



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní

K PROBLEMATICE SUŠÍCÍCH KŘIVEK JAKO PARAMETRU KOMFORTU

Ing. Tereza Heinisch

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Název disertační práce: K problematice sušících křivek jako parametru komfortu
Autor: Ing. Tereza Heinisch
Obor doktorského studia: Textilní technika a materiálové inženýrství
Forma studia: Kombinovaná
Školící pracoviště: Katedra hodnocení textilií, Fakulta textilní TUL
Školitel: doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
Konzultant: prof. Ing. Luboš Hes, DrSc., Dr.h.c.

Složení komise pro obhajobu disertační práce:

předseda: prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.	FT TUL, katedra materiálového inženýrství
místopředseda: doc. Ing. Maroš Tunák, Ph.D.	FT TUL, katedra hodnocení textilií
prof. Ing. Karel Adámek, CSc.	
prof. RNDr. Jan Pícek, CSc.	FP TUL, katedra aplikované matematiky
doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D. (oponentka)	FS TUL, katedra energetických zařízení
doc. Ing. Pavel Pokorný, Ph.D.	FT TUL, katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů
npor. Ing. Jana Švecová, Ph.D. (oponentka)	Univerzita obrany Brno, Fakulta vojenského leadershipu, katedra logistiky

S disertační prací je možno seznámit se na studijním oddělení doktorského studia Fakulty textilní Technické univerzity v Liberci.

Liberec, 2021

Anotace

Předmětem disertační práce je hodnocení sušících křivek ve vztahu k termofyziologickému komfortu zejména sportovních a ochranných textilií. Existuje několik metodik, které se dobou sušení zabývají. Bohužel však u nich nejsou jednoznačně definované podmínky sušení, především rychlost proudění, odvod vlhkosti z prostoru nad vzorkem a není definovaná teplota vzorku během sušení. Hlavní pozornost disertační práce je tedy věnována návrhu a realizaci přístroje, který měří za izotermních podmínek. Nový přístroj je schopen zajistit rovnoměrné ofukování testovaného vzorku a lze na něm nastavit různé rychlosti proudění. K realizaci sušících křivek byl zvolen gravimetrický způsob, který nejpřesněji odráží množství zbývající vlhkosti v textiliích. V práci jsou porovnány dva způsoby vlhčení vzorků, různé rychlosti proudění nad vzorkem a vliv izotermních a neizotermních podmínek na rychlost sušení. Poslední část práce je zaměřena na hodnocení termofyziologického komfortu s ohledem na množství vlhkosti v textiliích během procesu sušení. Pro vyhodnocení termofyziologického komfortu slouží naměřená data měrné tepelné jímavosti a zároveň subjektivní hodnocení vnímání pocitu sucha či vlhka z textilií.

Klíčová slova: sušící křivky, rychlost sušení, konstantní rychlost proudění vzduchu, vlhkost, termofyziologický komfort

Abstract

The goal of this dissertation is evaluation of drying rate in relation to thermophysiological comfort namely of sport and protective clothing. There are several methodologies, which are describing the time of drying, but unfortunately, none of them describes the conditions of drying, most importantly the velocity of air flow above the sample, water vapour concentration above the sample and temperature of the sample during its drying. The main focus of this dissertation is therefore devoted to the design and realization of a device, which is measuring under isothermal conditions. The new device is capable of ensuring constant air flow of the measured sample; there is also a possibility to set various flow rates. A gravimetric method was chosen for the drying curves, which most accurately reflects the amount of residual moisture in the textiles. The work compares two methods of wetting samples, different flow rates above the sample and the effect of isothermal and non-isothermal conditions on the drying rate. The last part deals with the evaluation of thermophysiological comfort with considering the moisture in textiles during the drying process. For evaluation of the thermophysiological comfort, the measured data of specific heat absorption as well as the subjective evaluation of the perception of the feeling of dryness or moisture from textiles are used.

Keywords: drying curves, drying rate, constant air flow velocity, moisture, thermophysiological comfort

АННОТАЦИИ

Темой диссертации является оценка диаграмм процесса сушки с точки зрения термофизиологического комфорта особенно спортивные и защитные текстильные изделия. Существует несколько методик, изучающих процесс сушки, но, к сожалению, в них четко не определяются условия сушки, особенно скорость течения воздуха или отведение влаги из пространства над образцом и определенная температура образца во время сушки. Основной целью диссертации поэтому стала разработка и реализация прибора для измерения параметров сушки в изотермических условиях. Новое устройство способно обеспечить равномерный обдув исследуемого образца, позволяет регулировать скорость течения воздуха. Для построения кривых сушки используется гравиметрический метод, который наиболее точно отражает количество остаточной влаги в текстильном образце. В работе сравниваются два метода смачивания образцов, изучается влияние скорости течения воздуха над образцом на скорость сушки при изо- и неизотермических условиях. Последняя часть работы посвящена оценке термофизиологического комфорта по отношению к оставшемуся количеству влаги в текстильном материале во время процесса сушки. Для оценки термофизиологического комфорта используются данные измерений удельного теплотогощения и субъективной оценки восприятия меры сухости или влажности текстильного материала.

Ключевые слова: диаграммы процесса сушки, скорость сушки, постоянная скорость течения воздуха, влажность, термофизиологический комфорт

Obsah

ÚVOD	6
1 Přehled o současném stavu problematiky	7
1.1 Dostupné normy a metody	7
1.2 Proces sušení	7
1.3 Hodnocení procesu sušení s ohledem na termofyziologický komfort	9
2 Předmět a cíle disertační práce	14
3 Popis vlastního řešení	15
3.1 Návrh nového měřícího zařízení	15
3.2 Výpočet přestupu tepla	16
3.2.1 Chladící efekt vznikající odparem vlhkosti při volné hladině.....	17
3.2.2 Výpočet koeficientu přestupu tepla α	18
3.2.3 Přestup tepla žebry chladiče	19
3.2.4 Výpočet rozdílu teplot	20
4 Analýza sušících křivek	21
4.1 Použité materiály	21
4.2 Porovnání metod vlhčení vzorků A B	23
4.3 Vliv rychlosti proudění nad měřenými vzorky	27
4.4 Vliv izotermních a neizotermních podmínek na rychlost sušení	28
4.5 Porovnání výsledků z nového přístroje s naměřenými daty z přístroje MMT	28
4.6 Vliv obsahu přidané vlhkosti v textilích na termofyziologický komfort	30
5 Zhodnocení výsledků pro vědní obor nebo pro praxi	32
6 Doporučení na pokračování práce v daném tématu a oboru	33
7 Seznam publikovaných prací	34
7.1 Publikace v odborných časopisech se vztahem ke studované problematice	34
7.2 Ostatní publikace v odborných časopisech	34
7.3 Příspěvky ve sbornících	34
7.4 Citace k publikaci autora [II] uvedené v databázi Scopus	35
8 Seznam použité literatury	36
9 Curriculum Vitae	41
10 Stručná charakteristika dosavadní odborné, výzkumné a vědecké činnosti	43
11 Vyjádření školitele doktorandky	45
12 Oponentské posudky disertační práce	46

ÚVOD

V současné době se často setkáváme s pojmem funkční textilie. Většina textilních výrobců tímto termínem označuje především textilie či oděvy ze syntetických vláken. Ta mají výrazně menší navlhavost než vlákna přírodní a často vzhledem ke svému případnému speciálnímu průřezu zajistí rychlý rozvod vlhkosti v ploše textilie a její následné odpaření. Díky tomu lze u funkčních textilií očekávat rychlejší odvod potu od těla a tím pádem i lepší termofyziologický komfort během sportovních aktivit. Kromě oděvů ze syntetických vláken se samozřejmě lze setkat i s prádlem z vláken přírodních. V posledních letech se velmi často pro výrobu spodního prádla využívají vlněná vlákna, která si uchovávají výborné termoregulační vlastnosti i přes svou vysokou navlhavost. Při volbě vhodného oděvu je z hlediska komfortních vlastností nutné brát v potaz především klimatické podmínky, ve kterých bude oděv nošen s ohledem na účel použití.

Kromě rychlého odvodu vlhkosti jsou důležitými vlastnostmi funkčních textilií také paropropustnost, tepelně izolační vlastnosti, větruodolnost a nepromokavost (nebo-li hydrostatická odolnost). U spodní vrstvy jsou nejdůležitější první dvě jmenované vlastnosti, větruodolnost a nepromokavost se uplatní pouze u svrchních oděvů. Aby oděvní systém správně fungoval, je nutné dodržet zásady správného vrstvení. Proto by všechny oděvní vrstvy měly zajistit dobrou úroveň paropropustnosti a rychlosti sušení. V běžném životě tedy proces sušení oděvů významně přispívá k celkovému termofyziologickému komfortu nositele. V případě sportovních nebo ochranných oděvů je tedy důležitým parametrem k hodnocení termofyziologického komfortu a měla by mu být věnována větší pozornost.

Výrobci oděvů se předhánají v lepších hodnotách jednotlivých vlastností u svých oděvních výrobků a s tím souvisí i vzrůstající zájem o kvalitní testování dostupných materiálů. Tento trend je patrný i na každoroční výstavě ISPO, kde české outdoorové firmy vždy zaujmají významnou část expozice. Vzhledem k výše zmíněným aspektům je třeba, aby jednotlivé laboratoře komfortu po celém světě byly schopny zajistit stejné podmínky testování a zároveň vycházely i ze stejných norem. Například pro hodnocení rychlosti sušení existuje norem několik. Tyto normy se liší použitými přístroji, způsoby hodnocení a podmínkami měření, které jsou v nich často nedostatečně definované.

1 Přehled o současném stavu problematiky

Následující část popisuje nejznámější metody a normy, které se zabývají dobou sušení textilií v souvislosti s oděvním komfortem, včetně odborných studií na toto téma.

1.1 Dostupné normy a metody

V současné době mají výrobci textilií a oděvů k dispozici několik metod [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], dle kterých lze v laboratořích otestovat rychlost nebo celkovou dobu sušení textilií. Jejich přehled včetně podmínek měření zobrazuje tabulka 1. Teplota měření u vybraných amerických norem činí 70 ± 2 °F, což po přepočtu vychází 21 ± 1 °C.

Tab. 1 Porovnání jednotlivých norem z hlediska klimatických podmínek měření

NORMY	t_a [°C]	$t_{destičky}$ [°C]	RH [%]	rychlost proudění [m.s ⁻¹]	záznam úbytku hmotnosti vlhkého vzorku během měření
AATCC TM 195-2009	21 ±1	-	65 ±2	NE	NE
AATCC TM 199-2011	21 ±1	37	65 ±2	NE	NE
AATCC TM 200-2017	21 ±1		65 ±2	2,5 ±0,5	NE, ale zaznamenává se teplota vzorku
AATCC TM 201-2014	21 ±1	37 ±1	65 ±1	1,5 ±0,5	NE, ale zaznamenává se teplota vzorku
TNI CEN/TR 16422	35	35	30	1 či 2	NE
ISO 17616	20 ±2	-	65 ±4	NE	ANO (interval 5 min)
JIS L 1096 - 1999	20 ±2	-	-	NE	ANO

Jejich podrobný popis představuje kapitola 5.1 v disertační práci. Nevýhodou stávajících norem je tedy především nejednotnost ve způsobu hodnocení celkové doby sušení, rychlosti sušení a také nastavení klimatických podmínek měření.

1.2 Proces sušení

Sušení označuje proces, během kterého se odstraňuje kapalina z textilií. Kapalná voda uvnitř póru se postupně mění v páru, která prostřednictvím difuze vstoupí do mezní vrstvy a je odvedena konvekcí. Během procesu sušení tedy dochází ke sdílení tepla i hmoty [8]. Jak uvádí ve své publikaci [10] například Barták, i přes to, že se mechanismus difuze při přenosu vlhkosti uplatní vždy, je následně přehlušen mechanismem konvekce.

V běžném životě sušení významně přispívá k termofyziologickému komfortu nositele v případě zvlhčení oděvu deštěm či potem. V případě sportovních nebo ochranných oděvů je tedy hodnocení procesu sušení významným parametrem k hodnocení termofyziologického komfortu [9].

Během procesu sušení tedy přechází nejprve vlhkost z povrchu materiálu z makro a mezopórů a až následně voda zevnitř materiálu z jednotlivých mikropórů směrem do okolního prostředí. Vlhký materiál je tedy směsí suché pevné látky a vody. Celkovou koncentrací vlhkosti v materiálu W_W [-] vyjadřuje rovnice (1) [8].

