



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta textilní



# Šíření plynné vlhkosti v rovině textilie

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3957 – Průmyslové inženýrství  
*Studijní obor:* 3901T073 – Produktové inženýrství

*Autor práce:* **Bc. Petra Macháčková**  
*Vedoucí práce:* prof. Ing. Luboš Hes, DrSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Textile Engineering ■

# The spread of vapor in the plane of the fabric

## Master thesis

*Study programme:* N3957 – Industrial Engineering  
*Study branch:* 3901T073 – Product Engineering

*Author:* **Bc. Petra Macháčková**  
*Supervisor:* prof. Ing. Luboš Hes, DrSc.



## Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 4.5. 2014

Podpis: Maduřková

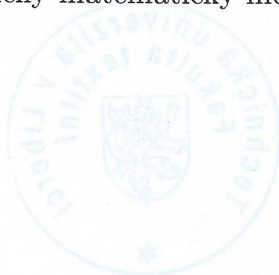
## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petra Macháčková**  
Osobní číslo: **T14000477**  
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**  
Studijní obor: **Produktové inženýrství**  
Název tématu: **Šíření plynné vlhkosti v rovině textilie**  
Zadávací katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište stručně současný stav v oblasti funkčního prádla s vysokou přidanou hodnotou a uveďte přehled větších českých výrobců a prodejců tohoto prádla.
2. Uveďte základní poznatky o termoregulačních funkcích lidského těla, o termofyziologickém komfortu textilií a o způsobech jeho hodnocení. Stručně kvalitativně vysvětlete mechanismy přenosu kapalně a plynně vlhkosti v textiliích.
3. Opatřete vzorky tkanin a funkčního prádla ze 100% PP, PES a bavlny o podobné plošné hmotnosti a struktuře a na přístroji PERMETEST změřte jejich paropropustnost v suchém stavu
  - a) s nezakrytým povrchem
  - b) se středem měřicí plochy zakrytým nepropustnou folií o průměru 25, 35 a 45 mm resp. jiném průměru dle potřeby, čímž nastane přenos plynné páry vedením v rovině textilie.
4. Dosažené výsledky vlivu délky trajektorie vodní páry a vlivu porozity a složení materiálu na naměřený výparný odpor zpracujte statisticky, znázorněte graficky a komentujte.
5. Dle možností sestavte jednoduchý matematický model vysvětlující dosažené výsledky.



Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Yoneda M., Kawabata S. :Analysis of Transient Heat Conduction in Textiles and Its Applications, Part II, Journal of Textile Machinery Society of Japan 31, 73-81 (1983)

Hes L.: Thermal properties of Nonwovens, in: Proc. INDEX 87 Congress, Genf 1987

Hes L.: Moisture absorbtivity of textile fabrics, in: Internat. Conf. ON Engineered Fabrics,UMIST, Manchester 1999.

Hes L., Doležal I.: New Method and Equipment for Measuring Thermal Properties of Textiles, J. Text. Mach. Soc. Japan 42, T124-128, 1989

Hes L., Prommerova M.: The Effect of Thermal Resistance and Absorptivity of Fabrics on Their Thermal Contact Characteristics. In: 21st Textile Res. Symp. At Mt. Fuji, 1992

Hes L., Bandyopadhyay B.N.: Effect of fiber polymer on warm-cool feeling. Indian J. of Fiber and Textile Research, 16, 1991, p. 195-199.

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Luboš Hes, DrSc.

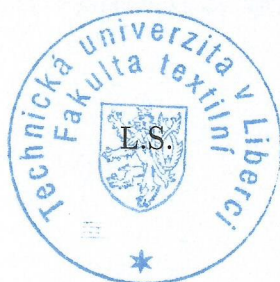
Katedra hodnocení textilií

Datum zadání diplomové práce: 27. března 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 13. května 2016



Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



doc. Ing. Vladimír Bajžík, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 4. prosince 2015

Technická univerzita v Liberci

Fakulta textilní

Katedra hodnocení textilií

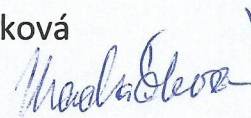
V Liberci dne 06. 01. 2017

Žádám o změnu termínu odevzdání diplomové práce z 06. 01. 2017 na 05. 05. 2017.

Důvod odkladu odevzdání: Studijní pobyt v zahraničí

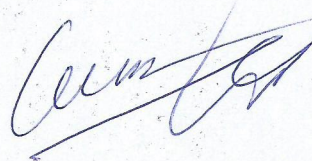
Děkuji za vyřízení.

Petra Macháčková



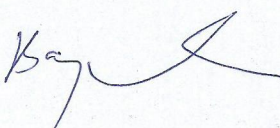
Vyjádření vedoucího práce

Doporučuji klade 'vyřízení'!



Vyjádření vedoucího katedry

Sanklank  
Bay



### **Poděkování**

V první řadě bych ráda poděkovala panu profesoru Lubošovi Hesovi za příjemnou spolupráci a vedení diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala všem ostatním, kteří poskytli cenné rady či pomoc při zpracování práce jako je pan Tunák, paní Hájková, paní Pařilová a členové katedry KMI. Poděkování také patří mé rodině za jejich podporu při studiu.

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá šířením páry v rovině textilie. V rámci této práce byla modifikována již existující metoda měření paropropustnosti. Původní metoda určuje prostup páry skrze textilií v kolmém směru. Zamezením prostupu páry skrze textilií nepropustnou fólií, která byla umístěna na vrchní části měřené textilie, byla zajištěna změna směru jejího prostupu. Pára tak byla nucena procházet textilií v její rovině. Se zvyšujícím se průměrem nepropustného zakrytí pak byla prodlužována trajektorie molekul páry procházejících rovinou textilie. Měření probíhalo na přístroji PERMETEST. Úspěšnost metody byla posuzována na základě závislosti výparného odporu na prodlužující se délce trajektorie molekul páry.

## **Klíčová slova**

Paropropustnost, paropropustnost v rovině textilie, výparný odpor, šíření páry, termo-fyziologické vlastnosti.



### **Anotation**

This thesis deals with spread of water vapor in plane of fabric. In the frame of this work was modified method of measuring water vapor permeability. The original method measures water vapor permeability which goes through the fabric from reverse side of fabric to face side of fabric. We make impossible for the water vapor to go through the fabric by covering the top of the fabric with impermeable material. The water vapor is then forced to change direction of spreading to direction of plane of fabric. Length of trajectory which water vapor must travel is changed with size of impermeable material. Measuring was made on PERMETEST instrument. The success of method was judged by the dependence of the water vapor resistance on the increasing length of the water vapor trajectory.

### **Key words**

Water vapor permeability, spread of water vapor in plane of fabric, water vapor resistance, spread of water vapor, thermophysiological properties

**Obsah**

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Úvod	10
ČÁST TEORETICKÁ	11
1 Funkční prádlo	11
1.1 Čeští výrobci funkčního prádla	12
1.1.1 Moira	12
1.1.2 Direct Alpine	13
1.1.3 Klimatex	14
1.1.4 Sensor	14
2 Termoregulace	15
2.1 Tělesná teplota	15
2.2 Změna tělesné teploty	15
2.3 Příjem a výdej tepla	17
2.4 Pot	18
2.5 Odvod vlhkosti z povrchu lidského těla	19
2.5.1 Odvod plynné vlhkosti evaporací (odpařování)	19
2.5.2 Odvod kapalné vlhkosti pomocí kapilár	22
2.5.3 Přenos kapalné vlhkosti pomocí difúze	25
2.5.4 Přenos kapalné vlhkosti pomocí sorpce	25
3 Komfort	26
3.1 Termo-fyziologický komfort	26
3.2 Vnímání vlhka	29
3.3 Termo-fyziologické vlastnosti textilií	29
4 Metody měření paropropustnosti	31
4.1 Gravimetrická metoda	31
4.2 Šálková metoda měření teploty	33
4.3 Měření pomocí skin modelu	34
4.4 „Newtonova“ potíci figurína	34
4.1.6 DMPC dynamická metoda	35
PRAKTICKÁ ČÁST	37
5 Experiment	37
5.1 Měřené textilní vzorky	38
5.1.1 Měření geometrické vlastnosti vzorků	38
5.1.1.4 Zaplnění	40
5.1.1.5 Porozita materiálů	40
5.2 Měření na přístroji PERMETEST	44
5.3 Modifikace metody měření na přístroji PERMETEST	45
5.4 Postup měření experimentu na přístroji PERMETEST	49
5.5 Výsledky měření	51
5.5.1 Závislost výparného odporu na délce trajektorie molekule vody	55
5.5.2 Závislost výparného odporu na zaplnění textilie	62
5.5.3 Prodyšnost materiálu	66
Závěr	72
Literatura	74
Seznam obrázků:	77
Seznam tabulek	78

## Seznam použitých symbolů a zkratk

$\lambda$	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná vodivost
$b$	[Wm <sup>-2</sup> s <sup>1/2</sup> K <sup>-1</sup> ]	tepelnou jímavost
$r$	[W <sup>-1</sup> Km <sup>2</sup> ]	plošný odpor vedení tepla
$q$	[Wm <sup>2</sup> ]	tepelný tok
$m^*$	[kg/(m <sup>2</sup> s)]	množství přenášené páry
$P_K$	[Pa]	parciální tlak vodních par na povrchu kůže
$P_T$	[Pa]	parciální tlak vodních par na povrchu textilie
$P_O$	[Pa]	tlak okolí
$\vartheta_K$	[°C]	teplota pokožky
$\vartheta_O$	[°C]	teplota okolí
$D_P$	[kg/(m.s.Pa)]	difúzní koeficient
$p_{WSAT}$	[Pa]	nasycený (parciální) tlak na povrchu pokožky
$p_{WE}$	[Pa]	(parciální) tlak aktuální
$\Delta p_{parc}$	[Pa]	rozdíl parciálních tlaků
$\Delta_x$	[m]	vzdálenost
$h$	[m]	tloušťka textilie
$D_C$	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	je difúzní součinitel vztažený na koncentraci
$\Delta c$	[-]	je rozdíl koncentrací
$C_{WSAT}$	[-]	je koncentrace páry ve stavu nasycení
$C_{WE}$	[-]	je koncentrace páry v okolním prostředí
$M_W$	[kg.mol <sup>-1</sup> ]	molární koncentrace vodní páry
$R$	[JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ]	obecná plynová konstanta
$T$	[K]	teplota vodní páry
$\beta_P$	[kg/(m <sup>2</sup> .s.Pa)]	koeficient přestupu vlhkosti prouděním
$\beta_C$	[kg/(m <sup>2</sup> s)]	koeficient přestupu vlhkosti prouděním vztažený na rozdíl koncentrací
$c_{pA}$	[J/(kg.K)]	specifické teplo vlhkého vzduchu
$M$	[W]	celkový metabolický výkon
$L$	[W]	pracovní výkon
$A_{DU}$	[m <sup>2</sup> ]	povrch lidského těla
$q_{ins}$	[W/m <sup>2</sup> ]	ochlazování odpařováním z kožních pórů
$q_{resp}$	[W/m <sup>2</sup> ]	ochlazování dýcháním (konvekci)
$q_{persp}$	[W/m <sup>2</sup> ]	intenzivní ochlazování pomocí hlavních potních žláz
$q_{vedením}$	[W/m <sup>2</sup> ]	teplo předávané vedením (kondukcí)
$q_{prouděním}$	[W/m <sup>2</sup> ]	teplo předávané prouděním (konvekci)
$q_{zářením}$	[W/m <sup>2</sup> ]	teplo předávané zářením (radiací)
$P$	[%]	paropropustnost
$Ret$	[m <sup>2</sup> Pa/W]	výparný odpor
$q_v$	[W/m <sup>2</sup> ]	snížený tepelný tok po zakrytí hladiny vzorkem
$q_o$	[W/m <sup>2</sup> ]	tepelný tok vyvozený odparem z volné vodní hladiny
$MVTR$	[g/m <sup>2</sup> .24 hod]	množství procházející vodní páry
$P_{REL}$	[%]	relativní paropropustnost
$P_{ABS}$	[kg/m <sup>2</sup> hod]	paropropustnost absolutní
$G_1$	[g]	váha vzorku před měřením
$G_0$	[g]	váha vzorku po uplynutí měření (6 hodin)
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha měřeného vzorku
$T$	[s]	doba měření
$R_{ct}$	[m <sup>2</sup> .K/W]	tepelný odpor

$\rho$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	objemová hmotnost
$c$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
WVT	$[\text{g}/\text{m}^2/\text{den}]$	přenos páry
A	$[\text{m}^2]$	testovací plocha
Q	$[\text{m}^3/\text{s}]$	objem průtoku
$C_2$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	je koncentrace odchozí vodní páry
$C_1$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	je koncentrace příchozí vodní páry
$m_s$	$[\text{kg}/\text{m}^2]$	plošná hmotnost
$\mu$	$[-]$	zaplnění
$R_{\text{par,rov}}$	$[\text{m}^2\text{Pa}/\text{W}]$	výparný odpor uvnitř textilie
$R_{\text{par,mv}}$	$[\text{m}^2\text{Pa}/\text{W}]$	výparný odpor mezní vrstvy
$\alpha$	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	součinitel přestupu do vzduchu prouděním
l	$[\text{J}/\text{kg}]$	výparné teplo vody
$R_{\text{vz}}$	$[\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}]$	je odpor vzduchu
Q	$[\text{m}/\text{s}]$	je propustnost vzduchu

## Úvod

Cílem práce je prověření zatím neprozkoumané metody měření paropropustnosti. Jedná se o prostup páry rovinou textilie. Doposud byl testován prostup páry pouze v kolmém směru skrze textili. Tento parametr je velmi důležitý z hlediska termoregulace lidského organismu, a to především ve sportovním odvětví. Výzkumy prokázaly, že vysoké procento ze všech zranění, která utrpí sportovci, souvisejí s dehydratací a přehřátím. Při nošení oděvu vzniká mezi pokožkou a oděvem vzdušný meziprostor tzv. mikroklima. Toto mikroklima je ovlivněno technickými vlastnostmi materiálu, ze kterého je oděv vyroben. Při nevhodných vlastnostech materiálu se může stát, že nastanou podmínky, které při vyšším zatížení neúměrně zvyšují nároky na produkci potu, nebo mohou způsobit až hypertermii, navzdory chladnému okolnímu prostředí. Z těchto důvodů je vlastnost paropropustnosti materiálu velmi důležitá.

Nastává však problém v místech, které nejsou schopny umožnit prostup páry skrze textili do okolního prostředí. Jedná se například o kontaktní místa batohů, které znemožňují prostup páry či různých sportovních chráničů a neprůstřelných vest pro vojenské využití. Tyto oblasti znemožňují prostup potu v podobě páry skrze textili do okolního prostředí. To zavedlo popud k hledání metody pro měření míry propustnosti vodní páry ve směru roviny dané textilie.

K modifikaci metody měření paropropustnosti bude využit přístroj PERMETEST. Danou modifikaci je možné testovat díky specifickému mechanismu přístroje, který produkuje vodní páru pomocí relativně malého senzoru umístěného vespod přístroje. Zakrytím této části znemožníme páře prostup skrze textili a ona tak bude nucena projít textilií v jiném směru, tedy ve směru její roviny. Se zvyšováním velikosti zakrytí nad senzorem tak budeme prodlužovat trajektorii, kterou musí molekula vody urazit a bude sledováno chování procházející páry rovinou textilie.

## ČÁST TEORETICKÁ

### 1 Funkční prádlo

Textilní průmysl je v dnešní době velmi rozvinut. Oděv splňuje vysokou škálu funkcí. Jednou ze základních funkcí je funkce sociální, do které spadá hledisko estetické, či náboženské. Další běžnou funkcí se rozumí ochrana organismu proti běžným vlivům prostředí. Za běžné vlivy považujeme takové, které se svou hodnotou nevymykají běžným podmínkám (tedy běžná teplota okolí, vliv větru či vlhkosti). Tyto funkce by měly splňovat všechny oděvní textilie. Skrze různé technologie umožňuje textilní průmysl zvyšování komfortu při běžném nošení ale i při sportovní či velmi vysoké aktivitě, nebo jiných aktivitách, které si vyžadují speciální funkce oděvu. Zde se dostáváme k pojmu funkční textilie. Jsou to takové textilie, které disponují funkcemi, které již nespádají do funkcí základních, tedy běžných. O takových textiliích hovoříme také jako o textiliích s přidanou hodnotou. Tyto funkce mohou být například termo-izolace, prodyšnost materiálu, nepropustnost vody, ale také různých chemikálií či ohně. Některé materiály mohou mít antistatické účinky či antibakteriální. Některé z těchto materiálů díky těmto vlastnostem nacházejí uplatnění zvláště v oblasti zdravotnictví. Textilie však nemusí disponovat pouze jednou přidanou hodnotou. V případě, že textilie disponuje více funkcemi najednou, pak textilii nazýváme textilií multifunkční [1].

Jak již bylo zmíněno v dnešní době existuje řada technologií a postupů, jak zajistit funkčnost textilie. Nejzákladnějším postupem je volba materiálu a využití konkrétních vlastností zvolených vláken, nebo jejich modifikace za účelem dosáhnout požadovaných vlastností. Známe také mnoho způsobů, jak vyrobit účelně profilované syntetické vlákno a zajistit si tak potřebné vlastnosti, které následně dodají textilii určitou funkci. Mnoha funkcí lze také dosáhnout správnou strukturou textilie. Vazbou textilie a hustotou této vazby můžeme ovlivnit především velikost pórů a její pevnost. Výborných výsledků lze dosáhnout kombinací několika materiálů (tzv. sendvičové struktury). Tyto materiály jsou velmi žádané ve sportovním odvětví, jelikož zde můžeme dosáhnout například hřejivého efektu zároveň s odolností vůči pronikání vody z okolí či současné prodyšnosti materiálu aj. Výsledků však lze dosáhnout taktéž finálními úpravami (např. impregnace) [1].

Nynější textilní průmysl je schopen vyrábět také takzvané chytré (neboli „smart“) textilie. Tyto textilie nedisponují pouze speciální vlastností, ale dokáží i reagovat zpětnou vazbou na popud z vnějšího okolí. Zde se textilie dále dělí na pasivní, aktivní a velmi chytré.

Pasivní chytré textilie dokáží reagovat na vnější popud například změnou barvy, avšak tato reakce je nevratná. Aktivní chytré textilie jsou schopny reagovat na vnější podněty, ale zároveň rozeznat změnu podnětu a reagovat na ně vratně. Pasivní a aktivní chytré textilie lze využít například pro oděvy hasičů, kde oděv rozpozná životu nebezpečnou teplotu a upozorní změnou své barvy. Nebo jako designový prvek, kdy se již vyrábějí deštníky měnící barvu po dopadu kapek vody na jeho povrch. Velmi chytré textilie jsou textilie, se zakomponovanou elektronikou.

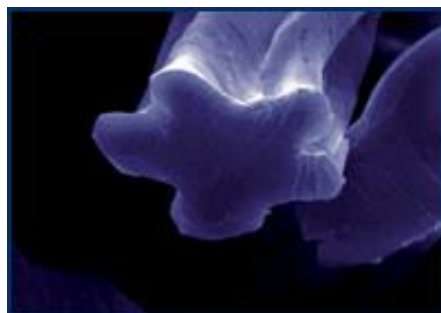
Pro tuto práci jsou v popředí zájmu textilie funkční, převážně textilie funkční zajišťující termofyziologický komfort [1].

## 1.1 Čeští výrobci funkčního prádla

V České republice jsou outdoorové sporty velice oblíbené a možná právě proto se na českém trhu nachází nemalé množství kvalitních domácích výrobců funkčního prádla. Předními výrobci jsou například Moira, Klimatex, Direct Alpine, Sensor, Hannah a méně známé, avšak kvalitní Suspect animal, Progress, Maloja, Rogeli a O'STYLE, který nechává kvalitu svých materiálů prověřovat v laboratořích Technické Univerzity v Liberci.

### 1.1.1 Moira

Firma Moira soustředí veškeré její aktivity jako výzkum, technologie a výrobu na Českou republiku. Moira nejen že vyrábí textilie vhodné pro sportovní vyžití, také zaručuje jejich zdravotní nezávadnost a pracuje v souladu se všemi ekologickými normami a požadavky Evropské Unie. Moira využívá jak vlákna přírodní z bavlny a merino vlny, tak umělá (viskóza, polyamid, polyuretan, polyester, polypropylen). Již řadu let Moira disponuje patentem na vlákno Moira TG 900. profil tohoto vlákna můžeme vidět na obrázku 1 [3].



Obr.1 Moira TG 900 [3].

Jedná se o tvarované syntetické vlákno s pěti laločnatým profilem s hlubokými laloky, které umožňují kapilární odvod potu od těla.

### 1.1.2 Direct Alpine

Direct Alpine je již od roku 1997 firmou, která situuje svou výrobu pouze zde v České republice, avšak díky vysoké kvalitě výrobků je dodávána do zemí po celé Evropě a dokonce i Japonska a Koreji. Firma Direct Alpine využívá nesčetně technologií jako je laser cutting (pro vytváření otvorů), podlepování švů (pro zachování nepromokavosti), nano tech (zabraňuje penetraci vody a nečistot do textilie), fresh cool (pro velmi rychlé schnutí materiálu). Pro zajištění vysoké funkčnosti materiálu používají například vlákna coolmax. Vlákna coolmax jsou polyesterová vlákna obsahující kanálky (4 či 6). Profil vlákna lze vidět na obrázku 2.



Obr.2: Vlákna Coolmax (se čtyřmi kanálky; s šesti kanálky) [5].

Profil tohoto vlákna stejně tak jako u laločnatých profilů díky kanálkům zajišťuje výborný odvod vlhkosti od těla. V některých případech firma využívá vlákna coolmax v kombinaci s vlákny z merino vlny pro lepší tepelné vlastnosti. Merino vlna je druh vlny získávan z ovcí speciálně vyšlechtěných pro náročnější klimatické podmínky, díky čemuž svou vlnu přizpůsobila a získala tak lepší vlastnosti. Oproti vlně normální je merino vlna jemnější, proto je výrazně komfortnější pro omak uživatele. Dále disponuje několika pro textilní průmysl výhodnými vlastnostmi. Vlákno merino vlny se skládá ze dvou částí spirálovitě spojených v jeden celek. Povrch vláken obsahuje jemné šupinky a vlákna také obsahují určité množství tuku lanolínu, díky čemuž značně brání usazování nečistot. Co se prodyšnosti týče, má merino vlna výhodu díky struktuře vláken umožňující dýchání nejen póry v textili, ale také skrze vlákna jako taková. Je tedy schopna výborné prodyšnosti [4].



### 1.1.3 Klimatex

Vznik firmy Klimatex řadíme do druhé poloviny dvacátého století. Firma Klimatex užívá řadu vláken, mezi které patří vlákna polypropylenová, vlákna coolmax, která již byla zmíněna výše a vlákna thermocool. Vlákno thermocool lze vidět na obrázku 3.



Obr.3: Thermocool [7].

Jedná se o duté vlákno obemknuté vláknem laločnatým, čímž zajišťuje kombinaci více vlastností. Vzduch uvnitř dutého vlákna poskytuje uživateli hřejivý efekt, zatímco laločnaté vlákno na povrchu zajišťuje odvod vlhkosti od těla. Tento materiál je díky jeho vlastnostem velmi využívaný pro sportovní spodní vrstvy, tedy vrstvy v kontaktu s lidským tělem [6].

### 1.1.4 Sensor

Firma sensor je jednou z předních Českých výrobců funkčního prádla na trhu. Jako všechny firmy využívá několika materiálů, avšak z hlediska zaměření této diplomové práce zmíníme materiál Coolmax Fresh, který lze vidět na obrázku 4. Jedná se o materiál firmy Advansa, který se definuje tím, že materiál obsahuje více jak 50% vláken Coolmax Fresh. Vlákna Coolmax Fresh jsou variantou vláken Coolmax s šesti kanálky, do kterých jsou přimísены částice stříbra. Přidáním iontů stříbra je docíleno trvalých antibakteriálních účinků a zamezení zápachu v přítomnosti potu. Stříbro funguje tak, že narušuje buněčnou stěnu bakterií a tím zabraňuje jejich růstu [8].



Obr.4: Coolmax Fresh [9].

