



---

Fakulteta za naravoslovje  
in matematiko

# TOPLOTNA PREVODNOST IN PREPUSTNOST TKANIN

Diplomski seminar na študijskem programu 1. stopnje Fizika

Rok Štanc

Mentor: doc. dr. Mitja Slavinec

Somentorica: prof. dr. Daniela Zavec Pavlinič

Maribor, 2015

ŠTANC, R.: Toplotna prevodnost in prepustnost tkanin

Diplomski seminar, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko, 2015

#### POVZETEK

V diplomskem seminarju obravnavamo toplotno upornost različnih tkanin in kompozitov. Posebno pozornost smo posvetili vplivu zračne prepustnosti na toplotni upor in na fiziološko udobje. Izmerili smo odvisnost zračne prepustnosti od tlačne razlike, debeline tkanine in relativnega deleža vode v tkanini. Odvisnosti od debeline smo opisali z matematičnim modelom. Izračunali smo še temperaturne razlike, ki nastanejo zaradi izhlapevanja vode iz tkanin in pojasnili vpliv mokrih tkanin na človeka.

Ključne besede: toplotna prevodnost, zračna prepustnost, tlak, temperatura, toplota, izhlapevanje.

#### ABSTRACT

In this thesis we study thermal conductivity of various fabrics and composites and also the impact of air permeability on thermal resistance and human comfort zone. We measured a dependence of a pressure difference, thickness of fabrics and the relative amount of water in fabrics on air permeability. The thickness dependence is also described by mathematical model. We calculated the temperature difference that occurs due to the evaporation of water from fabrics and we explain the impact of wet fabrics on human comfort.

Key words: thermal conductivity, air permeability, pressure, temperature, heat, evaporation.

## KAZALO

1	Uvod.....	1
2	Prenos toplote.....	2
2.1	Izhlapevanje.....	3
3	Zračna prepustnost tkanin .....	4
3.1	Vpliv zračne prepustnosti tkanine na toplotno upornost .....	4
4	Merjenje toplotne prevodnosti tkanin .....	6
4.1	Meritve in rezultati .....	7
5	Merjenje zračne prepustnosti tkanin .....	8
5.1	Meritve in rezultati .....	9
6	Analiza .....	16
7	Zaključek.....	20

# 1 Uvod

Lastnosti tekstilij so zelo pomembne tako pri oblačilih za vsakodnevno uporabo, kot pri tehničnih izdelkih, ki se uporabljajo za specifične namene, bodisi za športna ali zaščitna oblačila. Oblačila morajo ohranjati toplotno ravnovesje telesa ter ga ščititi pred vremenskimi vplivi kot sta npr. dež in veter, hkrati pa morajo biti čim bolj prepustna za vodno paro. Običajno je to z enim materialom težko doseči, zato oblačila sestavijo iz več različnih materialov, ki skupaj tvorijo ustrezen kompozit. Tipično so kompoziti sestavljeni iz treh plasti. Zunanja plast ščiti telo in notranje sloje pred zunanjimi vplivi ter poškodbami. Srednja plast je najpogosteje membranski material, ki je za vodo in zrak neprepusten, za paro pa zelo prepusten. Pri nekaterih oblačilih je to tudi izolacijski sloj. Notranji sloj mora biti čim bolj prijazen do telesa, hkrati pa mora čim bolj absorbirati vlago s površine telesa in jo prenašati na zunanjo stran, saj s tem povečamo udobje [1,2]. Kljub pomembnosti zaščite pred zunanjimi vplivi, je ugodje še vedno najpomembnejši faktor, ki pa ga v praksi z neprepustnimi materiali težko dosežemo. Zelo pomembna lastnost tekstila, ki bistveno vpliva na ugodje, je zračna prepustnost ali permeabilnost. Teoretična obravnava prepustnosti je precej zapletena oziroma je težko sestaviti tak model, ki bi lahko opisal prepustnost vseh tkanin. V različnih študijah obravnavajo teoretične modele za izračun prepustnosti na podlagi različnih vezav tkanin in njihove poroznosti [3]. Prav tako obravnavajo prepustnost tudi z modelom, ki temelji na pretoku zraka skozi kapilaro, kjer moramo ponovno poznati lastnosti tkanine, kot so poroznost, velikost por in debelina tkanine [4]. Običajno prepustnost opisujejo s semiempiričnimi enačbami ali enačbami, ki veljajo za poseben primer, ni pa splošnih modelov. Zračna prepustnost je odvisna tudi od debeline tekstila, odvisnost pa naj bi dobro opisala potenčna funkcija [5]. Na tkanino ima velik vpliv tudi vlažnost oziroma delež vode, ki se zadržuje v tkanini. Poleg tega, da se tkanini poveča toplotna prevodnost [6], se ji hkrati zmanjša tudi zračna prepustnost [7].

Cilj diplomskega seminarja je izmeriti toplotno prevodnost tkanin in kompozitov ter njihove prepustnosti, nato pa primerjati vpliv toplotne prevodnosti in zračne prepustnosti na toplotno upornost tkanine. V ta namen smo izdelali posebno merilno napravo za merjenje prepustnosti v odvisnosti od tlačne razlike na nasprotnih straneh tkanine. Meritve smo opravili za različne debeline in različne vlažnosti tkanin. V literaturi nismo zasledili sistematičnih raziskav vpliva vlažnosti na prepustnost tkanin, zato smo temu namenili posebno pozornost. Dobljene eksperimentalne rezultate smo nato opisali z modeli, na osnovi katerih lahko dokaj dobro napovemo razmere v drugih podobnih okoliščinah.

V diplomskem seminarju si bomo najprej ogledali osnove prenosa toplote s prevajanjem in prenos toplote zaradi izhlapevanja na primeru vlažne majice (poglavje 2). V poglavju 3 opišemo vpliv zračne prepustnosti tkanine na udobje človeka ter omenimo model za opis odvisnosti zračne prepustnosti tkanine od debeline. Podrobneje obravnavamo še vpliv zračne prepustnosti na toplotno upornost. V poglavju 4 predstavimo meritve toplotne prevodnosti, v poglavju 5 pa meritve zračne prepustnosti v odvisnosti od tlaka, debeline in relativnega deleža vode v tkanini. Fizikalni modeli, s katerimi smo na osnovi meritev opisali odvisnost zračne prepustnosti tkanine od debeline tkanine, so predstavljeni v poglavju 6. Na koncu izračunamo še

temperaturno razliko, ki nastane zaradi izhlapevanja vode iz tkanine, in pojasnimo, zakaj nastopi občutek hlada, če imamo oblečeno mokro majico.

## 2 Prenos toplote

Toplota se lahko prenaša z neposrednim stikom teles ali pa na daljavo. Poznamo tri načine prenosa toplote in sicer s prevajanjem, konvekcijo in sevanjem. V nadaljevanju bomo podrobneje opisali prevajanje, konvekcijo in sevanje pa zgolj omenili, saj se s tema dvema načinoma v primerih, ki jih bomo obravnavali, prenese zanemarljivo malo toplote. Na koncu poglavja bomo podrobno obravnavali še izhlapevanje, saj je tudi to pomemben proces prenosa tako mase kot toplote, predvsem pri sušenju tekstila.

Prevajanje je pojav, pri katerem teče toplotni tok skozi nek material v smeri od telesa z višjo temperaturo k telesu z nižjo temperaturo. Lahko si predstavljamo površino kože pri neki temperaturi, ki je višja od okolice, in oblačilo, skozi katero bo tekla toplotni tok v smeri od telesa v okolico. Gostoto toplotnega toka  $j$  opišemo s Fourierjevim zakonom, ki se za eno dimenzijo glasi [8]:

$$j = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

kjer je  $\lambda$  koeficient toplotne prevodnosti,  $dT/dx$  pa temperaturni gradient, ki kaže v smeri največjega naraščanja temperature. V stacionarnem stanju je v izotropnih snoveh gostota toplotnega toka v vseh točkah v smeri toka enaka, zato jo lahko zapišemo kar z razliko temperatur ( $\Delta T$ ) med eno in drugo stranjo materiala z debelino  $d$ ,

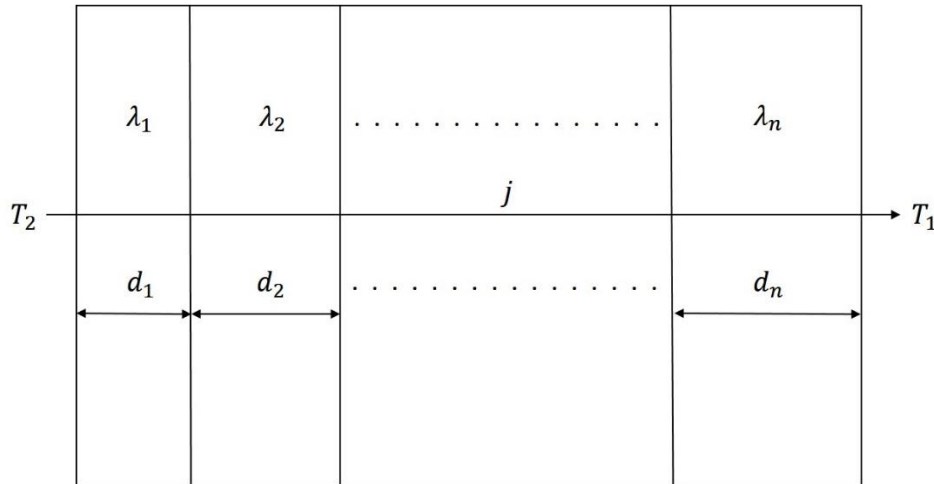
$$j = -\lambda \frac{\Delta T}{d}. \quad (2)$$

Celoten toplotni tok skozi ravno ploskev s površino  $S$  izračunamo iz enačbe:

$$P = -jS = -S\lambda \frac{\Delta T}{d}. \quad (3)$$

Poglejmo še, kolikšen toplotni tok teče skozi kompozitni material, ki je sestavljen iz več plasti materialov z različnimi koeficienti toplotne prevodnosti in različnimi debelinami (slika 1). Toplotna upornost ( $R$ ) je definirana kot  $R = d/\lambda$ , toplotna upornost kompozita pa kot seštevek posameznih toplotnih upornosti. Toplotni tok skozi kompozitni material, ki je sestavljen iz  $n$  različnih materialov, lahko zapišemo kot [9]:

$$P_{kompozit} = \frac{S\Delta T}{\sum_n R_n} = \frac{S\Delta T}{\sum_n \frac{d_n}{\lambda_n}}. \quad (4)$$



Slika 1. Toplotni tok skozi kompozitni material, sestavljen iz  $n$  različnih materialov, z različnimi debelinami ( $d_i, i = 1, \dots, n$ ) in koeficienti toplotne prevodnosti ( $\lambda_i, i = 1, \dots, n$ ), pri čemer je temperatura  $T_2$  za  $\Delta T$  večja od temperature  $T_1$ .