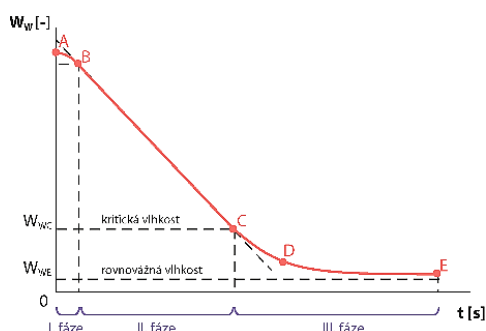
$$W_W = \frac{m_w}{m_F} \quad (1)$$

Kde m_w [kg] označuje hmotnost vody a m_F [kg] hmotnost suchého materiálu [8].

V případě hodnocení procesu sušení z hlediska termofyziologického komfortu se využívá poměr hmotnosti přidané vlhkosti a hmotnosti klimatizovaného vzorku, jak uvádí například [11, 12]. Z hlediska odstranitelnosti můžeme vlhkost v materiálu rozdělit na volnou, kterou lze v daných klimatických podmínkách odstranit například mechanicky (ždímáním) nebo postupným odparem vlhkosti při daných klimatických podmínkách a na rovnovážnou, která v materiálu zůstává i při nekonečně dlouhém sušení materiálu v daném prostředí (t_a , RH), a je tedy v rovnováze s obsahem vody ve vzduchu. Hodnota rovnovážné vlhkosti závisí na vlastnostech sušícího vzduchu a na navlhavosti sušeného materiálu. Struktura vláken ještě obsahuje tzv. chemicky vázanou vlhkost, která je obsažena uvnitř struktury vlákna (součástí chemické sloučeniny). Jejím odstraněním by se porušilo samotné vlákno. V této práci je však řešen proces sušení textilních materiálů s ohledem na komfort uživatele, proto zde prezentované sušící křivky vychází z přidané vlhkosti v materiálu vzhledem k jeho klimatizované hmotnosti. Cílem této práce tedy není odstranit rovnovážnou vlhkost ve vláknech, ale pouze vlhkost přidanou. Rychlost sušícího procesu vyjadřuje intenzita hmotnostního toku vlhkosti \dot{m} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], kterou vyjadřuje rovnice (2).

$$\dot{m} = \beta_p \cdot \Delta p_p \quad (2)$$

Kde β_p označuje součinitel přenosu hmoty vztahovaný k rozdílu parciálních tlaků vodní páry, který představuje hnací sílu celého procesu. Pokud by se zvolila jako hnací síla rozdíl mezi koncentracemi, je nutné použít součinitel přenosu hmoty β_C [13]. Vzájemný přepočtení mezi jednotlivými součiniteli je uveden v kapitole 2.2.2 disertační práce. Rychlost sušení závisí především na vnějších podmínkách, za kterých probíhá (relativní vlhkost vzduchu, teplota a rychlost proudění). Průběh sušení lze rozdělit do tří částí, jak je patrné z obrázku 1, který ilustruje průběh sušení.



Obr. 1 Závislost obsahu vlhkosti v materiálu W_W na době sušení [8]

Na začátku procesu je vlhký materiál uveden do styku s proudem vzduchu, který vykazuje nižší koncentraci vlhkosti než koncentrace vlhkosti na povrchu sušeného materiálu. V tomto okamžiku začíná probíhat proces sušení [8]. Proces sušení zahrnuje tři období:

I. Počáteční období sušení - materiál se začíná ochlazovat (pokud není dohříván). Tato fáze trvá velmi krátkou dobu [8, 14].

II. Období konstantní rychlosti sušení materiálu - doba odpařování nevázané (volné) vlhkosti v materiálu. Během tohoto období je teplota materiálu konstantní a hmotnost vlhkosti v materiálu se lineárně snižuje [8, 14]. Jedná se o nejdůležitější fázi procesu sušení z hlediska termofyziologického komfortu uživatele daného oděvu. V této fázi je žádoucí co nejvyšší, avšak krátkodobý chladicí efekt, aby na konci tohoto děje dosáhl uživatel tepelně komfortního vjemu. Úroveň rychlosti sušení lze stanovit pomocí koeficientu přenosu hmoty β_C [$m \cdot s^{-1}$] v závislosti na bezrozměrných číslech Sherwood a Schmidt [15]. Nad povrchem materiálu je v tomto časovém úseku tenze par přibližně stejně velká jako tenze par nad čistou vodou o stejné teplotě. Následuje bod C, kdy se hodnota vlhkosti v materiálu dostává na hranici kritické vlhkosti W_{WC} . Pro toto období sušení je tedy charakteristické především to, že rychlost sušení závisí na teplotě, relativní vlhkosti a hmotnostním průtoku vzduchu, avšak není ovlivněna druhem materiálu, tloušťkou vrstvy a aktuálním množstvím vlhkosti v materiálu [8]. Autoři studií [11, 16] zabývající se termofyziologickým komfortem textilií zdůrazňují, že v období konstantní rychlosti sušení hraje významnou roli především struktura povrchu, která ovlivňuje velikost skutečné efektivní vlhkosměnné plochy.

III. Období klesající rychlosti sušení - v této fázi se dostanou do kontaktu se vzduchem částice pevného materiálu, rychlost sušení se začíná zpomalovat. V tu chvíli se materiál začne ohřívat nad teplotu mokrého teploměru, což v obrázku 1 označuje bod D. Protože dráha difundující páry je složitější a odpor proti difuzi tím pádem větší, dochází ke zpomalení děje sdílení hmoty a zároveň i zpomalení sdílení tepla [8]. Teoretické modely tohoto období lze nalézt například v práci [14]. Děj sdílení tepla a hmoty se zastavuje, protože nelze materiál v klimatických podmínkách okolního prostředí více vysušit [14].

Sušícími křivkami se ve své práci zabývali například Günther [17] a Brunello [18], kteří studovali chování při sušení s pevnou vrstvou celulózové buničiny při různých provozních podmínkách. Obě studie řeší vztah teploty a rychlosti sušení a je v nich ověřeno, že počáteční obsah vlhkosti vzorků neovlivňuje rychlost sušení v lineární části sušících křivek.

Na jejich práci navázal Sousa [12], který analyzoval účinek některých procesních proměnných při konvekčním a kondukčně-konvekčním sušení přírodních textilních materiálů. V práci sledoval vliv počátečního obsahu vlhkosti textilie, teploty a rychlosti proudění vzduchu na tvar sušících křivek během provozních podmínek. Podrobnosti o experimentálním vybavení a konstrukci sušících křivek lze nalézt v jeho starší studii [19]. V práci [20] byly publikovány zobecněné sušící křivky bavlněných textilií. Metodou generálních sušících křivek založených na správnosti přenosu vlhkosti během procesu sušení se zabývaly také starší studie autorů Krasnikov [21] a Ciesielczyk [22]. Numerickým modelováním se zabýval například ve své studii Yiotis v roce 2005 [23], sušícím procesem v klasické sušárně pak například Hamdaoui ve své práci [24]. Všechny výše zmíněné studie řeší především teorii sušení a teoretické modely bez vztahu ke komfortním vlastnostem a bez důrazu na podmínky a použitou metodu měření.

1.3 Hodnocení procesu sušení s ohledem na termofyziologický komfort

Při hodnocení komfortních vlastností oděvů či textilií je nutné počítat i s tím, že oděv nezůstává stále v suchém stavu, ale při jednotlivých činnostech může navlhnout díky pocení nebo deštivému počasí. Obojí má za následek především zvýšení hmotnosti daného oděvu, lepivost oděvu na tělo, chladný a vlhký pocit.

Vyšší odvod tepla díky existenci vlhkosti v oblečení může být vnímán jako žádoucí i nežádoucí stav, podle toho v jakých klimatických podmínkách se uživatel pohybuje a jakou podstupuje fyzickou zátěž, viz například studie [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31], které ve svých závěrech zdůrazňují vliv množství vlhkosti v oděvu na komfort uživatele.

Rychlý odvod kapalného potu skrz textilii na její vnější stranu snižuje možnost ochlazení těla nositele, protože část tepla potřebná k jeho odpaření bude odebíraná pouze z okolního prostředí [32, 33]. Jak uvádí Hes ve svých studiích [34, 35], platí toto tvrzení pouze v případě volných oděvů, které neleží na pokožce. U oděvů přiléhavých je chladící efekt z vlhké textilie velmi dobře vnímán pokožkou uživatele a přispívá k jeho ochlazení. Se zvyšující mezerou mezi pokožkou a oděvem, tento efekt klesá. Odpařování vlhkosti (potu) z oděvu je tedy hlavním mechanismem sušení oděvu během jeho nošení [35].

Vliv horkého prostředí na fyziologické reakce sportovců a na jejich tělesný výkon je podrobněji popsán ve studii [36]. Studie je určena pro trenéry sportovců a obsahuje i doporučení, jakým způsobem vést trénink s ohledem na fyziologické procesy lidského organismu. Další autoři podobně zaměřené studie [31] sledovali snižování tělesné teploty pomocí speciálního navlhčeného chladícího oděvu před a během sportovního výkonu v horkém prostředí. Došli k závěru, že mírné odpařovací chlazení poskytuje významné termoregulační výhody během cvičení v horku.

Pro lepší pochopení a testování komfortních vlastností slouží také tzv. tepelní manekýni, především z důvodů simulace reálných podmínek pocení, jehož intenzita se liší nejen dle míry fyzické zátěže, klimatických podmínek, ale i podle rozmístění na lidském těle, jak zmiňují autoři studií [37, 38]. Z výše uvedených prací vyplývá, že rozmístění a množství potu na lidském těle není rovnoměrné a proto i způsoby vlhčení vzorků u testování doby sušení se u jednotlivých autorů významně liší.

Například Nielsen ve své práci [32] využívá způsob vlhčení pomocí uzavření vzorku s definovaným množstvím vlhkosti do plastových obalů a jejich ponechání minimálně po dobu 8 hodin. Odlišný způsob vlhčení používali ve své práci například Crow a Osczyevski [39], kteří vyzkoušeli tři způsoby vlhčení. Při prvním způsobu vzorky namočili do destilované vody a poté je lehce vymačkali pomocí papírových ubrousků, ve druhém způsobu na vzorky aplikovali 2,5 ml vody injekční stříkačkou a při třetím způsobu vkládali autoři studie rovnoměrně zavlhčené vzorky mezi dvě houby a takto je ponechaly přes noc. Ve studii Fourt a kolektiv [11] je popsán postup vlhčení vzorků ponořením do destilované vody přes noc. Ráno nechali vzorky volně odkapat do okamžiku, kdy ze vzorků odkapávala 1 či 2 kapky za minutu.

Množství aplikované vlhkosti se u jednotlivých autorů liší, například ve studiích [40, 41, 42] určuje množství aplikované vody plošná hmotnost textilie. Ve všech třech studiích odpovídá použité množství vlhkosti 30% hmotnosti vzorku v klimatizovaném stavu. V oficiálních metodikách [2, 3, 7] vychází množství aplikované vody z retenční schopnosti textilie. Stejný princip uvádí i studie [39, 43, 44]. Oproti tomu v normách [1, 5, 6] je přesně stanovené množství aplikované vlhkosti, které je stejné pro všechny vzorky.

Dalším problémem při porovnání metod a způsobů testování doby sušení je určení koncového bodu. Nielsen ve své práci z roku 1992 [32] využíval metodu sušení vlhkých vzorků na tepelném manekýnu a sledoval jeho tepelné ztráty. Ve chvíli, kde tepelné ztráty dosáhly ustáleného stavu, považoval testované vzorky za suché. Autoři studie [39] oproti tomu vycházeli z přesnosti vah a konec sušení ukončili ve chvíli, kdy vzorek obsahuje maximálně 5 % přidané vlhkosti.

S rozdílností jednotlivých metodik a přístupů k určení doby (či rychlosti) sušení se v literatuře setkáváme po celou dobu hodnocení této problematiky, jak ve své studii [44] zdůrazňuje i Laing kol.