## 2 Termoregulace

Termoregulace je schopnost organismu udržet si stálou tělesnou teplotu při výkyvech teploty okolní. Touto schopností disponují pouze vyšší živočichové, které nazýváme teplokrevní. U zbylého druhu živočichů se mění tělesná teplota společně s teplotou okolí. Tyto živočichy nazýváme chladnokrevní. Člověk se řadí do skupiny vyšších živočichů, tudíž je schopen termoregulace.

Termoregulace je pro člověka velmi důležitá, protože na ni závisí všechny biochemické procesy organismu. Proto se zvyšující se teplotou se zrychlují i metabolické procesy [10][26].

### 2.1 Tělesná teplota

V případě lidského organismu bereme v potaz teplotu slupky a teplotu jádra. Normální tělesná teplota měřená ze slupky lidského těla se pohybuje mezi 35,8 a 37,0 °C. Její kolísání mezi tímto intervalem je závislé na vlivech vnějšího okolí jako je teplota okolí, vlhkost a proudění vzduchu v okolí lidského těla a na aktivitě a stavu lidského organismu. Tato tělesná slupka se nazývá axila. Teplota axily se také liší s místem, na kterém je měřena. Nejvyšší hodnotu 34 – 36 °C lze naměřit na nejvíce prokrvených místech kterými jsou hlava, břicho a prsa. Na okrajových částech těla (končetiny) je teplota nižší přibližně 29-30 °C. Místa s nejnižší teplotou 23-28 °C jsou špička nosu, ušní lalůčky a špičky prstů. Na rozdíl od axily teplota lidského jádra není závislá na vnějších vlivech okolí, protože je od okolí dělena tukovou vrstvou, podkožním vazivem a kůží, proto je více či méně konstantní. Tato teplota se měří v okolí břišní dutiny a hrudi a pohybuje se v rozmezí mezi 39 a 40 °C. Hodnotu vnitřní teploty lze sledovat pomocí rektální teploty měřené z konečníku. V průběhu spánku teplota jádra klesá [10][11][13].

### 2.2 Změna tělesné teploty

Tělesná teplota kolísá v závislosti na několika faktorech. Jedním z faktorů je denní doba, nejnižší teplotu můžeme naměřit v ranních hodinách kolem čtvrté hodiny a nejvyšší naopak později odpoledne. Dále při zvýšené aktivitě člověka se společně se zvyšujícím se metabolismem zvyšuje tvorba tepla. Teplota se také může měnit díky sekreci některých hormonů. To lze zaznamenat například u žen po ovulaci vlivem progesteronu, kdy se teplota může navýšit o 0,5 °C.

Tělesná teplota je stabilizována tvorbou a výdejem tepla. Jestliže dojde k vyšší tvorbě tepla, než je množství tepla ztraceného, dochází k zvýšení teploty lidského organismu. Tvorba tepla probíhá převážně díky metabolismu a svalové činnosti v jádře těla. Nejvíce pak v játrech vzhledem jejich velmi aktivnímu metabolismu a při třesu velkých svalových skupin (stehenních svalů), čímž je tělesná teplota zvýšena dočasně pomocí oxidace glukózy ve svalových buňkách. Výdej tepla je pak závislý na cirkulaci tepla krví směrem z jádra skrze kůži na povrch lidského těla [10] [11].

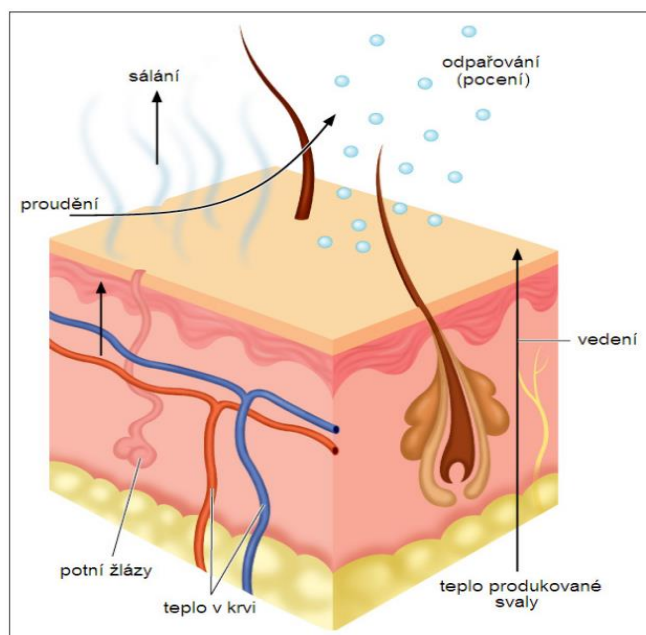
Následná ztráta tepla slupkou těla závisí na izolaci organismu pomocí oděvu či srsti a na vnějších podmínkách okolí. Předávání tepla organismu do okolí může probíhat několika způsoby:

**Sáláním (radiace)** je teplo odváděno pomocí infračervených paprsků. Jelikož infračervené záření vydávají všechny předměty, u kterých lze naměřit teplotu vyšší, nežli je absolutní nula. Pokud tato teplota okolí je nižší než teplota těla, pak je pomocí záření předáváno teplo z organismu do okolí.

**Vedením (kondukcí)** je odváděno pouze zanedbatelné množství tepla. Jedná se zde o princip předávání kinetické energie. Molekuly těla předávají teplo předmětům se kterými je tělo v přímém kontaktu, jako je například podlaha či vzduch. Avšak vzduch lze považovat spíše za látku, která vede teplo ve velmi malé míře, tedy za izolant, tudíž množství předávaného tepla tímto způsobem je ve velmi malé míře, pokud je vzduch ve stálém stavu a neproudí. Na druhé straně například voda je výborný vodič tepla, tudíž pokud se vyskytuje ve vzduchu v podobě vlhkosti, nebo je tělo v přímém kontaktu s ní a má nízkou teplotu, pak odebírá teplo tělu.

**Prouděním (konvekce)** je odváděno teplo, které je tělem předáno do nejbližšího okolí, tedy vzduchu a následně odvedeno pomocí jeho proudění. Tento odvod je umocněn za přítomnosti větru.

**Odpařováním (evaporací)** je odváděna největší část lidského tepla. Tento způsob umožňuje tělu výdej tepla bez ohledu na teplotě okolí. Dochází k němu při přeměně skupenství vyloučeného potu na povrchu kůže na páru, která se odpařuje z povrchu těla. Tímto je ochlazená krev v podkoží, která proudí do hlubších tkání těla a tím ho ochlazuje. Odpařování potu z povrchu těla je závislé na množství vlhkosti v okolním vzduchu. Pokud je vlhkost velmi vysoká, pot není přenášen do okolí, stéká po kůži a neodpařuje vůbec. Z toho důvodu je velmi důležitá volba vhodného oděvu, který umožňuje dobrý odvod potu od těla a nebrání odpařování [10] [11].



Obr.5: Mechanismy výdeje tepla [26].

Nejlépe izoluje teplo v lidském těle vrstva kůže, podkožního vaziva, a především vrstva tuku. Bylo dokázáno, že v organismu, který je v přímém kontaktu se studeným okolním prostředím, jako jsou například plavci, se tvoří větší tuková vrstva [10][11][13][26].

### 2.3 Příjem a výdej tepla

Za normálních okolností je tělo schopno udržovat výdej a příjem tepla v rovnováze mezi 35,8 – 37,4 °C. O termoregulaci lze hovořit teprve ve chvíli, kdy je přesáhnutá hranice této takzvané teplotní pohody. K tomu, aby bylo tělo schopno tyto teplotní rozdíly vypořádat je zapotřebí termoreceptorů – tepelné senzory. Organismus obsahuje **centrální termoreceptory** (thermo-senzory), které se nacházejí v samotném hypotalamu. K těmto centrálním termoreceptorům jsou zde i **termoreceptory hloubkové periferní** nacházející se v některých tkáních těla (v míše, dutině břišní a v okolí velkých žil) a **termoreceptory periferní povrchové** v kůži. Receptory v hypotalamu poskytují informaci, na základě které, prostřednictvím reflexů snižují, či zvýší teplotu jádra. Termoreceptory se dále dělí na chladové a tepelné. Zatímco pro zaregistrování chladu má člověk přibližně 250 tisíc termoreceptorů, pro teplo pouhých 30 tisíc.

Mechanismy, které snižují tělesnou teplotu jsou vazodilatace cév (rozšíření cév, které umožňuje lepší průtok krve a následně lepší předání tepla), pocení a snížení metabolické činnosti (např. omezením tělesné aktivity či snížením chuti k jídlu). Mechanismy, které zvyšují tělesnou teplotu jsou naopak vazokonstrikce cév (zúžení cév

čímž se sníží průtok krve), a piloerекce (tzv. husí kůže je u člověka bezvýznamná, ale u zvířat vytváří vzduchovou vrstvu mezi chlupy, která izoluje teplo).

V důsledku změn tělesné teploty mohou nastat nežádoucí stavy: Hypertemie (přehřátí organismu) nastane při vysoké aktivitě organismu ve velmi horkém počasí, horečka, či podchlazení [10][11][12].

V roce 2008 byl proveden průzkum při kterém byla provedena dvě měření, kde byla pozorována teplota lidského jádra v závislosti na intenzitě a době trvání zátěže. Z výsledného měření vyplývá, že doba trvání a intenzita zátěže zcela výrazně ovlivňuje množství nahromaděného tepla v organismu. Autoři uvádějí, že je velmi pravděpodobné, aby došlo ke zranění v důsledku přehřátí organismu i za chladnějších podmínek ( $< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), neboť samotná tělesná metabolická produkce je schopna vytvořit dostatek tepla k poranění organismu. Huffman a spol. (2008) ve své práci dokazují, že přibližně 20 % všech zranění, která utrpěli středoškolsí sportovci během dvouleté periody na stovce pozorovaných škol, souvisela s dehydratací a přehřátím.

Při použití oděvu jako ochranné vrstvy vůči vnějším vlivům vzniká mezi pokožkou a oděvem vzdušný meziprostor tzv. mikroklima. Toto mikroklima je ovlivněno technickými vlastnostmi materiálu, ze kterého je oděv vyroben. Při nevhodných vlastnostech materiálu se může stát, že nastanou podmínky, které při vyšším zatížení neúměrně zvyšují nároky na produkci potu, nebo mohou způsobit až hypertermii, navzdory chladnému okolnímu prostředí.

Výrazným vlivem regulace teploty je odvádění vlhkosti a tedy užití materiály, které jsou schopny vlhkost odvádět. Bylo provedeno několik studií na toto téma. Např. Tokura a Natsume (1987) ve své práci porovnávali 100% polyesterové a 100% vlněné materiály. Byla zjištěna výrazně vyšší teplota tělesného jádra a množství naakumulovaného tepla během odpočinku po zátěži při použití polyesteru, než při použití vlny [17].

## 2.4 Pot

Jak již bylo zmíněno největší transport tepla je pomocí pocení. Především při vysoké aktivitě se během fyzického zatížení ztrácí z těla až 80 % tepla. V případě fyzického zatížení je tento mechanismus spuštěn adrenalinem. Při klidovém stavu uniká přibližně 10 % tepla. V klidovém stavu jsou potní žlázy inervovány sympatickými cholinergními nervovými vlákny. Vytvářený pot je produktem potních žláz. Pot se skládá přibližně z 99% vody, zbytek tvoří soli (NaCl), tuk a močovina. Potní žlázy vyplavují pot

skrz vnější rohovou vrstvu, která má velký povrch. Díky tomu je odpar z této vrstvy až 5x vyšší, než ze stejně velké rovinné plochy. Při horkém prostředí produkuje neaklimatizované lidské tělo přibližně 1 000 ml potu za jednu hodinu. Tímto tělo ztrácí vodu a ionty. Po aklimatizování, které vzniká po několika týdnech se výdej potu zvýší na dva až tři litry za hodinu. Zvýšením sekrece potu se tedy i zvyšuje výdej tepla, a to až desetkrát.

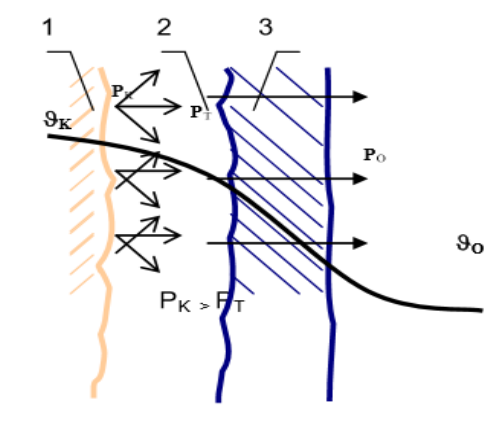
V lidském těle nalezneme až 2,5 milionu potních žláz. Potní žlázy jsou rozmístěny po celém těle, ale nejsou rozmístěny rovnoměrně. Největší množství potních žláz nalezneme na plochách chodidel a na nohou. K většímu pocení dochází také v oblasti podpaží, kde sice není vyšší počet potních žláz, ale jsou ve srovnání s ostatními větší. Jejich průměr je až dvojnásobný (0,3 – 0,5 mm) [10][12].

## **2.5 Odvod vlhkosti z povrchu lidského těla**

V oblasti výměny tepla je velmi významným artefaktem výměna pomocí vyloučených tekutin na povrch lidského těla, tedy pomocí potu. Vyloučená vlhkost může být předávána vedením, či prouděním. Tedy bez kontaktu s jiným objektem (povětšinou textilie), nebo při kontaktu s jiným objektem. Množství takto odvedené vodní páry je závislé na gradientu mezi koncentrací (parciálním tlakem) nasycené páry vytvořené na povrchu lidské pokožky a aktuální koncentrací (parciálním tlakem) vodní páry v okolním prostředí. Avšak často je zapotřebí obou dvou způsobů. Při odvodu vlhkosti z lidského těla je také třeba brát v potaz, že vlhkost se může vyskytovat v kapalném a plynném stavu a způsoby jejich odvodu od těla se liší [12][17][40].

### **2.5.1 Odvod plynné vlhkosti evaporací (odpařování)**

Velmi důležitou roli v problematice termoregulace hraje tepelná ztráta pomocí odpařování vody. Odpařením jednoho litru vody tělo ztratí přibližně 2,5 MJ tepla. Níže na obrázku 6 můžeme vidět, jak tento mechanismus funguje.



Obr.6: Odvod plynné vlhkosti od těla [12].

Pod jednotlivými čísly si představíme systém tří prostředí, která jsou zapojena do procesu. Pokožku 1, mikroklima, které tvoří prostor mezi pokožkou a textilií 2 a vrstva textilie 3. Dále zde můžeme vidět  $P_K$  parciální tlak vodních par na povrchu kůže,  $P_T$  parciální tlak vodních par na povrchu textilie a  $P_O$  tlak okolí. Klesající hodnota je zde teplota –  $\vartheta_K$  teplota pokožky a  $\vartheta_O$  teplota okolí. Množství přenášené páry  $m^* [kg/(m^2s)]$  se pak vyjadřuje v hmotnosti a je úměrné difúznímu koeficientu  $D_P [kg/(m.s.Pa)]$  a gradientu parciálního tlaku  $\Delta p_{parc} / \Delta x$  podle Fickova zákona. Množství přenášené páry lze ji vyjádřit vztahem [12]:

$$m^* = - D_P \cdot \Delta p_{parc} / \Delta x = - D_P \cdot (p_{WSAT} - p_{WE}) / h, \quad (1)$$

kde:  $D_P$  ... difúzní koeficient  $[kg/(m.s.Pa)]$

$p_{WSAT}$  ... nasycený (parciální) tlak na povrchu pokožky  $[Pa]$

$p_{WE}$  ... (parciální) tlak aktuální  $[Pa]$

$\Delta p_{parc}$  ... rozdíl parciálních tlaků  $[Pa]$

$\Delta x$  ... vzdálenost dle Fickova zákona  $[m]$

$h$  ... tloušťka textilie  $[m]$  [12].

Záporné znaménko u difuzního koeficientu nám zde značí směr přestupu látky z prostředí s vyšší koncentrací, do prostředí s nižší koncentrací [42].

Namísto gradientu tlaku vodní páry, může být také použit *gradient koncentrace*

hmotnosti  $C$  [kg H<sub>2</sub>O/1 kg vlhkého vzduchu]. Dosazením do výše zmíněné rovnice dostaneme:

$$m^* = -D_C \cdot \Delta c / \Delta x = -D_C \cdot (C_{WSAT} - C_{WE}) / h, \quad (2)$$

kde:  $D_C$ ...je difúzní součinitel vztahovaný na koncentraci [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$\Delta c$ ...Je rozdíl koncentrací [-]

$C_{WSAT}$  ...je koncentrace páry ve stavu nasycení [-]

$C_{WE}$ ...je koncentrace páry v okolním prostředí [-]

Rozdíl mezi oběma tvary difúzního koeficientu je dán stavovou rovnicí plynu, obsahující molární koncentraci vodní páry, obecnou plynovou konstantu a absolutní teplotu vodní páry [12][33]:

$$D_P = D_C \cdot M_W / RT, \quad (3)$$

kde:  $M_W$ ...je molární koncentrace vodní páry [ $kg \cdot mol^{-1}$ ]

$R$ ...je obecná plynová konstanta [ $JK^{-1} \cdot mol^{-1}$ ]

$T$ ...je teplota vodní páry [K] [12].

Pro přestup vlhkosti prouděním lze použít vztah pro přenos hmoty prouděním, který je podobný Newtonovu zákonu:

$$m^* = \beta_P (p_{WSAT} - p_{WE}) = \beta_C (C_{WSAT} - C_{WE}), \quad \beta_P = \beta_C \cdot M_W / RT, \quad (4)$$

kde:  $\beta_P$ ...koeficient přestupu vlhkosti prouděním [ $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ]

$\beta_C$ ... koeficient přestupu vlhkosti prouděním vztahovaný na rozdíl koncentrací [ $kg/(m^2 \cdot s)$ ]

Podobně jako koeficient přestupu tepla prouděním  $\alpha$  roste se s rychlostí vzduchu, je také koeficient přestupu vlhkosti prouděním  $\beta_P$  úměrný rychlosti vzduchu.



Díky analogii mezi přestupem tepla a vlhkosti, může být koeficient přestupu vlhkosti prouděním vypočítán pomocí Lewisova zákona:

$$\alpha = \beta_C \cdot c_{pA}, \quad (5)$$

kde:  $c_{pA}$  ...je specifické teplo vlhkého vzduchu [ $J/(kg \cdot K)$ ]

$\alpha$ ...koeficient přestupu tepla prouděním [ $W/m^2K$ ]

$\beta_C$ ...koeficient přestupu vlhkosti prouděním vztahovaný na rozdíl koncentrací [ $kg/(m^2s)$ ]

Pro odvod plynné vlhkosti evaporací je důležitý systém pórů v textiliích či vláknech samotných. Měření transportu plynné vlhkosti lze vidět níže v kapitole měření paropropustnosti. V mnoha případech dojde ke kondenzaci plynné vlhkosti na povrchu vláken uvnitř textilie. Pokud je pot v kapalném stavu mluvíme pak o kapilárním odvodu.

### 2.5.2 Odvod kapalné vlhkosti pomocí kapilár

Kapilární odvod potu spočívá v transportu kapaliny pomocí kapilár ve vláknech textilie. Jedná se o tzv. knotový efekt. Vlhkost je odsávána první textilní vrstvou a vzlíná do její plochy všemi směry. Parciální tlak vodních par v mikroklimatu se snižuje jen velmi nepatrně. Kůže ze strany textilie je smáčena odsávaným potem, intenzita přestupu je dána parciálním spádem. Kapilární odvod je dále závislý na smáčecí schopnosti této textilie a vláken, na povrchovém napětí vláken a potu.

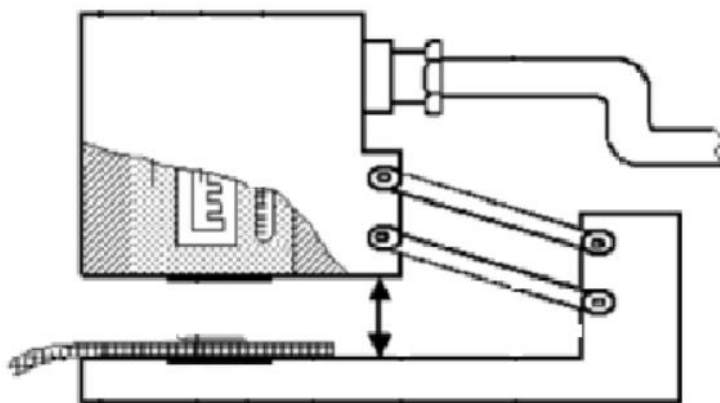
Měření vlhkostní jímavosti textilií probíhá na měřicím přístroji ALAMBETA. Přístroj nám poskytuje informace o tepelných vlastnostech textilií jako je **měrná tepelná vodivost** dané textilie  $\lambda$  [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ], která nám udává množství tepla, které proteče jednotkou délky za jednotku času a vytvoří rozdíl teplot 1 K. S rostoucí teplotou nám tato teplotní vodivost klesá.

Dále nám udává **tepelnou jímavost**  $b$  [ $Wm^{-2}s^{1/2}K^{-1}$ ]. Tento parameter je jediný z parametrů, který se používá k charakterizaci tepelného omaku. Jedná se o množství tepla, které proteče při rozdílu teplot 1 K jednotkou plochy za jednotku času v důsledku akumulace tepla v jednotkovém objemu. Chladnější omak pak mají látky, které absorbují teplo snadněji.

**Plošný odpor vedení tepla**  $r$  [ $W^{-1}Km^2$ ] je dán poměrem tloušťky textilie a její tepelnou vodivostí. Tento odpor je tím vyšší, čím je tepelná vodivost látky nižší.

**Tepelný tok**  $q$  [ $Wm^2$ ] je množství tepla, které se šíří z hlavice přístroje o teplotě  $t_2$  do textilie o počáteční teplotě  $t_1$  za jednotku času.

Samotné měření vlhkostní jímavosti spočívá v hodnocení úrovně tepelného toku procházejícího horním povrchem vlhčeného vzorku, který simuluje vlhkou (zpcenou) lidskou pokožku a který je v kontaktu s povrchem měřeného vzorku. Po vzájemném kontaktu obou textilií pod definovaným přtlakem dochází v důsledku povrchové sorpce k odvodu vlhkosti z „modelu“ pokožky a vedení vlhkosti mimo ploch snímačů tepelného toku. Textilie o vyšší sorpci a vyšším kapilárním odvodu vlhkosti pak více zbaví „model“ pokožky vlhkosti a vykáže sušší (teplejší) omak a naopak. Schéma přístroje lze vidět na obrázku 7 [18] [36].



Obr.7: Schéma měřícího přístroje ALAMBETA [36].

Vlhkostní jímavost tedy lze vyhodnotit dle míry tepelné jímavosti. Vztah pro tepelnou jímavost  $b$  je:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}, \quad (6)$$

kde:  $\lambda$ ...je měrná tepelná vodivost [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]

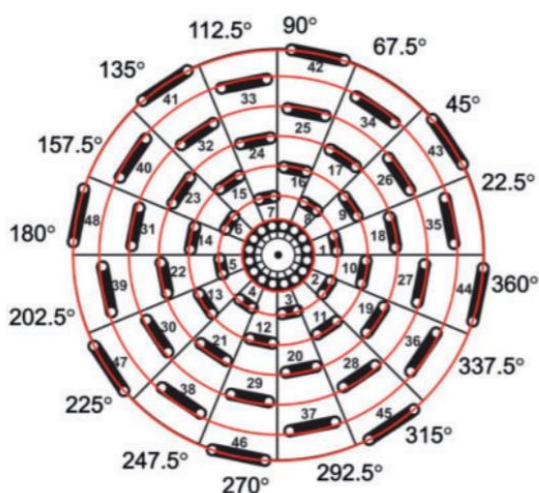
$\rho$ ...je objemová hmotnost [ $kg.m^{-3}$ ]

$c$ ...je měrná tepelná kapacita [ $J.kg^{-1}K^{-1}$ ] [36].

Škála naměřených hodnot tepelné jímavosti  $b$  pro vyhodnocení vlhkostní jímavosti:

- stupeň 5 výborná 400-550 [ $Wm^{-2} s^{1/2}K^{-1}$ ]
- stupeň 4 dobrá 550-650 [ $Wm^{-2} s^{1/2}K^{-1}$ ]
- stupeň 3 průměrná 650-750 [ $Wm^{-2} s^{1/2}K^{-1}$ ]
- stupeň 2 podprůměrná 750-850 [ $Wm^{-2} s^{1/2}K^{-1}$ ]
- stupeň 1 nedostačující 850 a více [ $Wm^{-2} s^{1/2}K^{-1}$ ] [36].