Kot smo že omenili, imata konvekcija in sevanje v naših primerih zelo majhen vpliv, zato ju bomo na tem mestu samo omenili. Konvekcija je proces, pri katerem ni neposrednega stika med dvema telesoma z različnima temperaturama, ampak se toplota prenaša z okoliško tekočino. Poznamo naravno in prisilno konvekcijo. Pri naravni konvekciji se npr. redkejši topel zrak, zaradi sile vzgona začne dvigovati, njegovo mesto pa zasede hladnejši zrak. Pri prisilni konvekciji pa gonilna sila konveksijskega toka ni vzgon, pač pa nek zunanji dejavnik (npr. tlačna razlika zaradi vetra). Vsako telo z določeno temperaturo oddaja toploto tudi s sevanjem, kolikšen je ta tok, pa opišemo s Stefanovim zakonom.

## 2.1 Izhlapevanje

Pri izhlapevanju se voda na površini upari in kot vodna para zapusti površino. Hitrost izhlapevanja je odvisna od relativne vlažnosti zraka, temperature, hitrosti zraka in površine, s katere voda izhlapeva. Za to se porablja energija, ki jo voda črpa iz okolice. Tako v primeru, če imamo oblečeno mokro majico, voda, ki se zadržuje v tkanini, za izhlapevanje prejema energijo iz okolice in s površine našega telesa. Enak princip ohlajanja uporablja tudi naše telo. V primeru, da se telo preveč segreje (npr. pri fizični aktivnosti), se začnemo potiti, pot pa nato izhlapi s površine kože, za kar se porabi določena količina toplote ( $Q_i$ ), ki prenese odvečno toploto telesa v okolico [10]. To toploto lahko zapišemo kot produkt mase vode ( $m_v$ ) in njene izparilne toplote ( $q_i$ ) pri določeni temperaturi:

$$Q_i = m_v q_i(T). \quad (5)$$

Privzemimo, da sušimo oblačilo samo s pihanjem zraka skozi tkanino. Tako na primer simuliramo sušenje mokre majice na vetru. V tem primeru tkanina oziroma voda v tkanini prejema toploto samo iz zraka, ki se ob prehodu skozi tkanino ohladi in pri tem odda toploto  $Q_z$ :

$$Q_z = m_z c_z \Delta T_z, \quad (6)$$

kjer je  $m_z$  masa zraka,  $c_z$  specifična toplota zraka pri konstantnem tlaku in  $\Delta T_z$  razlika temperature zraka pred in za tkanino. Če enačimo en. (5) in (6), lahko izrazimo  $\Delta T_z$ :

$$\Delta T_z = \frac{m_v q_i(T)}{m_z c_z}. \quad (7)$$

### 3 Zračna prepustnost tkanin

Zračna prepustnost tkanin pomembno vpliva na udobje in tehnične lastnosti oblačil. Bolj prepustne tkanine tipično bolje regulirajo temperaturno ravnovesje in s tem zagotavljajo več udobja, vendar ne v vetrovnih razmerah. Veter pri bolj prepustnih tkaninah odnaša več toplega zraka, ki ga je telo predhodno segrelo, in s tem povzroči hitrejše ohlajanje telesa. Zračna prepustnost je odvisna od veliko dejavnikov, kot so površinska struktura tkanine, način vezave, velikost por v tkanini, poroznost, debelina in premer niti. Vse vplive je v teoretičnem modelu težko ustrezno upoštevati, zato poskušamo opisati prepustnost s čim manj parametri. Običajno sta debelina in poroznost tkanine tisti dve lastnosti, ki nam lahko podata največ informacij in s katerima je smiselno sestavljati splošne modele. V literaturi je omenjena potenčna odvisnost volumskega pretoka ( $\Phi_v$ ) zraka skozi tkanino od njene debeline ( $d$ ) [5]:

$$\Phi_v = a d^{-b}, \quad (8)$$

kjer je  $a$  koeficient, ki narašča s premerom niti, in  $b$  eksponent, ki se s povečevanjem koeficienta  $a$  zmanjšuje. Enačba (8) je empirična, zato bomo na osnovi meritev poskušali pojasniti tudi, ali lahko koeficientoma  $a$  in  $b$  damo nek fizikalni pomen.

#### 3.1 Vpliv zračne prepustnosti tkanine na toplotno upornost

Za oblačila, ki imajo majhen koeficient toplotne prevodnosti, še ni nujno, da so v vseh pogojih najboljše izolatorji. Velik vpliv na ohlajanje ima veter, ki s prisilno konvekcijo konstantno odnaša segreto plast zraka na površini tkanine, tja pa prodira hladen zrak iz okolice, kar povzroča hitrejše ohlajanje oziroma večji prenos toplote iz telesa v okolico. V vetrovnih razmerah je zato zelo pomemben zunanji sloj oblačila, ki ščiti telo pred vetrom in pred tem, da bi hladen zrak prodril do kože, kar bi še dodatno povečalo izgubo toplote. Zaradi tega ni pomembno samo, kolikšen je koeficient toplotne prevodnosti tkanine, ampak tudi kolikšna je

prepustnost tkanine za zrak. Tkanine, ki bolj prepuščajo zrak, tudi boljše dihajo, kar je v primeru brezvetrja primernejše, saj je manjša možnost pretiranega potenja, ki bi navlažil tkanino, to pa bi povzročilo povečanje toplotne prevodnosti, saj vlažna tkanina bolje prevaja toploto kot suha [6]. Situacija je popolnoma drugačna v vetrovnih razmerah. Pri tkaninah z večjo prepustnostjo lahko zrak prodre dlje v notranjost tkanine, ali celo do kože, in s tem večje količine toplega zraka nadomesti s hladnejšim, zato se toplotne izgube povečajo [8]. Več kot se bo zraka zamenjalo, več ga bo moralo telo ponovno segreti, zato lahko zapišemo toploto, ki jo telo izgubi na tak način, kot količino toplote, ki jo potrebujemo, da ponovno segrejemo neko maso zraka. Količino te toplote izračunamo z enačbo (6). Zapišimo še gostoto toplotnega toka  $j_z$ , ki zaradi zračne prepustnosti tkanine prehaja iz tkanine v okolico, kot

$$j_z = \frac{m_z c_z \Delta T_z}{S t}, \quad (9)$$

kjer je  $S$  površina tkanine in  $t$  čas izpostavljenosti vetru, in gostoto toplotnega toka  $j_p$  izgubljenega zaradi prevajanja z enačbo (2) ter definirajmo efektivno toplotno upornost kot  $R_{ef} = \Delta T / \sum j = \Delta T / (j_z + j_p)$ . Tako pridemo do izraza za efektivno toplotno upornost tkanine:

$$R_{ef} = \frac{1}{\frac{\lambda}{d} + \frac{m_z c_z}{S t}}. \quad (10)$$

Maso zraka izrazimo z volumskim pretokom zraka skozi površino  $S$ , to pa poimenujemo zračna prepustnost tkanine ( $\Phi_{vS}$ ):

$$\Phi_{vS} = \frac{\Phi_v}{S}, \quad (11)$$

ki pa je enaka hitrosti, s katero gre zrak skozi tkanino in je hkrati količina, ki jo lahko eksperimentalno merimo. Tako preoblikovana enačba (10) dobi obliko [11]:

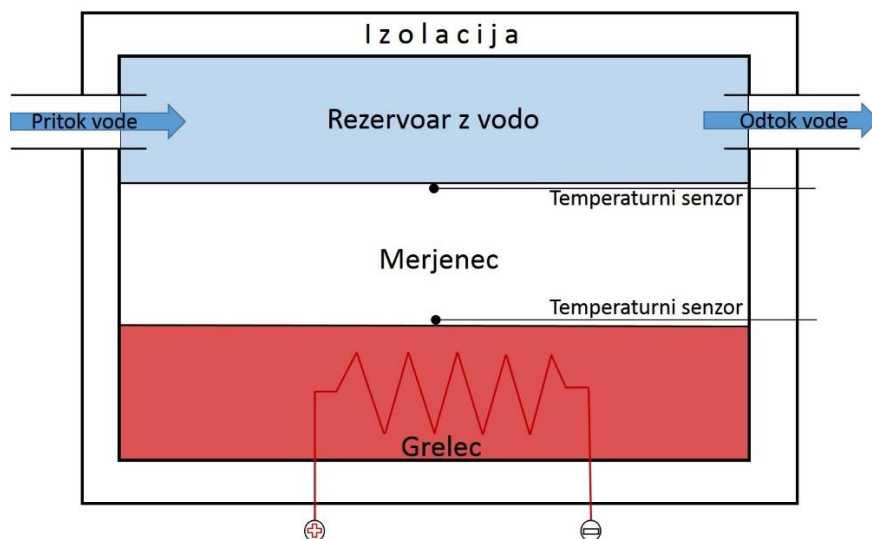
$$R_{ef} = \frac{d}{\lambda + \Phi_{vS} \rho_z c_z d}, \quad (12)$$

kjer je  $\rho_z$  gostota zraka. Iz enačbe (12) vidimo, da večja kot bo prepustnost tkanine, bolj se bo zmanjšal toplotni upor (toplotna izolativnost) oblačila. V primeru, da je zunanji sloj oblačila za zrak neprepusten ali da vetra ni, drugi člen v imenovalcu enačbe (12) odpade in nam ostane samo klasičen izraz za toplotno upornost.