V jedné z nejstarších prací, která se zabývá metodou sušení, z roku 1951 [11] využili autoři pomalu otáčející se kolo, na které zavěsili navlhčené bavlněné a vlněné vzorky. Tento způsob simuloval reálné podmínky při sušení textilií na šňůře. Poté byly vzorky v pravidelných intervalech odebírány a převažovány. V průběhu sušení byly dodrženy standardní klimatické podmínky. Rychlost proudění vzduchu zde není blíže specifikována, pouze autoři zmiňují, že odpovídá podmínkám sušení na šňůře, což není dostatečné. Z výsledků tohoto experimentu vyplývají následující poznatky. Druh použitých vláken ovlivňuje především absorpci textilií, nemá však tak významný vliv na dobu sušení. Velký vliv na sušení má i chlupatost přízí či celých plošných textilií. Mírná chlupatost textilií je schopná do určité míry zvýšit skutečnou efektivní výparnou plochu a tím pádem i zvýšit rychlost sušení. Na druhou stranu ale u textilií s vysokým vlasem dochází ke zpomalení rychlosti sušení kvůli vrstvě nehybného vzduchu. Také zde svými experimenty potvrzují, že hlavní část sušení probíhá s konstantní rychlostí [11].

V práci lze tedy nalézt jedny z prvních sušících křivek textilií, které vychází z gravimetrické metody. V posledních letech se sice objevuje větší množství studií, které se dobou a průběhem procesu sušení ve vztahu k termofyziologickému komfortu zabývají, avšak jsou mezi nimi značné rozdíly ve způsobu vlhčení a ve způsobu samotného průběhu testování doby sušení textilií. Tento fakt kritizují i autoři studie [44].

Mezi první studie, ve kterých se používá přístroj pro měření managementu vlhkosti (dále jen MMT), patří práce autorů [45]. Odvod vlhkosti v textiliích významně ovlivňuje lidské vnímání pocitu komfortu, proto zde autoři vyzdvihují nutnost testovat celkový management vlhkosti. Autoři zde popisují důležitost hodnotit šíření vlhkosti po obou stranách textilií horizontálně i vertikálně skrz textilii. Přístroj vyhodnocuje 10 zavedených indexů, které charakterizují vlastnosti šíření vlhkosti v textiliích. V této studii bylo na přístroji MMT naměřeno osm sad sportovního oblečení a výsledky ukazují významné rozdíly mezi použitými textiliemi. Nositelé jsou se zvyšující se vlhkostí v oděvu schopni lépe vnímat a subjektivně hodnotit rozdíly v pocitech lepkavosti a vlhkosti spojených s pocením nositele během fyzické aktivity [45].

Další práce, které používají pro testování přístroj MMT, jsou například studie autorů Troynikova a Supurena [46, 47].

Studie Troynikova [46] vyhodnocuje na přístroji MMT pleteniny ze 100% vlny, 100% viskózy, 100% polyesteru a kombinaci vlna/viskóza a vlna/polyester pro využití jako spodní vrstvy sportovního oděvu. Autor zde kromě jiného připouští, že hodnocení na přístroji MMT nezahrnuje vliv přítomnosti vzduchových mezer mezi pokožkou a tkaninou a také vliv mezní vrstvy mezi pokožkou a textilií při skutečném nošení. Z výsledků testování se jeví jako ideální především kombinace vláken vlna s polyesterem a vlna s viskózou, v tomto testování dosahují lepších vlastností než textilie pouze z jednoho druhu vláken [46].

Podobný výzkum zahrnuje i práce Supurena [47], která se zabývá testováním oboustranných pletenin v materiálových kombinacích na lícni a rubní straně: bavlna/ bavlna, bavlna/ polypropylen, polypropylen/ bavlna a polypropylen/ polypropylen. Textilie byly hodnoceny dle výsledků parametrů vedení vlhkosti v textiliích a tepelné absorpce. Veškeré hodnoty byly naměřeny na přístroji MMT a na přístroji Alambeta.

Výsledky testu ukazují, že polypropylenová vnitřní a bavlněná vnější strana pleteniny má lepší vlastnosti pro transport vlhkosti, poskytuje vysokou úroveň pohodlí a může být preferována pro letní sportovní oblečení. Ve studii je také porovnávána měrná tepelná jímavost textilií v mokřem a suchém stavu. V práci však nejsou zaznamenány sušící křivky, je zde hodnocena pouze rychlost šíření vlhkosti na spodní stranu textilie [47].

I přes tyto výsledky zůstávají autoři studie k testování na MMT mírně skeptičtí a zmiňují ve své práci, že se metoda testování na přístroji MMT zaměřuje pouze na transport kapalné vlhkosti v rovině textilie, ale nezahrnuje vlastnosti přenosu vodní páry, tepelné vlastnosti, sorpci vláken či omak, které také ovlivňují lidské vnímání komfortu. Metoda MMT je tedy vhodná jako jedna z částí hodnocení celkového termofyziologického komfortu a poskytuje pouze přibližné výsledky [46].

Jiným způsobem pohlíží na dobu sušení ve své studii Prahsarn [48], který tento faktor dává do souvislosti s dobou vysychání mikroklimatu během testování propustnosti textilií pro vodní páry a vzduchu a vychází z rozdílů relativních vlhkostí. V práci porovnává dvě metody pro hodnocení propustností a tepelných vlastností. Zabývá se ale pouze celkovou dobou sušení.

Potřebu zabývat se měřením doby a rychlosti sušení textilií nastiňují i práce [9, 16, 34, 35], které řeší problematiku tepelných vlastností oděvu v mokřem stavu. V nich autoři zdůrazňují významný vliv mokřeho oděvu na chladicí efekt. Vzhledem k tomu, že relativní propustnost vodní páry (relativní tok tepla odpovědný za ochlazování těla) a teplota textilie klesá v důsledku odpařování vody z povrchu tkaniny, je z hlediska tepelného komfortu v běžných klimatických podmínkách žádoucí, aby byl oděv schopen vlhkost rychleji transportovat od těla nositele. Výsledky studií [34, 35] tedy také potvrzují, že pokud je mokřý oděv přímo na pokožce, zvyšuje se významně chladicí efekt. Pokud je mezi oděvem a pokožkou mezera, je chladicí účinek nižší.

Odlíšné metody hodnocení doby sušení zmiňuje studie [44], která vyhodnocuje dvě metody doby sušení. První metoda využívá k testování zakrytované laboratorní váhy, na které autorka umístila navlhčený vzorek a sledovala úbytek hmotnosti. Chybí zde nastavení rychlosti proudu vzduchu, měření je proto značně zdlouhavé. Váha vzorku se zaznamenává v pětiminutových intervalech. Vyhodnocení doby sušení probíhá dvěma způsoby. První způsob vychází z rozdílu mezi hmotností klimatizovaného vzorku a vzorku sušeného. Druhý způsob porovnává rozdíl mezi hmotností aktuální u sušeného vzorku a hmotností předchozí. Práce neobsahuje sušící křivky, ale opět pouze celkovou dobu sušení a je zaměřena na význam určení koncového bodu sušení.

Jednoduchý způsob hodnocení doby sušení se objevuje také v práci autorů Varga a spol. [49], kde byly testovány bavlněné a tencelové tkaniny po ošetření pryskyřicí při různých teplotách. Na ošetřených a neošetřených textiliích byly změřeny tyto vlastnosti: sorpce kapaliny a vodní páry, rychlost sušení a absorpce tepla. Pro záznam sušících křivek je zde využit jednoduchý způsob. Vzorek textilie o rozměru 5 x 15 cm se umístí na citlivé váhy připojené k počítači. Pomocí injekční stříkačky se aplikuje množství 500 mg vodného roztoku barviva do středu textilie. Během sušení je vzorek pravidelně vážen po dobu 2 hodin. Pro každý vzorek byla provedena dvě měření a byla vypočítána průměrná sušící křivka. Měření je však díky absenci ofukování velmi zdlouhavé a nepřesné [49].

V roce 2018 se objevil nový přístroj na měření rychlosti sušení a záznam sušících křivek v práci [50]. Jedná se o zařízení, které využívá tzv. nekontaktního způsobu vytápění vzorku. Vzorek je umístěn těsně nad vyhřívací systém na tenkou platformu se zabudovaným teplotním čidlem. Samotný vyhřívaný systém není v kontaktu s váhami ani měřeným vzorkem.

Díky tomuto řešení není přesnost vah ovlivněna ostatními kabely, které jsou nutné pro napájení ohřívacího systému. Platforma se vzorkem je postavena přímo na analytické váhy. Rychlost vzduchu přímo nad vzorkem je nižší než hodnota $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. K zajištění stabilního prostředí a odvodu vlhkého vzduchu se zde poprvé objevuje ventilační systém. Nad celým systémem je umístěna kamera, která zároveň zaznamenává i oblast šíření vlhkosti. Rychlost sušení je zde hodnocena také pouze v lineární části sušících křivek. Přístup hodnocení rychlosti sušení z této studie [50] je tedy podobný zde prezentovanému zařízení. Liší se však teplotou měření a rychlosti proudění nad měřeným vzorkem. Naměřené sušící křivky v práci [50] oproti prezentovanému přístroji zahrnují nejen proces sušení, ale také období šíření vlhkosti po aplikaci tekutiny.

Hodnocení šíření vlhkosti a absorpci vlhkosti objevuje například ve studii [51], kde je pro záznam využita termokamera. V této práci ale není záznam průběhu sušení. Oproti tomu ve studii [52] z roku 2016 se objevuje využití termokamery i pro měření celkové doby sušení, která vychází ze zobrazené zavlhčené plochy. Sušící křivky se ale v této práci nevyskytují.

2 Předmět a cíle disertační práce

Předmětem disertační práce je studium problematiky sušení ve vztahu k termofyziologickému komfortu s důrazem na možnosti testování a hodnocení. Hlavním cílem práce je vytvořit nové zařízení, které bude schopné zajistit stejné izotermní podmínky pro jednotlivá měření i s možností regulace rychlosti ustáleného proudění okolního vzduchu nad testovaným vzorkem. Mezi další cíle práce patří ověření opakovatelnosti měření, porovnání různých metod vlhčení vzorků, vyhodnocení vlivu rychlosti proudění nad měřeným vzorkem, vliv izotermních a neizotermních podmínek a také vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termofyziologický komfort uživatele.

Vlastní disertační práce je rozdělena do osmi kapitol. Vzhledem k tématu disertační práce je druhá kapitola zaměřena na oblast přenosových jevů s důrazem na přenos vlhkosti a s tím spojený i přenos tepla. Přenos tepla a vlhkosti patří mezi základní mechanismy ovlivňující vnímání komfortu při nošení oděvů, tvoří tedy nedílnou součást při hodnocení komfortních vlastností samotných textilií. Jejich vzájemný vztah podrobně popisuje třetí kapitola. Součástí této kapitoly je i rešerše odborných studií ostatních autorů především v oblasti hodnocení termofyziologického komfortu textilií. Následuje čtvrtá kapitola, která pojednává o sorpčních vlastnostech textilních materiálů. Součástí teoretické části je i rozsáhlá rešeršní část v kapitole páté, která podrobně popisuje problematiku hodnocení procesu sušení ve vztahu ke komfortním vlastnostem textilních materiálů včetně zhodnocení dostupných metodik či norem.

Experimentální část začíná návrhem a realizací nového měřicího zařízení. Nové měřicí zařízení odstraňuje nedostatky stávajících metod. Zejména umožňuje měřit úbytek vlhkosti v textiliích gravimetrickým způsobem při izotermních podmínkách v nastavených časových intervalech. U nového zařízení lze regulovat rychlost proudění přímo nad měřeným vzorkem a díky zabudovanému zvedacímu elementu je zcela eliminovaná odchylka, kterou by způsobilo právě ofukování měřeného vzorku. Izotermní podmínky měření jsou zajištěny zabudovaným hliníkovým žebrem s přidavnými ventilátory. Tento způsob měření se v současných metodikách nevyskytuje.

Dílčí cíle disertační práce je možné rozdělit do následujících bodů a jsou součástí kapitoly sedmé a osmé:

- Porovnání metod vlhčení vzorků A a B.
- Vyhodnocení vlivu rychlosti proudění nad měřenými vzorky.
- Porovnání izotermních a neizotermních podmínek měření vzhledem k rychlosti sušení.
- Porovnání výsledků z nového přístroje s naměřenými daty z přístroje MMT.
- Vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termofyziologický komfort uživatele včetně subjektivního hodnocení suchosti či vlhkosti textilie.