Co se kapilárního odvodu vlhkosti týče v dnešní době jsou známy metody měření nejen skrze textílii, ale také hodnotící prostup potu ve všech směrech. Lze pro určení transportu kapalné vlhkosti ve všech směrech použít elektricky vodivou metodu. Umístěním měděné desky viz obrázek 8 pod měřený vzorek [13].



Obr. 8: Měděná deska pro měření kapilárního odvodu vlhkosti ve všech směrech [13].

Prostředkem je zaváděna do textílie kapalina. Pomocí měděných bodů je podáván signál o momentu, kdy kapalina dosáhne jejich pozice. Pomocí několika bodů je pozorována rychlost šíření vlhkosti ve všech směrech textílie [13].

Výslednou rychlost přenosu kapaliny materiálem lze získat po dosažení do následujícího vzorce [13]:

$$\text{rychlost přenosu} = \frac{\text{oblast pokrývající měděné body}}{\text{doba dosažení měděného bodu}} [\text{mm}^2/\text{s}] \quad (7)$$

### **2.5.3 Přenos kapalné vlhkosti pomocí difúze**

Difúze je proces rozptylování, v našem případě vlhkosti, v prostoru, který nastává při prostupu vlhkosti z povrchu pokožky skrz oděvní systém až do okolního prostředí. Jde o přirozenou vlastnost látek, které se snaží vyrovnat svou koncentraci v celém prostoru, kterého mohou dosáhnout (tzv. difundují). Jednotlivé vrstvy oblečení a vzduchové vrstvy vytvářejí difúzní odpor, který brání volnému šíření vlhkosti. Tento odpor je úměrný délce a průměru pórů ve struktuře (tkaniny, pleteniny). Čím delší a užší pór, tím je difúzní odpor větší a vlhkost zůstává uvnitř oděvního systému [12][17][40].

### **2.5.4 Přenos kapalné vlhkosti pomocí sorpce**

Jedná se o nejpomalejší způsob odvodu kapalné vlhkosti. Celý proces je podmíněn vlákněným složením textilie. Aby byla sorpce možná je zapotřebí, aby textilie obsahovala alespoň z části sorpční vlákna. Proces začíná vniknutím vlhkosti do mezimolekulárních oblastí ve struktuře vlákna, kde se následně navážou na hydrofilní skupiny molekulové struktury.

Všechny tři mechanismy přenosu kapalné vlhkosti (kapilární, difúze, sorpce) se mohou transportu účastnit současně, avšak nejrychlejší je difúzní a kapilární odvod [12][17][40].

### 3 Komfort

Komfort je hodnota těžce vyčíslitelná, jelikož se jedná o soubor nejen vyčíslitelných hodnot, ale také hodnot subjektivních. O komfortu hovoříme jako o situaci, kdy teplotní rozdíly částí lidského těla jsou velmi malé a pokožka neobsahuje vlhkost. Za takových podmínek je také minimální potřeba lidského organismu regulovat teplotu. Některé z teorií také přidávají do definice komfortu pár jiných kritérií. Barker (2002) prohlásil, že je stejně tak důležité brát v potaz psychologii člověka a jeho individuální zkušenosti. Li a Wong (2006) přiřadili komfortu několik aspektů [16]:

- Komfort je závislý na subjektivním vnímání různých pocitů.
- Komfort zahrnuje mnoho aspektů lidských smyslů. Je ovlivněn vizuálním vnímáním (estetické aspekty, pohodlí), tepelnými vlastnostmi textilie, bolestí při nošení dané textilie (svědění, tlak, ..) a omak.
- Závisí na předešlé zkušenosti a okolí (kulturní vlivy, sociální).

Komfort je, jak již bylo zmíněno souhrn několika vlastností, avšak jsme schopni ho hodnotit dle výše zmíněných definic několika aspekty:

- Termo-fyziologický komfort
- Omak
- Ergonomie oděvů
- Psychické pohodlí [16].

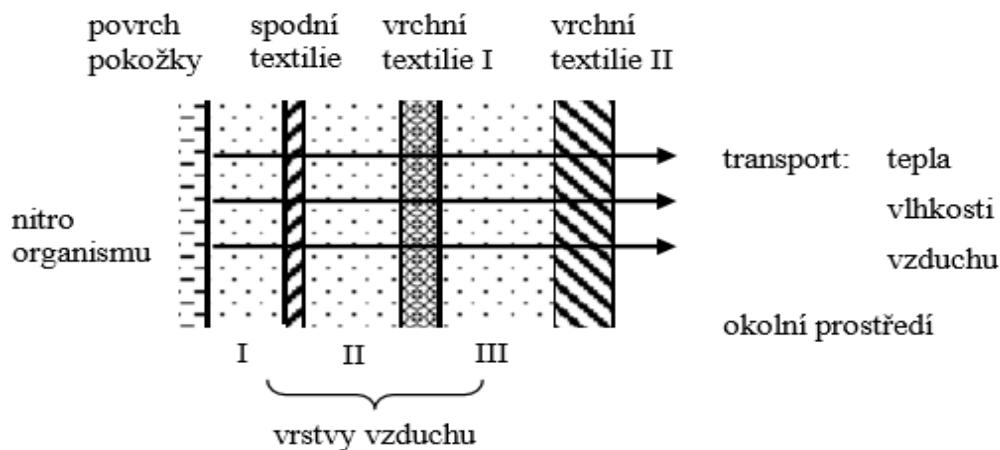
#### 3.1 Termo-fyziologický komfort

Za podmínek, kdy organismus nemusí vyrovnávat teplotu, nedochází k termoregulaci. Při normálním prokrvení organismu nedochází k pocení a není ani přítomen pocit chladu. Tento stav vyjadřuje stav tepelné pohody (termo-fyziologického komfortu). Optimální podmínky pro termo-fyziologický komfort:

- Teplota pokožky 33-35 °C
- Relativní vlhkost okolního vzduchu 50±10%
- Rychlost proudění okolního vzduchu 25±10 cm.s<sup>-1</sup>
- Obsah CO<sub>2</sub> 0,07%
- Nepřítomnost vody na pokožce

Pro zajištění termo-fyziologického komfortu je tedy důležité konstruovat oděv vhodným způsobem. Aby oděv napomáhal termoregulaci ve chvíli, kdy tělo není schopno samoregulace, musí mít schopnost prostupu tepla, vodních par, kapalné vlhkosti

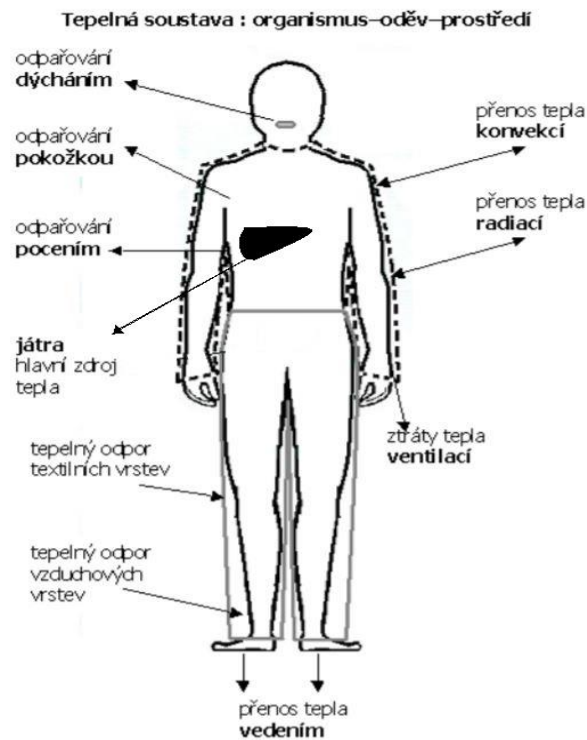
a prodyšnosti v souladu s výše uvedenými hodnotami pro termo-fyziologický komfort. Pro kompletní systém udržení termo-fyziologického komfortu se oděv často skládá z několika vrstev. Pokud vrstvíme části oděvu je zapotřebí brát v ohledu mezivrstvy vzduchu, které jsou tím vytvořeny. Tyto vrstvy, které lze vidět na obrázku 9 je nutno brát v závislosti na sobě, protože navzájem ovlivňují stav a fyzikální vlastnosti vrstev ostatních [12][16][40].



Obr. 9: Oděvní systém [12].

První vrstva vzduchu nacházející se mezi lidskou pokožkou a první vrstvou oděvu se nazývá mikroklima.

Aby lidské tělo dosáhlo termo-fyziologického komfortu je zapotřebí dosáhnout rovnováhy ve výměně tepla mezi lidským organismem a okolím. Tedy v případě vrstvení oblečení dochází k výměně tepla všemi vrstvami. Na obrázku 10 můžeme také názorně vidět, že se jedná o soustavu několika procesů, do níž je zapotřebí brát v potaz i oděvní systém, který výměnu tepla výrazně ovlivňuje.



Obr. 10: Systém výměny tepla lidského organismu s okolím v souladu s textilními vrstvami [12].

Po zhodnocení všech vlivů by neměla vzniknout ani ztráta, ale ani přebytek tepla. Vzájdnění ideálního stavu termofyziologického komfortu je pak dáno vztahem [12]:

$$(M - L) / A_{DU} \pm q_{\text{vedením}} \pm q_{\text{prouděním}} \pm q_{\text{zářením}} - q_{\text{ins}} - q_{\text{resp}} - q_{\text{persp}} = 0, \quad (8)$$

kde:  $M$ ...celkový metabolický výkon [W]

$L$  ...pracovní výkon [W]

$A_{DU}$  ...povrch lidského těla [m<sup>2</sup>], bývá v průměru 1,8 m<sup>2</sup>

$q_{\text{ins}}$ ... ochlazování nepatrným neustálým avšak nevnímaným odpařováním z kožních pórů [W/m<sup>2</sup>]

$q_{\text{resp}}$ ...ochlazování dýcháním, kdy dochází k přenosu tepla konvekcí na vnitřním povrchu plic[W/m<sup>2</sup>]

$q_{\text{persp}}$ ...intenzivní ochlazování pomocí hlavních potních žláz [W/m<sup>2</sup>]

$q_{\text{vedením}}$ ...teplo předávané vedením [W/m<sup>2</sup>]

$q_{\text{prouděním}}$ ...teplo předávané prouděním [W/m<sup>2</sup>]

$q_{\text{zářením}}$  ... teplo předávané zářením [W/m<sup>2</sup>] [12].

### 3.2 Vnímání vlhka

Lidské tělo obsahuje senzory pro vnímání vnějších vlivů. Avšak najdeme zde pouze senzory pro vnímání bolesti, tlaku, tepla a chladu. Pro vnímání vlhkosti využívá lidské tělo senzorů pro vnímání chladu. Chladové receptory jsou společně s teplovými umístěny v pokožce, ale také v centrální nervové soustavě a v cévách vnitřních orgánů. Chladové receptory a snímají pokles teploty v oblasti 35 - 38 °C. Kožní chladové receptory se nacházejí v podobě volně zakončených nervových vláken uložených těsně pod epitelem pokožky [10].

### 3.3 Termo-fyziologické vlastnosti textilií

Termo fyziologický komfort, jak již bylo zmíněno, definujeme jako stav organismu, který vykazuje spokojenost s teplotou okolního prostředí. Aspekty, které zde ovlivňují pocit člověka jsou teplota okolí, vítr a vlhkost. V dnešní době mají textilie mnoho vlastností a lze je použít jednak jako hřejivý element, pokud je teplota okolí nízká, jako chladivý v horkém prostředí či při procesu termoregulace lidského těla pocením za vyšší úrovně tělesné aktivity. V dnešní době jsme schopni většinu z těchto potřebných vlastností testovat [22].

Mezi termo-fyziologické vlastnosti řadíme **relativní paropropustnost  $P$  [%]** textilie. Tato hodnota je nenormalizovaný parametr a je procentuálním vyjádřením paropropustnosti. Je vyvozena dle tepelného toku  $q_0$ . 100% paropropustnost představuje tepelný tok  $q_0$  vyvozený odparem z volné vodní hladiny, která má stejnou plochu, jako má měřený vzorek. Zakrytím této hladiny vzorkem se hodnota tepelného toku sníží na  $q_v$ . Hodnotu lze vypočítat dle vztahu [22]:

$$P = (q_v/q_0) 100 , \quad (9)$$

kde:  $q_v$ ...je snížený tepelný tok po zakrytí hladiny vzorkem [ $W/m^2$ ]

$q_0$  ...je tepelný tok vyvozený odparem z volné vodní hladiny [ $W/m^2$ ] [22].

Dále pak **výparný odpor  $R_{et}$  [ $m^2Pa/W$ ]**, který je nepřímo úměrný paropropustnosti textilie. Výparný odpor nám udává velikost, jakou brání textilie průchodu vodních par



do vnějšího prostředí. Hodnotu získáme pomocí parciálního tlaku vodní páry ve vzduchu  $P_{WE}$  a parciálního tlaku páry ve stavu nasycení  $P_{WSAT}$  [22]:

$$R_{et} = (P_{WSAT} - P_{WE}) (q_v^{-1} - q_0^{-1}), \quad (10)$$

kde:  $P_{WSAT}$  ...je parciální tlak nasycené vodní páry [Pa]

$P_{WE}$  ...je parciální tlak vodní páry ve vzduchu [Pa] [22]

Jelikož hodnota výparného odporu je nepřímo úměrná hodnotě paropropustnosti, považujeme při výsledné klasifikaci textilií nízké hodnoty výparného odporu za úspěšné.

Klasifikaci paropropustnosti, dle hodnoty výparného odporu  $R_{et}$ , lze vidět níže v tabulce 1 [22].

**Tab.1: Klasifikace paropropustnosti pomocí hodnoty výparného odporu**

$R_{et} < 6$	Velmi dobrá	Nad 20 000 g/m <sup>2</sup> .24 hod
$R_{et} 6 - 13$	Dobrá	20 000 – 9 000 g/m <sup>2</sup> .24 hod
$R_{et} 13 - 20$	Uspokojivá	9 000 – 5 000 g/m <sup>2</sup> .24 hod
$R_{et} > 20$	neuspokojivá	Pod 5 000 g/m <sup>2</sup> .24 hod

[22].

Stanovení **tepelného odporu**  $R_{ct}$  [m<sup>2</sup>.K/W] nám charakterizuje odpor materiálu proti prostupu tepla [12][22].

## 4 Metody měření paropropustnosti

Všeobecně vzato lze paropropustnost materiálů hodnotit, z hlediska měřených veličin, dvěma způsoby. Prvním způsobem je udáváno množství vodní páry v gramech. Jedná se o množství vodní páry, které propustí jeden metr čtvereční látky během 24 hodin. Tato hodnota je udávána jako hodnota MVTR v  $g/m^2 \cdot 24 \text{ hod}$  a jedná se o paropropustnost absolutní. Čím vyšší hodnota MVTR, tím je materiál propustnější. Výhodou je, že se touto hodnotou dá vyjádřit i produkce potu. Lidské tělo vyprodukuje při chůzi 5 000 – 10 000  $[g/m^2 \cdot 24 \text{ hod} \cdot \text{potu}]$ , při běhu 20 000 – 28 000  $[g/m^2 \cdot 24 \text{ hod} \cdot \text{potu}]$  a při velmi vysoké fyzické aktivitě nad 35 000  $[g/m^2 \cdot 24 \text{ hod} \cdot \text{potu}]$ . Toto měření se však dnes již tolik nepoužívá, jelikož nezohledňuje důležité parametry, jako jsou teplota a vlhkost vzduchu [24].

Druhý způsob udává dvě důležité veličiny. Jednou z nich je relativní propustnost materiálu pro vodní páry a druhou důležitou veličinou je výparný odpor. Tyto veličiny jsou blíže popsány výše v kapitole termofiziologické vlastnosti textilií. Na rozdíl od metody MVTR tato metoda zohledňuje aktuální okolní podmínky [12].

Tyto veličiny lze dále zjistit několika metodami. Existuje tedy mnoho metod pro měření, které se liší především stavebními mechanismy, dále zkušebními podmínkami a parametry měření. Jednou variantou je gravimetrická metoda (tzv. Cup method), kdy měříme paropropustnost pomocí misek se silikagelem. Lepší variantou je pak metoda, kdy je přístroj simulována lidská pokožka [12][39].

### 4.1 Gravimetrická metoda

Tuto metodu lze praktikovat dvěma způsoby. Metoda přímá a metoda invertovaná. Princip měření spočívá v uchycení vzorku textilie kruhového tvaru na misku obsahující silikagel. Silikagel je oxid křemičitý ( $SiO_2$ ) ve formě granulí. Jelikož má velmi vysokou porozitu slouží zde jako desikant (pohlcovač vlhkosti). Jeho vlastnosti jsou snadno obnovitelné po vysušení za teploty 120 – 150 °C. Pro lepší určení nasycení vlhkostí je silikagel opatřen příměsí pro indikování vlhkosti, která změní jeho barvu vlivem vlhkosti [14][39].

Názorně lze vidět na obrázcích 11 a 12. Nejprve dojde k zvažení misky se vzorkem, kdy získáme  $G_0$  před expozicí v klimatizační skříni. V klimatizační skříni je vzorek ponechán po dobu 6 hodin. Po uplynutí této doby  $T$  je vzorek opět zvažen a získáme  $G_1$ .

Z těchto hodnot je pak spočítána relativní paropropustnost  $P_{REL}$  [%] dle vztahu [12] [14]:

$$P_{REL} = (G_1 - G_0) / G_0 , \quad (11)$$

kde:  $G_1$ ...je váha vzorku před měřením [kg]

$G_0$  ... je váha vzorku po uplynutí 6 hodin [kg] [12].

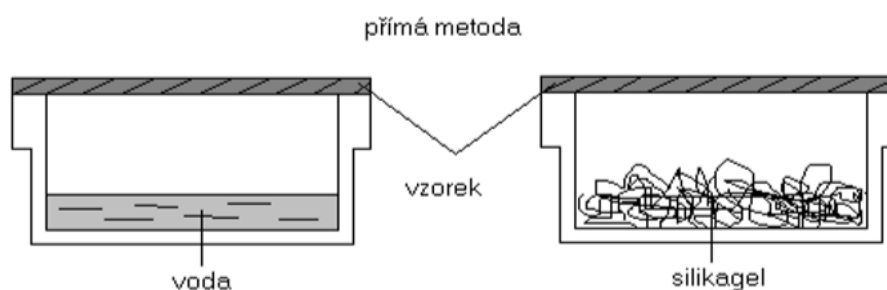
Nebo lze spočítat paropropustnost absolutní  $P_{ABS}$  [kg/m<sup>2</sup> hod] dle následujícího vztahu:

$$P_{ABS} = (G_1 - G_0) / S T , \quad (12)$$

kde:  $S$ ...je plocha měřeného vzorku [m<sup>2</sup>]

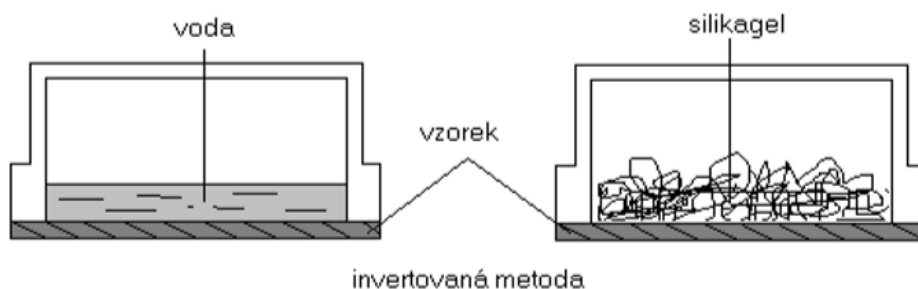
$T$ ...doba měření gravimetrickou metodou [s] [12].

Tato metoda však upadá do ústraní vzhledem k časové náročnosti a nízké přesnosti měření, která je dána nelineární sorpcí vysoušedla (silikagelu). Stejně tak se upouští od starší metody přímé, viz obrázek 11, při které byl vážením zjišťován úbytek vody v nádobě, která je překrytá textilním vzorkem a vystavené proudu vzduchu o rychlosti 1 m/s.



Obr. 11: Gravimetrická metoda [12].

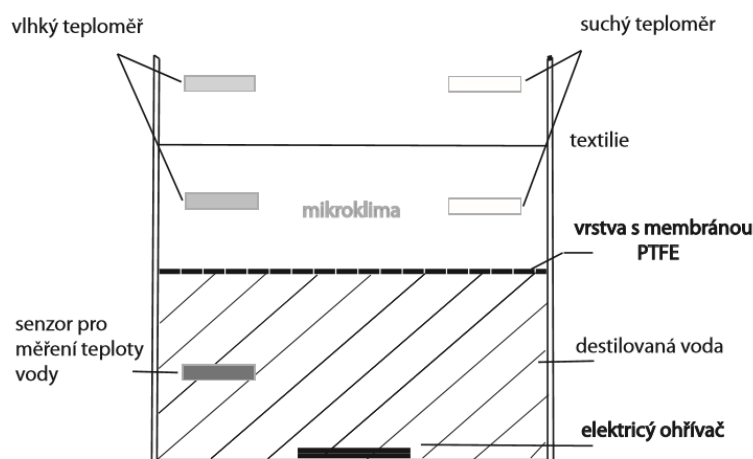
Obě dvě metody, starší i novější, lze provozovat i pomocí níže zobrazeným obráceným režimem [12].



Obr. 12: Obrácený způsob metody [12].

#### 4.2 Šálková metoda měření teploty

Jedná se o měřicí zařízení pomocí šálku o průměru 95 mm, který je obklopen izolačním materiálem tak, aby zabránil bočnímu úniku a tím poklesu tepelného toku a vodní páry. Šálek je naplněn destilovanou vodou s cílem vytvořit neomezený zdroj vodní páry. Vrstva voděvzdorného a paropropustného materiálu (s membránou z PTFE) čímž je simulována lidská kůže. Vzorek je umístěn 60 mm nad tuto vrstvu, čímž je vytvořeno mikroklima. Ve spodní části je voda ohřívána pomocí elektrického ohřívače a kontrolována senzorem teploty. Do procesu jsou zapojeny dva typy senzorů pro měření, suchý teploměr a vlhký teploměr. Každý z nich je zde dvakrát, jednou v prostoru mikroklimatu a jednou v prostoru nad zkoušeným vzorkem. Schéma procesu můžeme názorně vidět na obrázku 13.



Obr. 13: Schéma procesu měření šálkové metody.

Celá aparatura je vložena do zkušební komory a v intervalech 10 sekund jsou měřeny a počítačem zaznamenávány teploty všech 4 teploměrů a tepelný výkon. Po dosažení ustáleného stavu jsou výsledky brány pro měření. Jsou sledovány rozdíly hodnot tepelného toku před textilií a za textilií [15].

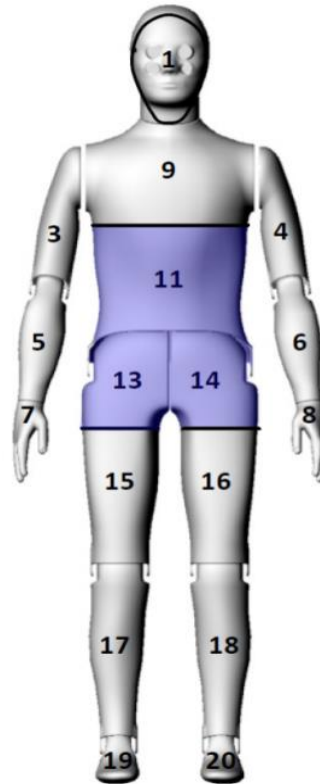
### 4.3 Měření pomocí skin modelu

Další více využívanou metodou je metoda skin modelu. Tato metoda je časově mnohem výhodnější, a proto je nyní více využívána. K této metodě je zde na Technické Univerzitě v Liberci využíván přístroj PERMETEST, který umožňuje měření paropropustnosti a výparného odporu bez jakéhokoliv mechanického poškození materiálu. Principem zkoušky je měření tepelného toku  $q$ . Tepelný tok prochází spodní částí přístroje simulujícího lidskou pokožku. Aby byla lidská pokožka, a tedy i proces pocení, věrohodně napodoben, je povrch modelu pokryt porézní vrstvou a je zvlhčován. Zkoušený vzorek je pak přiložen na porézní vrstvu. Následně je vzorek uzavřen hlavicí přístroje, která zajišťuje vhodné podmínky. To znamená, že při procesu měření je pomocí elektrické topné spirály a regulátoru prostor hlavice udržován na teplotě okolního vzduchu (obvykle mezi 20 – 23 °C), čímž jsou zajišťovány pro proces měření izotermické podmínky.