## 4 Merjenje toplotne prevodnosti tkanin

Toplotno prevodnost tkanin smo merili v ravnovesnem stanju s posebej izdelano merilno napravo [12], pri kateri se toplota prenaša predvsem s prevajanjem, vpliv prenosa toplote s konvekcijo in sevanjem pa je zanemarljiv. Naprava je sestavljena iz grelca na spodnji strani in rezervoarja, skozi katerega teče voda iz vodovodne napeljave in zagotavlja konstantno temperaturo na zgornji strani (slika 2). Moč grelca lahko reguliramo z napetostnim izvirom, na katerega je grelec priključen, maksimalna moč pa je okoli 30 W. Vzorec, ki mu želimo izmeriti toplotno prevodnost, mora biti velikosti  $10 \times 10$  cm in debeline okoli 1 cm. Temperaturo tkanine smo merili s šestimi digitalnimi temperaturnimi senzorji z natančnostjo  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ . Senzorje lahko poljubno razmestimo, tudi med posameznimi plastmi merjenca, v kolikor je vzorec sestavljen iz več plasti. Na ta način lahko opazujemo, kako se temperatura spreminja med plastmi tkanine. Temperaturni senzorji so z vmesnikom Vernier povezani z računalnikom, meritve pa spremljamo v programu Logger Pro 3. Celoten merilni sistem (grellec, rezervoar s hladno vodo in merjenec) je izoliran iz vseh strani s peno debeline približno 4 cm, ki zmanjšuje prenos toplote v okolico, zato lahko predpostavimo, da je moč grelca enaka toplotnemu toku skozi merjenec. Iz geometrije merjenca izhaja, da so toplotne izgube v prečni smeri majhne, zato smo jih zanemarili. Meritev poskušamo izvesti pri čim tanjši plasti merjenca, saj tako izgube v prečni smeri relativno še dodatno zmanjšamo.



Slika 2. Skica merilne naprave za merjenje toplotne prevodnosti

Pred pričetkom meritve smo najprej izmerili debelino vzorca, ki je bil sestavljen iz več plasti določene tkanine, saj je bil en sloj pretanek za opravljanje meritev. Meritve smo izvajali na vzorcih debeline od približno 2 mm do 10 mm. Meritev je potekala, dokler se ni vzpostavilo stacionarno stanje, saj je v stacionarnem stanju toplotni tok v vseh točkah enak, zato lahko iz razlike temperatur  $\Delta T$  med spodnjo in zgornjo stranjo tkanine ter debeline vzorca  $d$  izračunamo toplotno prevodnost  $\lambda$ . Pri vsaki meritvi moramo izmeriti tudi napetost ( $U$ ) in tok ( $I$ ) vira, iz tega izračunamo moč grelca, ki je enaka toplotnemu toku, ki teče skozi vzorec. Toplotno prevodnost tkanine nato izračunamo iz enačbe (3):

$$\lambda = \frac{UId}{S\Delta T}. \quad (13)$$

#### 4.1 Meritve in rezultati

Meritve toplotne prevodnosti smo izvajali na štirih vzorcih in sicer z dvema homogenima materialoma in z dvema kompozitoma, ki sta bila sestavljena iz treh plasti. Ti materiali so:

- flis,
- membrana,
- kompozit 1 - sestavljen iz plasti, ki predstavlja notranji sloj obleke, flisa in plasti, ki predstavlja zunanji sloj obleke,
- kompozit 2 - enak kot kompozit 1, le da je namesto flisa vstavljena membrana.

Naredili smo več meritev, katerih vrednosti so podane v tabeli 1. Ocenjujemo, da je bolj natančna meritev toplotne prevodnosti membrane kot flisa, saj je pri slednjem zaradi večje stisljivosti tudi večja napaka meritve debeline vzorce. Pri stisljivih tkaninah je ravno merjenje debeline faktor, ki prinese največ napake, kar lahko vidimo tudi v tabeli 1 pri meritvah za flis in kompozit 1.

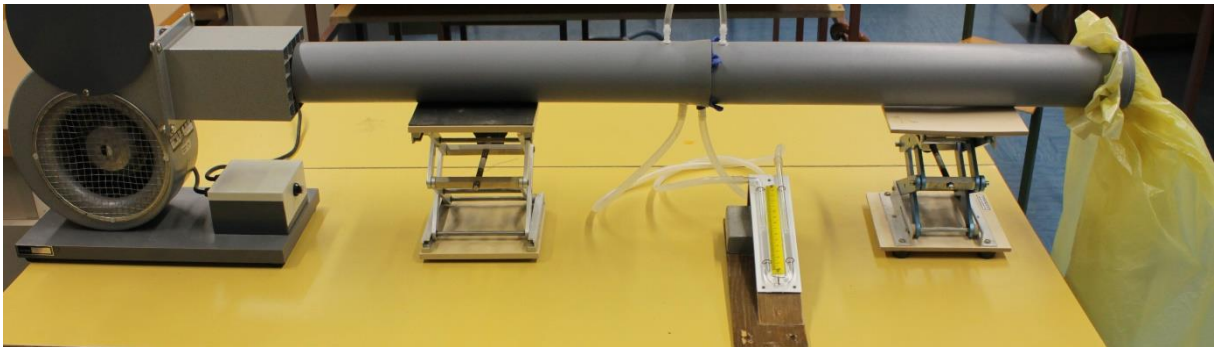
Tkanina	$d$ [mm]	$U$ [V]	$I$ [A]	$\Delta T$ [K]	$\lambda$ $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	$\bar{\lambda}$ $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
Flis	4,7±0,3	11,9±0,1	0,60±0,02	23,7±0,2	0,14±0,02	0,13±0,01
	6,4±0,3	11,9±0,1	0,60±0,02	34,9±0,2	0,13±0,01	
	11,6±0,3	12,1±0,1	0,62±0,02	75,6±0,2	0,12±0,01	
Membrana	2,20±0,05	12,5±0,1	0,64±0,02	21,1±0,2	0,085±0,007	0,081±0,006
	2,40±0,05	12,5±0,1	0,64±0,02	24,9±0,2	0,076±0,006	
Kompozit 1	13,0±0,3	12,8±0,1	0,66±0,02	85,9±0,2	0,13±0,01	0,13±0,01
	3,5±0,3	13,1±0,1	0,68±0,02	24,1±0,2	0,13±0,01	
	3,2±0,3	13,1±0,1	0,68±0,02	20,8±0,2	0,14±0,02	
Kompozit 2	9,40±0,05	13,0±0,1	0,66±0,02	74,7±0,2	0,108±0,009	0,108±0,009
	2,70±0,05	13,1±0,1	0,68±0,02	21,1±0,2	0,113±0,009	
	2,60±0,05	13,1±0,1	0,68±0,02	22,8±0,2	0,102±0,009	

Tabela 1. Vrednosti debelin ( $d$ ) materialov, napetosti ( $U$ ) na grelcu in toka ( $I$ ) skozi grelec, ter temperaturna razlika ( $\Delta T$ ) med spodnjo in zgornjo stranjo materiala, za izračun toplotne prevodnosti ( $\lambda$ ) po enačbi (13).  $\bar{\lambda}$  je povprečna vrednost izračunanih koeficientov toplotne prevodnosti iz meritev.

Zaradi precejšnje občutljivosti na stisk že posamezne meritve debeline variirajo med samo, poleg tega pa je tudi težko oceniti, kako se tkanina stisne med meritvijo toplotne prevodnosti v merilni napravi. Meritve so kljub temu pokazale, da ima membrana manjšo toplotno prevodnost kot flis, prav tako pa se enak trend kaže pri obeh kompozitih. Tudi kompozit z membrano ima manjšo toplotno prevodnost kot kompozit s flisom.

## 5 Merjenje zračne prepustnosti tkanin

Za merjenje zračne prepustnosti tkanin smo izdelali napravo (slika 3), ki je sestavljena iz dveh cevi s premerom 75 mm, ki se stakneta druga za drugo, na njunem stičišču pa se vpne tkanina, skozi katero pihamo zrak s pihalnikom. Tlačno razliko med eno in drugo stranjo tkanine merimo z vodnim manometrom, ki je nagnjen pod kotom  $\alpha = 15^\circ$  od vodoravne podlage, s čimer smo povečali natančnost meritve.



Slika 3. Naprava za merjenje zračne prepustnosti tkanin. Na levi strani slike je pihalnik, na sredini vodni manometer, na desni strani pa je pritrjena plastična vreča za merjenje volumskega pretoka.

Iz razlike višine vode  $\Delta h$  na vodnem manometru med levo in desno cevko smo izračunali tlačno razliko  $\Delta p$ , ki je skozi tkanino poganjala zračni tok:

$$\Delta p = \rho g \Delta h \sin \alpha , \quad (14)$$

kjer je  $\rho$  gostota vode v cevki,  $g$  gravitacijski pospešek in  $\alpha$  nagnjenost vodnega manometra. Merili smo čas  $t$ , ki je bil potreben, da se je vreča z volumnom  $V = 100$  l napolnila z zrakom. Ko se je le-ta napolnila, sta se tlaka na obeh straneh skoraj izenačila, zato se je razlika v nivoju vode v cevki zmanjšala, kar je bil indikator za konec merjenja časa. Volumski pretok  $\Phi_v$  smo izračunali iz enačbe:

$$\Phi_v = \frac{V}{t} . \quad (15)$$

Hitrost pretoka zraka v cevi smo merili tudi z merilnikom hitrosti vetra Extech AN200, ki smo ga namestili na konec cevi, vrednost pa uporabili za izračun volumskega pretoka še preko zveze:

$$\Phi_v = Sv, \quad (16)$$

kjer je  $S$  površina preseka cevi,  $v$  pa hitrost, s katero se zrak pretaka skozi cev. Izmerili smo tudi hitrost zraka v cevi, ko v njej ni tkanine. Ta je na mestu, kjer drugače pritrdimo tkanino, znašala 13,3 m/s.