Poslední osmá kapitola velmi úzce souvisí s kapitolou sedmou a slouží jako podklad pro hodnocení sušících křivek se vztahem k termofyziologickému komfortu vlhkých textilií.

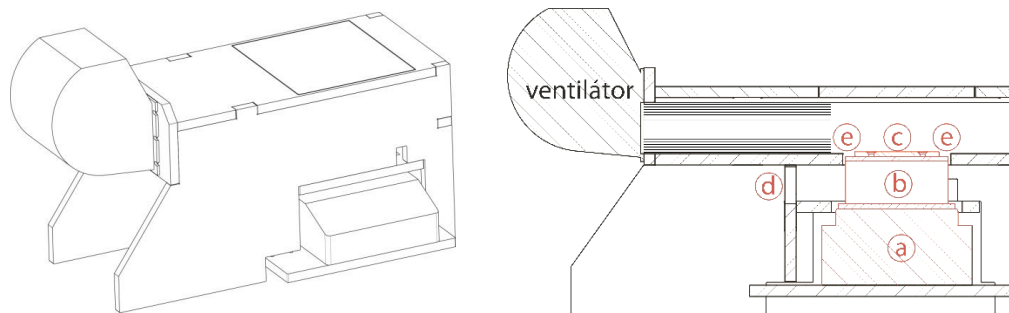
3 Popis vlastního řešení

3.1 Návrh nového měřícího zařízení

Z výsledků předchozích experimentů dle dostupných metodik [1, 6, 7] popsaných v diplomových pracích [55, 56, 57] a odborných článcích (například [12, 19, 44]) vyplývá, že rozhodujícím faktorem pro rychlost a průběh sušení je kromě teploty a vlhkosti také rychlost proudění. Tento fakt vyzdvihuje ve své studii především Chau [50], který se naopak snažil rychlost proudění z důvodů náročné regulace rychlostního profilu zcela minimalizovat. Ostatní dostupné metodiky a studie často vliv proudění zcela opomíjejí [7] nebo měří na zakrytovaných vahách [6, 44, 49], u kterých není vyřešen odvod vlhkosti pryč z prostoru nad vzorkem. Někteří autoři se rychlostí proudění sice zabývají [11], avšak neřeší již režim proudění. Proto je dílčím cílem této práce i návrh a realizace prototypu přístroje pro měření průběhu sušení textilií za přesně definovaných podmínek rychlosti proudění vzduchu nad vzorkem a také je zde využít vyhřívací element pro zajištění izotermních podmínek měření. Výslednému návrhu předcházely experimenty na upraveném přístroji Permetest pro měření paropropustnosti. Výsledky z tohoto experimentu shrnují články [58, 59].

Vytvořený první prototyp nového přístroje umožňuje měření s regulací rychlosti proudění od 1 do 5 m·s⁻¹ přímo nad měřenou textilií. Také obsahuje usměrňovací část pro dosažení ustáleného proudění. V původním návrhu prototypu figurovala i vyhřívaná deska dle norem [5, 53] jako tomu je například ve studii [50]. Od té bylo nakonec ustoupeno vzhledem k finanční náročnosti pro perfektní regulaci její teploty a technického řešení pro zakomponování na vážící element, aniž by docházelo k nepřesnosti vážení vlivem přírodních kabelů k vyhřívané destičce. Místo destičky bylo zvoleno jednodušší řešení, tzv. hliníkové žebro a přidané ventilátory, které žebro ve spodní části ofukují. Tím je zajištěna téměř konstantní teplota okolí a destičky během celého měření.

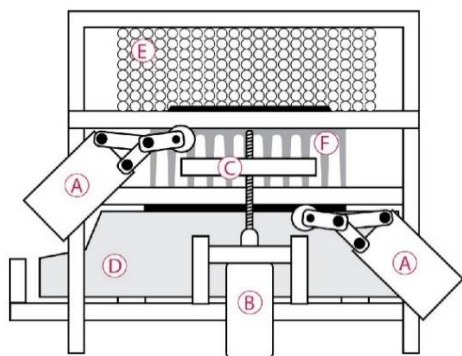
První prototyp přístroje popisují odborné články [60, 61] a je zobrazen na obrázku 2 a 3. První část tvoří kanál, který obsahuje ventilátor a usměrňující část pro proudění. Ventilátor umožňuje nastavit různé rychlosti proudění, které ofukuje testovaný materiál. Druhou část tvoří měřící jednotka, na které je horizontálně umístěn testovaný materiál. Měřící jednotka (obrázek 2) se skládá z analytických vah (a), hliníkového žebra (b) a destičky (c). Hliníkové žebro s připevněnou destičkou je ofukováno dalšími ventilátory, které zajišťují izotermní podmínky sušení. Pomocí upínacího rámečku (e) je na destičku připevněn měřící vzorek. Těsně před hliníkovým žebrem (d) jsou umístěné přídavné ventilátory, které pomáhají žebro během měření udržovat na konstantní teplotě. Testovaný vzorek zasahuje celou vlhčenou plochou do měřícího kanálu. Výsledky z prvního prototypu přístroje shrnují články [60, 61].



Obr. 2 První prototyp přístroje – schéma celkového vzhledu a řez

Později byl první prototyp přístroje rozšířen o zvedací element s časovými čidly a PLC jednotku viz schéma a fotografie na obrázku 3 (a) a (b), aby bylo docíleno maximální přesnosti měření. Podrobný popis přístroje je uveden v disertační práci.

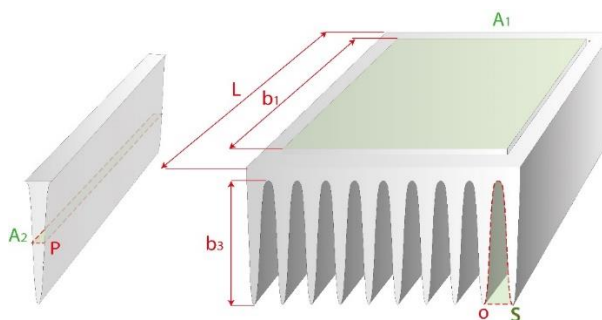
A - koncová čidla, B - zvedací mechanismus,
 C - rám zvedacího mechanismu, který zvedá měřicí člen,
 D - analytické váhy, E - usměrňovač proudění,
 F - hliníkové žebro



Obr. 3 (a) schéma z boku přístroje a (b) fotografie 2. prototypu přístroje - přední pohled

3.2 Výpočet přestupu tepla

Pro ověření izotermních podmínek bylo nutné provést následující výpočty. V tabulce 2 jsou uvedeny parametry hliníkového žebra (obrázek 4), na kterém je umístěn vzorek. Výpočty a tabulkové hodnoty fyzikálních veličin jsou platné pro teplotu $20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu $65 \pm 4 \text{ } \%$ [62].



Obr. 4 Chladící element – hliníkové žebro

Tab. 2 Konstrukční parametry žebra

celková délka chladiče - L	0,109 m
celková šíře chladiče	0,1 m
celková výška chladiče	0,055 m
délka destičky pro umístění vzorku - b_1	0,091 m
šíře destičky pro umístění vzorku	0,08 m
výška destičky pro umístění vzorku	0,005 m
výška žebra - b_3	0,045 m
obvod mezery mezi žebry - o	0,099 m
plocha průřezu mezi žebry - S	0,00028 m ²
plocha vzorku - A_1	0,00728 m ²
střední hodnota průřezu žebra - A_2	0,00044 m ²
celková hodnota průřezu všech žeber u paty žeber - A_3	0,006322 m ²
obvod žebra - P	0,226 m
celková plocha bočních stran	0,011169 m ²
celková plocha přední a zadní strany s výřezy žeber	0,0065 m ²

3.2.1 Chladicí efekt vznikající odparem vlhkosti při volné hladině

Během měření vlhkého vzorku dochází k odparu vlhkosti, který způsobuje významný chladicí efekt viz rovnice (3) a závisí kromě jiného i na teplotě [16]. Celý proces sušení na novém přístroji je urychlen nucenou konvekcí, kterou zajišťuje hlavní ventilátor. Pro účely výpočtu rychlost ofukování vzorku činí $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Výparné teplo má při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ hodnotu $2453,4 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [63]. Měrná plynová konstanta pro vodní páru r je $461,5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [13]. Rozdíl parciálních tlaků vodní páry při $RH = 65 \%$ a $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ vychází 817 Pa .

Pro výpočet rovnice (3) je však nutné nejprve spočítat součinitel přenosu hmoty β_c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] vztažený k rozdílu koncentrací podle rovnice (4) [13], následně je nutné přepočítat jej pomocí měrné plynové konstanty a termodynamické teploty tak, abychom získali součinitel přenosu hmoty vztažený k rozdílu parciálních tlaků β_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$] podle rovnice (3) [10]. Sherwoodovo číslo ve své podstatě vyjadřuje Nusseltovo difuzní kritérium [64] viz rovnice (5). Koeficient difuzivity vodní páry ve vzduchu lze spočítat ze vztahu (6) a dosahuje pro atmosférický tlak $1,01325 \text{ MPa}$ a teplotu $20 \text{ }^\circ\text{C}$ přibližně hodnoty $2,4\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ [65]. Za charakteristický rozměr tělesa v tomto případě je považována délka destičky ve směru proudění.

Výpočet Reynoldsova čísla Re , které je taktéž bezrozměrné, představuje rovnice (7) [10]. Toto číslo se používá u nucené konvekce a vychází z porovnání sil setrvačných a třecích. Dle hodnoty Reynoldsova čísla je určen typ proudění a následně tvar kritériální rovnice [64]. Kinematická viskozita vzduchu ν dosahuje hodnoty $1,532\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ [66].

$$\dot{Q}_1 = \beta_p \cdot \Delta p_p \cdot A_1 \cdot l_v = \frac{\beta_c}{r \cdot T} \cdot \Delta p_p \cdot A_1 \cdot l_v \quad (3)$$

$$\beta_c = \frac{Sh \cdot D_v}{b_1} \quad (4)$$

$$Sh = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Sc^{0,33} = 43,2 \quad (5)$$

$$D_v = 1,87 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{T^{2,072}}{p} \quad \text{pro } 282 \text{ K} \leq T \leq 450 \text{ K} \quad (6)$$

$$Re = \frac{v \cdot b_1}{\nu} \quad (7)$$

V tomto případě dosahuje Reynoldsovo číslo hodnoty 5939,9. Ostrá naběžná hrana však může způsobit u vyšších rychlostí lokální turbulenci (tohoto efektu si byli vědomi i autoři normy ISO 11092 [53]), kteří připouští jistý stupeň turbulence. Schmidtovo číslo Sc udává poměr mezi kinematickou viskozitou proudící tekutiny ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] a difuzním koef. složky D_v [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]. Pro vzduch a vodní páru lze jeho hodnotu nalézt také v tabulkách a dosahuje hodnoty 0,6 [67]. Doplněním obou bezrozměrných čísel Re a Sc do rovnice (5) [65] získáváme hodnotu Sherwoodova čísla Sh , která vychází 43,2. V literatuře lze nalézt více tvarů rovnice pro výpočet tohoto čísla [13, 67, 68], avšak rozdíly ve výsledcích jsou minimální a pro tento případ zanedbatelné. Dosazením Sh do rovnice (4) lze získat součinitel přenosu hmoty β_c viz výpočet (8), který vychází $0,0113 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Rovnice (9) počítá tepelný tok odvedený odparem z povrchu namočené textilie, kterou pokrývá souvislá vrstva kapaliny, a vychází 1,22 W.

$$\beta_c = \frac{Sh \cdot D_v}{b_1} = \frac{43,2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-5}}{0,091} = 0,0113 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_1 = \frac{0,0113}{461,5 \cdot 293,15} \cdot 817 \cdot 0,00728 \cdot 2,45 \cdot 10^6 = 1,22 \text{ W} \quad (9)$$

3.2.2 Výpočet koeficientu přestupu tepla α

Ve spodní části hliníkového žebra vzniká nucená konvekce pomocí tří přídavných ventilátorů, která podporuje izotermní podmínky měření. Rovnice (10) tedy zahrnuje výpočet koeficientu přestupu tepla konvekcí α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]. Všechna žebra jsou ofukována přídavnými ventilátory, které významně ovlivňují rozdíl teplot ΔT [K]. Cílem je, aby byl rozdíl teplot minimální. Pro účely výpočtu je uvažována rychlost $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tuto rychlost však lze zvýšit v případě vyšší rychlosti hlavního ventilátoru. Obdobně jako součinitel přenosu hmoty je i koeficient přenosu tepla prouděním spočítán pomocí tzv. podobnostních čísel a kritériální rovnice. Prandtlovo číslo lze spočítat dle vztahu (11), kde ν označuje kinematickou viskozitu vzduchu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], ρ hustotu vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], c_p měrnou tepelnou kapacitu ($1006 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a veličina λ_l součinitel měrné tepelné vodivosti vzduchu ($0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). Hodnota Prandtlova čísla v tomto případě vychází 0,71, tento výsledek odpovídá i hodnotám uvedených v publikaci [65].