Vlhkost ve spodní hlavicí přístroje se mění v páru a prochází skrze separační folii směrem k textilií a dále i skrze textilií. Přístrojem jsou měřeny hodnoty tepelný tok bez zkoušeného vzorku  $q_0$  a tepelný tok za přítomnosti vzorku  $q_v$  [12][16][39].

### 4.4 „Newtonova“ potící figurína

V tomto případě se jedná o figurínu simulující celé lidské tělo. Měření se provádí v klimatizační komoře na figuríně, která je zahřátá a produkuje páru. Aparát simulující lidské tělo obsahuje dvacet nezávisle na sobě kontrolovaných tepelných zón, jak lze vidět na obrázku 14. Všechny tyto zóny jsou vybaveny ohříváčem, aby byla zajištěna simulace tepelného výkonu.



Obr. 14: Figurína obsahující 20 kontrolovaných tepelných zón [37].

Veškeré zóny, vyskytující se na povrchu, jsou nastaveny na 35 °C. Zde je sledován výparný odpor  $R_{et}$  a odpor tepelný  $R_{ct}$  [37].

#### 4.1.6 DMPC dynamická metoda

Při této metodě je měřený vzorek o velikosti 6 x 5 cm upoután mezi dvě kovové desky. Do systému jsou potrubím přiváděny dva proudy nasyceného dusíku. K nasycení došlo při projití skrze destilovanou vodu. Jeden proud obsahuje 95% vlhkosti a druhý 5 % vlhkosti. celý proces probíhá pouze na principu difuze bez jakéhokoliv takového spádu. To znamená, že transport páry probíhal pouze na základě rozdílných koncentrací páry. Vlhkost příchozí i odchozí je měřena pomocí čidel vlhkosti. při procesu měření je teplota místnosti kontrolována na  $20 \pm 1$  °C. Snímače snímají příchozí a odchozí páru každých 10 sekund a jsou ukládány počítačem. Výpočet rychlosti přenosu vodní páry

$WVT$  [g/m<sup>2</sup>/den] je pak počítán dle vztahu [39][40]:

$$WVT = \frac{Q \cdot (C_2 - C_1)}{A} \cdot 1000 \cdot 3600 \cdot 24, \quad (13)$$

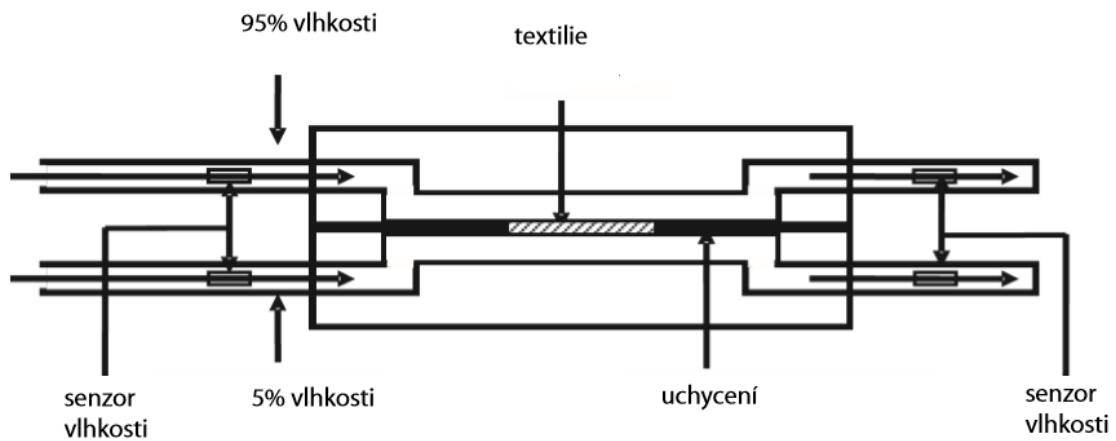
kde:  $A$ ...je testovací plocha [m<sup>2</sup>]

$Q$ ...je objem průtoku [m<sup>3</sup>/s]

$C_2$ ...je koncentrace odchozí vodní páry [kg/m<sup>3</sup>]

$C_1$ ...je koncentrace příchozí vodní páry [kg/m<sup>3</sup>] [39].

Na obrázku 15 lze vidět schéma měření DMPC dynamické metody.



Obr. 15: Schéma měření DMPC metody [39].

## PRAKTICKÁ ČÁST

### 5 Experiment

Praktická část pojednává o modifikaci metody měření paropropustnosti. Jedná se o měření paropropustnosti textilie, avšak nejde o již měřený parametr ve směru kolmém skrze textilií, ale o průchod páry rovinou textilie. Hlavním cílem je tedy vynalézt zcela novou metodu měření paropropustnosti k čemuž nám slouží přístroj PERMETEST, díky jeho specifické konstrukci. V první části bylo prováděno měření na přístroji PERMETEST klasickým způsobem a poté za námi upravených podmínek. Změny směru trajektorie molekul vody bylo dosaženo zakrytím svrchní části měřené textilie nepropustnou fólií tak, aby v tomto místě pára nemohla danou textilií opustit po překonání úseku ve směru tloušťky textilie. Takto byly molekuly páry nuceny pokračovat textilií ve směru její roviny a následně ji opustit až v místě, kde měřený materiál nebyl zakryt nepropustnou fólií. Pro měření bylo vybráno 14 druhů textilních materiálů, které byly měřeny, jak klasickým způsobem, tak způsobem modifikovaným.

Dále byly naměřeny a dle daných vztahů vyvozeny geometrické vlastnosti měřených vzorků, které mohou mít zásadní vliv na námi měřený parametr. Byla tedy sledována jejich závislost na výparném odporu při měření naší metodou, ve směru roviny textilie. Jedná se především o tloušťku měřených materiálů, jejich plošnou hmotnost, objemovou hmotnost a porozitu.

V závěru byla měřena propustnost vzduchu daných textilií v rovině textilie se záměrem zjištění přítomnosti závislosti těchto dvou parametrů. Dle faktu, že prostředím pro prostupnost vzduchu, stejně tak jako pro prostup páry textilií, je vzduch uvnitř měřené textilie, proto byla předpokládána závislost „podélného“ výparného odporu a „podélného“ odporu vzduchu. Lze tedy předpokládat, že v důsledku této závislosti by se následně dalo usoudit, že při experimentálním měření naší nové modifikované metody nedocházelo ke kondenzaci páry uvnitř textile, a tedy následně přenosu vlhkosti jinak, nežli pomocí pórů. Jedná se o modifikaci měření, jehož klasickým postupem je měření propustnosti vzduchu ve směru kolmém k textilií. V tomto případě se jedná o měření propustnosti vzduchu textilním materiálem ve směru jeho roviny. Toho je dosaženo taktéž díky vytvoření komponentu, který částečně omezuje průchod vzduchu při měření. K tomuto postupu byl využit přístroj FX 3300.



## 5.1 Měřené textilní vzorky

Pro danou metodu bylo použito několik vzorků. Některé vzorky se vyznačují stejnými parametry avšak bylo provedeno měření i na několika rozličných vzorcích a byl sledován vliv různých parametrů na prostup páry rovinou textilie. Vzorky 1-4 se vyznačují stejnou vazbou a přibližně shodnou plošnou hmotností. Tyto vzorky se liší především druhem použitých vláken. Jedná se o 100% polyester, 100% bavlnu, 100% polypropylen a kombinaci 50% bavlna/50% polyester. Zde jsme mohli sledovat vliv použitého materiálu na prostup páry rovinou textilie. Dále bylo testováno několik sportovních materiálů. Jedná se o velmi tenké pleteniny vyrobených z polyesteru. Jelikož je předpokládán úspěšný prostup páry v rovině u vysoce porózních textilií, bylo měření provedeno i na několika distančních pleteninách s velmi vysokým obsahem vzduchu uvnitř textilie.

Byly zjištěny základní charakteristiky zkoušených materiálů jako je vlákenný materiál, struktura textilie a některé geometrické vlastnosti měřených textilií. Tyto vlastnosti jsou popsány v kapitole Měřené geometrické vlastnosti textilií.

### 5.1.1 Měřené geometrické vlastnosti vzorků

Geometrické vlastnosti textilií mají výrazný vliv na paropropustnost materiálu. Asi nejvíce se na ní podílí velikost pórů v měřené textilii, kudy pára prochází, a tedy i její prodyšnost. Byla zjišťována tloušťka měřených textilií pomocí přístroje ALAMBETA, plošná hmotnost vážením a dle získaných dat byla dále vypočtena objemová hmotnost měřených vzorků. Z těchto získaných veličin pak byla následně vypočtena porozita materiálů.

#### 5.1.1.1 Tloušťka textilie

Tloušťka  $t$  [m] je kolmá vzdálenost mezi protilehlými povrchy textilie. Pro tuto práci byla tloušťka materiálu měřena dle Interní normy č. 23-304-02/01 (Měření tepelných vlastností na přístroji Alambeta) pomocí přístroje ALAMBETA. Měření na přístroji ALAMBETA je využíváno pro měření několika vlastností materiálu. Již bylo v práci zmíněno, že takto lze měřit vlhkostní jímavost, dále přístroj slouží k měření tepelných vlastností materiálu. Přístroj ukládá naměřená data a poté lze zobrazit základní statistiku jako je aritmetický průměr z naměřených dat a variační koeficient měření udávaný v %. Schéma přístroje lze vidět výše v práci na obrázku 7 [22][30][38].

### **Podmínky měření na přístroji ALAMBETA:**

- Příkon: 60 VA
- Provozní podmínky (teplota: 18 – 23 °C, relativní vlhkost: 10 – 80 %)
- Přítlak hlavice (měnitelný v rozsahu 100 - 1000 Pa, běžný je přítlak 200 Pa)
- Tloušťka vzorku: 0,5 – 8,0 mm
- Rozměr vzorku: min. 10 × 10 mm
- Doba měření: 10 – 100 sekund [38].

Tloušťka materiálu společně s poměrem pórů, které se uvnitř nacházejí jsou zásadními parametry pro měření modifikované metody paropropustnosti rovinou textilie. Lze předpokládat, že s rostoucí tloušťkou materiálu a velikostí pórů se bude zvyšovat i hodnota paropropustnosti v rovině textilie.

#### **5.1.1.2 Plošná hmotnost**

Plošná hmotnost  $m_s$  [kg/m<sup>2</sup>] nám určuje hmotnost 1 m<sup>2</sup> materiálu, v našem případě textilie. Plošná hmotnost byla pro tuto práci zjišťována dle normy ČSN EN 12127. byly vytvořeny vzorky o rozměrech 10x10cm, které se zvážili a následně byly hodnoty dosazeny do vzorce [30][28]:

$$m_s = \frac{m}{s}, \quad (14)$$

kde:  $m$ ...*hmotnost zkoušeného vzorku [kg]*  
 $s$ ...*plocha zkušebního vzorku [m<sup>2</sup>]* [28].

#### **5.1.1.3 Objemová hmotnost**

Jedná se o podíl hmotnosti daného materiálu a jeho celkového objemu. Objemová hmotnost  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] se vypočítá z plošné hmotnosti materiálu a jeho tloušťky. Lze ji označit jako hustotu textilie, tzn. že nám určuje v jaké míře je objemová jednotka textilie vyplněna vlákněným materiálem a jaká část tohoto objemu je vyplněna vzduchem. Tato veličina nám tedy nepřímo určuje pórovitost [30][31].

Objemovou hmotnost jsme pro tuto práci počítali dle vzorce:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{S \times h} = \frac{\rho_s}{h}, \quad (15)$$

kde:  $m$ ...je hmotnost měřené textilie [kg]

Plošná hmotnost  $m_s$  [kg/m<sup>2</sup>]  $h$ ...je tloušťka měřené textilie [m]

$\rho_s$ ...je hustota použitého materiálu v textilií [kg/m<sup>3</sup>] [31].

#### 5.1.1.4 Zaplnění

Zaplnění je hodnota vyjadřující míru vzduchu a vláken uvnitř textilie. K jeho výpočtu lze využít objemové či hmotnostní hodnoty měřeného vzorku [27]. Pro výpočet byl použit vztah:

$$\mu = \frac{m_s}{h \times \rho \text{ vláken}}, \quad (16)$$

kde:  $m_s$ ...je plošná hmotnost vzorku [kg/m<sup>2</sup>]

$h$ ...je tloušťka textilie [m]

$\rho$  vláken...je hustota vláken [kg/m<sup>3</sup>].

Hodnota zaplnění nám do jisté míry určuje porozitu  $P$  [%], kterou jsme zde následně počítali dosazením hodnoty zaplnění do vztahu:

$$P = 1 - \mu \quad (17)$$

#### 5.1.1.5 Porozita materiálů

Propustnost vzduchu je hodnota významná pro stanovení termofyziologického komfortu a lze z ní také určit porozitu daného materiálu, která dále významně souvisí s paropropustností textilie. Porozita je vnímána jako poměr objemu pórů a objemu vzorku, přičemž získaný poměr závisí především na použité metodě. Výsledek porozity závisí také na velikosti molekul použitého adsorbátu (v tomto případě vzduchu). Porozita tkaných struktur je menší, než porozita pletených struktur, což je doprovázeno fyzikálními vlastnostmi, jako je velikostmi pórů, hustota materiálu, hygroskopické vlastnosti, tepelná

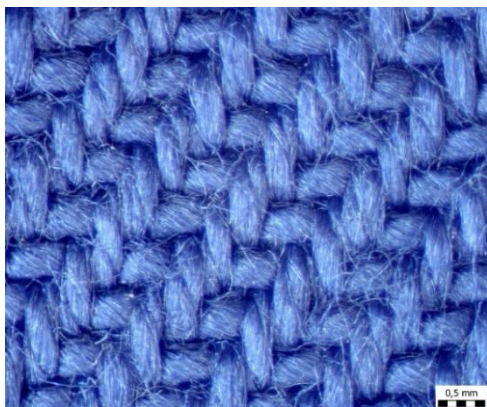
vodivost. Porozitu lze měřit přímo na základě experimentálního měření některých z vlastností materiálu, které přímo souvisejí s porozitou materiálu. Mezi tyto metody lze zařadit husto-měrnou a objemovou metodu. Jedná se o výpočet porozity na základě znalostí hustotních a objemových hodnot měřeného materiálu. V této práci byla porozita počítána pomocí výše zmíněného vztahu pro výpočet zaplnění.

Hodnoty byly naměřeny pomocí příslušných instrumentů a pomocí výše zmíněných vztahů dopočítány. Výsledky najdeme v tabulce 2.

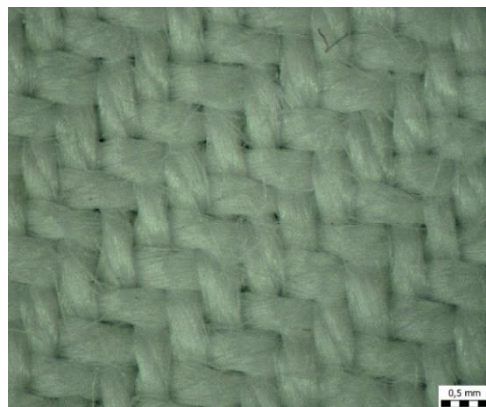
**Tabulka 2: Geometrické vlastnosti měřených textilií**

vzorek:	<b>plošná hmotnost [kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Tloušťka [mm]</b>	<b>zaplnění [-]</b>	<b>porozita [%]</b>	<b>hustota vláken/směsi [kg/m<sup>3</sup>]</b>
1	0,242	<b>0,23</b>	0,670	33	1560
2	0,205	<b>0,58</b>	0,259	74	1360
3	0,267	<b>0,36</b>	0,815	18	910
4	0,288	<b>0,24</b>	0,820	18	1460
5	0,172	<b>0,91</b>	0,139	86	1360
6	0,136	<b>0,24</b>	0,416	58	1360
7	0,138	<b>0,15</b>	0,666	33	1380
8	0,203	<b>4,16</b>	0,040	95	1360
9	0,696	<b>4,21</b>	0,132	86	1256
10	0,398	<b>2,53</b>	0,125	87	1256
11	0,255	<b>3,48</b>	0,054	95	1360
12	0,288	<b>3,40</b>	0,062	94	1360
13	0,178	<b>0,38</b>	0,344	66	1360
14	0,310	<b>3,71</b>	0,061	94	1360

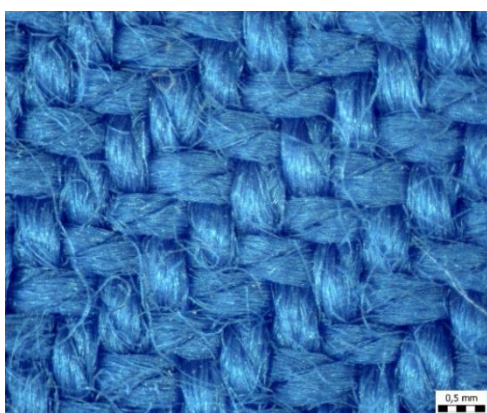
Dále byly pořízeny makroskopické snímky v příslušném měřítku. Na obrázku 16 jsou měřené textilie 1 - 6. Na obrázku 17 jsou měřené textilie 7 – 12 a na obrázku 18 jsou měřené textilie 13 a 14. Snímky jsou pořízeny dle měřítka v pravém rohu fotografie.



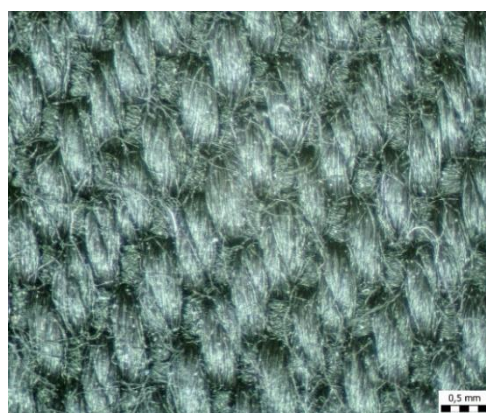
**Vzorek 1**  
100% bavlna,  
dvouvazný kepr



**Vzorek 2**  
100% polyester,  
dvouvazný kepr



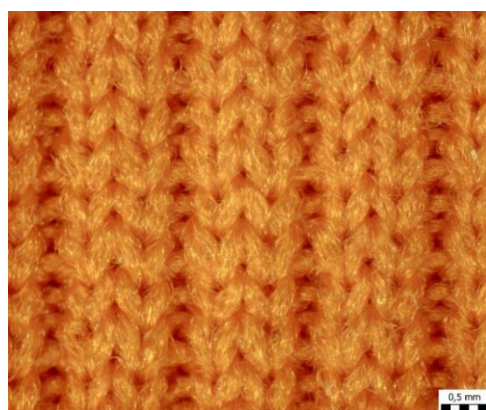
**Vzorek 3**  
100% polypropylen,  
dvouvazný kepr



**Vzorek 4**  
50% polyester, 50% bavlna  
dvouvazný kepr



**Vzorek 5**  
100% polyester,  
obouliční zátažná pletenina

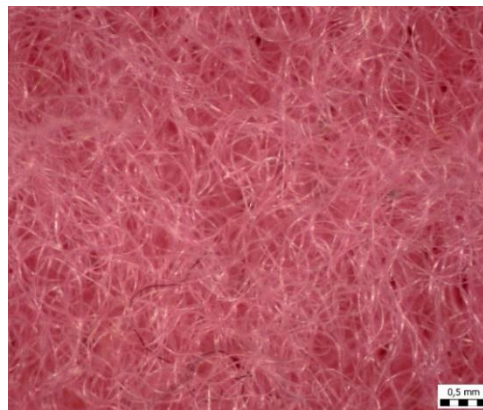


**Vzorek 6**  
100% polyester,  
obouliční zátažná (žebrovná) pletenina

*Obr. 16: fotografie vzorků 1-6*



**Vzorek 7**  
100% polyester,  
jednoduchá zátěžná pletenina



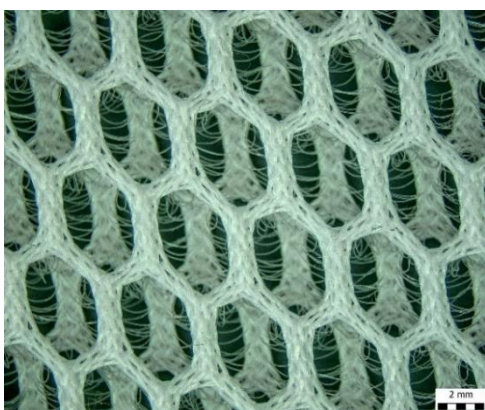
**Vzorek 8**  
100% polyester,  
počesaná pletenina



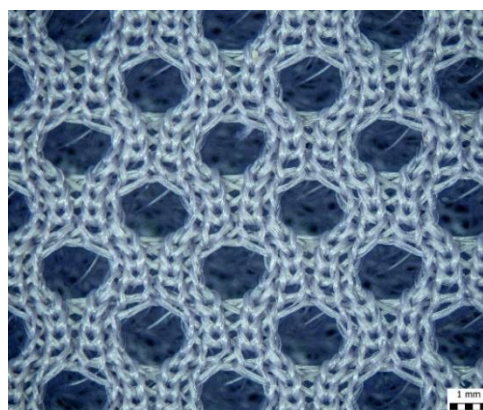
**Vzorek 9**  
1.vrstva: pletenina 80% polyester, 20%polyamid  
2.vrstva: rouno 100% polyester  
3.vrstva: membrána 100% polyamid  
4.vrstva:osnovní pletenina 100% polyester



**Vzorek 10**  
1.vrstva: pletenina 80% polyester, 20%polyamid  
2.vrstva: rouno 100% polyester  
3.vrstva: membrána 100% polyamid  
4.vrstva: osnovní pletenina 100% polyester

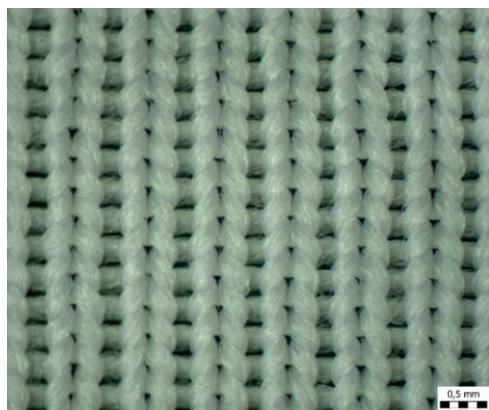


**Vzorek 11**  
100% polyester,  
distanční pletenina

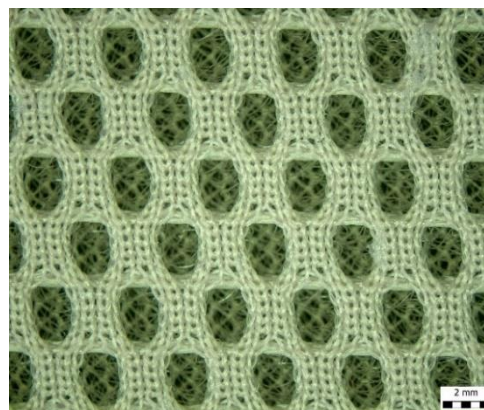


**Vzorek 12**  
100% polyester,  
distanční pletenina

*Obr. 17: fotografie vzorků 7-12*



Vzorek 13  
100% polyester,  
jednolícni zátažná pletenina



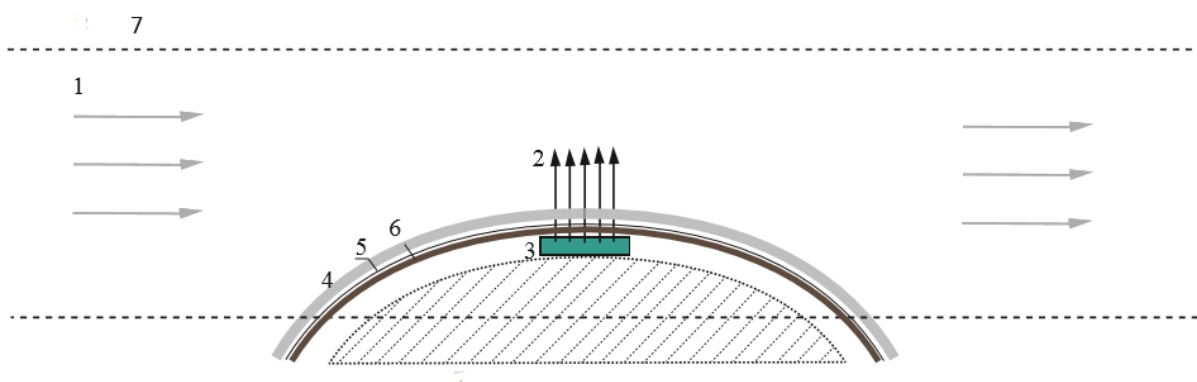
Vzorek 14  
100% polyester,  
distanční pletenina

Obr. 18: fotografie vzorků 13 a 14

## 5.2 Měření na přístroji PERMETEST

Při měření na přístroji Permetest je sledováno několik hodnot. Dle těchto hodnot pak získáváme údaje o hodnotě paropropustnosti a výparném odporu textilie. Toho je dosaženo pomocí procházejícího tepelného toku. Při měření tepelného odporu textilií  $R_{ct}$  v přístrojích typu Skin model je zajišťován odpar vlhkosti z povrchu hydrofilních textilií pomocí paralelního proudu vzduchu o teplotě  $t_{vz}$  (20 – 25°C), kterému je vystaven volný povrch měřené textilie. Tento povrch textilie má teplotu  $t_{vzor}$ , pohybující se mezi 30 – 35°C.