Merili smo tudi, kako vpliva vlažnost in s tem masa vode v tkanini na prepustnost. Meritve smo izvajali enako kot pri merjenju s suhimi tkaninami, le da smo tkanino pred meritvijo navlažili. Po vsaki meritvi smo tkanino spet stehali in tako izmerili, koliko vode je med meritvijo izhlapelo. Relativni delež ( $r$ ) mase vode v tkanini med posamezno meritvijo smo definirali kot [6]:

$$r = \left( \frac{m_{pred} + m_{po}}{2 m_s} - 1 \right), \quad (17)$$

kjer je  $m_s$  masa suhe tkanine,  $m_{pred}$  masa tkanine pred meritvijo in  $m_{po}$  masa tkanine po meritvi.

## 5.1 Meritve in rezultati

Meritve smo izvajali na materialih, za katere smo izmerili toplotno prevodnost (glej poglavje 4). Ti materiali se uporabljajo za izdelavo gasilskih oblek, in sicer se dva uporabljata za zunanji in notranji sloj obleke, dva pa kot vmesni sloj, tako da lahko iz teh štirih materialov sestavimo dva kompozitna materiala. Meritve smo izvedli še z bombažem in dvema materialoma, ki se uporabljata za športne majice. V tabeli 2 so podane izmerjene vrednosti tlačne razlike, časa polnjenja vreče, hitrosti zraka v cevi in izračunane vrednosti zračne prepustnosti tkanine (glej en. (11)), saj je to najpogosteje uporabljena fizikalna količina, s katero se opiše prepustnost tkanine.

Prepustnosti membrane nismo mogli izmeriti, saj je ta očitno neprepustna za zrak. Iz tabele 2 vidimo, da je najbolj prepusten za zrak flis, čeprav na prvi pogled ne izgleda tako. Je debelejši od ostalih tkanin, pa tudi sama struktura izgleda manj prepustna, vendar, kot kažejo meritve, struktura, ki ni pletena (kot npr. bombažna tkanina) zelo dobro prepušča zrak.

Vrednosti zračne prepustnosti v tabeli 2 so za oba načina merjenja precej različne in se ne ujemajo niti v okviru napake. Sklepamo, da je en razlog za manjše volumnske pretoke pri merjenju z vrečo, v samem polnjenju vreče, ki kljub relativno majhni masi predstavlja določen upor in s tem zmanjša volumnski pretok. Vrednosti so sistematično manjše in se razlikujejo za približno faktor dva. Meritve za odvisnost prepustnosti tkanine od tlaka in debeline smo opravili z merilnikom hitrosti, saj lahko pri merjenju na tak način počakamo, da se hitrost zraka v cevi in na zaslonu merilnika čim bolj ustali (merilnik ima namreč tudi nek odzivni čas), s tem pa dobimo bolj natančne rezultate, medtem, ko smo pri merjenju pretoka z vrečo omejeni na čas polnjenja vreče, ki pa je pri velikih tlačnih razlikah reda 10 sekund. Kljub temu smo uporabili

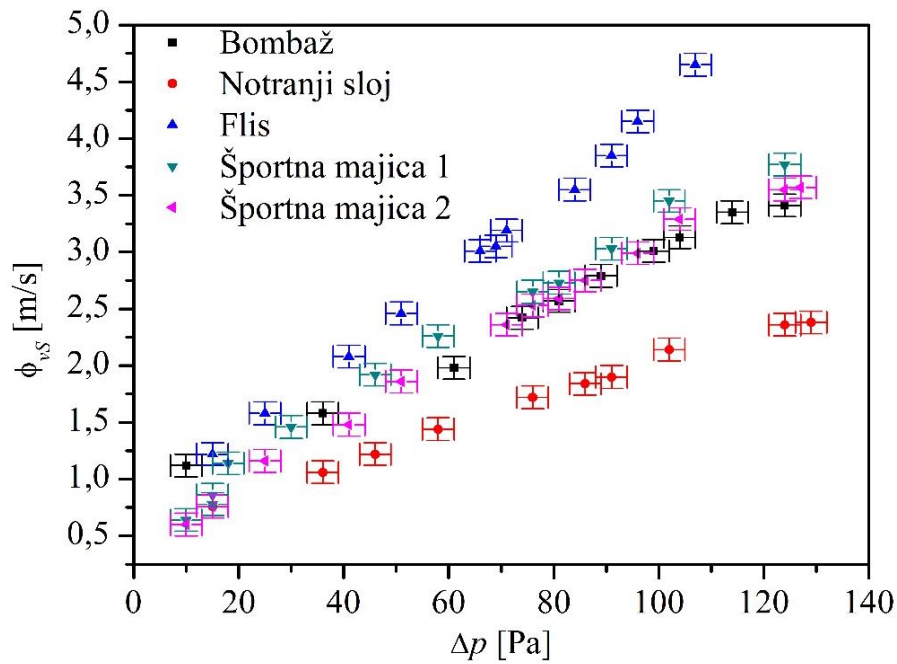
tudi način merjenja z vrečo in sicer pri meritvah odvisnosti prepustnosti tkanine od relativnega deleža vode v njen. V tem primeru predvidevamo, da je to boljša izbira, saj z vrečo zagotovimo, da gre skozi tkanino vedno enak volumen zraka, ki med meritvijo suši tkanino.

Tkanina	$\Delta p$ [Pa]	$t$ [s]	$\Phi_{vS1} \left[ \frac{m}{s} \right]$	$v \left[ \frac{m}{s} \right]$	$\Phi_{vS2} \left[ \frac{m}{s} \right]$
Flis	$100 \pm 3$	$9,0 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,2$	$4,3 \pm 0,1$	$4,3 \pm 0,1$
Membrana	$100 \pm 3$	Ne prepušča zraka			
Notranji sloj	$100 \pm 3$	$22,5 \pm 0,5$	$1,0 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$	$2,1 \pm 0,1$
Zunanji sloj	$100 \pm 3$	$148 \pm 2$	$0,15 \pm 0,05$	$0,40 \pm 0,05$	$0,40 \pm 0,05$
Kompozit 1	$100 \pm 3$	$158 \pm 2$	$0,14 \pm 0,05$	$0,30 \pm 0,05$	$0,30 \pm 0,05$
Bombaž	$100 \pm 3$	$10,0 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,1$
Športna majica 1	$100 \pm 3$	$11,0 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,1$
Športna majica 2	$100 \pm 3$	$10,0 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,2$	$3,1 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,1$

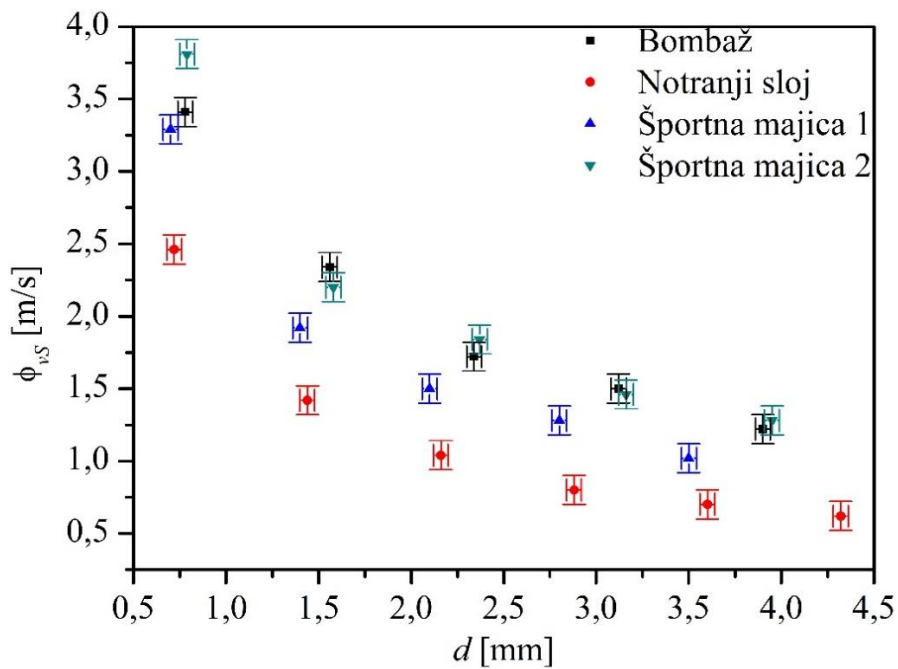
Tabela 2. Vrednosti zračne prepustnosti za različne tkanine.  $\Delta p$  je razlika tlakov, pri kateri je bila meritev narejena,  $t$  je čas, v katerem se vreča z volumnom  $V = 100$  l napolni z zrakom,  $\Phi_{vS1}$  volumski pretok na enoto površine oziroma zračna prepustnost tkanine, izračunana iz časa napihovanja vreče (en. (11) in (15)),  $v$  izmerjena hitrost v cevi in  $\Phi_{vS2}$  zračna prepustnost, izračunana iz izmerjene hitrosti zraka v cevi (en. (11) in (16)), ki je kar enaka hitrosti izmerjeni z merilnikom, saj se z združitvijo enačbe (11) in (16) površina krajša in ostane samo hitrost.