Veličina b_2 [m] označuje tzv. charakteristický průměr pro nekruhový kanál, v tomto případě je nutné jej spočítat viz rovnice (12). Je zde aplikován výpočet dle [10] pro trubky nekruhového tvaru a jeho hodnota je 0,0113 m. Hodnotu Reynoldsova čísla Re počítá rovnice (82). Tato hodnota potvrzuje, že se jedná o laminární proudění [13]. Lze tedy využít zjednodušené kritériální rovnice (14) pro výpočet Nusseltova kritéria, které vychází 7,59 [64]. Dosazením Nusseltova čísla viz rovnice (15) se získá hodnota koeficientu přestupu tepla $17,46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{b_2} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda_1} = 0,71 \quad (11)$$

$$b_2 = \frac{4 \cdot S}{o} = \frac{4 \cdot 0,00028}{0,099} = 0,0113 \text{ m} \quad (12)$$

$$Re = \frac{v \cdot b_2}{\nu} = \frac{2 \cdot 0,0113}{0,00001532} = 1475 \quad (13)$$

$$Nu = 1,615 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{b_2}{L} \right)^{0,33} \quad (14)$$

$$= 1,615 \cdot (1475 \cdot 0,71 \cdot 0,104)^{0,33} = 7,59$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{b_2} = \frac{7,59 \cdot 0,026}{0,0113} = 17,46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1} \quad (15)$$

3.2.3 Přestup tepla žebry chladiče

Pro výpočet celkového tepelného toku viz rovnice (16) [65], který zahrnuje přestup tepla konvekcí z okolního vzduchu a vedení tepla skrz hliníková žebra chladiče, je nutné nejprve určit tzv. parametr m [m^{-1}] dle rovnice (17) uvedené v [65]. Tento parametr ve svém výpočtu zahrnuje koeficient přestupu tepla α a součinitel tepelné vodivosti hliníkového žebra λ_2 , který činí $211 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [65]. Hodnoty ostatních veličin jsou uvedeny v tabulce 2. Po dosazení do rovnice (18) dostáváme hodnotu $2,48 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \Delta T$.

$$\dot{Q}_2 = m \cdot b_3 \cdot \tanh(m \cdot b_3) \cdot \frac{\lambda_2}{b_3} \cdot A_3 \cdot \Delta T \quad (16)$$

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot P}{\lambda_2 \cdot A_2}} = 6,52 \text{ m}^{-1} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_2 &= (m \cdot b_3 \cdot \tanh(m \cdot b_3)) \cdot \frac{\lambda_2}{b_3} \cdot A_3 \cdot \Delta T \\ &= 0,2934 \cdot \tanh(0,2934) \cdot \frac{211}{0,045} \cdot 0,006322 \cdot \Delta T \\ &= 2,48 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (18)$$

3.2.4 Výpočet rozdílu teplot

V předchozích kapitolách byly vyjádřeny jednotlivé tepelné toky, ze kterých je nyní nutné spočítat rozdíl teplot. V celkovém výpočtu je zanedbaný vliv záření, které je díky lesklému vnitřnímu povrchu měřicího kanálu minimální. Rovnice (19) porovnává jednotlivé toky tepla, a to tepelný tok odparem na jedné straně a na straně druhé tepelný tok konvekcí a vedením skrz hliníkové žebro. V tomto případě platí okrajová podmínka 3. druhu, tzv. Robinova podmínka, která předpokládá rovnost hustoty toku tepla konvekcí mezi povrchem a tekutinou a hustotu tepelného toku vedením ve stěně v blízkosti daného povrchu. Rovnice (20) počítá rozdíl teplot.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \quad (19)$$

$$1,22 = 2,48 \cdot \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{1,22}{2,48} = 0,49 \text{ K} \quad (20)$$

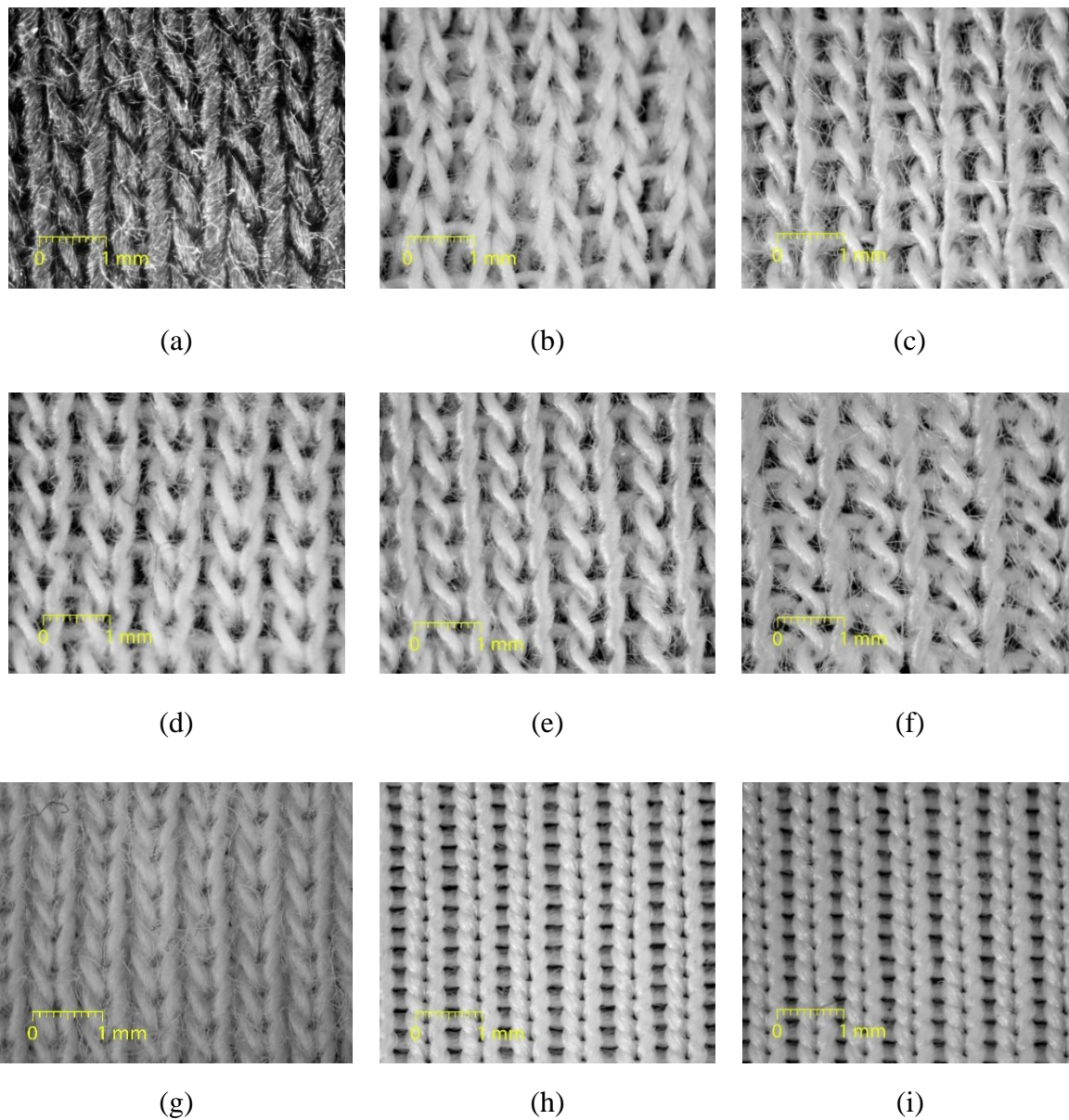
Vzhledem k tomu, že vychází rozdíl 0,49 K (°C), lze podmínky měření považovat téměř za izotermní. Je nutné brát v potaz i to, že veškeré výpočty jsou provedeny pro maximální výparnou plochu, která je, jak potvrdil experiment uvedený v disertační práci, u textilních vzorků téměř vždy menší. Pokud by se ještě zvýšila rychlost u spodních ventilátorů, nebo změnil tvar chladicího žebra (blok s více žebry), bude teplotní rozdíl zcela zanedbatelný. Také je nutné brát v potaz zjednodušení kvůli nehomogenosti a nerovnoměrnému povrchu a zanedbání případného teplotního spádu v tloušťce textilie.

Dodržení přesných klimatických podmínek měření má při sušení textilií zásadní vliv na přesnost výsledků. Je tedy nutné sledovat po celou dobu měření především teplotu a relativní vlhkost vzduchu v laboratoři. I přes odchylky, které připouští norma [62], je vhodné zamezit kolísání teploty i relativní vlhkosti vzduchu. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno po ověření opakovatelnosti měření při standardních klimatických podmínkách k úpravě klimatických podmínek v laboratoři dle podmínek definovaných jako alternativní zkušební prostředí. Alternativní zkušební prostředí umožňuje měřit při relativní vlhkosti vzduchu $50 \pm 4 \%$ a teplotě $23 \pm 2 \text{ °C}$ [62]. Klimatizování laboratoře na tyto alternativní zkušební podmínky není tak náročné jako v případě standardních podmínek a lze tedy zajistit přesnější výsledky. V případě alternativních zkušebních klimatických podmínek se teplotní rozdíl mírně zvýší, přesněji o 0,3 °C. Výpočet teplotního rozdílu byl následně ověřen i pomocí teplotního čidla, které bylo umístěno těsně pod povrch měřicí destičky. Záznam teplot je uveden v příloze disertační práce.

4 Analýza sušících křivek

4.1 Použité materiály

Po ověření opakovatelnosti měření uvedené v disertační práci v kapitole 6.4 a v odborném článku [69] na jednoduchých textiliích plátňové vazby byly vybrány nové materiály, a to hladké jednolící a oboulící zátažné pleteniny (obr. 5), které se standardně používají pro první oděvní vrstvu. Jejich specifikace je uvedena v tabulce 3 a 4. Všechny vzorky byly před samotným experimentem vyprány a zbaveny nečistot v ultrazvukové čističce.



Obr. 5 (a) P-BA, (b) P-PE, (c) P-MO, (d) P-TE, (e) P-MMO, (f) P-VI, (g) P-ME, (h) P-COOL, (i) P-PVC

Tab. 3 Specifikace vzorků – oboulící zátěžné hladké pleteniny

Značení vzorku		P-BA	P-PE	P-MO	P-TE	P-MMO	P-VI	P-ME
materiálové složení vzorku		100% bavlna	100% polyester	100% modal	100% viskóza (tencel)	100% mikromodal	100% viskóza	100% vlna (merino)
plošná hmotnost	[g·m ⁻²]	205	189	163	182	173	162	280
tloušťka textilie	[mm]	0,7	0,7	0,74	0,69	0,69	0,59	0,9
měrná hmotnost klimatizovaných vláken	[kg·m ⁻³]	1530	1380	1520	1520	1520	1520	1320
hustota sloupků	[10 cm ⁻¹]	112	105	100	100	90	88	135
hustota řádků	[10 cm ⁻¹]	150	150	155	150	160	160	140
rozteč sloupků	[mm]	0,89	0,95	1	1	1,11	1,14	0,74
rozteč řádků	[mm]	0,67	0,67	0,65	0,67	0,63	0,63	0,71
jemnost přízí	[tex]	20	20	20	20	20	20	20
délka nitě v očku	[mm]	3,3	3,4	3,4	3,5	3,6	3,6	3,2
průměr příze	[mm]	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,2
porozita	[%]	58	55	62	60	61	55	59

Tab. 4 Specifikace vzorků – jednolící zátěžné hladké pleteniny

označení vzorku		P-COOL	P-PVC
materiálové složení vzorku		100% polyester (coolmax)	100% polyvinylchlorid
plošná hmotnost	[g·m ⁻²]	174	188
tloušťka textilie	[mm]	0,4	0,4
měrná hmotnost klimatizovaných vláken	[kg·m ⁻³]	1380	1360
hustota sloupků	[10 cm ⁻¹]	105	110
hustota řádků	[10 cm ⁻¹]	300	300
rozteč sloupků	[mm]	0,95	0,91
rozteč řádků	[mm]	0,33	0,33
jemnost přízí	[tex]	20	20
délka nitě v očku	[mm]	2,8	2,7
průměr příze	[mm]	0,19	0,19
porozita	[%]	37	34

Příprava vzorků a postup měření včetně vyhodnocení dat

Před každým měřením byly z jednotlivých vybraných materiálů vystřiženy vzorky o rozměru 8 x 9,1 cm. Odběr vzorků probíhal dle normy [70]. Následně byly všechny vzorky ponechány v klimatických podmínkách laboratoře (alternativní zkušební prostředí: $t_a = 23 \pm 2$ °C a $RH = 50 \pm 4$ %) po dobu 24 hodin. Vzorky byly zváženy, jejich hmotnost byla označena jako hmotnost vzorku v klimatizovaném stavu. Poté byla zvolena metoda vlhčení vzorku viz kapitola 4.2.