Měření pro experimentální ověření nové metody spočívalo jednak v klasickém měření paropropustnosti, jednak v měření paropropustnosti modifikovaným postupem. Na obrázku 19 vidíme schéma klasického procesu při měření na přístroji PERMETEST.



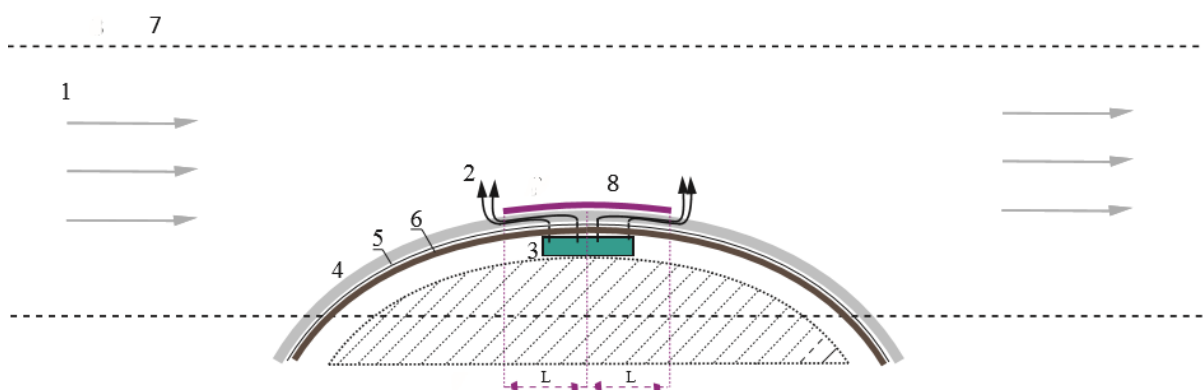
Obr. 19: Schéma běžného měření na přístroji PERMETEST

Zde na obrázku 19 můžeme vidět prostup páry při klasickém měření. Zvlhčovaná hlavice se senzorem 3 tvoří základ hlavice. Tato hlavice je uzavíratelná, aby bylo dosaženo vhodných podmínek pro měření. Po uzavření testovací hlavice a spuštění měření pak vodní pára společně s teplem 2 prochází směrem přes porézní vrstvu a separační folii 6, 5 až k testovanému vzorku 4. Při měření na přístroji PERMETEST je zkoušená textilie situována vždy lící stranou nahoru, z důvodu umístění sensoru, který simuluje pocení, ve spodní části hlavice, čímž zajistíme simulaci pocení směrem od těla do okolního prostředí. Z lící strany je testovaná textilie také ofukována vzduchem o rychlosti  $1 \text{ m.s}^{-1}$  a teplotě  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , což zde představuje běžné venkovní prostředí. Celý systém je uzavřen vrchní hlavicí 7 pro zajištění a kontrolu ideálních podmínek pro měření.

Před začátkem měření je třeba vždy kalibrace přístroje pomocí změřených hodnot etalonu. Pro měření na přístroji PERMETEST je etalonem textilie stoprocentního polypropylenu a keprové vazby, která splňuje hodnoty výparného odporu  $4,6 \text{ [m}^2\text{Pa/W]}$ . Po kalibraci přístroje následuje samotné měření. Měření obecně probíhá vždy ve dvou fázích. V první fázi je spuštěno tzv. referenční měření bez jakéhokoliv vzorku. Ve fázi druhé měření probíhá se zkoušenou textilií. Přístroj poté vyhodnotí výslednou paropropustnost textilie a její výparný odpor pomocí hodnot tepelného toku při volném odparu vlhkosti a tepelného toku za přítomnosti měřené textilie.

### 5.3 Modifikace metody měření na přístroji PERMETEST

Princip modifikace spočívá v částečném zamezení prostupu vodní páry textilií a tím změně směru trajektorie této páry. Níže na obrázku 20 lze vidět schéma následující změny, která byla provedena při modifikaci měření.



Obr. 20: Schéma modifikace postupu měření



Oblast testovacího přístroje zůstává stejná, avšak přibylo zde námi přidané zakrytí zkoušené textilie nepropustnou folií 8. Jak lze vidět ze schémat výše, vodní pára se v přístroji PERMETEST odpařuje z měřicí hlavice s centrálně umístěným relativně malým čidlem (20 mm) výparného toku. Právě tento systém nám umožňuje modifikaci měřícího postupu, vzhledem k jeho malému průměru. Pokud povrch měřené textilie zakryjeme, pak nad tímto čidlem pára nemůže procházet skrz zkoušenou textiliu přímo, jelikož v místě nad čidlem a jeho okolí je měřená textilie zakryta zafixovaným nepropustným štítkem kruhového tvaru. Díky tomu, že jsme znemožnili prostup plynné vlhkosti ven z textilie nad středem měřicí hlavice jsou pak molekuly vody po vstupu do textilie nuceny změnit směr a procházet po dráze  $L$  v rovině textilie až k hraně nepropustného štítku, kde následně opustí zkoušenou textiliu a difundují do vzduchu proudícího s rychlostí 1 m/s vytvářeného přístrojem.

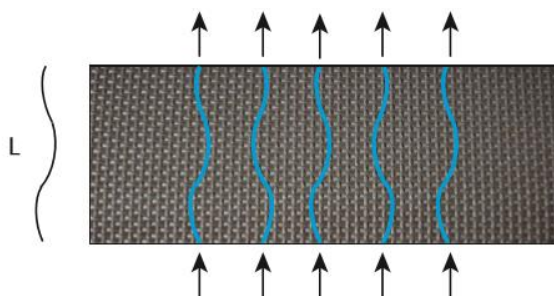
V tomto místě, kde pára opustí textiliu tedy vstoupí do mezní vrstvy s parním odporem  $R_{par, mv}$ . Jelikož se jedná o měření v rovině textilie efektivní porozita  $\varepsilon^*$  příčného řezu zkoušené textilie je zde daná poměrem průřezů pórů v rovině textilie ku plnému průřezu textilie.

Pokud nedojde ke kondenzaci páry uvnitř textilie, pak těmito póry po celé délce  $L$  proudí pára od svého zdroje k volnému povrchu textilie uvnitř přístroje. Jelikož přístroj pracuje s konstantní teplotou, budeme tedy předpokládat, že po většinu dráhy páry budou podmínky izotermní, takže ke kondenzaci nedojde. Parní odpor uvnitř textilie  $R_{par, rov}$  [s/m] je zde závislý na délce trajektorie a porozitě.

$$R_{par, rov} = L^* / (\varepsilon^* \cdot D_c), \quad (18)$$

kde:  $L^*$ ...představuje průměrnou délku dráhy molekuly vodní páry od jejího vstupu do textilie až k jejímu výstupu z textilie (několik milimetrů) [m]

$D_c$  ... je difúzní součinitel vztážený na koncentraci [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]



Obr.21: Směr trajektorie molekul vodní páry.

Jelikož v našem případě jsou molekuly vodní páry na přístroji PERMETEST po celé ploše sensoru (20 mm), nejsme schopni určit přesnou délku  $L$ , počítáme tedy ve vztahu s průměrnou délkou  $L^*$ , která je vyvozena z nejdelší možné délky trajektorie a nejkratší možné délky trajektorie. Ze vztahu lze vidět, že parní odpor textilie ve směru její roviny je zákonitě podstatně vyšší, než parní odpor ve směru jejich tloušťky, zvláště u běžných relativně tenkých textilií, kde porozita materiálu je nižší.

Součinitel difuze je ovšem v tabulkách vztažen na případ, kdy hnací silou není rozdíl parciálních tlaků vodní páry, ale rozdíl koncentrací, jak již zde bylo zmíněno.

Celkový parní odpor  $R_{par,celk}$  systému je složen z parního odporu, který působí v místě od vstupu páry do textilie do místa jejího výstupu  $R_{par,rov}$  a parního odporu  $R_{par,mv}$  v místě, kde páry vstupuje do okolního prostředí tzv. mezní vrstvy. Je tedy dán součtem všech jednotlivých odporů (všechny tyto odpory jsou zde vztaženy na hnací sílu danou bezrozměrným rozdílem koncentrací vodní páry):

$$R_{par,celk} = R_{par,rov} + R_{par,mv}, \quad (19)$$

$$R_{par,celk} = L^* / (\varepsilon^* \cdot D_c) + (1/\beta), \quad (20)$$

kde:  $\beta$ ... je součinitel přestupu vlhkosti [ $kg/(m^2 \cdot s)$ ]

$R_{par,rov}$  ... je výparný odpor od středu po hranu nepropustného zakrytí [ $m^2 Pa / W$ ]

$R_{par,mv}$  ... je výparný odpor mezní vrstvy [ $m^2 Pa / W$ ].

Rychlost vzduchu udáváme v [ $m/s$ ] a pro laminární proudění jej lze zjednodušeně stanovit pomocí analogie mezi přestupem tepla a vlhkosti, tzv. Lewisova vztahu:

$$\alpha = \beta_C \cdot c_{pA}, \quad (21)$$

kde:  $\beta_c$ ... je součinitel přestupu hmoty prouděním, který závisí na rychlosti vzduchu [ $kg/(m^2 \cdot s)$ ]

$c_{pA}$  ... je specifické teplo vlhkého vzduchu [ $J/(kg \cdot K)$ ]

$\alpha$  ... zde představuje součinitel přestupu do vzduchu prouděním [ $W/(m^2 \cdot K)$ ].

Avšak součinitel přestupu vzduchu  $\alpha$  lze v našem případě stanovit z přibližného vztahu pro malé rychlosti proudění:

$$\alpha = 8,3 v^{1/2} \quad (22)$$

Touto malou rychlostí se míní proudění vzduchu uvnitř měřicího přístroje, které je nastaveno na 1 m/s. Odpařené množství vlhkosti  $m^*$  [kg/(m<sup>2</sup>.s)] pak plyne z rovnice:

$$m^* = \Delta c / R_{par,celk} \quad (23)$$

Jak bylo výše zmíněno, tento celkový parní odpor  $R_{par,celk}$  v tomto případě musí být přepočten na hnací sílu tvořenou rozdílem parciálních tlaků vodní páry, nikoliv na rozdíl koncentrací:

$$D_p = D_c \cdot M_w / RT, \quad (24)$$

kde:  $M_w$ ...je molární hmotnost vodní páry [kg.mol<sup>-1</sup>]  
 $R$ ...je obecná plynová konstanta [JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>]  
 $T$ ...představuje teplotu vodní páry [K].

Odpařené množství vlhkosti  $m^*$  [kg/(m<sup>2</sup>.s)] pak plyne z rovnice:

$$m^* = \Delta p \cdot M_w / (R_{par,celk} \cdot R \cdot T), \quad (25)$$

kde:  $\Delta p$  ...představuje rozdíl parciálních tlaků vodní páry  $p_{WSAT} - p_{WE}$  [Pa].

Hodnota  $p_{WE}$  platí pro teplotu měřicí hlavice, a  $p_{WSAT}$  je dána stupněm nasycení vodní páry v přístroji PERMETEST (obvykle 40%), za stálé teploty, neboť měření paropropustnosti probíhá za izotermických podmínek. Po vynásobení výše uvedeného vztahu pro přenášenou hmotnost vodní páry výparným teplem vody  $l$  (cca 2 500 000 J/kg) dostaneme konečný vztah pro chladicí tok  $q_{chl}$  registrovaný přístrojem:

$$q_{chl} = m^* \cdot l = \Delta p \cdot M_w / (R_{par,celk} \cdot R \cdot T) \quad (26)$$

#### 5.4 Postup měření experimentu na přístroji PERMETEST

Bylo vytvořeno několik vzorků s podmínkou velikosti 15x15 cm pro přesné měření na přístroji. Všechny vzorky byly nejprve měřeny bez jakéhokoliv zakrytí pro paropropustnost a výparný odpor na přístroji PERMETEST. Následně byly navrženy velikosti komponentů, které sloužili v dalších měřeních k zakrytí povrchu textilie. Nejmenší z komponentů má průměr 25 mm, aby přesahoval prostor nad senzorem, který má 20 mm. Poté byly zhotoveny komponenty z nepropustné fólie kruhového tvaru. Jednalo se o komponenty tří velikostí (první o průměru 25 mm, druhý o průměru 35 mm a třetí o průměru 45 mm). Po vytvoření komponentů byly textilní materiály postupně měřeny se všemi velikostmi komponentů. Zde se dá experiment rozdělit do čtyřech částí:

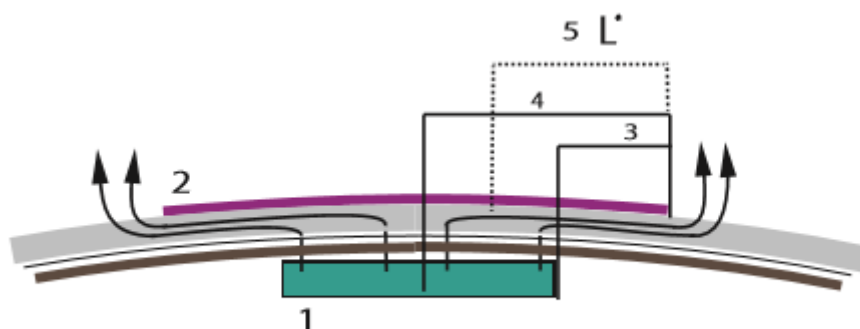
- Měření vzorků klasickým způsobem bez jakéhokoliv zakrytí
- Fixace nepropustných kruhových komponentů (o průměru 25 mm) na lícovou stranu všech vzorků a poté měření se zakrytím
- Fixace nepropustných kruhových komponentů (o průměru 35 mm) na lícovou stranu všech vzorků a poté měření se zakrytím
- Fixace nepropustných kruhových komponentů (o průměru 45 mm) na lícovou stranu všech vzorků a poté měření se zakrytím

Zakrytím části textilie jsme zamezili průchod molekul vody v kolmém směru a byly tak nuceny změnit směr své trajektorie.



*Obr. 22: Umístění měřeného vzorku se zakrytím na střed*

Velikostí průměru daného zakrytí byla zvyšována délka této trajektorie molekuly vody. Protože senzor ve spodní části přístroje má průměr 20 mm, výsledné trajektorie pak byly spočteny jako průměrná hodnota nejdelší možné trajektorie molekuly vody a nejkratší možné trajektorie molekuly vody znázorněných na obrázku 23.



Obr. 23: Průměrná trajektorie  $L^*$

Kde 1 je senzor přístroje, 2 nepropustné zakrytí měřené textilie, 3 nejkratší možná délka trajektorie, 4 je nejdelší možná trajektorie a 5 průměrná trajektorie molekule vody  $L^*$ .

Jelikož senzor produkuje páru po celé své ploše, nelze určit přesně danou délku trajektorie molekuly. Tato molekule vody může mít počáteční polohu v místě okraje senzoru, ale také v přímém centru tohoto senzoru. Z tohoto důvodu používáme již zmíněnou průměrnou hodnotu délky trajektorie molekuly vody. Tímto způsobem byly vytvořeny průměrné délky trajektorií molekul vody u všech velikostí zakrytí a získané hodnoty lze vidět v tabulce 3.

Tab.3: Délky trajektorie molekul vody

[mm]			
zakrytí :	25	35	45
nejdelší možná trajektorie:	12,5	17,5	22,5
nejkratší možná trajektorie:	2,5	7,5	12,5
<b>průměrná trajektorie</b>	<b>7,5</b>	<b>12,5</b>	<b>17,5</b>

Mezi jednotlivými částmi měření byly vzorky vždy ručně vyprány, pro odstranění fixační vrstvy, která sloužila k upevnění nepropustné fólie k lícni straně měřené textilie, a ponechány volnému sušení v rovině. Volné sušení v rovině je důležité pro ponechání všech původních parametrů textilie. Pro měření na přístroji PERMETEST je také důležité, aby byly vzorky důkladně usušeny, jelikož vlhkost obsažena v textiliu by výrazně ovlivnila výsledné hodnoty a výsledky by byly neprůkazné.

## 5.5 Výsledky měření

Přístroj PERMETEST zaznamenává a ukládá naměřené hodnoty paropropustnosti a výparného odporu do paměti počítače. Z uložených dat pak automaticky vypočítá střední hodnotu a hodnotu variačního koeficientu naměřených dat. Variační koeficient lze definovat jako relativní míru variability. Každý ze čtrnácti vzorků byl proměřen 3x, výsledné hodnoty jsou tedy průměrem ze tří měření.

Střední hodnoty paropropustnosti **P** a výparného odporu **Ret** klasickým procesem bez zakrytí můžeme vidět v tabulce 4.

**Tab.4: Měření paropropustnosti a výparného odporu se zakrytím materiálu 25mm**

BEZ ZAKRYTÍ				
Vzorek:	P[%]	Cv[%]	Ret [m <sup>2</sup> Pa/W]	Cv[%]
1	60,3	2,1	4,4	5,1
2	59,4	2	4,4	3,7
3	59,3	0,6	4,4	1,8
4	63,5	3,3	3,8	9,1
5	71,5	0,5	2,6	1
6	77	1,5	2	5,4
7	81,7	0,8	1,5	4,3
8	43,3	1,9	8,9	3,5
9	46,7	1,1	7,6	2,5
10	38,9	2,8	10,5	4
11	50,1	3,8	6,7	9,2
12	43,2	2,3	8,3	3,5
13	75,6	0,7	2	2,7
14	44,5	1,3	7,9	2,1

V dalším kroku byly vzorky vystaveny volnému sušení na rovné podložce a po vysušení doplněny o nepropustnou (aluminiovou) fólii o průměru 25 mm. Je důležité, aby vzorky byly umístěny kruhovým zakrytím situovaným přímo na střed. To proto, aby kruhové zakrytí bylo centrováno nad senzor přístroje a délka trajektorie vody pak byla následně co nejpřesněji odhadnuta. Výsledky z prvního měření se zakrytím vrchní části textilie můžeme vidět v tabulce 5.

**Tab.5: Měření paropropustnosti a výparného odporu se zakrytím materiálu 25mm**

ZAKRYTÍ (25 mm)				
Vzorek:	P[%]	Cv[%]	Ret [m <sup>2</sup> Pa/W]	Cv[%]
<b>1</b>	21,3	6,2	24,6	7,3
<b>2</b>	16,7	3	30,9	3,4
<b>3</b>	20,4	2,3	23,4	2,7
<b>4</b>	21,7	0,5	24	0,9
<b>5</b>	20,9	4,8	25	5,5
<b>6</b>	21,2	7,7	24,7	9,5
<b>7</b>	21,7	2,5	23,6	2,9
<b>8</b>	23,5	4,8	21,3	6,1
<b>9</b>	21,3	6,6	33,2	7
<b>10</b>	21,8	0,9	32,1	1,6
<b>11</b>	26,6	1	18	0,7
<b>12</b>	24,1	4,3	19,7	5,6
<b>13</b>	20,6	8,2	24,2	10,9
<b>14</b>	24,8	3,4	19,1	4

V tomto měření byla již výrazně prodloužena trajektorie molekule vody z důvodu zamezení průchodu vodní páry kolmo textilií. Jedná se o průměrnou trajektorii dlouhou  $L^*$  7,5 mm. Můžeme vidět předpokládaný vysoký pokles hodnoty  $P$ , avšak ne nulový, což poukazuje na skutečnost, že k transportu páry rovinou textilie dochází.

Dále byly tytéž vzorky opět ručně vyprány a vysušeny. Pro nové měření byly opatřeny zakrytím o průměru 35 mm a měřeny stejným způsobem. Výsledky měření jsou vyobrazeny v tabulce 6.

**Tab.6: Měření paropropustnosti a výparného odporu se zakrytím materiálu 35mm**

ZAKRYTÍ (35 mm)				
Vzorek:	P[%]	Cv[%]	Ret [m <sup>2</sup> Pa/W]	Cv[%]
<b>1</b>	17,7	22,1	32,3	30,1
<b>2</b>	12,4	0,9	44,1	2,3
<b>3</b>	13,2	5	43,3	7
<b>4</b>	15,3	3,2	38,2	2,9
<b>5</b>	9,6	22,7	88,8	19,2
<b>6</b>	17,2	2,8	46	3,3
<b>7</b>	8,2	6,9	97	7,1
<b>8</b>	7,8	15,6	76,5	16,2
<b>9</b>	15,2	7,26	40,9	8,4
<b>10</b>	15	2,7	41	3,2
<b>11</b>	16,3	5,3	33,6	5,7
<b>12</b>	15,8	4,4	33	4,4
<b>13</b>	11	4,5	50,6	6,4
<b>14</b>	16,7	3,9	30,1	5

Použitím nepropustného zakrytí o průměru 35 mm jsme prodloužili průměrnou délku trajektorie L\* na 12,5 mm. Dle našeho předpokladu opět došlo k nárůstu výparného odporu a poklesu hodnoty paropropustnosti. Totéž bylo po vyprání a vysušení textilií provedeno v následujícím kroku při zakrytí fólií o průměru 45 mm. Délka trajektorie L\* je nyní 17,5 mm. Výsledky měření se zakrytím s největším průměrem lze vidět v tabulce 7.



**Tab.7: Měření paropropustnosti a výparného odporu se zakrytím materiálu 45mm**

ZAKRYTÍ (45 mm)				
Vzorek:	P[%]	Cv[%]	Ret [m <sup>2</sup> Pa/W]	Cv[%]
<b>1</b>	12,3	29,3	50,1	30,2
<b>2</b>	11,4	8	48,3	8,3
<b>3</b>	13,8	10,8	44,2	12,5
<b>4</b>	10,6	7,4	55,8	8,3
<b>5</b>	7,1	19	96	22,3
<b>6</b>	7,4	33,9	98	41,7
<b>7</b>	10,4	19,3	62,9	20
<b>8</b>	3,9	16,6	157,4	18,8
<b>9</b>	14,9	9,9	39,9	11,4
<b>10</b>	16,8	7,2	34,3	7,6
<b>11</b>	11,7	3,4	49,4	3,4
<b>12</b>	15,22	2,7	33,1	2,1
<b>13</b>	11,8	20,9	49,5	21,7
<b>14</b>	13,7	2,9	38,8	3,8

Naměřené výsledky posledního měření s nejdelsí trajektorií molekuly vody opět vykazují předpokládaný pokles paropropustnosti a s tím spojený nárůst výparného odporu. V některých případech lze dokonce pozorovat velmi nízké hodnoty paropropustnosti. To lze jednoduše vysvětlit strukturou daných textilií. Některé struktury neumožňují transport vlhkosti v plynné podobě v delších úsecích, tedy ve směru roviny textilie. Jedná se především o velmi tenké, či hustě zaplněné textilie. Avšak z ostatních měření lze usoudit, že při určité struktuře textilie se pára opravdu šíří námi určeným směrem, a tedy rovinou textilie.

Pomocí grafů byla prezentována závislost výparného odporu na délce trajektorie molekule vody, která procházela textilií díky zakrytí různých velikostí. Ideálním případem pro naše měření by byl rovnoměrný nárůst výparného odporu s nárůstem délky trajektorie molekule vody.