Tipično tkaninam merijo prepustnost pri določeni tlačni razliki (za navadni tekstil 100 Pa, za tehnični tekstil pa 200 Pa), nas pa je zanimala odvisnost volumskega pretoka od tlačne razlike. Tako smo raziskali, kako veter vpliva na lastnosti tkanine, s tem pa tudi, kako vpliva na človeško telo oziroma ugodje med nošenjem v različnih vetrovnih pogojih. Meritve so prikazane na grafu na sliki 4, kjer lahko vidimo, da se prepustnost tkanin približno linearno povečuje s povečevanjem tlačne razlike. Pri večjih tlakih (nad 100 Pa) se pri vseh tkaninah, razen pri flisu, opazi, da prepustnost ne narašča več tako izrazito. Iz tega sklepamo, da se prepustnost ustali pri neki maksimalni vrednosti za določen tekstil (v območju tlakov, ki tkanin še fizično ne poškodujejo). Tudi pri flisu bi se prepustnost najverjetneje nekje ustalila, vendar tega nismo mogli preveriti, saj nismo mogli doseči dovolj velike tlačne razlike.

Debelina tekstila ključno vpliva na maso oblačila in njegovo zračno prepustnost. Oboje vpliva na ugodje med nošenjem. Zanimala nas je zračna prepustnost posameznega tekstila v odvisnosti od njegove debeline, kar smo izmerili tako, da smo zrak pihali skozi različno število plasti merjene tkanine. Kot je razvidno iz grafa na sliki 5, se prepustnost tkanine zmanjšuje z večanjem debeline tkanine, kar smo tudi pričakovali. Ali je ta odvisnost potenčna, in s tem v skladu z enačbo (8), ali eksponentna, bomo analizirali v naslednjem poglavju. Med bombažem in športnima majicama ni večjih razlik, saj imajo podobne zračne prepustnosti, pri notranjem sloju pa so prepustnosti manjše, saj je že v osnovi manj prepusten.

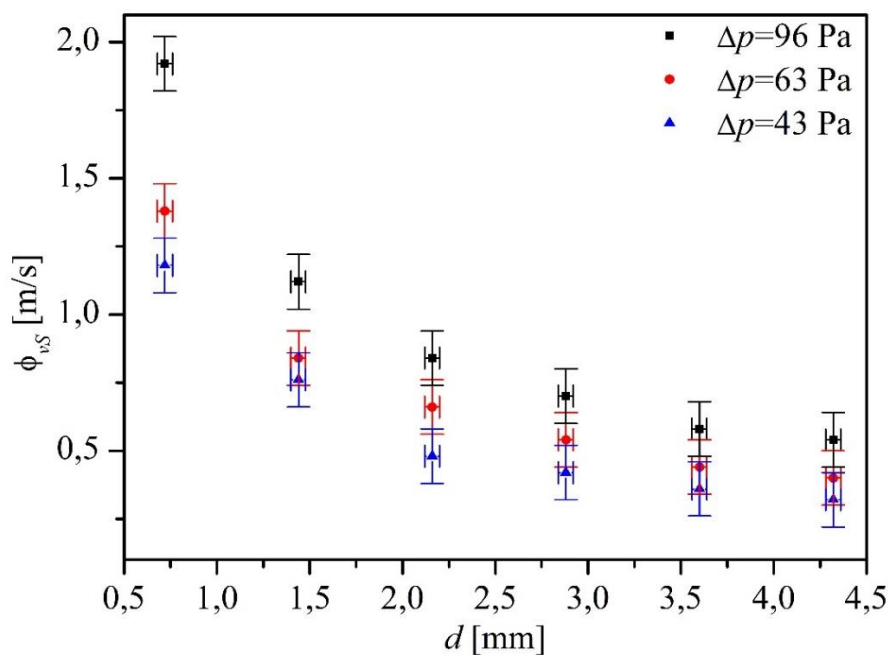


Slika 4. Zračne prepustnosti ( $\phi_{vS}$ ) različnih tkanin v odvisnosti od tlačne razlike ( $\Delta p$ )

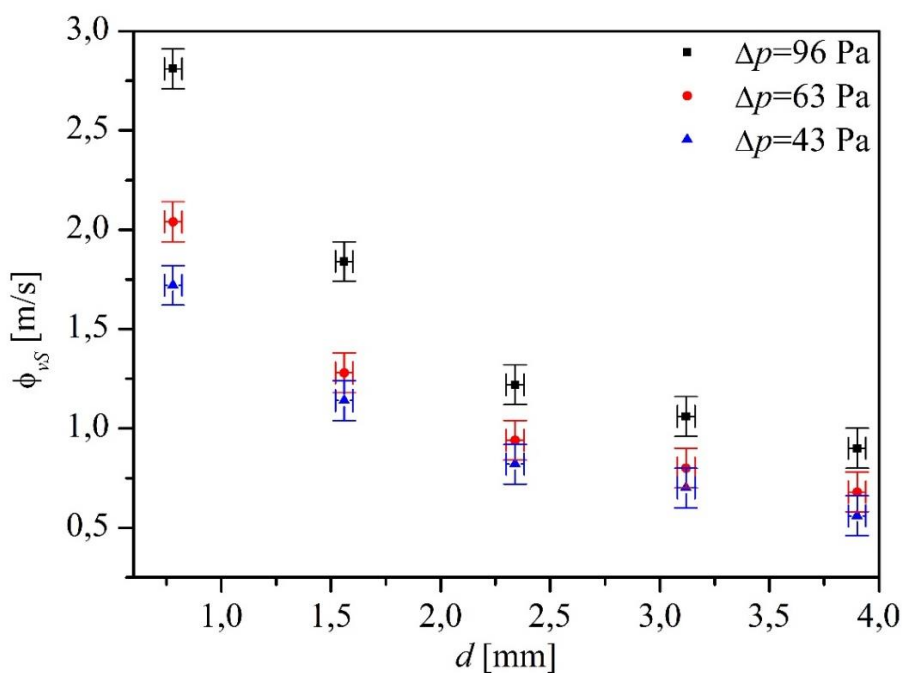


Slika 5. Zračne prepustnosti ( $\phi_{vS}$ ) različnih tkanin v odvisnosti od njihove debeline ( $d$ )

Za notranji sloj in bombaž smo preverili tudi, kako je prepustnost tkanine odvisna od njene debeline pri različnih tlačnih razlikah. Z večanjem tlačne razlike se prepustnost veča, kar kažeta grafa na slikah 6 in 7.



Slika 6. Zračna prepustnost ( $\phi_{vS}$ ) notranjega sloja v odvisnosti od debeline ( $d$ ) pri različnih tlačnih razlikah ( $\Delta p$ )

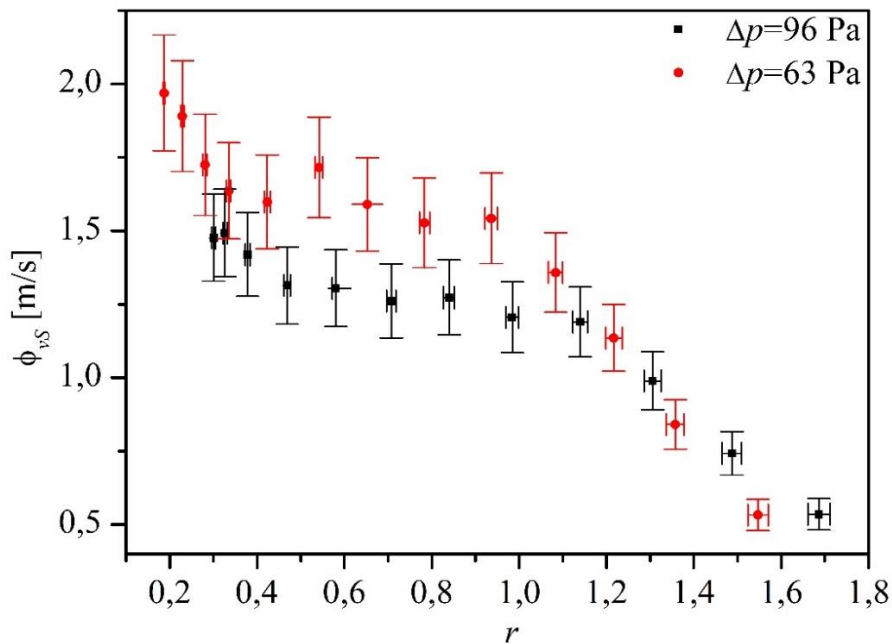


Slika 7. Zračna prepustnost ( $\phi_{vS}$ ) bombaža v odvisnosti od debeline ( $d$ ) pri različnih tlačnih razlikah ( $\Delta p$ )

Oblačila se lahko tudi omočijo, bodisi zaradi padavin ali velike vlažnost zraka, bodisi zaradi potenja med fizično aktivnostjo. Vlažnost tkanin vpliva na udobje oblačil, pa tudi na fizikalne lastnosti tkanin. Vlažni tkanini se poveča toplotna prevodnost, zato mokra majica povzroči občutek hlada. Poleg tega, na ta občutek še bolj vpliva prispevek izhlapevanja vode iz tkanine, saj se za to porablja energija, ki jo tkanina oziroma voda v tkanini črpa tako iz okolice kot tudi iz telesa. Ravno zaradi tega so lastnosti vlažnih tkanin še toliko bolj pomembne. Nas je zanimalo, kako delež vode v tkanini vpliva na prepustnost zraka. Predpostavili smo, da se prepustnost zmanjša, saj vlakna nabreknejo in pri tem zmanjšajo površino por v tekstilu, ki

vplivajo na prepustnost. Obstajajo pa tudi določeni umetni materiali (npr. najlon), katerim se vlakna zaradi vode podaljšajo vzdolžno in ne prečno, kar povzroči povečanje prepustnosti [13]. Mi smo pri vseh uporabljenih merjencih izmerili bistveno zmanjšanje prepustnosti omočene tkanine.

Iz grafa na sliki 8 vidimo, da se bombažu s povečevanjem relativnega deleža vode v tkanini najprej prepustnost zniža, nato pa je za določene vrednosti  $r$  konstantna, približno med  $r = 0,4$  in  $r = 1,1$ . Od slednje vrednosti naprej se prepustnost, ne glede na tlačno razliko, približno linearno zmanjšuje.