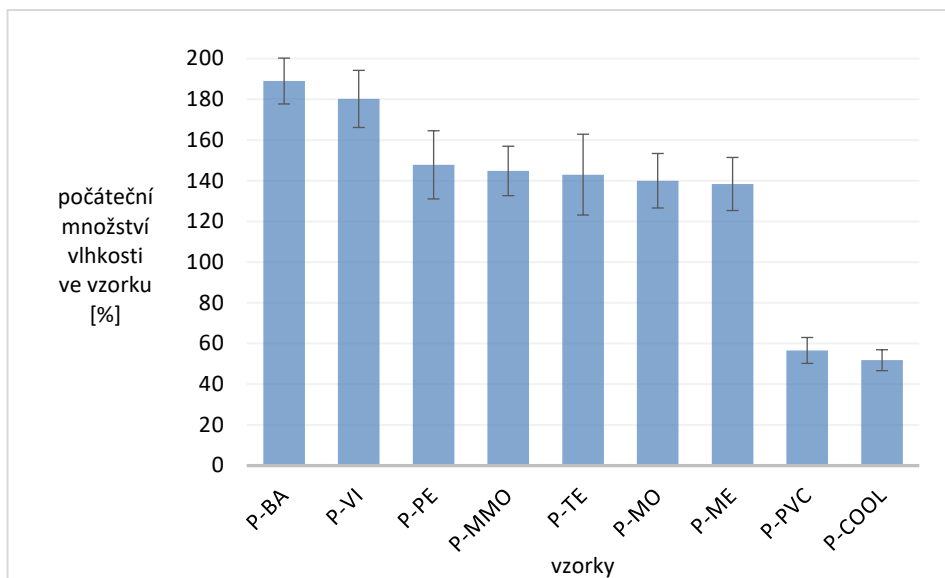
Následně byl vzorek umístěn na měřicí jednotku. Měření bylo zahájeno v okamžiku zapnutí ventilátoru. Aktuální hmotnost zavlhčeného vzorku byla zapisována automaticky v programu v počítači, který byl propojen s váhami. Z naměřených dat byla spočítána hmotnost zbývající vlhkosti ve vzorku. Každý vzorek byl změřen třikrát. V následujících grafech jsou již zaznamenány pouze průměrné hodnoty aktuální hmotnosti přidané vlhkosti v daném časovém intervalu. Pokud není uvedeno jinak, vztahuje se hmotnost vlhkosti vždy na stejnou plochu vzorku 0,00728 m².

4.2 Porovnání metod vlhčení vzorků A B

Autoři odborných studií zabývajících se sušením se ve způsobu vlhčení vzorků neshodují. V zásadě se objevují dva odlišné způsoby vlhčení. První z nich vychází z vlhčení celých vzorků dle jejich schopnosti zadržovat vlhkost a druhý používá aplikaci přesně stanoveného množství kapaliny. Princip vlhčení vzorků ponořením celého vzorku do kapaliny používali autoři studií [11, 39, 44]. Tento způsob určení množství retenční (přidané) vlhkosti pro zavlhčení vzorku vychází z norem [2, 7]. Následné vlhčení vzorku však u amerických norem [2, 3] probíhá pomocí pipety. Oproti tomu japonská norma [7] popisuje jiný postup. Nejprve se vzorek namočí do vodní lázně po dobu minimálně 3 hodin, vyjme se a po uplynutí deseti minut je takto navlhčený vzorek vložen na rám měřicího přístroje. Tyto rozdílné způsoby zavlhčení proto poskytují i rozdílné výsledky, protože se liší nejen v rozdílném množství počátečního zavlhčení vzorků (rozdílná celková doba sušení), ale také ve velikosti zavlhčené plochy vzorků (odlišné rychlosti sušení v lineární části sušících křivek). Například Chau a kol. [50] ve své studii zdůrazňují, že je vhodnější způsob vlhčení pomocí pipety. A to z toho důvodu, že přesně stanovené množství vlhkosti totožné pro všechny měřené vzorky lépe simuluje reálný případ zavlhčení oděvu potom při jeho nošení, resp. lidé volí oděv s ohledem na klimatické podmínky a očekávanou fyzickou zátěž, podle kterých vyberou oděv z textilie o vhodné tloušťce a plošné hmotnosti. Pokud množství aplikované vody vychází z plošné hmotnosti vzorků, jak je zmíněno například ve studiích [40, 41, 42] nebo z množství retenční vlhkosti, neodpovídá to dle nich tak dobře reálným podmínkám nošení oděvů. Vzhledem k nejednotnosti u ostatních autorů i jednotlivých norem byly v této práci navrženy dva způsoby vlhčení, zde označené jako metoda A a B. U obou metod probíhá vlhčení pomocí destilované vody.

Metoda A

U této metody je celý vzorek ponořen po dobu nejméně 3 hodin do kapaliny a následně ponechán k okapání po dobu 10 minut na savé papírové utěrce, aby ze vzorku neodkapávala kapalná vlhkost. Podobný princip využíval ve své studii i Crow [39], nebo norma [7]. Po uplynutí této doby se stanoví počáteční množství vlhkosti (=množství zadržené vlhkosti) ve vzorku. V grafu na obrázku 6 je množství množství vlhkosti ve vzorku vztahované k jeho hmotnosti v klimatizovaném stavu. Při vlhčení touto metodou jsou všechny vzorky zavlhčené rovnoměrně po celé ploše, avšak mají ve své struktuře odlišné množství vlhkosti dle jejich schopnosti zadržet vodu nejen uvnitř vláken, ale především ve své struktuře.



Obr. 6 Počáteční přidaná (retenční) vlhkost vztažená k hmotnosti vzorků v klimatizovaném stavu

Metoda B

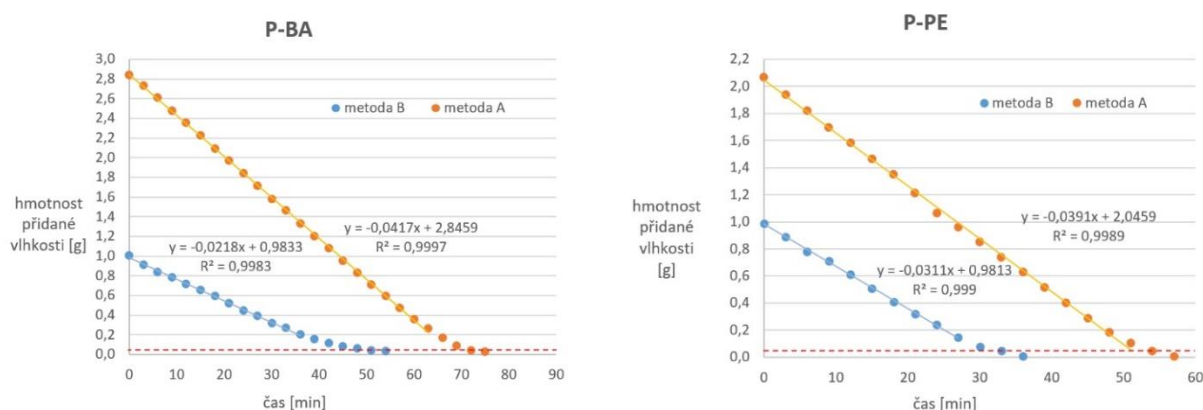
Druhý způsob vlhčení využívá aplikaci přesně definovaného množství vlhkosti na vzorek pomocí pipety. Množství aplikované vlhkosti bylo experimentálně stanoveno na $1 \pm 0,05$ g vlhkosti. Klimatizovaný vzorek se upne do rámu měřícího přístroje. Následně se na něj nanese na tři místa ve středové části vzorku vždy 0,33 g destilované vody (celkem tedy 1 g). Vzorek se zakryje fólií a počká se 15 minut, aby vlhkost vyvzlínala do všech stran. Po celou dobu je vzorek zakrytý a uzavřen v kanálu, aby nedocházelo k odparu vlhkosti. U této metody je ve všech vzorcích stejné počáteční množství aplikované vlhkosti, avšak jednotlivé vzorky se významně liší ve velikosti zavlhčené plochy podle jejich schopnosti šířit vlhkost v ploše.

Následující část porovnává obě metody vlhčení. Pro každý materiál byla provedena tři opakování, v následujících grafech jsou vyneseny pouze průměrné hodnoty v daných časových intervalech. Rychlost proudění nad vzorkem byla nastavena na $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jednotlivé grafy na obrázku 7 zobrazují celý průběh sušení s důrazem na lineární část, kdy je nejvýraznější chladící efekt, nebo-li nejvyšší rychlost sušení. Způsob hodnocení textilií pomocí určení rychlosti sušení pouze v lineární části sušící křivky používali ve své studii [50] například i Chau nebo Yanilmaz a kol. [40]. Z tohoto důvodu byl zároveň s analýzou naměřených sušících křivek proveden experiment popsáný v disertační práci v poslední kapitole. Cílem tohoto experimentu bylo zjistit, jakým způsobem ovlivňuje množství přidané vlhkosti na konci lineární části komfortní vjem uživatele podle jeho pocitu vnímání vlhka či sucha. I přes to, že v tomto bodě u některých textilií (především z přírodních vláken) hodnotitelé vnímali mírný pocit vlhka, považovali jej z hlediska celkového vnímání termofyziologického komfortu za téměř nevýznamný. Tímto způsobem tedy byla ověřena možnost a význam hodnocení sušících charakteristik jednotlivých textilií pomocí rychlosti sušení v lineární části sušící křivky.

Pro přesnější určení koncového bodu lineární části sušící křivky byla využita metoda pro nalezení tzv. bodu zlomu pomocí statistického programu R [71], která přesněji definovala konec lineární části sušení. Nalezení bodu zlomu na následujících naměřených sušících křivkách shrnuje v disertační práci příloha 7. Tento bod na křivce odpovídá dle odborné literatury [8, 11] tzv. kritickému bodu. Od tohoto okamžiku se děj sdílení hmoty zpomaluje a převažuje uvolňování vlhkosti zevnitř přízí a vláken.

V lineární části každé sušící křivky jsou data proloženy regresní přímkou, u které je spočítán koeficient determinace. Spočítané koeficienty determinace u všech naměřených dat byly vyšší než 0,99, tato hodnota potvrzuje vhodnost použití daného regresního modelu.

Koncový bod sušení určuje v jednotlivých grafech čárkovaná čára a vychází z přesnosti vah. Proces sušení je tedy považován za ukončený ve chvíli, kdy hmotnost zbývající přidané vlhkosti ve vzorku klesne pod 0,05 g. U vzorků z přírodních vláken by dosažení nulové hodnoty trvalo velmi dlouho, avšak množství vlhkosti je již hlediska vnímání termofyziologického komfortu zanedbatelné. Aby bylo možné spočítat z naměřených dat rychlost sušení a porovnat ji s teoretickou hodnotou, byly v grafech ponechány absolutní hodnoty zbývající přidané vlhkosti pro stejnou velikost vzorku (0,00728 m²). Tento způsob zvolili ve své studii i například Chau a kol. [50]. Na obrázku 7 jsou vybrány pouze dva vzorky, naměřené sušící křivky ostatních vzorků jsou součástí disertační práce.