### 5.5.1 Závislost výparného odporu na délce trajektorie molekule vody

K vyhodnocení výsledků byla použita základní statistika pomocí Excelu. Přístroj PERMETEST během měření ukládá naměřené hodnoty a po naměření daného vzorku nám zobrazí střední hodnotu z měření paropropustnosti  $P$  [%] a výparného odporu  $Ret$  [ $m^2Pa/W$ ]. Ke každé z těchto hodnot počítač také vyhodnotí variační koeficient daných měření  $CV$  [%].

Variační koeficient se užívá pouze pro kladné hodnoty a lze o něm hovořit jako o relativní směrodatné odchylce. Jak můžeme vidět ze vztahu níže, udává nám z kolika procent se směrodatná odchylka podílí na aritmetickém průměru [34][35].

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}}, \quad (27)$$

kde:  $s$ ...je směrodatná odchylka

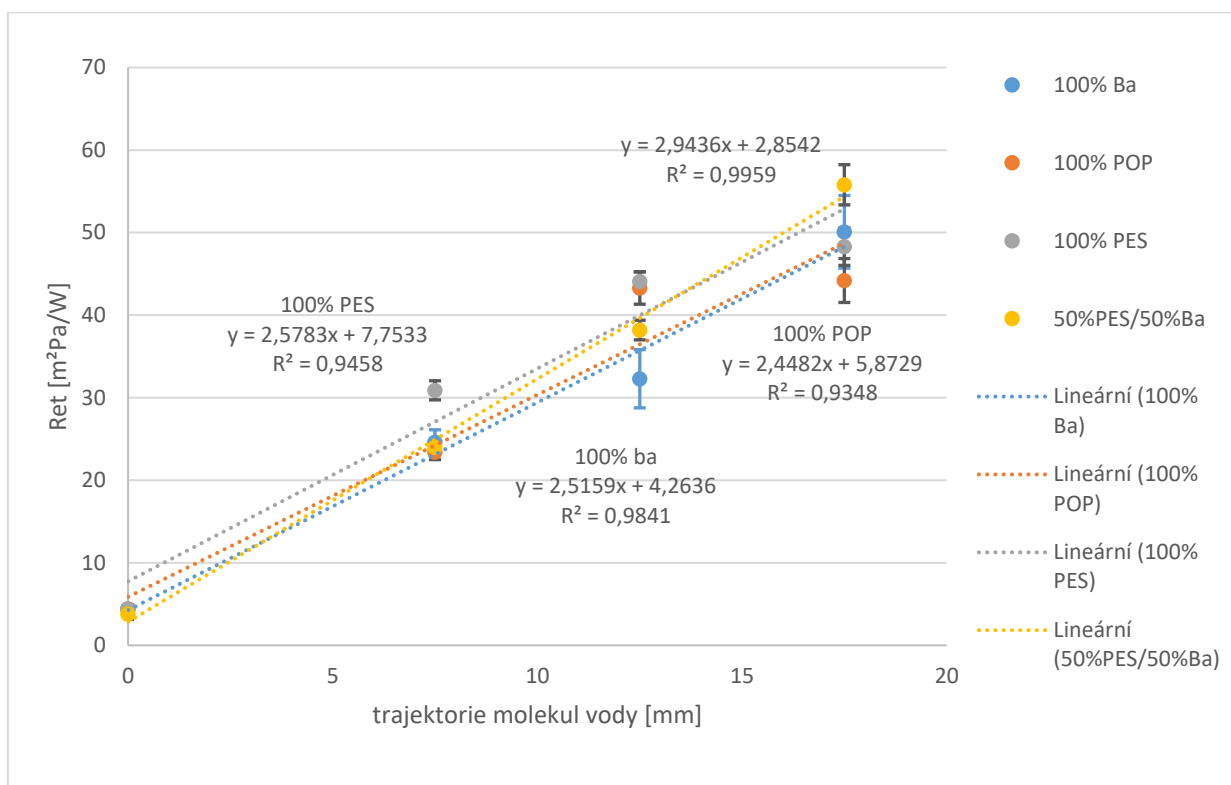
$\bar{x}$ ...je aritmetický průměr [34].

Díky tomu, že je relativní mírou variability, umožňuje nám srovnávat variability dvou souborů s podstatně odlišnou úrovní hodnot. Dále byly spočteny 95% intervaly spolehlivosti pro střední hodnoty, které byly použity v grafu pro sestavení chybových úseček.

K získání intervalů spolehlivosti nám sloužila směrodatná odchylka, která byla pro vyvozena díky znalosti variačního koeficientu a aritmetického průměru za pomoci vztahu pro výpočet variačního koeficientu.

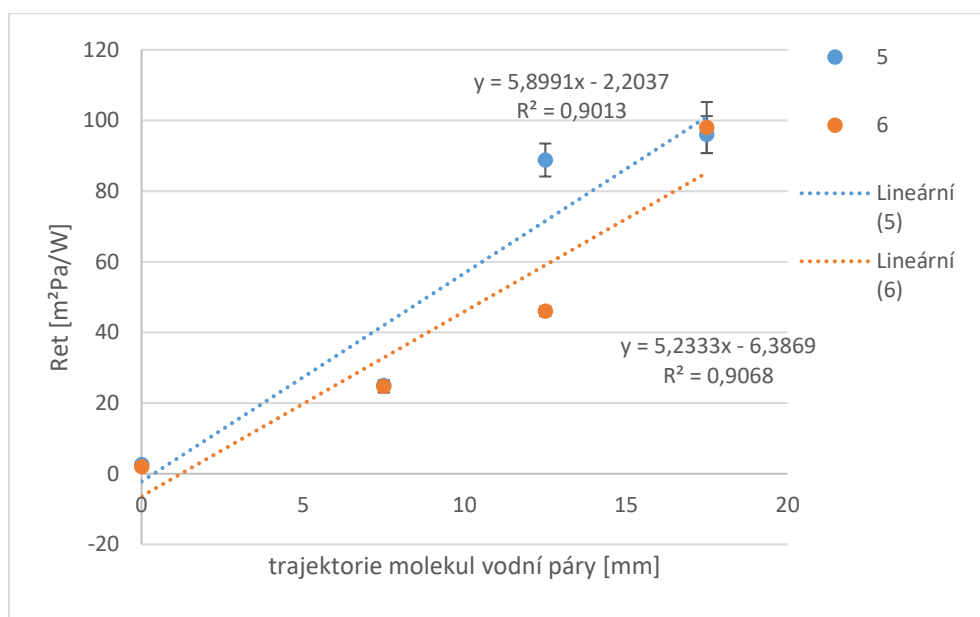
Pro hodnocení naměřených výsledků pak byla použita lineární regrese. Pomocí jednoduché lineární regrese popisujeme vztah dvou kvantitativních proměnných definováním přímky, která nejlépe vystihuje průběh jejich závislosti. Jedná se o aproximaci daných hodnot přímkou metodou nejmenších čtverců. Podstatou metody nejmenších čtverců je nalézt právě takovou přímku, aby součet druhých mocnin zmíněných odchylek byl co nejmenší. Dle koeficientů determinace  $R^2$  pak byla hodnocena míra lineární závislosti dat [2].

Nejprve byly porovnány vzorky 1 – 4 vzhledem k jejich společnému faktoru, kterým byla vazba tkaniny a přibližně stejná hodnota plošné hmotnosti. Tyto vzorky se liší především složením. Z obrázku 24 je patrné, že hydrofobní i hydrofilní materiály se chovají podobně. Z tohoto chování lze usoudit, že nedochází ke kapilární kondenzaci. V takovém případě by se různé materiály chovaly různě.



Obr. 24: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č. 1,2,3,4

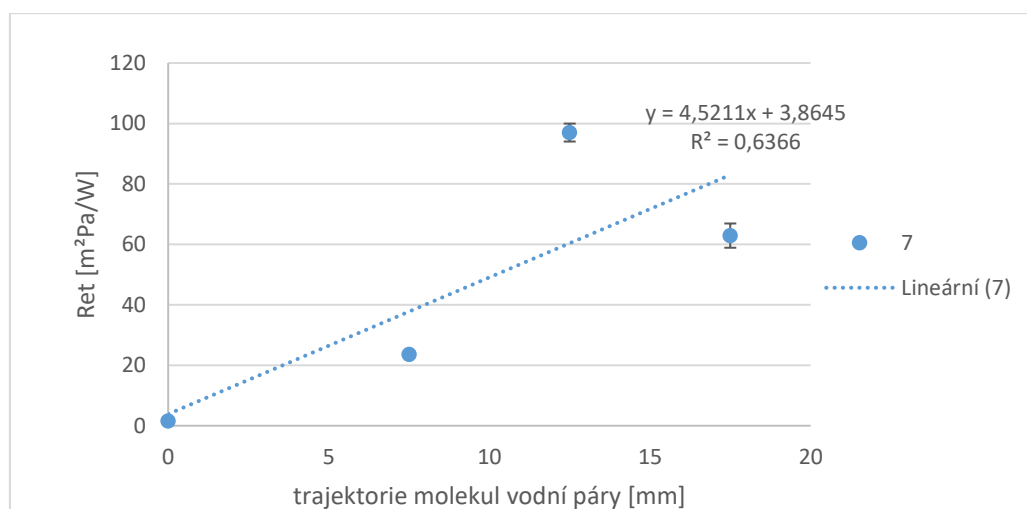
V grafu jsou vyneseny hodnoty vzorků, které mají stejnou vazbu a podobnou plošnou hmotnost. Liší se především materiálem. Grafy byly proloženy lineární spojnicí trendu a doplněny o intervaly spolehlivosti. Z grafu vyplývá, že materiálové složení vzorku velmi neovlivňuje výsledek měření. Dle koeficientů determinace v grafu, blízcích se k hodnotě 1, si lze povšimnout, že vzorky vykazují vysokou lineární závislost. Již bylo zmíněno, že takové chování je u modifikované metody žádané. Tedy výparný odpor se zvyšuje lineárně společně s rostoucí délkou trajektorie molekule vody. Na následujícím grafu na obrázku 25 lze vidět další dva vzorky, které mají stejnou vazbu. Jedná se o obouliční pleteniny podobného složení a plošné hmotnosti.



Obr. 25: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.5,6

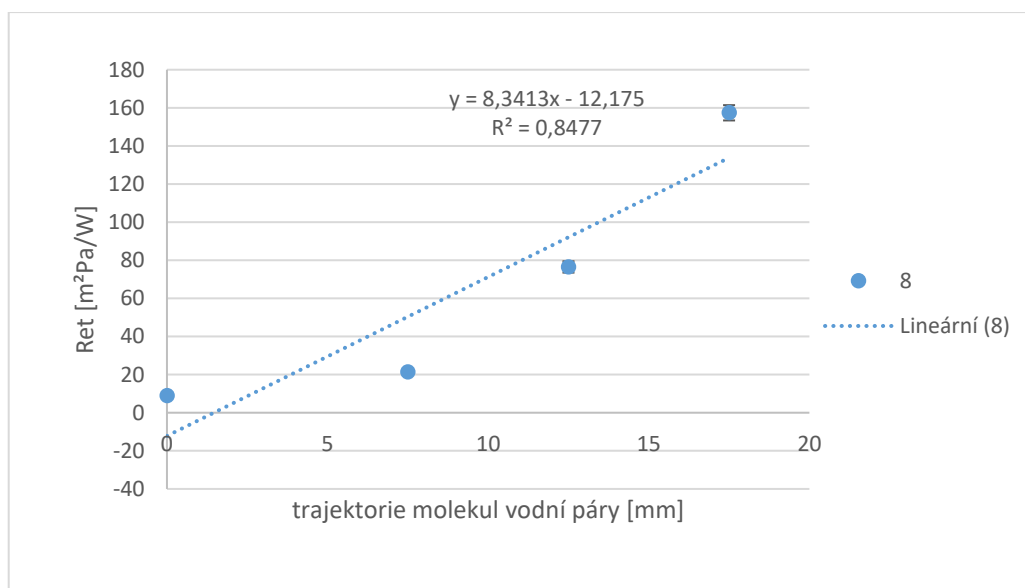
I zde materiály vykazují linearitu. Dle koeficientu determinace lze usoudit, že závislost je o něco menší, než u předchozích vzorků, avšak stále vysoká. Také si můžeme všimnout, že při postupném prodlužování trajektorie, kterou je molekule vody nucena překonat, se paropropustnost výrazně snižuje, a tedy hodnota výparného odporu v tomto případě výrazněji roste. Oba tyto jevy pravděpodobně způsobuje velmi malá tloušťka měřených vzorků 5 a 6 a s tím spojená jejich velmi nízký objem pórů.

Následující graf na obrázku 26 nevykazují příliš velké závislosti. Koeficient determinace je zde velmi nízký. I v tomto případě se jedná o materiál velmi malé tloušťky, dokonce, co se této práce týče, nejmenší a proto pára nemá dobré podmínky pro prostup. Lze zde dokonce předpokládat, dle poslední hodnoty nízkého výparného odporu, že v tomto případě došlo ke kondenzaci páry uvnitř textilie.



Obr.26: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry – vzorek č.7

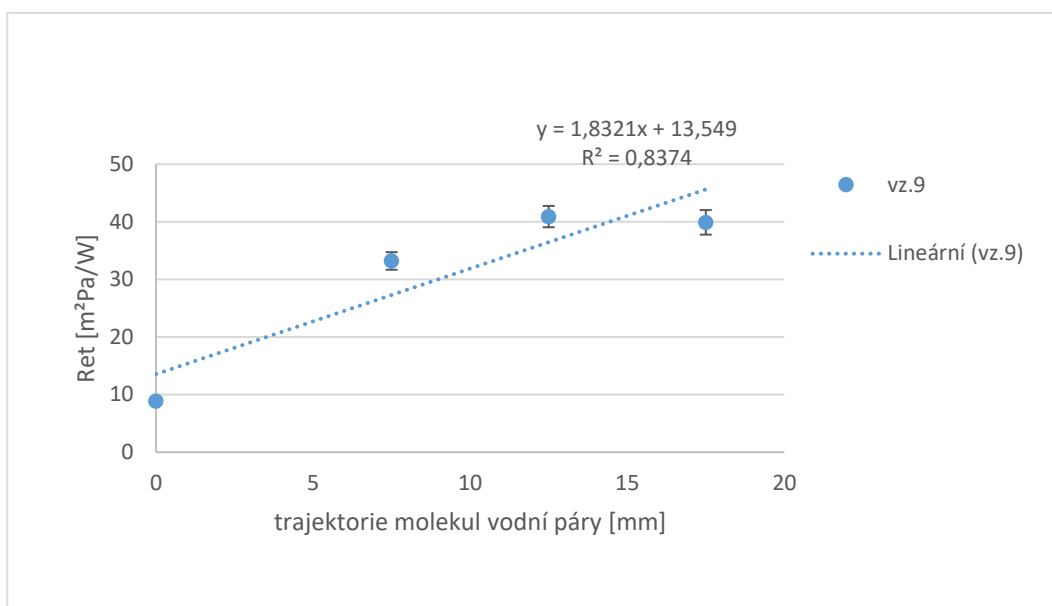
Na následujícím grafu na obrázku 27 vidíme poměrně vysokou závislost, avšak hodnoty výparného odporu jsou velmi vysoké. Jedná se o velmi hustou strukturu, která velmi neumožňuje prostup páry, tudíž s prodlužující se trajektorií taktéž velmi stoupá výparný odpor.



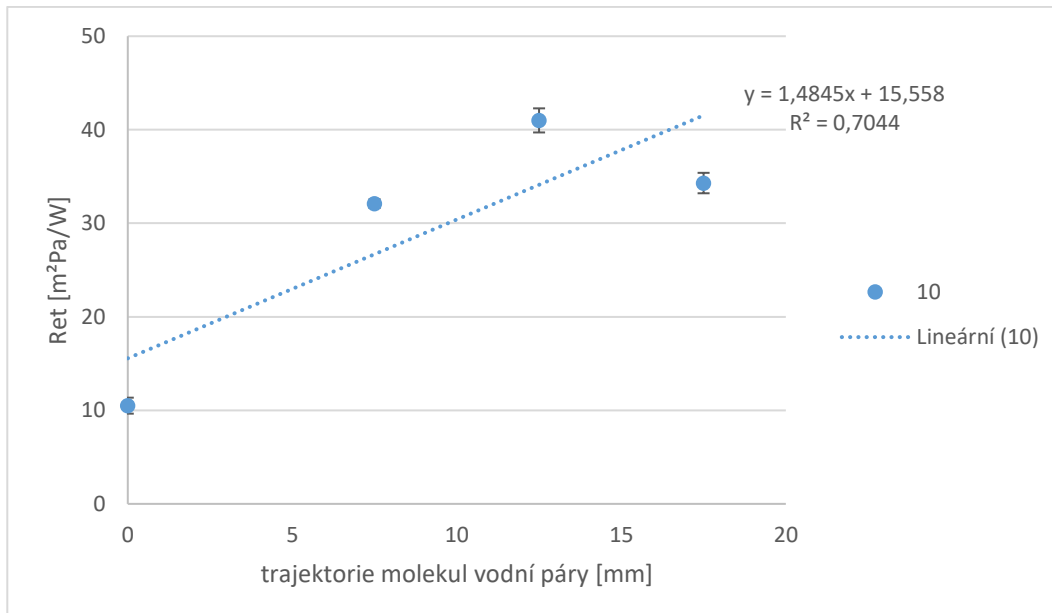
Obr. 27: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.8

Následující dva grafy na obrázcích 28 a 29 se chovají obdobně. Jedná se o dvě „sendvičové“ struktury textilií stejného složení. Liší se pouze tloušťkou střední vrstvy tvořené vlákenným rounem. Výsledky měření jsou s nejvyšší pravděpodobností významně

ovlivněny prostřední vrstvou textilie, která je velmi porózní. Avšak lineární závislost zde není velmi vysoká.



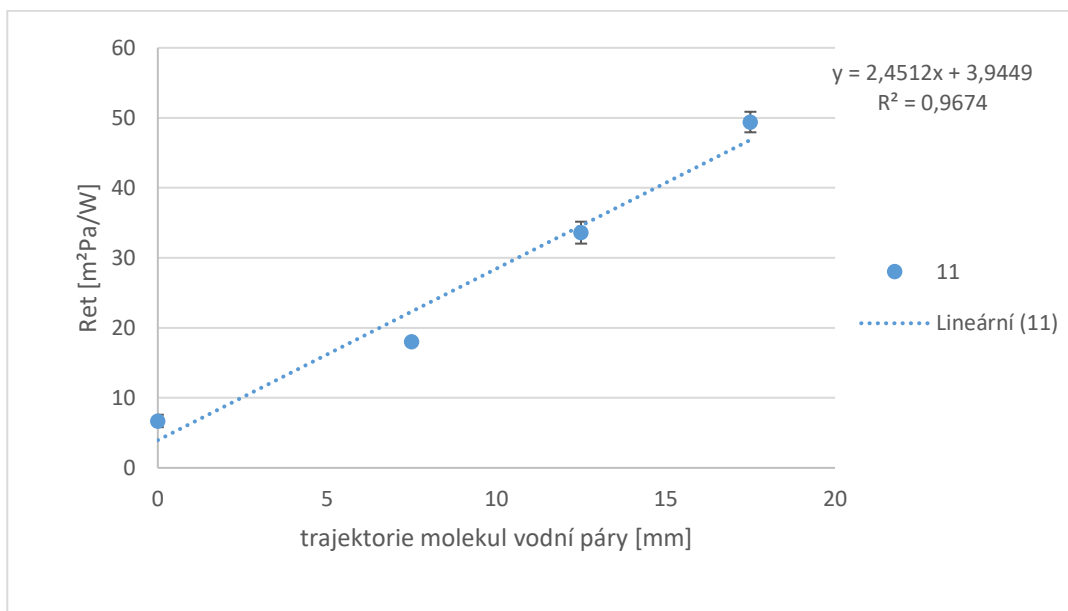
Obr. 28: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.9



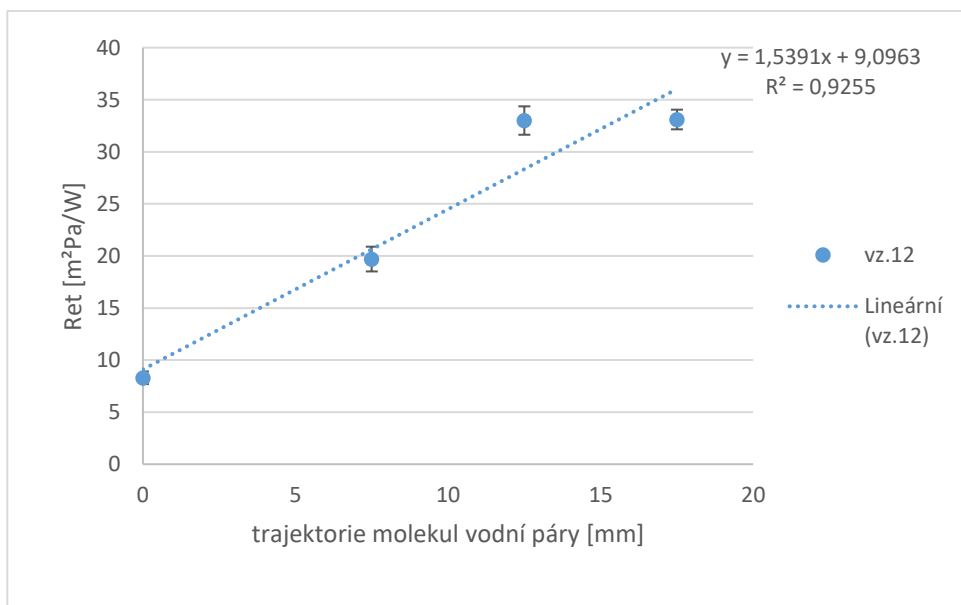
Obr. 29: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.10

Výrazně lepší výsledky měření paropropustnosti a výparného odporu v rovině dle očekávání vykazují měřené textilie 11 a 12. Je to dáno strukturou těchto materiálů. Jedná se o distanční pleteniny s vyšší tloušťkou textilie a vysokým obsahem pórů uvnitř textilie,

kteřé jsou hlavním aparátem pro prostup páry, proto tyto textilie umožňují páře lepší prostup i ve směru její roviny.