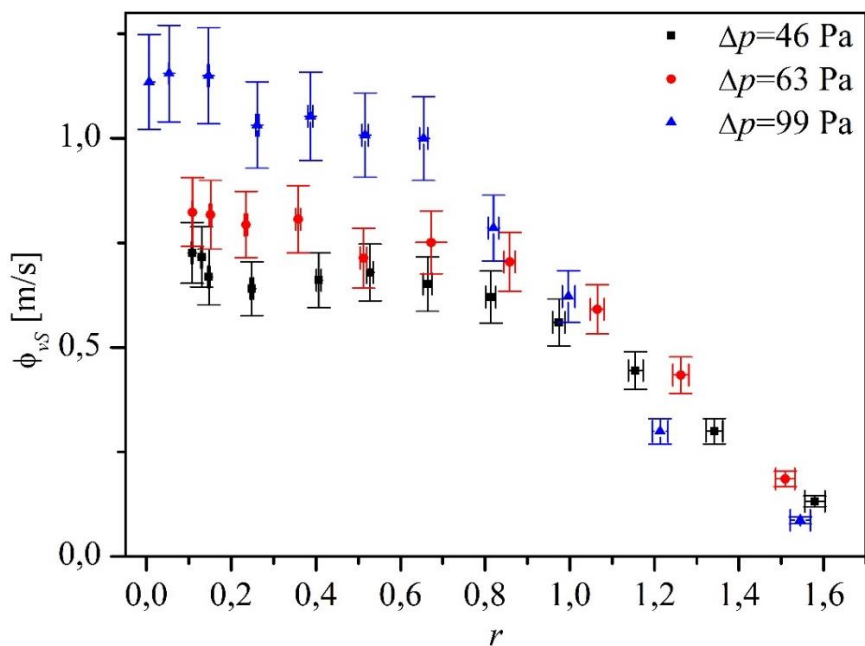


Slika 8. Zračna prepustnost ( $\phi_{vS}$ ) bombažu v odvisnosti od relativnega deleža vode ( $r$ ) v njem, pri dveh različnih tlačnih razlikah ( $\Delta p$ )

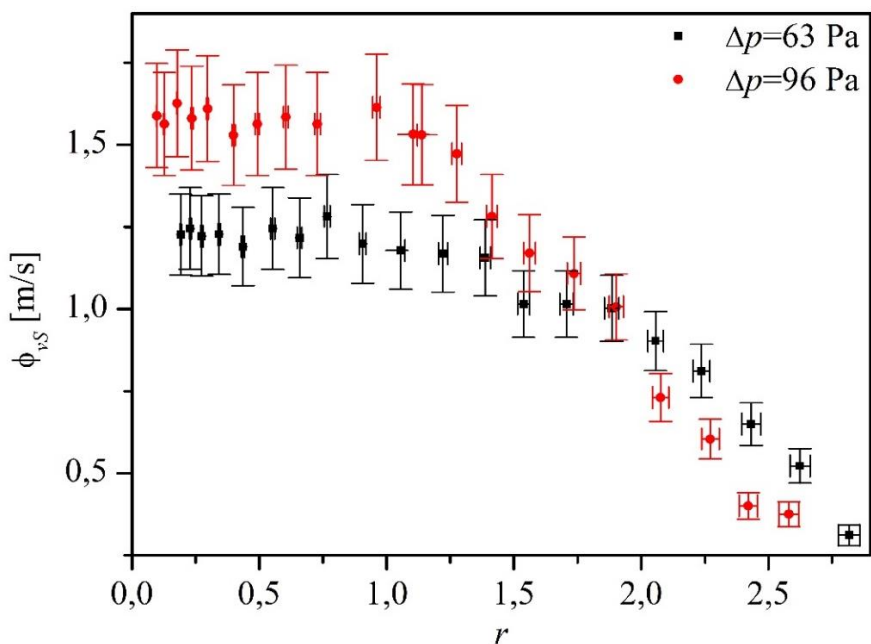
Za notranji sloj smo izmerili prepustnost pri treh različnih tlačnih razlikah (slika 9). Tudi tukaj se izkaže, da je do določenega relativnega deleža vode v tkanini ( $r \cong 0,8$ ) prepustnost še odvisna od tlačne razlike, naprej pa več ne, in se približno linearno zmanjšuje s povečevanjem relativnega deleža vode. Za razliko od bombaža je pri tej tkanini prepustnost pri majhnih vrednostih  $r$  približno konstantna za dano tlačno razliko, šele nato pa se začne prepustnost manjšati.

Podobno kot pri notranjem sloju je tudi pri športni majici (slika 10), kjer je do določene vlažnosti ( $r \cong 1,3$ ) prepustnost enaka, nato pa se ne glede na razliko tlakov približno linearno zmanjšuje. Pri večjih vrednostih  $r$  je razhajanje med prepustnostjo pri večji in manjši tlačni razliki sicer večje, vzrok pa je verjetno v precej velikem deležu vode v tkanini. Športna majica lahko namreč vpije skoraj dvakrat več vode, kot preostali dve tkanini.





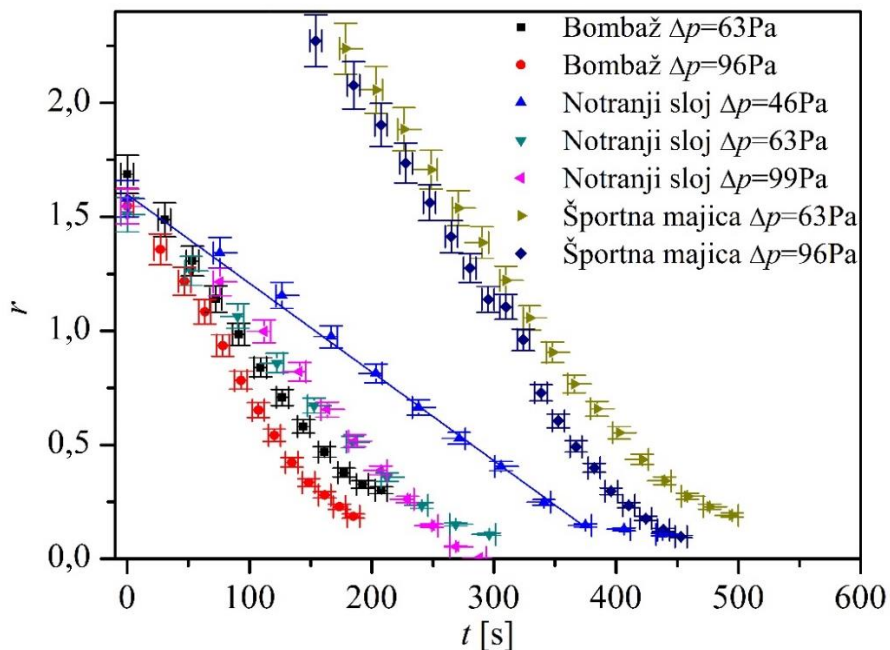
Slika 9. Zračna prepustnost ( $\phi_{vS}$ ) notranjega sloja v odvisnosti od relativnega deleža vode ( $r$ ) v njem pri treh različnih tlačnih razlikah ( $\Delta p$ )



Slika 10. Zračna prepustnost ( $\phi_{vS}$ ) športne majice v odvisnosti od relativnega deleža vode ( $r$ ) v njej, pri dveh različnih tlačnih razlikah ( $\Delta p$ )

Meritve smo naredili pri različnih tlačnih razlikah in ugotovili, da je prepustnost do določenih vrednosti vlažnosti približno konstantna (razen pri bombažu, kjer se že pri majhni vlažnosti prepustnost zmanjša in je šele nato za določene vrednosti  $r$  konstantna), nato pa se, ne glede na tlačno razliko, približno linearno zmanjšuje s povečevanjem relativnega deleža vode v tkanini. Posredno smo ugotovili, da lahko športna majica vpije precej več vode kot npr. bombaž, prepustnost pa se ji bistveno ne spremeni (v primerjavi z bombažem, ki se mu pri vrednosti  $r = 1,5$  prepustnost zmanjša že za več kot dvakrat, športni majici pa skoraj nič).

Hitrost sušenja tkanine je še eden izmed pomembnih faktorjev, predvsem pri tkaninah, ki se uporabljajo za fizične aktivnosti. Tudi to lastnost smo preverili na različnih tkaninah, in ugotovili, da se delež vode v tkanini linearno zmanjšuje s časom (slika 11). Zanimala nas je odvisnost deleža vode v tkanini od časa sušenja tkanine. Rezultati, prikazani na sliki 11, kažejo na linearno odvisnost, zato smo poiskali premico, ki se najbolj prilega meritvam in katere naklon nam je dal koeficient hitrosti sušenja tkanine. Zaradi preglednosti na sliki 11 ni vrisanih vseh premic, katerim smo določali naklone, ampak je kot primer vrisana samo ena, ki ustreza notranjemu sloju pri tlačni razliki 46 Pa. Tudi ostale premice smo prilagodili na enak način, upoštevali pa smo samo točke, ki sledijo linearnemu trendu, zadnjih nekaj meritev ( $r < 0,2$ ), ko je tkanina praktično že suha, pa smo zanemarili. Kot smo že ugotovili, lahko športna majica vpije bistveno več vode kot preostale tkanine, vendar smo se pri obravnavi hitrosti sušenja bolj osredotočili na manjše vrednosti relativnega deleža vode v tkanini ( $r < 2,4$ ), ki so še vedno bistveno večje kot pri preostalih tkaninah. Koeficienti za tri tkanine pri različnih tlakih so podani v tabeli 3. Največje koeficiente imata bombaž in športna majica, kar pomeni, da se najhitreje sušita. Za športno majico, katere namen je, da se hitro suši, smo sicer predvidevali, da se bo sušila najhitreje, vendar smo pričakovali večjo razliko v primerjavi z bombažem. Koeficient sušenja se z večjo razliko tlakov povečuje, kar je smiselno, saj je pri večji tlačni razliki prepustnost večja, kar pomeni, da gre skozi tkanino več zraka, ki dovede potrebno energijo za izhlapevanje vode v tkanini.