Obr. 7 Porovnání sušících křivek pro metodu A a B

Z grafů na obrázku 7 je patrná výrazná linearita sušících křivek. Je to zřejmě tím, že v této práci se dařilo udržet teplotu sušeného vzorku na teplotě okolí díky dobrému tepelnému kontaktu vzorku s ohřívacím žebrem přístroje. Z toho důvodu nedochází k většímu poklesu teploty v textilií, který bývá v experimentech u ostatních autorů [11, 44, 50]. Grafy na obrázku 7 zobrazují sušící křivky pro obě metody vlhčení. Z naměřených dat je patrný vliv způsobu zvlhčení textilie. Například u vzorku P-BA nedocházelo k tak výraznému šíření vlhkosti v ploše, jako tomu bylo například u vzorku P-PE. Z tohoto důvodu vykazuje vzorek P-BA větší rozdíl mezi rychlostmi sušení v lineární části sušících křivek a to téměř dvojnásobný.

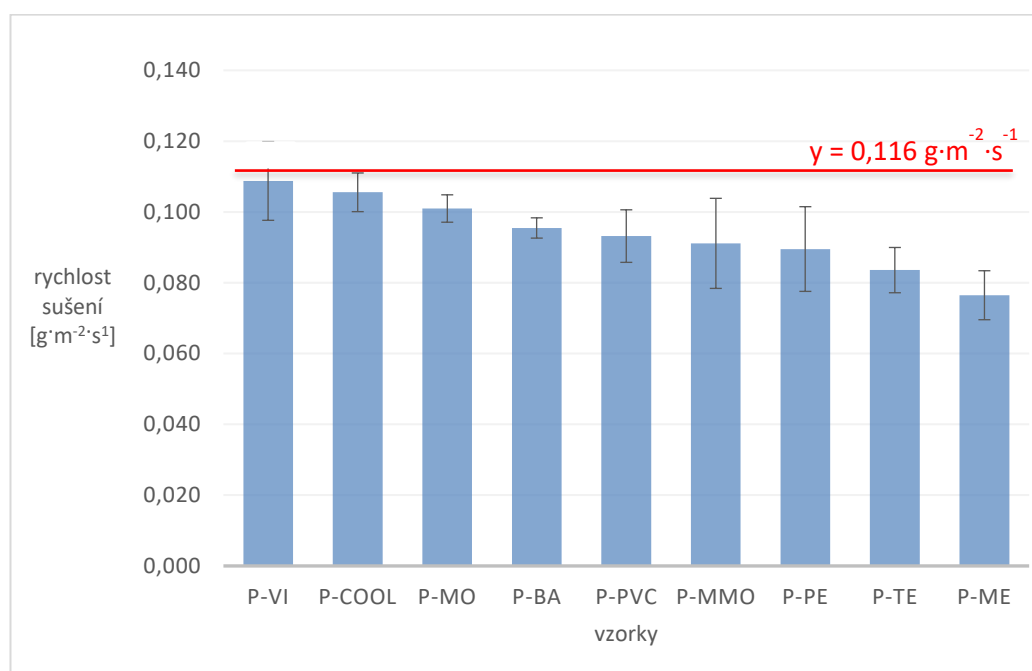
Metoda A lépe reprezentuje případ, kdy dochází k úplnému propocení první oděvní vrstvy a absorbovaný pot se nemůže rozvést dále do plochy. Skutečná efektivní vlhkosměnná plocha je v tomto případě ovlivěná pouze strukturou textilií. Porovnání s teoreticky vypočítanou hodnotou zobrazuje graf na obrázku 8, kde jsou rychlosti sušení v lineární části pro všechny vzorky vztažené na 1 m² a na jednu sekundu. Rovnice (21) počítá skutečné množství odpařené vlhkosti z textilie, kde člen k_1 určuje poměr nezavlhčené plochy k celkové ploše vzorku. Následně lze z této rovnice odvodit i velikost skutečné efektivní vlhkosměnné plochy, porovnáním teoretické hodnoty rychlosti odpařené množství vlhkosti se skutečnou hodnotou rychlosti odparu z naměřených dat.

$$\dot{m} = \beta_p \cdot (1 - k_1) \cdot \Delta p_p \quad (21)$$

Člen k_1 tedy určuje poměr nezavlhčené plochy k celkové ploše vzorku. V tabulce 5 je uveden výpočet velikosti skutečné efektivní vlhkosměnné plochy pro 1 m² textilie.

Tab. 5 Vypočtené hodnoty k_1 z naměřených dat

Vzorky	P-VI	P-COOL	P-MO	P-BA	P-PVC	P-MMO	P-PE	P-TE	P-ME
k_1	0,065	0,093	0,132	0,179	0,199	0,217	0,230	0,281	0,343
efektivní vlhkosměnná plocha [m ²] (1- k_1)	0,935	0,907	0,868	0,821	0,801	0,783	0,770	0,719	0,657



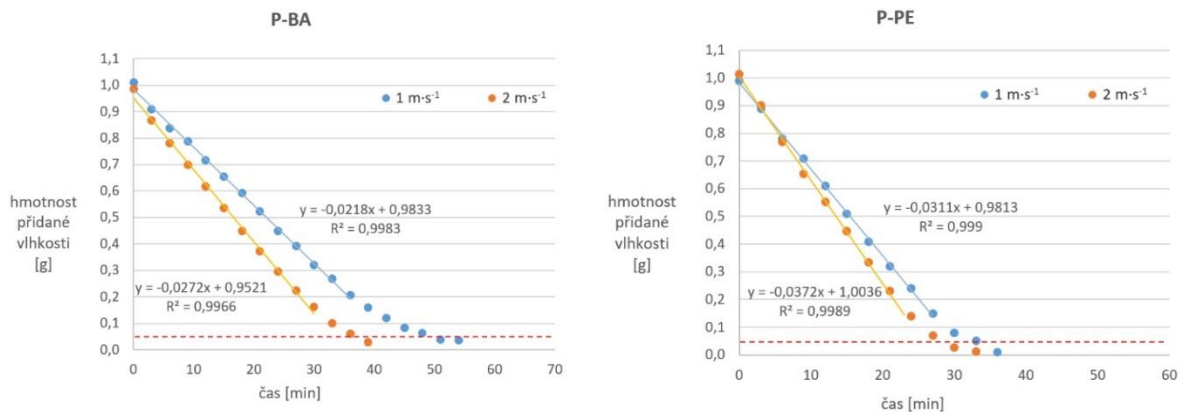
Obr. 8 Porovnání rychlostí sušení v lineární části pro metodu A vzhledem k teoreticky spočítané rychlosti sušení

Metoda B naopak přesněji odráží způsob zavlhčení textilie potem na lidském těle při mírném až středním stupni pocení, kdy nedochází k úplnému zavlhčení textilie a může se zde pozitivně projevit schopnost textilie šířit vlhkost v ploše. U této metody je tedy velikost skutečné efektivní vlhkosměnné plochy ovlivněna nejen strukturou, ale především i schopností textilií šířit vlhkost ve všech směrech. Z tohoto důvodu nová metodika i nový přístroj umožňuje oba dva způsoby vlhčení. Díky tomu lze otestovat komfortní vlastnosti materiálů s ohledem na účel použití, či umístění dané textilie na lidském těle dle rozložení potních zón, s různým stupněm zavlhčení textilie.

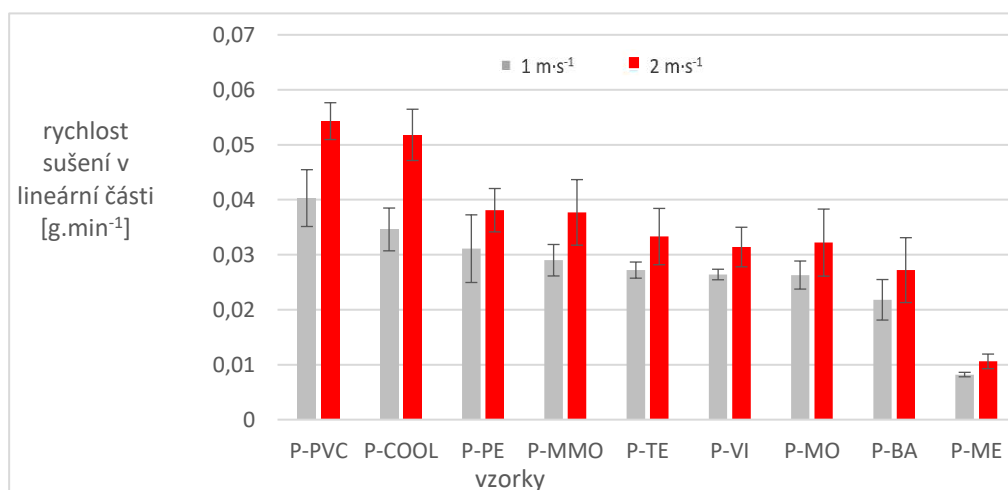
4.3 Vliv rychlosti proudění nad měřenými vzorky

Dílním cílem disertační práce bylo i vyhodnocení vlivu rychlosti proudění na rychlost sušení v lineární části křivek. Většina z norem [1, 2, 6, 7] či studií [32, 44, 49] neklade důraz na přesnou rychlost a především druh proudění, kterému jsou textilie během procesu sušení vystaveny. Rychlost proudění však společně s teplotou a relativní vlhkostí patří k zásadním parametrům, které rychlost sušení ovlivňují.

Z tohoto důvodu byl navržen a vyvinut zde prezentovaný nový přístroj, který umožňuje nastavit rychlost proudění v rozsahu $1\text{--}5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro hodnocení sušících křivek byly vybrány rychlosti $1\text{ a }2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, které se standardně používají například při hodnocení paropropustnosti dle mezinárodní normy ISO 11092 [53]. Porovnání s metodou bez nucené konvekce okolního vzduchu shrnuje například článek [69]. Jako způsob vlhčení byla vybrána metoda B. V grafech na obrázku 9 jsou opět vybrány pouze dva vzorky, naměřené sušící křivky ostatních vzorků jsou součástí disertační práce.



Obr. 9 Porovnání sušících křivek pro rychlosti proudění $1\text{ a }2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

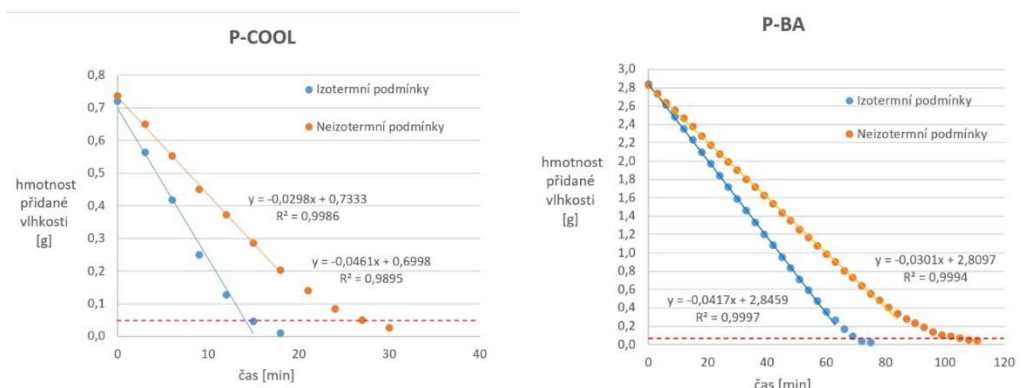


Obr. 10 Vliv rychlosti proudění na rychlost sušení

Graf na obrázku 10 porovnává rychlosti odparu (sušení) pro všechny vzorky. Nejnižší rychlost sušení v lineární části vykazoval pro obě rychlosti proudění vzorek P-ME, díky jeho nízké schopnosti šířit vlhkost v ploše. Nejvyšší rychlost a zároveň i nejkratší doba sušení se projevila u vzorků z profilovaných vláken P-COOL a P-PVC. Statisticky významný rozdíl mezi oběma rychlostmi proudění vykazovaly vzorky P-PVC, P-COOL, P-MMO, P-VI a P-ME. U ostatních vzorků díky vyšší variabilitě naměřených dat dochází k překrývání 95% intervalů spolehlivosti pro střední hodnotu. U všech vzorků však docházelo k zvýšení rychlosti sušení při nastavení vyšší rychlosti ofukování hlavního ventilátoru. Z naměřených dat je tedy patrný vliv rychlosti proudění nad měřeným vzorkem.