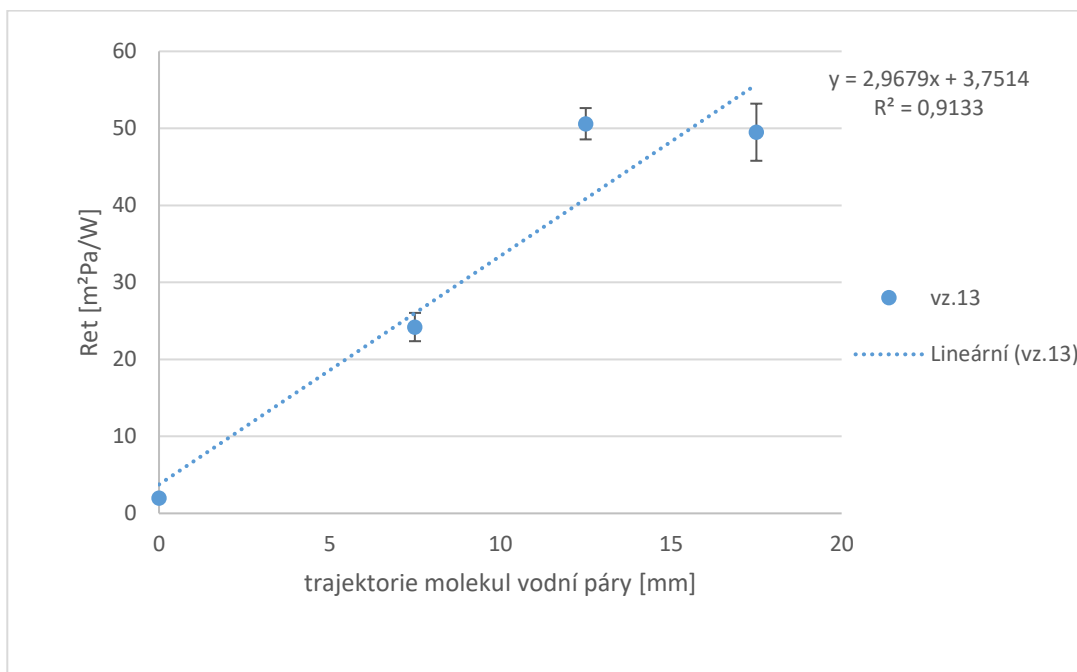


Obr. 30: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.11

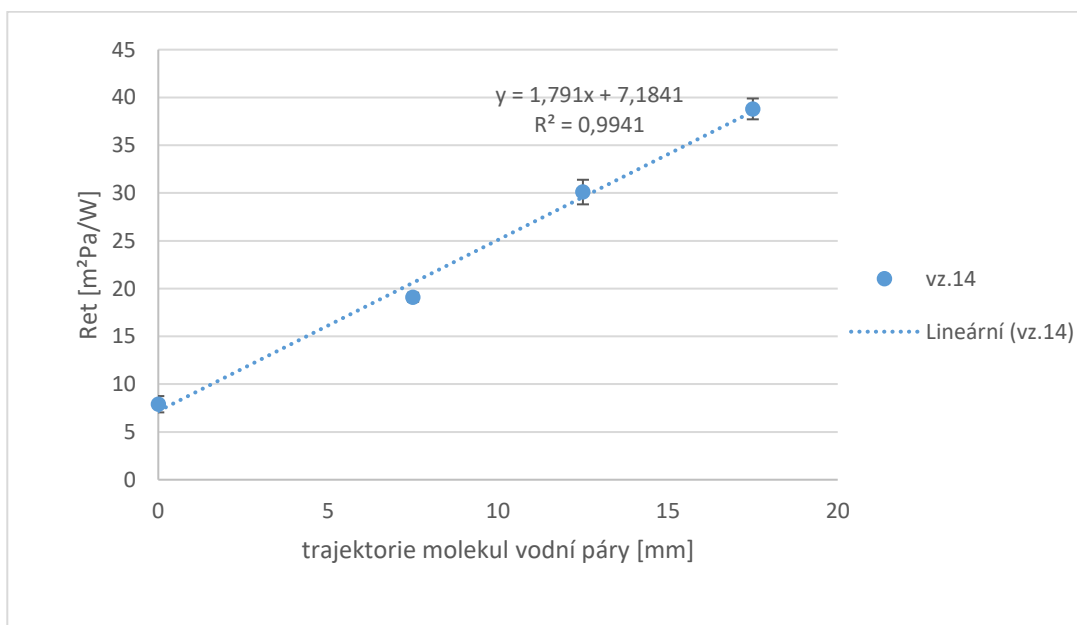


Obr. 31: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.12

Zde v grafu na obrázku 32 vidíme o něco menší lineární závislost mezi výparným odporem a délkou trajektorie molekuly vody. Jedná se o podobný případ jako u vzorku 7, kdy výsledky měření jsou ovlivněny velmi malou tloušťkou textilie.



Obr. 32: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.13



Obr. 33: Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.14



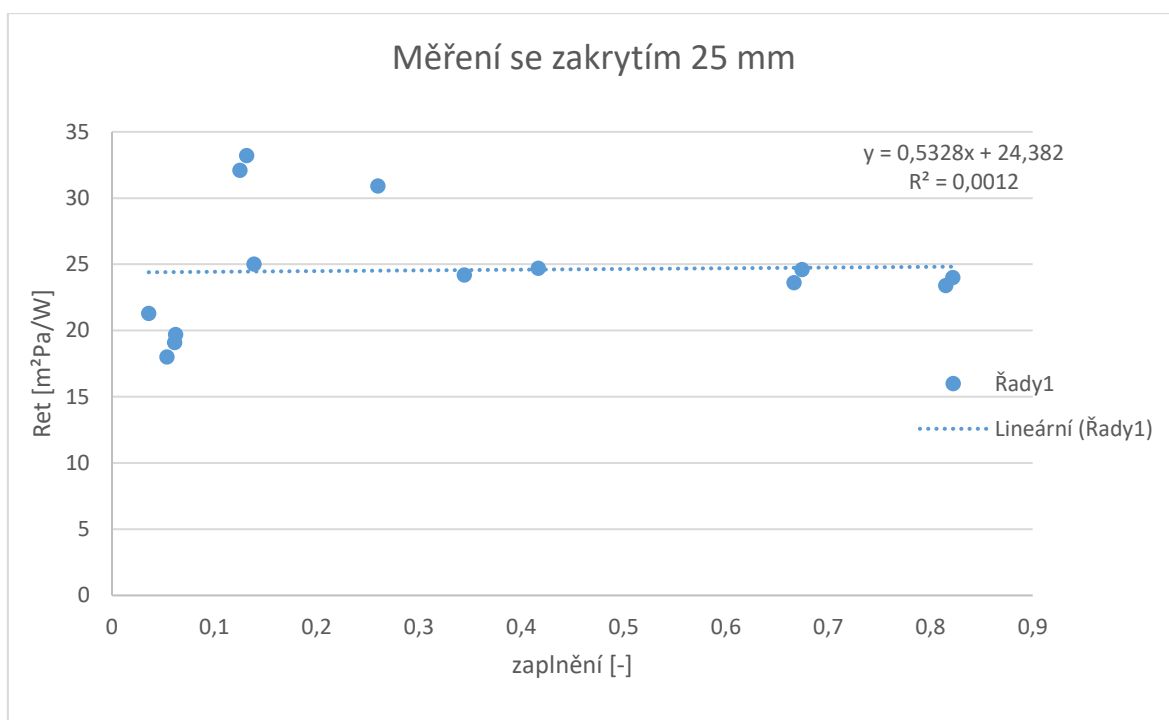
V grafu na obrázku 33 vidíme opět nižší hodnoty výparného odporu, tudíž hodnoty paropropustnosti v rovině budou vyšší. Poslední testovaná textilie je stejně jako textilie 11 a 12 distanční pletenina, proto disponuje vhodnými podmínkami pro prostup páry uvnitř textilie pomocí pórů.

Žádaným efektem pro náš výzkum je tedy lineární chování dat. Pokud by docházelo ke správnému prostupu páry rovinou textilie, pak by s rostoucí délkou trajektorie molekuly vodní páry vzrůstal výparný odpor měřené textilie. Grafy byly proto proloženy lineárními spojnicemi trendu a doplněny o stupeň determinace. Stupeň determinace se pohybuje v intervalu od 0 do 1. Čím více se blíží hodnotě 1, tím je lineární závislost hodnot vyšší. Z grafů je tedy jasné, že lineární závislost je vysoká.

Před a po každém procesu měření byly vzorky zváženy, abychom získali přibližný přehled o tom, zda plynná vlhkost uvnitř textilie zkondenzovala a byla částečně pojata textilií, či se tak nestalo a voda prošla materiálem v plynném stavu. U většiny vzorků byl zjištěn nárůst hmotnosti a tedy přítomnost vlhkosti uvnitř textilie. Nárůst hmotnosti byl však minimální a pro vyvození závěrů neprůkazný. Přestože byly výsledky nedostačující, zavedly na popud pro další možnosti zjišťování, zda kapalina prochází rovinou textilie v plynné podobě, či kondenzuje a je dále transportována v kapalně podobě. Syntetické materiály nemají schopnost odvádět vlhkost v podobě páry pomocí vláken samotných, a tak je zapotřebí pórů ve struktuře textilie. Z důvodu závislosti paropropustnosti materiálů na jejich porozitě, byla v této studii věnována pozornost geometrickým vlastnostem měřených textilií.

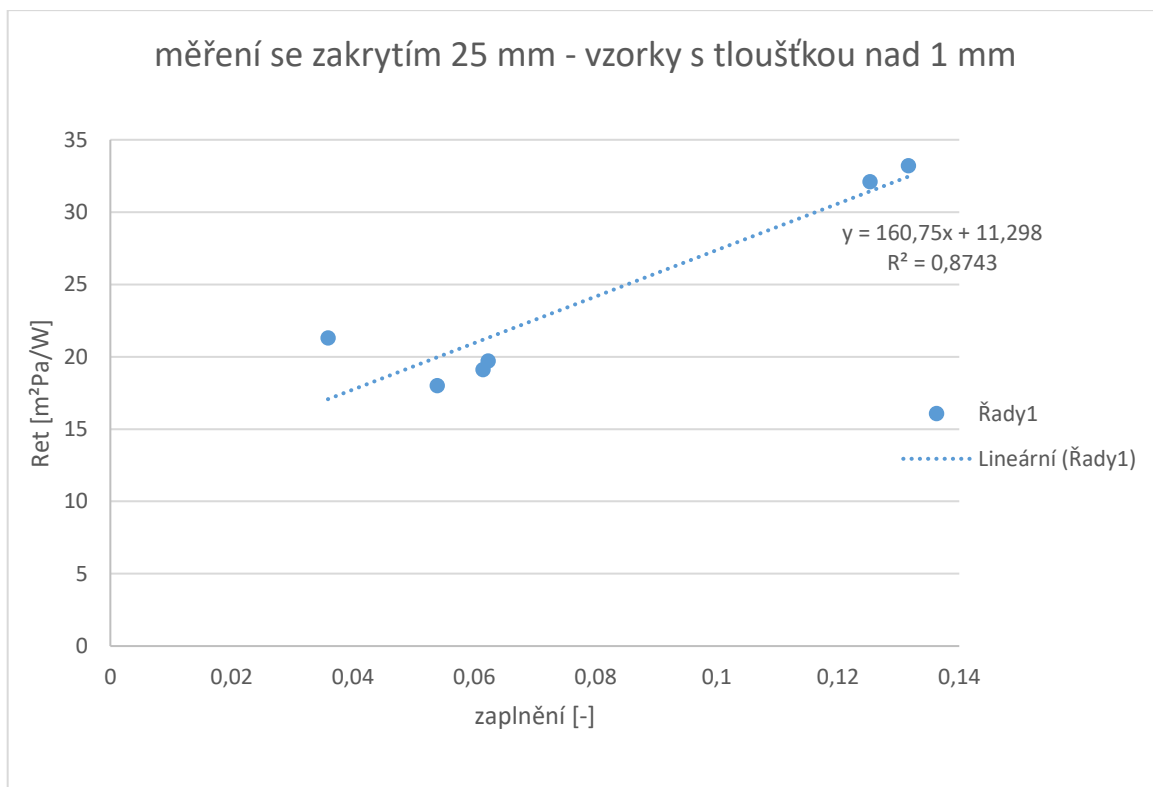
### **5.5.2 Závislost výparného odporu na zaplnění textilie**

Na základě naměřených a vypočtených dat v tabulce 2 byly sledovány vlivy těchto hodnot na výparný odpor měřených textilií. S předpokladem vlivu tloušťky textilie a tedy zároveň její porozity byly sestaveny grafy závislostí výparného odporu na zaplnění měřených textilií. Byl sledován vliv zaplnění textilie na výparném odporu, který prochází průměrnou délkou trajektorie  $L^* 7,5$  mm, dále  $L^* 12,5$  mm a  $L^* 17,5$  mm.



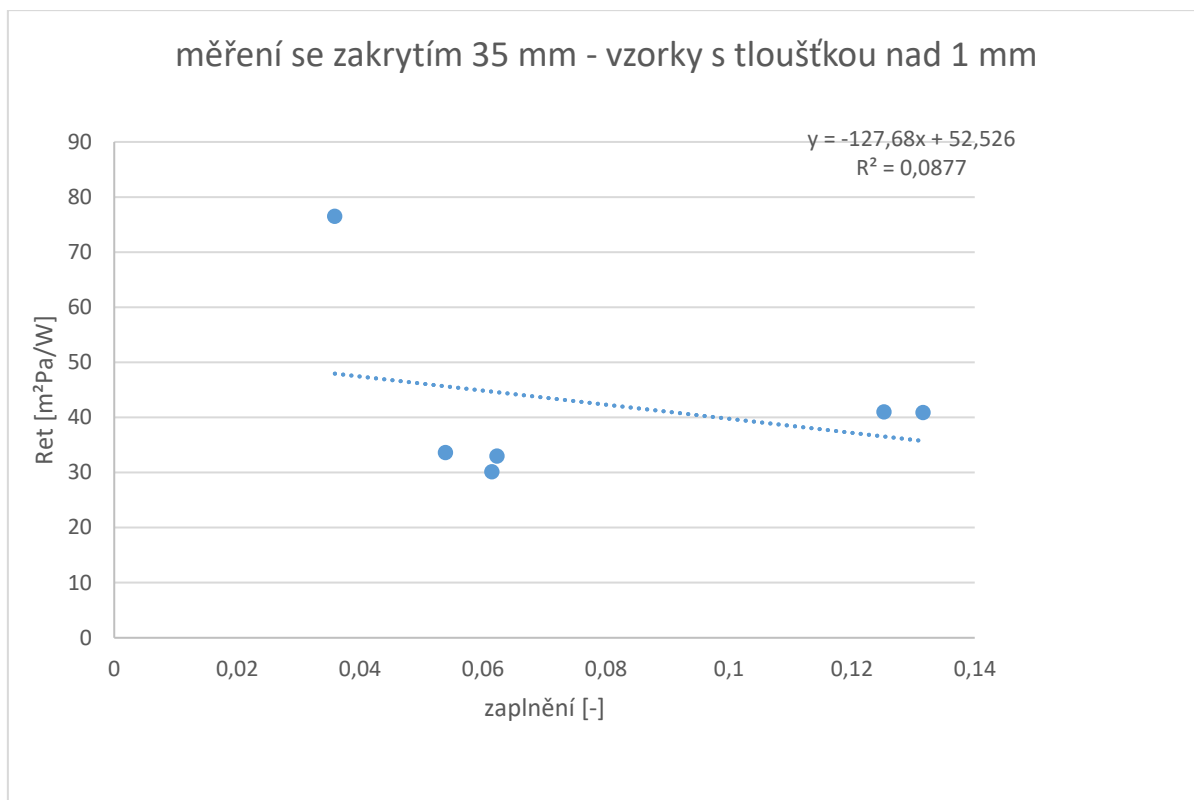
Obr. 34: Závislost „podélného“ výparného odporu při  $L^*=7,5$  na zaplnění textilie

Z grafu na obrázku 34 lze vidět, že s rostoucí hodnotou zaplnění se nezvyšuje hodnota výparného odporu. Toto chování lze jednoduše zdůvodnit. U velmi tenkých vzorků lze předpokládat, že díky velmi malým pórům se pára nešíří pouze vzdušnými póry textilie. Dále některé ze vzorků jsou příliš tenké pro správné určení jejich tloušťky na přístroji ALAMBETA a proto mohou být hodnoty nepřesné. Toto zkoumání bylo tedy přehodnoceno a vzorky byly roztrženy do dvou skupin. V první skupině jsou zařazeny vzorky s tloušťkou vyšší nežli 1 mm a v druhé skupině se nacházejí vzorky s tloušťkou nižší nežli 1 mm. Dále byly tedy závislosti těchto dvou parametrů hodnoceny pouze u vzorků o tloušťce vyšší než 1 mm.



Obr.35: Závislost „podélného“ výparného odporu při  $L^*=7,5$  na zaplnění textilie u vzorků s tloušťkou vyšší než 1 mm

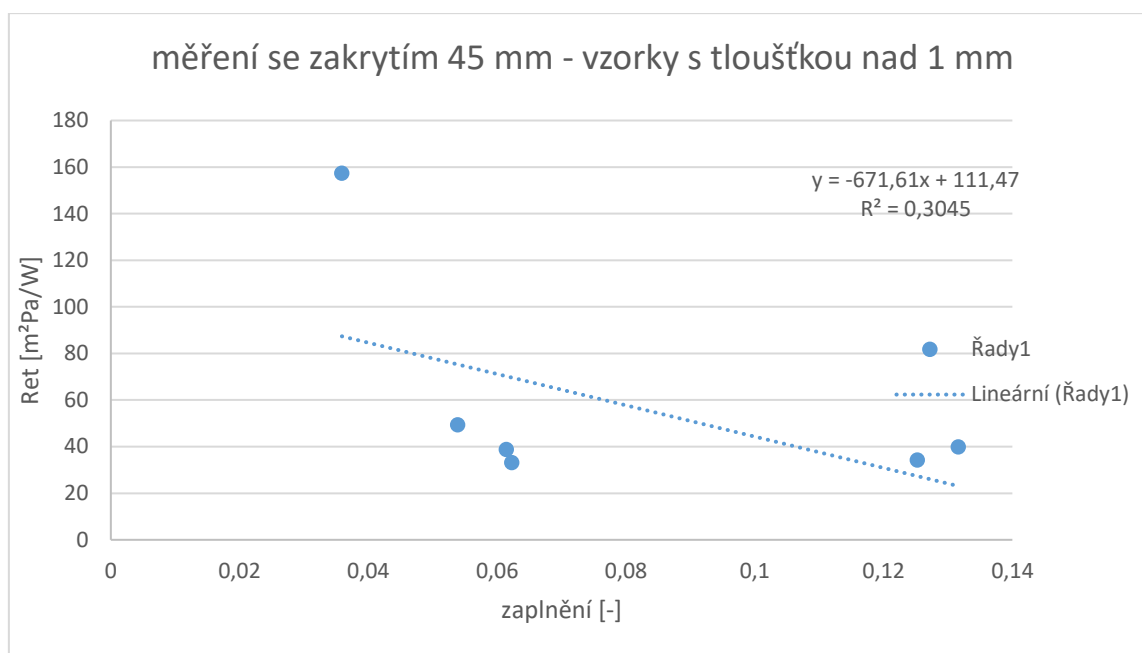
Při nejmenším zakrytí měřené textilie vykazují grafy relativně velkou závislost. Předpokládaná teorie se tedy potvrzuje. S rostoucím zaplněním textilie se zákonitě zvyšuje i její výparný odpor. To samé bylo sledováno v závislosti s výparným odporem textilií, kdy molekuly páry byly nuceny urazit delší vzdálenost, tedy v případě, kdy průměrná délka  $L^*= 12,5$  mm.



Obr. 36: Závislost „podélného“ výparného odporu při  $L^*=12,5$  na zaplnění textilie u vzorků s tloušťkou vyšší než 1 mm

Z grafů na obrázku 36 lze vidět, že závislost výparného odporu na zaplnění textilie se s prodlužující průměrnou délkou trajektorie molekuly vody snižuje. To může být způsobeno určitou pravděpodobností kondenzace páry v případě, že prochází delší trajektorií uvnitř textilie, která může odpor snížit. Dále nutno zohlednit jedno vysoce vybočující měření. Jedná se o vzorek 8 a hodnoty lze zdůvodnit jeho strukturou. Zatímco ostatní materiály těchto vysokých tlouštěk jsou distanční pleteniny, nebo vícevrstvé textilie s vlákněným rounem právě v prostřední vrstvě textilie, kudy vede hlavní trasa trajektorie molekuly vody, tato textilie své tloušťky dosahuje díky úpravě počesání. Neumožňuje tedy správný prostup páry.

Dále lze vidět na obrázku 37 závislost zaplnění textilie na „podélný“ výparný odpor s nejdělsí trajektorií.



Obr. 37: Závislost „podélného“ výparného odporu při  $L^*=17,5$  na zaplnění textilie u vzorků s tloušťkou vyšší než 1 mm

Závislost zaplnění textilie na „podélném“ výparném odporu této textilie, tedy při průchodu páry rovinou textilie o průměrné délce  $L^*$ , byla prokázána. Bylo však také prokázáno, že s prodlužující se průměrnou délkou  $L^*$  se tato závislost výrazně snižuje.

Z grafů je taktéž jasné, že samotná porozita, nebo zaplnění textilie nejsou jediným faktorem, který prostup páry ovlivňuje. Tento prostup je také velmi ovlivněn tloušťkou a strukturou textilie. Textilie s tloušťkou vyšší než 1 mm prokazují vyšší závislost. Vyšší závislost dále prokazují textilie s více porózní strukturou ve středu textilie.

### 5.5.3 Prodyšnost materiálu

S porozitou, a tedy i paropropustností materiálu úzce souvisí prodyšnost materiálu vůči proudícímu vzduchu. Při vysokém fyzickém zatížení lze také značnou část tepla odvést z oděvního systému ventilací, pokud je vnější vzduch chladnější a oděv dostatečně propustný pro vzduch. Prodyšnost je definována jako rychlost proudu vzduchu procházejícího kolmo vzorkem textilie při definovaném rozdílu tlaků na protějších stranách textilie, době a zkušební ploše. Odpovídá jí tedy tlaková ztráta, která vznikne při průchodu textilií.

Podstatou měření prodyšnosti je vytvoření tlakového rozdílu na protějších stranách textilie. Důsledkem vzniklého rozdílu tlaku vznikne tendence tento rozdíl snížit, což přinutí vzduch k průchodu přes otevřené prostory v textilií.

U statické prodyšnosti jsou textilní materiály hodnoceny při konstantním rozdílu tlaků tzn., že množství vzduchu, které prochází upnutou textilií v upínací čelisti, je odečteno po ustálení tlakového rozdílu na protějších stranách textilie. Po celou dobu vzduch prochází textilií jedním směrem konstantní rychlostí. Na Fakultě textilní Technické Univerzity v Liberci je několik standardních zařízení na měření prodyšnosti. Přístroj Metefem FF – 12A a M 021 S. Nejnovějším zařízením je přístroj FX 3300. Toto zařízení je automatizované, kdy dle zvoleného tlakového rozdílu a požadovaných jednotek měření je zobrazena hodnota prodyšnosti [27].

### 5.5.3.1 FX 33000

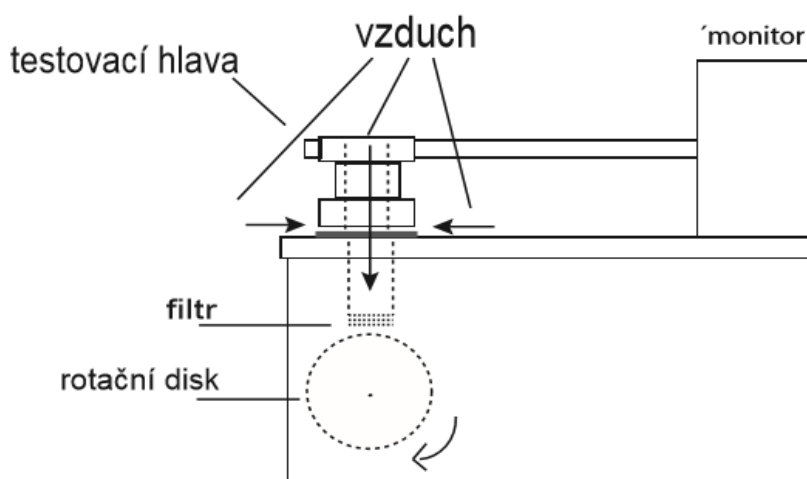
Již bylo zmíněno, že z důvodu závislosti paropropustnosti materiálů na jejich porositě, byl tedy zkoumán vztah mezi naší naměřenou hodnotou paropropustnosti materiálu ve směru plochy textilie a propustnosti vzduchu těchto materiálů ve směru stejném. Jelikož častým jevem je kondenzace páry uvnitř textilie a následný transport vlhkosti v kapalném skupenství, lze předpokládat, že čím vyšší korelace hodnot zkoumané paropropustnosti ve směru plochy textilie a propustnost vzduchu ve směru taktéž v rovině textilie, by znamenala úspěšný průchod vlhkosti v plynném stavu, tedy páry. Testování probíhalo na přístroji FX 3300.

Přístroj obsahuje měřící hlavu a obrazovku, na které lze volit podmínky měření. Na obrazovce přístroje si lze pro proces měření zvolit libovolný tlakový spád [Pa]. Pro textilie se však dle příslušné normy ČSN EN ISO doporučuje 100 nebo 200 [Pa]. Přístroj má upínací plochu 20 cm<sup>2</sup>. Přístroj nám umožňuje si zvolit z několika možností jednotek ve kterých nám udává výsledek. Doporučené jednotky jsou [mm/s]. Je důležité vzorek do přístroje vkládat bez jakýchkoliv skladů, nečistot a pnutí, aby nebyla ovlivněna velikost pórů v textilií.

Princip měření spočívá ve vakuové pumpě, která nasává vzduch skrze vyměnitelnou hlavu obsahující kruhový otvor. Vzorek je umístěn mezi horní a spodní hlavu a upevněn pomocí stlačitelného ramene, které po stlačení spustí vakuové čerpadlo. Před samotným měřením si lze libovolně zvolit zkušební tlak, který je automaticky zachován, a po několika sekundách průvzdušnosti zkušební vzorku přístroj digitálně vyhodnotí výsledek v předem zvolené měrné jednotce. V neposlední řadě je důležité se při měření soustředit na indikátor, který nám pomocí barevné škály na obrazovce, určuje přesnost zkoušky. Zelená barva indikátoru značí přesnost měření, žlutá méně přesné měření a červená nepřesné měření.