Slika 11. Spreminjanje relativnega deleža vode ( $r$ ) s časom ( $t$ ) za različne tkanine

Tkanina	$\Delta p$ [Pa]	$k$ [ $\times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ]
Bombaž	63	$-(7,4 \pm 0,1)$
	96	$-(7,9 \pm 0,1)$
Notranji sloj	46	$-(3,9 \pm 0,1)$
	63	$-(4,8 \pm 0,1)$
	99	$-(6,1 \pm 0,1)$
Športna majica	63	$-(7,6 \pm 0,1)$
	96	$-(8,7 \pm 0,1)$

Tabela 3. Vrednosti koeficientov sušenja ( $k$ ) pri različnih tlačnih razlikah ( $\Delta p$ ) za različne tkanine

## 6 Analiza

Kako vpliva prepustnost tkanin na toplotno upornost, smo obravnavali že v poglavju 3, zdaj pa pogledajmo še, kakšne so toplotne upornosti, glede na izmerjene podatke prepustnosti in toplotne prevodnosti. V brezvetrju zadostuje, če primerjamo samo toplotne prevodnosti tkanin, sicer pa moramo upoštevati tudi prepustnost tkanine. V tabeli 4 so podane toplotne upornosti tkanin in kompozitov, katerim smo izmerili toplotno prevodnost in prepustnost. Po enačbi (12) smo izračunali toplotni upor v primeru brezvetrja in v primeru vetra, ki bi ustvarjal tlačno razliko okoli 100 Pa. Za izračun smo uporabili vrednosti prepustnosti, ki smo jih izmerili z merilnikom hitrosti vetra. Razlika v toplotnih uporih je največja pri flisu in pri kompozitu 1, pri membrani in kompozitu 2 pa razlike ni, saj membrana ne prepušča vetra. Glede na toplotne upore iz tabele 4 je flis v vetrovnih razmerah zelo slab izolator. Toplotni upor ima sicer v brezvetrju primerljiv z membrano, vendar je za zrak zelo prepusten, kar mu v primeru vetra drastično zniža toplotno upornost (slabše izolativne lastnosti). Podobno je s kompozitom, čeprav se mu toplotni upor zniža precej manj, saj je zunanji sloj manj prepusten. Če ne upoštevamo ugodja nošenja posameznega tekstila, je nedvomno membrana v vseh pogledih boljša izbira. Vendar tkanine, ki ne prepuščajo zraka, tudi slabše dihajo, kar pa vpliva na ugodje med uporabo oblačila. Izbira materiala oziroma tkanine je zato zelo odvisna od tega, v kakšnih pogojih jo bomo uporabljali in ne le od njenih lastnosti.

Tkanina	$d$ [mm]	$\bar{\lambda}$ [ $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ ]	$R_0$ [ $\times 10^{-2} \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ ]	$R_{ef}$ [ $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ ]
Flis	$2,50 \pm 0,05$	$0,13 \pm 0,01$	$1,9 \pm 0,2$	$(1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$
Membrana	$1,20 \pm 0,05$	$0,081 \pm 0,006$	$1,5 \pm 0,1$	$(1,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$
Kompozit 1	$3,45 \pm 0,05$	$0,13 \pm 0,01$	$2,7 \pm 0,2$	$(2,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$
Kompozit 2	$2,30 \pm 0,05$	$0,108 \pm 0,009$	$2,1 \pm 0,2$	$(2,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$

Tabela 4. Vrednosti toplotnega upora za različne tkanine v primeru brezvetrja ( $R_0$ ) in v primeru vetra ( $R_{ef}$ );  $d$  je debelina tkanine,  $\bar{\lambda}$  pa toplotna prevodnost tkanine.

Meritve prepustnosti tkanine od njene debeline (slika 5) smo poskušali opisati z enačbo (8), to pa smo najprej preoblikovali v

$$\Phi_{vS} = \Phi_{vS,0} \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-b}, \quad (18)$$

kjer je  $d_0$  neka referenčna debelina (npr. 1 mm),  $\Phi_{vS,0}$  pa zračna prepustnost tkanine pri referenčni debelini. Če je odvisnost  $\Phi_{vS}(d)$  res potenčna, kot predvideva enačba (8), potem mora odvisnost  $\ln(\Phi_{vS}/\Phi_{vS,0})$  od  $\ln(d/d_0)$  biti linearna. Na sliki 12 je ta odvisnost narisana. Vidimo, da je odvisnost res linearna, zato smo meritvam za posamezno tkanino prilagodili premico, katere strmina je enaka parametru oziroma potenci  $b$ . Na sliki 12 je vrisan samo primer prilagoditvene premice za eno tkanino, in sicer za notranji sloj, za ostale tkanine pa premice zaradi preglednosti niso vrisane. Strmine premic, ki smo jih dobili za vsako tkanino posej, so podane v tabeli 5. Iz teh strmin smo nato izračunali še povprečno strmino, ki ima vrednost 0,70. Vse vrednosti so znotraj 10% napake, zato lahko v okviru te napake za vse tkanine uporabljamo vrednost parametra  $b = 0,70$ .

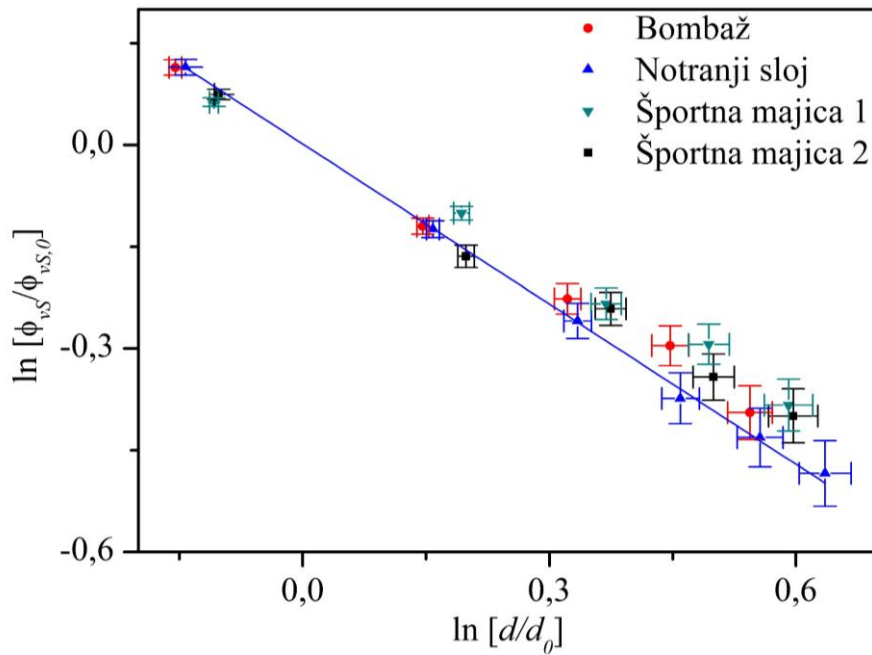
Preverili smo tudi, ali bi morda odvisnost prepustnosti od debeline lahko zapisali z eksponentno funkcijo:

$$\Phi_{vS} = \Phi_0 e^{-\frac{d}{D_0}}, \quad (19)$$

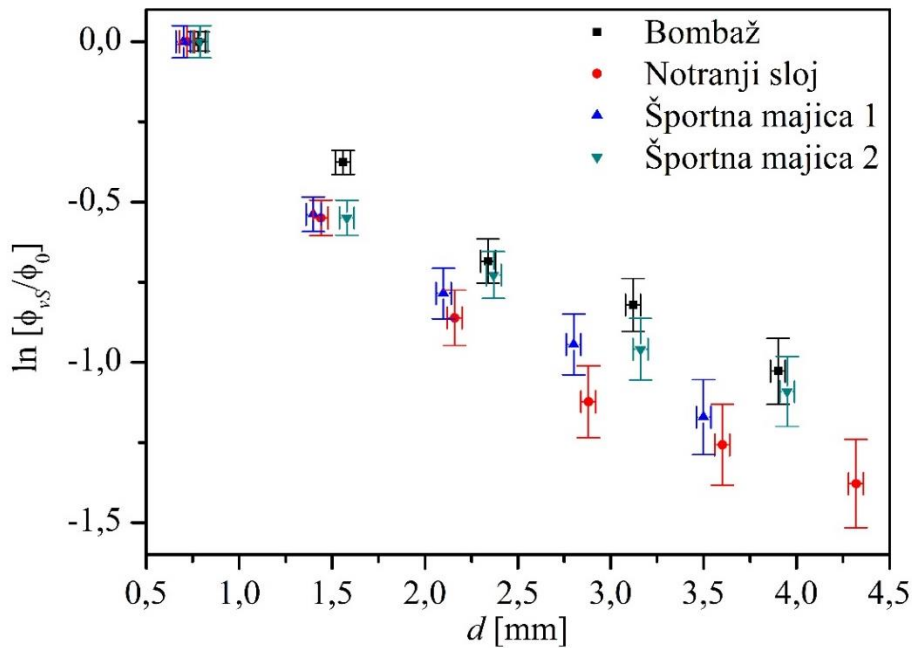
kjer je  $\Phi_0$  pretok na enoto površine, če ni tkanine,  $D_0$  pa karakteristična debelina, ki bi jo določili iz meritev. Iz grafa odvisnosti  $\Phi_{vS}(d)$  na sliki 5 namreč ne moremo sklepati, ali je odvisnost potenčna ali eksponentna. Na sliki 13 je graf  $\ln(\Phi_{vS}/\Phi_0)$  v odvisnosti od  $d$ . Če bi bila odvisnost  $\Phi_{vS}(d)$  eksponentna, bi odvisnost  $\ln(\Phi_{vS}/\Phi_0)$  od  $d$  bila linearna, naklon premice pa enak  $D_0$ . Kot vidimo na sliki 13, bi točkam težko prilagodili premico, iz tega pa lahko sklepamo, da odvisnosti  $\Phi_{vS}(d)$  eksponentna funkcija oziroma enačba (20) ne opiše.

