znojenja) nositelja odjevnog sustava i za prikaz mjernih rezultata; modula za mjerenje frekvencije otkucaja srca nositelja odjevnog sustava i za prikaz mjernih

rezultata te modula za mjerenje temperatura između pojedinih slojeva odjeće za određivanje udjela toplinskog izolacijskog efekta svakog pojedinog sloja u odjevnom sustavu.

Ovim uređajem smanjuje se subjektivizam ocjene, a povećava se signifikantnost egzaktnog mjerenja



a.



b.

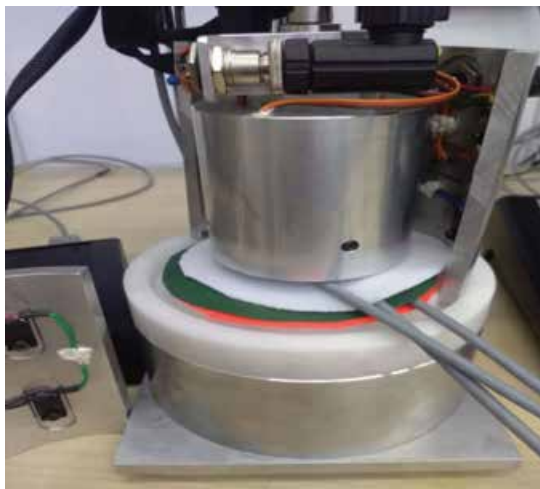
Slika 9: Uređaj za mjerenje fizioloških parametara ljudskog tijela pri egzaktnom vrednovanju toplinske udobnosti odjeće: a. mjerni uređaj; b. senzori

2.3. Višenamjenski diferencijalni konduktometar za tekstilne kompozite i odjeću

U sklopu tehnologijskog projekta *PoC6_1_189 Diferencijalni toplinski konduktometar za tekstilne kompozite i odjeću* je osmišljen, konstruiran, patentiran i realiziran višenamjenski diferencijalni konduktometar za tekstilne kompozite i odjeću, sl. 10,

koji može izmjeriti utjecaj svakog pojedinog sloja odjeće ili kompozita na njihova ukupna toplinska svojstva, što je vrlo bitno za utvrđivanje kvalitete ispitivanih gotovih odjevnih predmeta kao i pri projektiranju budućih odjevnih predmeta sa zadanim toplinskim svojstvima.

Višenamjenski diferencijalni toplinski konduktometar za tekstilne kompozite i odjeću mjeri kontaktnu toplinsku vodljivost između dvije ploče različitih temperatura. Jedna ploča predstavlja površinu kože ljudskog tijela, a druga okoliš kompozita ili odjeće. Osim za mjerenja vodljivosti uređaj je opremljen i nizom senzora temperature koji se umeću u svaki sloj kompozita ili slojeva odjeće. Pri tome se mjeri diferencijalni pad temperature po slojevima, odnosno učinkovitost toplinske izolacije svakog pojedinog sloja. Time se omogućio analitički pristup i egzaktno vrednovanje svih utjecajnih parametara kompozita i slojeva odjeće na njihovu toplinsku izolaciju. Ključne tehničke karakteristike uređaja su mehanički dio aparature, električni dio grijanih površina, senzorski dio mjerenja temperatura, regulacijski dio za održavanje konstantnih zadanih temperatura, sustav za mjerenje električne snage grijača površina, upravljačko mjerno mikroročunalo, međusklop za komunikaciju s osobnim računalom i softveri za mikroročunalo i osobno računalno za prijem podataka, pohranjivanje podataka, prikaz podataka mjerenja i potrebnih izračuna u grafičkom i tabelarnom prikazu na zaslonu monitora te za ispis na tiskalu.