To celé ovládáme ovladačem rozsahu. Pro uvolnění měřeného vzorku je třeba stlačení upínacího ramene podruhé čímž se zároveň vakuová pumpa uzavře. Vysoká stabilita a přesnost snímače tlaku poskytují vynikající přesnost měření a reprodukovatelnost výsledků testů [27].

Schéma přístroje FX 330 lze vidět na obrázku 37.



Obr. 38: Schéma procesu měření na přístroji FX 3300

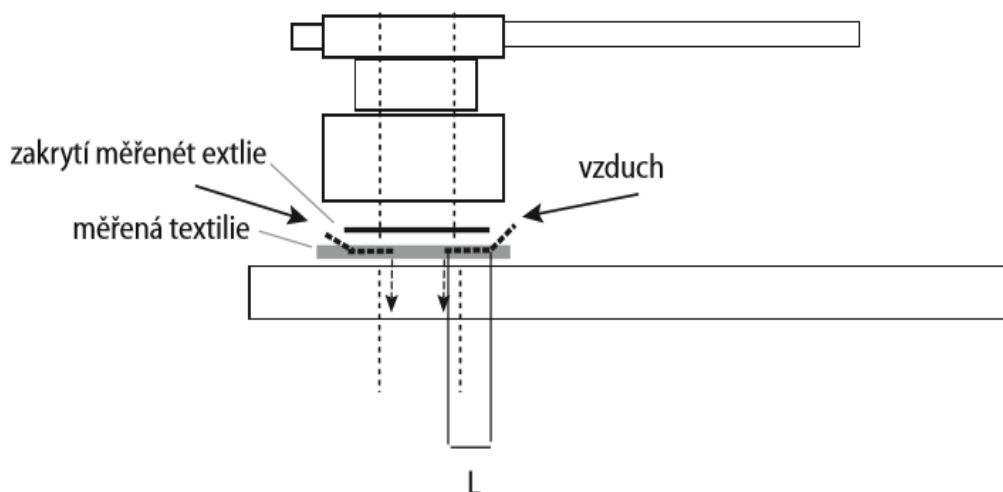
Vzduch je do přístroje nasáván vrchní částí měřicí hlavičky, která obsahuje otvor. Na obrázku 39 můžeme vidět stlačitelnou měřicí hlavičku obsahující otvor. Dále na obrázku vidíme spodní část přístroje, která obsahuje dvě osy. Tyto osy slouží jako opora měřené textilie při proudění vzduchu skrze textilii [27].



Obr. 39: Měřicí hlavičky FX 3300

V rámci klasického měření na přístroji FX 3300 jsou získávány hodnoty propustnosti vzduchu skrze materiál. Pro tuto práci byla použita metoda měření propustnosti vzduchu

taktéž v rovině textilie, kterou se již zabývala dřívější studie. Jedná se o podobný princip měření, jako je námi modifikovaná metoda měření paropropustnosti v rovině textilie na Permetestu.



Obr. 40: Schéma procesu měření na FX 3300 za použití modifikace.

Jedná se tedy o zakrytí měřeného materiálu tak, aby trajektorie vzduchu byla nucena změnit směr. Protože zakryjeme otvor vrchní části měřicí hlavice, jediná možná cesta pro průchod vzduchu je po stranách hlavice. Vzduch je tedy nucen projít rovinou textilie o délce trajektorie  $L$ . V této modifikaci, kterou se již zabývala dřívější studie, je záměrem neprodyšně upnout pleteninu tak, aby nebylo možné vsakování vzduchu mezi vzorkem a hlavicí. Vzduch je vsakován pouze kolmo přes textilií, kde je měřen rozdíl tlaku, který způsobila struktura měřeného vzorku. Zde se náš postup o něco liší.

Abychom byli schopni hodnotit závislost výsledků měřených na Permetestu a výsledků na přístroji FX 3300 je zapotřebí použít pouze částečné zakrytí. Aby trajektorie molekul vodní páry a molekul vzduchu měla stejnou délku a výsledky tak byly reprodukovatelné. Pro porovnání byla tedy vybrána nejdelší měřená trajektorie na Permetestu a dle té byl vytvořen nepropustný kruhový aparát, který přesahovat otvor měřicí hlavice. Byla tak vytvořena délka trajektorie pro molekuly vzduchu 17,5 mm.

Každý z materiálů byl měřen pětkrát za přítlaku 200 [Pa] a v jednotkách [mm/s]



a výsledná průměrná hodnota propustnosti vzduchu byla přepočtena na hodnotu vzdušného odporu dle níže uvedeného vzorce:

$$R_{vz} = \frac{\Delta P}{Q}, \quad (28)$$

kde:  $R_{vz}$ ...je odpor vzduchu [Pa . s/m]

$\Delta P$ ...je námi předem nastavený tlak 200 [Pa]

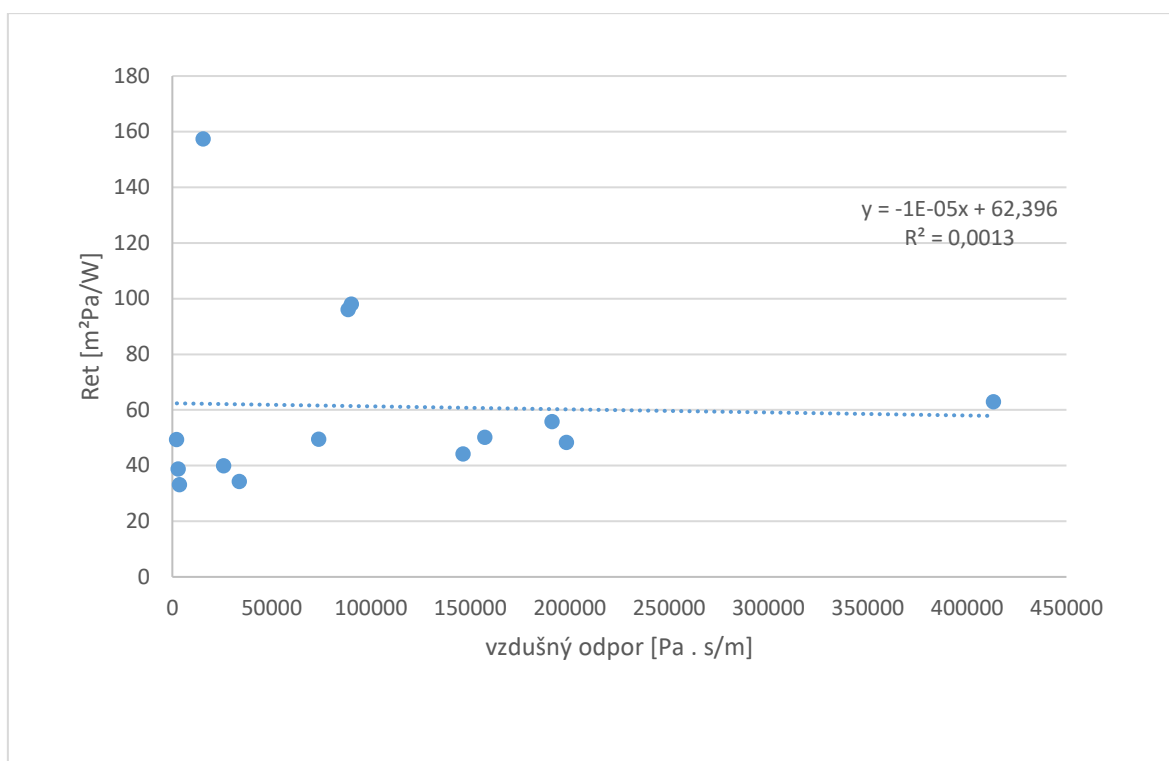
$Q$  ...je propustnost vzduchu [m/s].

Hodnota  $Q$  je propustnost vzduchu naměřená na přístroji FX330. Po dosazení naměřených hodnot do výše uvedeného vzorce jsme získali hodnoty viz tabulka 8.

**Tab.8: Hodnoty odporu vzduchu**

<b>vzorek:</b>	<b>Odpor vyduchu [Pa . s/m]</b>
<b>1</b>	157232,7
<b>2</b>	198412,7
<b>3</b>	146412,9
<b>4</b>	191204,6
<b>5</b>	88573,9
<b>6</b>	90171,3
<b>7</b>	413223,1
<b>8</b>	15479,9
<b>9</b>	25886,6
<b>10</b>	33704,1
<b>11</b>	2231,1
<b>12</b>	3552,4
<b>13</b>	73691,9
<b>14</b>	3022,7

Hodnoty byly následně pro srovnání vyneseny pomocí grafu a byla sledována jejich závislost s výparným odporem.



Obr. 41: Závislost „podélného“ výparného odporu na odporu vzduchu

Z grafu není prokázána závislost výparného odporu měřeného v rovině textilie a vzdušného odporu měřeného v rovině textilie. Příčinou jsou pravděpodobně odlišné přenosové podmínky. Zatímco u paropropustnosti se jedná o prostup páry pomocí difuze u propustnosti vzduchu se jedná o reálný proud vzduchu v důsledku tlakového spádu. Avšak dle hodnot, které vykazují povětšinou vyšší vzdušný odpor nežli výparný, lze taktéž předpokládat, že hodnoty byly ovlivněny stlačením vzorků při procesu měření na přístroji FX 3300 čímž byla ovlivněna jejich tloušťka a tedy i porozita.

## **Závěr**

V práci byla ověřena nová, doposud nepublikovaná experimentální metoda stanovení výparného odporu textilií ve směru roviny textilie. Nová metoda byla umožněna díky specifické konstrukci přístroje PERMETEST. Spočívala v tom, že volný povrch vzorku vloženého do tohoto přístroje byl zakryt nepropustnou folií, která překrývala snímač chladicího toku. Proud páry byl proto nucen urazit od snímače jistou vzdálenost uvnitř textilie ve směru její roviny, než vystoupil z textilie a vstoupil do okolního proudícího vzduchu. Dle experimentálního měření lze vyvodit nárůst výparného odporu v závislosti na délce trajektorie molekuly páry.

Při experimentech se vycházelo ze skutečnosti, že přenosový děj přístroji PERMETEST je izotermický. To znamená, že teoreticky v průběhu tohoto děje nedochází ke kondenzaci vodní páry. V práci uvedený původní teoretický model byl založen na tomto předpokladu. Jestliže se molekuly vody pohybují uvnitř textilie, lze předpokládat určitou pravděpodobnost kondenzace. Zde je prostor pro další zkoumání této oblasti.

Nebyla zjištěna žádná závislost naměřených hodnot „podélného“ výparného odporu s prodyšností testovaných textilií, což lze zdůvodnit tím, že při proudění vzduchu v textiliích (při zjišťování prodyšnosti) jde o reálné proudění vzduchu v důsledku tlakového spádu, zatímco při pohybu páry jde o prostup molekul páry difuzí (podobně jako u vedení tepla) v relativně klidném vzduchu. Jde tedy o různé přenosové děje, což je možný důvod pro výsledky našeho měření. Dále příčinou mohla být možná změna tloušťky materiálu v důsledku přitlaku při měření na přístroji FX 3300.

Experimentálně bylo zjištěno, že „podélný“ výparný odpor logicky roste s délkou dráhy, kterou molekuly páry musely absolvovat uvnitř textilie. Tento odpor dále roste s klesající tloušťkou a klesající porozitou textilie. Tato nepřekvapivá, avšak potvrzená zjištění by pak měla posloužit v dalším zkoumání při návrhu textilií, kde vedení páry v jejich rovině bude důležitou vlastností ovlivňující jejich termo-fyziologický komfort. Jedná se například o sedací textilie, batohy, spodní vrstvy pod neprůstřelné vesty, ložní prádlo, antidekubitní pomůcky, výstelky bot a podobně. Avšak ve spoustě z těchto případů mohou být podmínky přenosu vlhkosti jiné než izotermické, což bude taktéž vyžadovat další studium.

Závěrem lze konstatovat, že nová experimentální metoda stanovení výparného odporu textilií ve směru roviny textilie byla v práci úspěšně ověřena a že tedy může být používána k návrhu textilií se zlepšeným vedením páry v jejich rovině. Avšak výsledky jsou

velmi ovlivněny strukturou měřené textilie, proto je zde prostor pro další šetření.

## Literatura:

- [1] DRAŠAROVÁ, Jana. *Bariérové textilie*. Technická Univerzita v Liberci. Výukový materiál
- [2] LITSCHMANOVÁ, Martina. *Statistika I. Jednoduchá lineární regrese* [online]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~lit40/STA1/Cviceni/PDF/14cRegrese.PDF>
- [3] Historie. *MOIRA* [online]. Praha. Dostupné z: <http://firma.moira.cz/af30-historie.html>
- [4] Historie, profil. *Direct Alpine* [online]. Liberec. Dostupné z: <http://www.directalpine.cz/profil-firmy>
- [5] Coolmax – funkční látka do horkých dní. *Sekora* [online]. Praha. Dostupné z: <http://blog.sekora.cz/?p=3854>
- [6] Klimatex Life. *Klimatex* [online]. Praha. Dostupné z: <http://klimatex.eu/cz/klimatex-life>
- [7] *Thermo°Cool* [online]. Praha. Dostupné z: <http://www.craft.cz/materialy/thermo-cool>
- [8] *Senzor: Použité materiály* [online]. Praha. Dostupné z: <https://www.sensor.cz/materialy/>
- [9] CoolMax FX. *Masood textile Mills Ltd* [online]. Faisalabad. Dostupné z: [http://www.masoodtextile.com/Farhan\\_RD/CoolMax%20FX.php](http://www.masoodtextile.com/Farhan_RD/CoolMax%20FX.php)
- [10] ROKYTA, Richard, *Fyziologie pro bakalářská studia v medicíně, přírodovědných a tělovýchovných oborech*. Praha: ISV, 2000. ISBN 80-85866-45-5
- [11] MAĎA, Patriak a Josef FONTANA. *Funkce buněk a lidského těla, Termoregulace*. vyd. Praha: Univerzita Karlova. Dostupné na: <http://fbt.cz/skripta/xi-regulacni-mechanismy-1-endokrinni-regulace/11-termoregulace/>
- [12] HES, Luboš a Petr SLUKA. *Úvod do komfortu textilií*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-926-0
- [13] AJA, Dhanakodi, Venugopal Ramesh BABU, Mani SENTHILKUMAR, Govindan RAMAKRISHNAN a Natarajan KANNAN. A dynamic sweat transfer tester for analyzing transverse sweat transfer properties of multi-weave structure fabrics. *Journal of Industrial Textiles* [online]. 2014, 44(2), 211-231
- [14] *ES č. 1907/2006 a č.1272/2008*. Bezpečnostní list, Silikagel pro sušení, 2010, Dostupné na: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:QB4YBlxMxr4J:www.mach-chemikalie.cz/download.php%3Fid%3D311+&cd=2&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>

- [15] ZHANG, CHang, WANG, Xiuqing, LV, Yonggang, Ma, Juanjuan, HUANG, Jianhua, A new method for evaluating heat and water vapor transfer properties of porous polymeric materials. *Polymer Testing*, 2010
- [16] WARDININGSIH, Wiah, *Study of Comfort Properties of Natural and Synthetic Knitted Fabrics in Different Blend Ratios for Winter Active Sportswear*. vyd. RMIT University, Melbourne, 2009. Diplomová práce.
- [17] FUNFÁLEK, Tomáš. *Vliv textilní membrány na dynamiku změn fyziologických ukazatelů zátěže*. Univerzita Karlova v Praze, 2015. Diplomová práce. Vedoucí práce Mjr. Mgr. Karel Sýkora.
- [18] HES, Luboš, *Thermophysiological properties of artificial and animal furs*, vyd. Liberec: Technical University of Liberec, International Congress on Technical textiles, 2014
- [19] HES, Luboš, *Fast determination of surface moisture absorbivity of smart underwear*. vyd. Liberec: Technical University of Liberec, International Textile Conference, Terrassa 2001
- [20] AJA, Dhanakodi, Venugopal Ramesh BABU, Mani SENTHILKUMAR, Govindan RAMAKRISHNAN a Natarajan KANNAN. A dynamic sweat transfer tester for analyzing transverse sweat transfer properties of multi-weave structure fabrics. *Journal of Industrial Textiles* [online]. 2014, 44(2), 211-231
- [21] MYŠÍK, Roman, *Vliv přísad biopolymerů na paropropustnost materiálů pro potravinářské obaly*. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013. Diplomová práce
- [22] IN č. 23-304-01/01. Stanovení termofyziologických vlastností textilií, 7.12. 2004, Výzkumné Centrum Textil LN00B090
- [23] HES, Luboš, BHAGUSLAWSKA-BACZEK, M., Analysis and experimental determination of effective water vapour permeability of wet woven fabrics. *Journal of Textile and Apparel Technology and Management*, Vol. 8, No. 4, 2014
- [24] GIBSON, P. W., Factors influencing steady-state heat and water-vapour transfer measure for clothing materials, *Textile Research Journal*, 1993. 63, 12, 749-764.
- [25] HES, Luboš, ARAUJO, Mario. Simulation of the Effect of Air Gaps between the Skin and a Wet Fabrics on Resulting Cooling Flow. *Textile Research Journal*, 2010. 80, 14, 1488–1497.
- [26] BERNACIKOVÁ, Martina. Termoregulace (Thermoregulation). *Fyziologie člověka*. Brno: Masarykova univerzita, 2014. ISBN 978-80-210-7697-6.

- [27] Norma ČSN EN ISO 9237. Textilie – Zjišťování prodyšnosti plošných textilií. Český normalizační institut, 1996.
- [28] ČSN EN 12127. Textilie - Plošné textilie - Zjišťování plošné hmotnosti pomocí malých vzorků. Praha: Český normalizační institut, 1997
- [29] PECHOUŠEK, Jiří. Měření plochy povrchu pevných látek a určování jejich porozity metodou sorpce plynu. In: Portál moderní fyziky: Univerzita Palackého v Olomouci [online]. Olomouc, 2010. Dostupné z:  
<http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/ostatni/BET.pdf>
- [30] *Veličiny, jejich jednotky a základní výpočty používané pro zpracování papíru a lepenky* [online]. In: . s. 20. Dostupné z:  
[http://www.odbornaskola.cz/joomla/images/stories/odbornaskola/pdf/Obalovatechnika1/ka pitola2\\_veliiny.pdf](http://www.odbornaskola.cz/joomla/images/stories/odbornaskola/pdf/Obalovatechnika1/ka pitola2_veliiny.pdf)
- [31] STANĚK, Jaroslav. Nauka o textilních materiálech: Část 4. Vlastnosti délkových a plošných textilií. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1988.
- [32] KOVÁŘ, Radko. Struktura a vlastnosti plošných textilií. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2003. ISBN 80-7083-676-8.
- [33] *Přehled teorie a výpočtových vztahů: Základní stavové veličiny* [online]. Dostupné z:  
<http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/termomechanika/teorie/teorie.pdf>
- [34] CHUDOBA, Josef. *Pravděpodobnost a statistika: Ústav nových technologií a aplikované informatiky* [elektronická skripta]. In: . Technická Univerzita v Liberci, 2016, s. 186
- [35] BEDÁŇOVÁ, Iveta. Charakteristiky variability (proměnlivost souboru). Statistika a výpočetní technika: Přednášky [online]. 2012 . Dostupné z:  
<http://cit.vfu.cz/stat/fvhe/teorie/predn1/variabil.htm>
- [36] *IN č. 23-303-01/01*. Zjišťování stupně vlhkostní jímavosti textilií. Prosinec 2003. Liberec: Výzkumného centra Textil LN00B090
- [37] WARDININGSIH, Wiah, Olga TROZNIKOV, Nayia NAWAZ a Chris WATSON. Influence of Wearing Impact Protective Garment on Thermophysiological Comfort of the Wearer. *Science Direct*. [online]. , 551 – 556 [cit. 2017-03-23] 2014
- [38] *IN č. 23-304-02/01*. Měření tepelných vlastností na přístroji Alambeta. Prosinec 2014. Liberec: Výzkumného centra Textil LN00B090
- [39] HUANG, Jianhua a Xiaoming, QIAN. Comparison of Test Methods for Measuring Water Vapor Permeability of Fabrics. *Textile Research Journal*. 2008, 78, (4) 342-352

- [40] LEE, Seungsin a Kay OBENDORF. Statistical Modeling of Water Vapor Transport Through Woven Fabrics. *Textile Reserch Journal* 2012, 82, (3): 211–219
- [41] BHATIA, Dinesh a Urvashi, MALHORTA .Thermophysiological Wear Comfort of Clothing: *An Overview.Journal of Textile science and Engineering*. 2016
- [42] BARTÁK, Martin. *Úvod do přenosových jevů pro inteligentní budovy* [online]. In: . Praha: Evropský sociální fond, 2010

### **Seznam obrázků:**

- Obrázek 1** Moira TG 900
- Obrázek 2** Vlákna Coolmax (se třemi kanálky; s šesti kanálky)
- Obrázek 3** Thermocool
- Obrázek 4** Coolmax Fresh
- Obrázek 5** Mechanismy výdeje tepla
- Obrázek 6** Odvod plynné vlhkosti od těla
- Obrázek 7** Přístroj ALAMBETA
- Obrázek 8** Měděná deska pro měření kapilárního odvodu vlhkosti ve všech směrech
- Obrázek 9** Oděvní systém
- Obrázek 10** Systém výměny tepla lidského organismu s okolím v souladu s textilními vrstvami
- Obrázek 11** Gravimetrická metoda
- Obrázek 12** Obrácený způsob
- Obrázek 13** Schéma procesu měření šálkové metody
- Obrázek 14** Figurína s obsahující 20 kontrolovaných tepelných zón
- Obrázek 15** Schéma měření DMPC metody
- Obrázek 16** fotografie měřených vzorků 1-6
- Obrázek 17** fotografie vzorků 7-12
- Obrázek 18** fotografie vzorků 13 a 14
- Obrázek 19** Schéma běžného měření na přístroji PERMETEST
- Obrázek 20** Schéma modifikace postupu měření
- Obrázek 21** Směr trajektorie molekul vodní páry
- Obrázek 22** Umístění měřeného vzorku se zakrytím na střed
- Obrázek 23** Průměrná trajektorie L\*
- Obrázek 24** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.1,2,3,4
- Obrázek 25** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.5,6
- Obrázek 26** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry – vzorek č.7
- Obrázek 27** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.8
- Obrázek 28** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.9
- Obrázek 29** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.10
- Obrázek 30** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.11



**Obrázek 31** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.12

**Obrázek 32** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.13

**Obrázek 33** Měření „podélného“ výparného odporu v závislosti na střední délce trajektorie vodní páry - vzorek č.14

**Obrázek 34** Závislost „podélného“ výparného odporu při  $L^*=7,5$  na zaplnění textilie

**Obrázek 35** Závislost „podélného“ výparného odporu při  $L^*=7,5$  na zaplnění textilie u vzorků s tloušťkou vyšší než 1 mm

**Obrázek 36** Závislost „podélného“ výparného odporu při  $L^*=12,5$  na zaplnění textilie u vzorků s tloušťkou vyšší než 1 mm

**Obrázek 37** Závislost „podélného“ výparného odporu při  $L^*=17,5$  na zaplnění textilie u vzorků s tloušťkou vyšší než 1 mm

**Obrázek 38** Schéma procesu měření na přístroji FX 3300

**Obrázek 39** Měřicí hlavice FX 3300

**Obrázek 40** Schéma procesu měření na FX 3300 za použití modifikace

**Obrázek 41** Závislost „podélného“ výparného odporu na odporu vzduchu

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Klasifikace paropropustnosti pomocí hodnoty výparného odporu

Tabulka 2 Geometrické vlastnosti měřených textilií

Tabulka 3 Délky trajektorie molekul vody

Tabulka 4 Měření paropropustnosti a výparného odporu se zakrytím materiálu 25mm

Tabulka 5 Měření paropropustnosti a výparného odporu se zakrytím materiálu 25mm

Tabulka 6 Měření paropropustnosti a výparného odporu se zakrytím materiálu 35mm

Tabulka 7 Měření paropropustnosti a výparného odporu se zakrytím materiálu 45mm

Tabulka 8 Hodnoty odporu vzduchu