Tkanina	b	$\bar{b}$
Bombaž	$0,60 \pm 0,03$	
Notranji sloj	$0,79 \pm 0,04$	
Športna majica 1	$0,72 \pm 0,03$	$0,70 \pm 0,07$
Športna majica 2	$0,70 \pm 0,03$	

Tabela 5. Vrednosti naklonov premic ( $b$ ) za posamezno tkanino in izračunana povprečna vrednost naklona ( $\bar{b}$ ).



Slika 12. Odvisnost  $\ln(\phi_{vS}/\phi_{vS,0})$  od  $\ln(d/d_0)$  in primer prilagoditvene premice, katere naklon je enak potenci  $-b$ .



Slika 13. Odvisnost  $\ln(\phi_{vS}/\phi_0)$  od debeline tkanine ( $d$ )

Ugotovili smo tudi, da se prepustnost mokrih tkanin bistveno zmanjša. Prepustnost je do neke mejne vrednosti deleža vode v tkanini približno konstantna, nato pa začne linearno padati z večanjem deleža vode v tkanini. Tudi hitrost sušenja je premo sorazmerna s časom, odvisna pa je tudi od tlačne razlike: manjša kot je, manjši bo tudi koeficient sušenja in obratno. Poglejmo še, do kolikšnih temperaturnih razlik bi prišlo v primeru sušenja različnih tkanin pri enakih

relativnih deležih vode v tkanini. V enačbi (7) zapišemo maso vode kot produkt površinske gostote  $\sigma$ , ki nam da podatek o masi enega sloja tkanine za kvadratni meter, razlike relativnega deleža vode v tkanini ( $\Delta r$ ), ki nastane v času sušenja ( $\Delta t$ ) in površine tkanine:  $m_v = \sigma \Delta r S$ . Maso zraka izrazimo z volumskim pretokom zraka, njegovo gostoto in časom, ki je potreben, da izhlapi določena količina vode, torej  $m_z = \Phi_v \rho_z \Delta t$ . Dobimo:

$$\Delta T_z = \frac{\sigma \Delta r S q_i(T)}{\Phi_v \rho_z c_z \Delta t}. \quad (20)$$

V enačbi (21) nato zamenjamo še  $\Delta r / \Delta t$  s koeficientom sušenja  $k$ , ter  $\Phi_v / S$  s prepustnostjo tkanine  $\phi_{vS}$  in pridemo do izraza, s katerim lahko izračunamo, za koliko se zrak ohladi pri prehodu skozi tkanino med procesom izhlapevanja:

$$\Delta T_z = \frac{\sigma k q_i(T)}{\phi_{vS} \rho_z c_z}. \quad (21)$$

Za vrednost izparilne toplote moramo vzeti podatek, ki velja za izparevanje vode pri določeni temperaturi. V našem primeru smo vzeli podatek o izparilni toploti pri 25°C, ki znaša 2444 kJ/kg [14]. V tabeli 5 so podane temperaturne razlike različnih tkanin pri različnih tlakih, ki nastanejo zaradi izhlapevanja vode iz tkanine. V primeru vetra gre zrak skozi tkanino v smeri proti telesu. To pomeni, da je temperatura zraka, ki je prišel skozi, v tem primeru pri telesu oziroma na notranji strani tkanine nižja, zato se pojavi občutek hlada, če imamo na sebi mokro majico. Temperaturne razlike sicer niso velike, vendar dovolj, da jih občutimo.

Tkanina	$\sigma \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$	$\Delta p$ [Pa]	$\Delta T$ [K]
Bombaž	0,27 ± 0,02	63 ± 3	2,0 ± 0,2
		96 ± 3	1,5 ± 0,2
Notranji sloj	0,27 ± 0,2	46 ± 3	1,7 ± 0,2
		63 ± 3	1,7 ± 0,2
		99 ± 3	1,6 ± 0,2
Športna majica	0,17 ± 0,1	63 ± 3	1,2 ± 0,2
		96 ± 3	1,0 ± 0,2

Tabela 6. Temperaturne razlike ( $\Delta T$ ) zraka pred in za tkanino med izhlapevanjem.  $\Delta p$  je tlačna razlika in  $\sigma$  površinska gostota tkanine.

## 7 Zaključek

V diplomskem seminarju smo obravnavali toplotno prevodnost in zračno prepustnost različnih tkanin. Prepustnost smo definirali kot volumski pretok zraka na kvadratni meter površine, kar je enako hitrosti, s katero gre zrak skozi tkanino. Pogledali smo, kako zračna prepustnost vpliva na toplotni upor tkanine in kakšen vpliv ima to na človeka v različnih vetrovnih razmerah. Izmerili smo toplotno prevodnost dveh kompozitnih materialov in dveh tkanin, ki sta služili kot vmesni sloj v obeh kompozitih. Kompozita sta bila sestavljena iz zunanje in notranje tkanine, med katerima je bil v enem kompozitu flis, v drugem pa membrana. Za bombaž, notranji sloj, flis in dve športni majici, smo izmerili tudi, kako je zračna prepustnost odvisna od tlačne razlike med eno in drugo stranjo tkanine in ugotovili, da prepustnost tkanin z naraščajočo tlačno razliko približno linearno narašča (slika 4).

Meritve kažejo, da se prepustnost tkanine z naraščajočo debelino zmanjšuje. Bolje to odvisnost opiše potenčna funkcija (en. (8)), ki smo jo našli v literaturi, sami pa smo jo zapisali v fizikalno bolj korektni obliki in pojasnili pomen obeh parametrov, ki nastopata v enačbi. Preverili smo tudi, ali bi lahko to odvisnost zapisali z eksponentno funkcijo (en. (20)), vendar se je izkazalo, da omenjena funkcija ne opiše odvisnost prepustnosti tkanine od njene debeline.

Z merjenjem prepustnosti tkanine v odvisnosti od deleža vode v tkanini smo ugotovili, da majhne vrednosti vlage ne vplivajo bistveno na prepustnost. V tem režimu je velikost por v tkanini dovolj velika, da dodatna vlaga ne omejuje prehoda zraka skozi tkanino. Pri določeni vlažnosti, ki je odvisna od tipa in narave tkanine, pa se prepustnost z naraščajočo vlažnostjo prične približno linearno zmanjševati. V tem režimu dodatna vlaga v tkanini zmanjšuje velikost por na način, da to neposredno omejuje in zmanjšuje pretok zraka, hkrati pa pri teh vlažnostih prepustnost več ni odvisna od tlačne razlike.

Iz naklonov premic na grafih odvisnosti  $r(t)$  (slika 10) smo ocenili koeficiente sušenja in na podlagi tega primerjali, kateri tekstil se najhitreje suši. Najbolj učinkovito se suši športna majica, ki je temu cilju tudi namenjena.

Na koncu smo primerjali še vpliv prepustnosti na toplotno upornost. Ugotovili smo, da so membrane in kompozitni materiali z membranami dobri izolatorji v vseh vetrovnih razmerah, saj ne prepuščajo zraka. Izračunali smo tudi temperaturno razliko, ki se pojavi zaradi izhlapevanja vode iz tkanine in pojasnili, zakaj nam je hladno v primeru, če imamo na sebi mokro majico.

## LITERATURA

- [1] S. Brzenzinski, G. Malinowska, T. Nowak, *High-tech Sports Clothing With a High Comfort of Use Made from Multi-layer Composite Materials*, *Fibres Text. East. Eur.* **13**, 90-93 (2005).
- [2] M. Matusiak, *Investigation of the Thermal Insulation Properties of Multilayer Textiles*, *Fibres Text. East. Eur.* **14**, 98-102 (2006).
- [3] M. Havlova, *Air permeability and constructional parameters of woven fabrics*, *Fibres Text. East. Eur.* **21**, 84-89 (2013).
- [4] A. V. Kulichenko, *Theoretical Analysis, Calculation, and Prediction of the Air Permeability of Textiles*, *Fibre Chem.* **37**, 371-380 (2005).
- [5] A. V. Genis, L. N. Andrianova, G. A. Kulagina, *Preparation of heat bonded fibrous materials with an assigned air permeability from polymer melts*, *Fibre chem.* **21**, 258-263 (1989).
- [6] E. Klemenčič, *Vpliv kapljev in na toplotno prevodnost*, magistrsko delo (Fakulteta za naravoslovje in matematiko Univerza v Mariboru, Maribor, 2014).
- [7] L. Hes, C. Loghin, *Heat, Moisture and Air Transfer Properties of Selected Woven Fabrics in Wet State*, *JFBI* **2**, 141-149 (2009).
- [8] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incopera, D. P. Dewitt, *Fundamentals of heat and mass transfer* (John Wiley & Sons, Hoboken, 2011).
- [9] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentals of Physics* (John Wiley & Sons, Cleveland, 2011).
- [10] Y. A. Cengel, *Heat and mass transfer a practical approach* (McGraw-Hill Science, New York, 2006).
- [11] D. Jakšič, *Projektiranje in konstrukcija tekstilij in oblačil* (Naravoslovnotehniška fakulteta Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2007).
- [12] H. Topolovec, *Naprava za merjenje toplotne prevodnosti*, diplomsko delo (Pedagoška fakulteta Univerza v Mariboru, Maribor, 1998).
- [13] P. W. Gibson, K. Desabrais, T. Godfrey, *Dynamic Permeability of Porous Elastic Fabrics*, *JEFF* **7**, 29-36 (2012).
- [14] UCSB, *Enthalpy of vaporization of water*, pridobljeno dne 24. 8. 2015 iz [http://www2.bren.ucsb.edu/~dturney/WebResources\\_13/WaterSteamIceProperties/EnthalpyOfVaporizationH2O.pdf](http://www2.bren.ucsb.edu/~dturney/WebResources_13/WaterSteamIceProperties/EnthalpyOfVaporizationH2O.pdf)