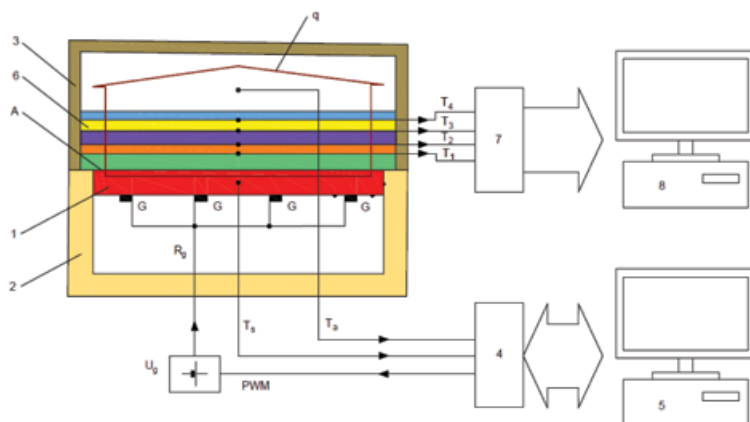


Slika 10: Višenamjenski diferencijalni konduktometar za tekstilne kompozite i odjeću

Mjerni sustav regulira snagu pri održavanju parametara kod uspostave termodinamičke ravnoteže na temelju koje je moguće izmjeriti ukupnu toplinsku vodljivost tekstilnih kompozita i dijelova odjeće te utvrditi utjecaj svakog pojedinog sloja na ukupnu vodljivost.

2.4. Uređaj za mjerenja temperaturnih gradijenata u odjevnim kompozitima

Uređaj za mjerenja temperaturnih gradijenata u odjevnim kompozitima, sl. 9, mjeri pad temperatura između slojeva odjevnih kompozita [2].



Slika 11: Uređaj za mjerenja temperaturnih gradijenata u odjevnim kompozitima

Konstruiran je da određuje temperaturne gradijente za konvencionalnu i inteligentnu odjeću koji imaju kompozitnu strukturu do 5 slojeva. Uređaj ima 4-kanalno pojačalo za termoparove K-tipa s kompenzacijom temperature hladnog kraja termopara i analognim pokazivačima temperatura te izlazima za priključak na AD pretvornike. Termoparovi se postavljaju između slojeva kompozita na tzv. uređaj s vrućom pločom ili na diferencijalni konduktometar, pri čemu se, na temelju mjerenja temperaturnih gradijenata, određuju pojedinačna toplinska izolacijska svojstva svakog sloja kompozita i ukupne strukture još u fazi inženjerskog projektiranja toplinskih svojstava odjeće. Također se može koristiti i pri ispitivanju toplinskih svojstava gotove odjeće, pri čemu se termoparovi ugrađuju u strukturu odjevnog predmeta kako bi se mjerila učinkovitost toplinske izolacije svakog sloja odjeće te donosila ocjena o svrsishodnosti ugradnje i cijene ugradbenih materijala u odjevnim kompozitima. Mjerenja se mogu izvoditi u laboratorijskim uvjetima na termalnim manekenima i na ljudskom tijelu tijekom nošenja odjeće.

Uređaj je izrađen u sklopu projekta IP-2018-01-6363 Razvoj i toplinska svojstava inteligentne odjeće ThermIC financiranog od Hrvatske zaklade za znanost i Kratkoročne financijske potpore istraživanju za 2020. Sveučilišta u Zagrebu Razvoj mjerne opreme za utvrđivanje gradijenata temperatura u višeslojnoj toplinskoj izolaciji odjeće. Za novi, ispravljeni, funkcionalni prototip ovog uređaja je predana patentna prijava (P20211208) Državnom zavodu za intelektualno vlasništvo Republike Hrvatske,

pod nazivom Mjerni uređaj i metoda za simultana mjerenja otpora prolazu topline i temperaturnih gradijenata slojeva kompozita odjeće. Izumitelji uređaja su Dubravko Rogale, Snježana Firšt Rogale i Željko Knezić, a podnositelj prijave Tekstilno-tehnološki fakultet.

2.5. Uređaja za nedestruktivno mjerenje otpora prolazu topline i propusnosti vodene pare/otpore prolazu vode

Permetest, sl. 12, je uređaj za nedestruktivno mjerenje otpora prolazu topline i propusnosti vodene pare i otpora prolazu vode i jedini je uređaj koji nije realiziran u Zavodu za odjevnu tehnologiju, nego je kupljen.



Slika 12: Uređaj za nedestruktivno mjerenje otpora prolazu topline i propusnosti vodene pare i otpora prolazu vode, Permetest

Uređaj je nabavljen sredstvima Kratkoročnih financijskih potpora istraživanju za 2017. Sveučilišta u Zagrebu: Ispitivanje otpora prolazu topline i vodene pare zaštitne i inteligentne odjeće (voditelj: prof. dr. sc. D. Rogale), Termofiziološka svojstva tekstila, kože i kompozita (voditelj: prof. dr. sc. Z. Skenderi) i Termoizolacijska svojstva kompozitnog materijala dobivenog kombinacijom elektroispredanja iz otopine i taline (voditelj: prof. dr. sc. B. Mijović) te sredstva Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta. Uređaj je konstruirao, patentirao i realizirao prof. dr. sc. Lubos Hes sa Technical University of Liberec, Department of Textile Evaluation.

2.6. Pomoćni uređaji u laboratoriju

Za potrebe znanstveno-istraživačkog rada u laboratoriju napravljeno je ili kupljeno više pomoćnih uređaja. To su instrumenti iz grupacije općih elektroničkih uređaja potrebnih za kontrolu rada elektroničkih mjernih sustava (osciloskopi, univerzalni

mjerni instrumenti, mjerni mostovi i dr.), alati za održavanje, mjerni instrumenti za određivanje stanja u okolišu (digitalna mjerila temperature zraka, mjerila relativne vlažnosti zraka, tlaka zraka, anemometri za mjerenja brzine strujanja zraka s vrućom žicom i lopatičastom turbinom i dr.). Mnogi specifični instrumenti su i napravljeni. Tako je, kao jedan primjer, na sl. 13 prikazan precizni digitalni manometar za male tlakove (do 60 mbara).



Slika 13: Digitalni manometar i mjerilo temperatura za ispitivanja termoizolacijskih svojstava ekspanzirajućih komora

Prikazani uređaj ima ugrađen dva digitalna termometra sa tzv. inteligentnim senzorima korištenim za istraživanja termoizolacijskih svojstava ekspanzirajućih komora inteligentne odjeće, kao još jedna u nizu manjih inovacija. Pomoćni uređaji u laboratoriju imaju svoju specifičnu namjenu i važni su za ispravno funkcioniranje opisanih mjeriteljskih sustava.

3. Zaključak

Uspostavljen i ustrojen Laboratorij za termoizolacijska svojstva odjeće jedini je laboratorij u ovom dijelu Europe u kojem se mogu izvoditi cjelokupna ispitivanja toplinskih svojstava odjeće ili ispitivanja na već izrađenoj odjeći. Za implementaciju koncepcije integriranog mjeriteljskog sustava za cjelovita ispitivanja termofizioloških svojstava odjevnih kompozita i odjeće u Laboratorija za termoizolacijska svojstva odjeće važno je da svi navedeni uređaji mogu raditi kao jedna smisljena povezana mjeriteljska cjelina koja sačinjava složen i sveobuhvatan sustav za određivanja toplinskih svojstava odjeće i kompozita, ali na način da je moguće koristiti svaki od spomenutih uređaja zasebno, kao potpuno izdvojen i autonomni mjerni sustav.

Većina mjernih uređaja realizirana je instalirana i umjerena u Zavodu za odjevnu tehnologiju Tekstilno-tehnološkog fakulteta, što ukazuje na izniman inovativni potencijal.

Ovo je izvrstan primjer kako se na temelju vlastitih znanstvenih istraživanja može doći do inovacija koje su priznate diljem svijeta i iz kojih su nastali patenti. Na taj način, na vlastitim istraživanjima, se stvara novi originalni fundus znanja koji može poslužiti kao temelj za nova istraživanja, nastavni proces i uspostavu novih mjernih metoda te novog laboratorija.



Rad je izrađen u sklopu aktivnosti na istraživačkom projektu IP-2018-01-6363 Razvoj i toplinska svojstva inteligentne odjeće (ThermIC) financiranog od Hrvatske zaklade za znanost

Literatura

- [1] Rogale D., Firšt Rogale S.: Integrirani mjerni sustav za neovisna mjerenja temperature i stanja aktuatora u inteligentnoj odjeći, Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske 2018, Rogale D., Žiljak V. (ur.), Zagreb, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, 2019., 315-318, ISSN 1332-3482
- [2] 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* 14 (2021), ISSN 1996-1944