4.4 Vliv izotermních a neizotermních podmínek na rychlost sušení

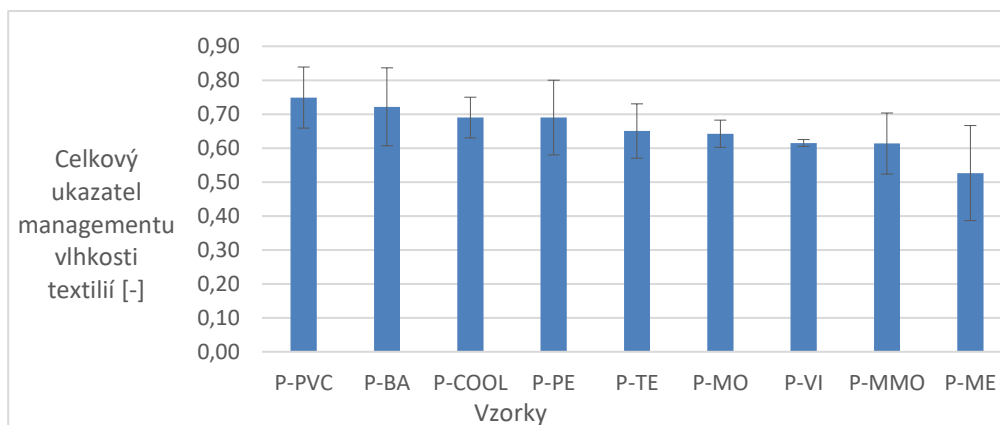
Jedním z cílů disertační práce bylo zajistit izotermní podmínky měření, jak je uvedeno například v normě [53] pro měření paropropustnosti. Celý výpočet je uvedený v kapitole 3.2. Z výsledků provedeného experimentu se potvrdil statisticky významný rozdíl na 5% hladině významnosti v rychlostech sušení při izotermních a neizotermních podmínkách, naměřené sušící křivky jsou v grafech na obrázku 11. Pokud by tedy nebyl vzorek dohříván, došlo by k výraznému poklesu teploty. S poklesem teploty souvisí i menší tlakový spád, který rychlost sušení významně ovlivní.



Obr. 11 Porovnání izotermních a neizotermních podmínek měření při $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

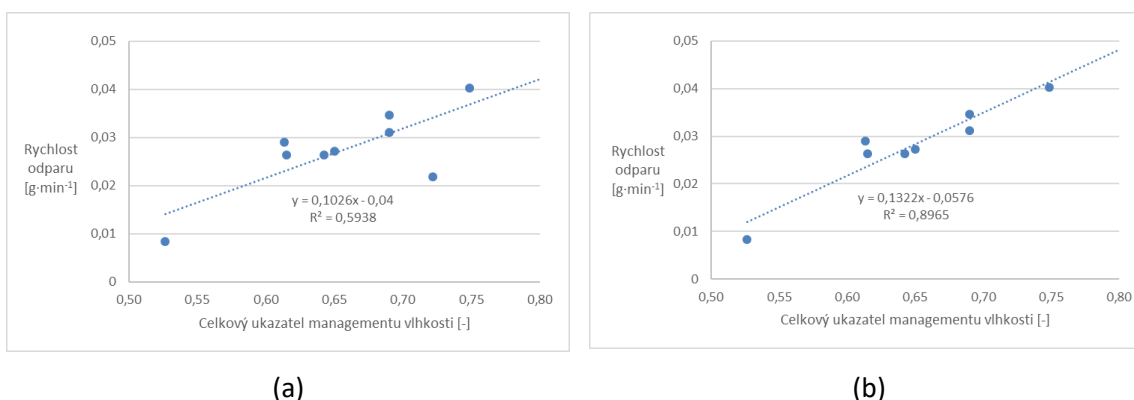
4.5 Porovnání výsledků z nového přístroje s naměřenými daty z přístroje MMT

V kapitole 4.2 byly prezentovány dva způsoby vlhčení vzorků – metoda A a B. U metody B je rychlost sušení ovlivněná především celkovou velikostí vlhkosměnné plochy, která přímo závisí na schopnosti textilie šířit vlhkost v ploše. A právě schopnost šířit vlhkost včetně rychlosti sušení patří k parametrům, které lze hodnotit na přístroji MMT, jako tzv. celkový ukazatel managementu vlhkosti. Graf na obr. 12 zobrazuje celkový ukazatel managementu vlhkosti textilií.



Obr. 12 Celkový ukazatel managementu vlhkosti jednotlivých vzorků

Jak je z grafu patrné, nejsou mezi naměřenými daty významné rozdíly. Podle tabulky vyhodnocení z přístroje MMT uvedené v [75] lze celkový ukazatel managementu vlhkosti většiny vzorků označit za VELMI DOBRÝ. Pouze vzorek P-ME vykazuje stupeň DOBRÝ. Závislost celkového ukazatele managementu vlhkosti na rychlosti sušení ukazují grafy na obrázku 13.



Obr. 13 (a) vztah celkového managementu vlhkosti a rychlosti odparu u metody B pro všechny vzorky, (b) vztah celkového managementu vlhkosti a rychlosti odparu u metody B s vyloučením vzorku P-BA.

Graf (a) na obrázku 13 ilustruje závislost mezi rychlostmi sušení u metody B a celkovým managementem vlhkosti pro všechny vzorky. Z grafu je patrné vybočující měření u vzorku P-BA. Tento vzorek vykazoval významné šíření vlhkosti pouze v jednom směru, proto byla u něho celková vlhkosměnná plocha relativně malá. Avšak přístroj MMT není schopen vyhodnotit šíření vlhkosti pouze v jednom horizontálním směru. Pokud by byl přístroj MMT schopen přesně zachytit velikost zavlhčené plochy, měla by se ve výsledcích projevit relativně silná lineární závislost, jako je tomu v grafu (b), ze kterého je vzorek P-BA vyloučen. Hodnocení managementu vlhkosti na přístroji MMT je tedy vhodné především u vzorků, kde se vlhkost šíří stejně ve směru řádku i sloupku u pletenin či útku a osnovy u tkanin. Pokud dochází k šíření vlhkosti pouze v jednom směru, není to přístroj MMT schopen odlišit. Směrové šíření vlhkosti u přístroje MMT považuje za nedostatečné i například studie Troynikova [46]. Rychlost sušení tedy nelze jednoznačně z přístroje MMT stanovit.

4.6 Vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termofyziologický komfort

Množství vlhkosti v textiliích má zásadní vliv na termofyziologický komfort nositele. Velké množství vlhkosti způsobí nejen rychlý odvod tepla (ochlazení nositele), ale zároveň i nepříjemný pocit lepivosti či škrábavosti na pokožce. Proto se poslední dílčí cíl disertační práce zaměřuje na vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích ve vztahu k termofyziologickému komfortu uživatele. Nejprve byl ověřen vliv přidané vlhkosti na měrnou tepelnou jímavost, která charakterizuje v podstatě tepelný omak a měrnou tepelnou vodivost v případě úplného zavlhčení vzorků. Následně byly tyto hodnoty porovnány s hodnotami naměřenými u vzorků v klimatizovaném stavu. U naměřených dat se u všech vzorků potvrdil významný vliv přidané vlhkosti na tyto vlastnosti. Naměřená data jsou součástí disertační práce v kapitole 8.

Následoval experiment, který porovnával množství zbývající přidané vlhkosti v textiliích během procesu sušení s hodnotami měrné tepelné jímavosti a subjektivním hodnocením uživatelů. Celý proces je zaznamenán v příloze 9. Jako stěžejní byl vybrán tzv. kritický bod na konci lineární části.

V tomto bodě klesá intenzita chladícího toku, proto bylo nutné ověřit skutečný stav zavlhčené textilie, její tzv. “suchost” či “vlhkost”. Všechny vzorky byly před samotným experimentem opět vyprány a zbaveny nečistot v ultrazvukové čističce. Následně byly ponechány po dobu 24 hodin v klimatických podmínkách laboratoře při alternativních podmínkách. Vybraní hodnotitelé byli ve věku mezi 35–65 lety. Vzorky byly navlhčeny metodou A a po 10 minutovém odkapání byly zváženy. Poté byly v pravidelných 15 minutových intervalech přikládány na dobu 5 sekund na předloktí hodnotitele a převáženy. V čase mezi hodnocením a vážením byly vzorky ponechány k volnému schnutí na stole v klimatických podmínkách laboratoře. Hodnocení probíhalo na stupnici 1–5 včetně půl stupňů. Jednotlivé stupně pocitu vlhka či sucha popisuje tabulka 6. Na základě hodnocení uživatelů byl zvolen jako hraniční stupeň 2. Hodnoty nižší nebo rovny stupni 2 byly brány jako komfortní.

Tab. 6 Hodnoty „subjektivního vnímání vlhkosti ve vzorku“ na konci lineární části sušící křivky

Hodnotitel/ vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	M_e	n dovzar	přidaná vlhkost ve vzorku [%]	přidaná vlhkost ve vzorku [g] (o ploše 0,00728 m ²)	přidaná vlhkost vztahovaná na 1 m ² [g·m ⁻²]	měrná tepelná jímavost [W·m ⁻² ·s ^{0,5} ·K ⁻¹]
P-BA	2	1,5	1,5	3	1,5	1,5	1	1	3	1,5	0,37	18	0,26	36	372
P-MO	2	1,5	2	3	2	1,5	1,5	1	3	2	0,35	21	0,25	34	329
P-TE	2	2	2	4	2	2	2	2	2,5	2	0,14	20	0,27	37	369
P-MMO	1,5	1,5	2,5	2,5	2	2	2	1,5	2,5	2	0,22	20	0,25	34	341
P-VI	1,5	2	2	3	2	2	1,5	1,5	3	2	0,2	24	0,28	38	321
P-ME	1,5	1	2	3	2	2	1	1	2	2	0,28	21	0,42	58	272
P-PE	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	0,22	7	0,1	14	301
P-COOL	1	1	1,5	1	1	1,5	2	1	2	1	0,21	4	0,05	7	342
P-PVC	1,5	1	1	1	1	2	2	1	2,5	1	0,28	8	0,11	15	338

V okamžiku určení stupně suchosti hodnotitelem byla zaznamenána aktuální hmotnost vzorku.

Pro lepší porovnání bylo určeno i procentuální zavlhčení vzorku jako množství přidané vlhkosti vztažené k hmotnosti vzorku v klimatizovaném stavu. Jednotlivé hodnocení vždy probíhalo maximálně se dvěma hodnotiteli, aby nedošlo k ohřevu vzorků kontaktem s ostatními hodnotiteli. Pořadí přikládání vzorků bylo zvoleno náhodně. Hodnocení stejného vzorku probíhalo mezi oběma uživateli nejdříve po 15 sekundách.

Jednotlivá hodnocení hodnotitelů byla vždy přiřazena k procentuálnímu vyjádření vlhkosti ve vzorku s přesností ± 2 %. Přehled všech hodnocení je uveden v příloze 9 disertační práce. Z vyhodnocených dat byl vybrán bod, který odpovídal zavlhčení vzorků na konci lineární části sušících křivek. Tento bod na sušících křivkách byl zvolen především z důvodu, aby se ověřil vliv vlhké textilie na termofyziologický komfort uživatele v okamžiku, kdy dochází ke zpomalení sušícího procesu a snižuje se intenzita chladícího toku.

Z hodnot získaných od 9 hodnotitelů byl určen výsledný stupeň pocitu suchosti v daném bodě a také byla vyhodnocena shoda mezi hodnotiteli z hlediska vnímání pocitu vlhka či sucha pomocí variability mediánu ordinální škály (= n dorvar) [72].

Z hodnot mediánů ze získaných stupňů suchosti od všech hodnotitelů můžeme u všech vzorků konstatovat, že na konci lineární části sušících křivek lze považovat příslušné množství vlhkosti v textiliích z hlediska vnímání pocitu sucha či vlhka stále za komfortní. U vzorků z přírodních vláken se hodnota zavlhčení na konci lineární části sušení pohybuje okolo 18–24 %, u vzorků z vláken syntetických díky jejich nízké nebo téměř nulové navlhavosti činí pouze 4–8 %. V tabulce jsou uvedeny i absolutní hodnoty vlhkosti pro plochu vzorku $0,00728 \text{ m}^2$, aby je bylo možné vztáhnout k naměřeným sušícím křivkám.

V tabulce 5 jsou kromě subjektivního hodnocení suchosti od všech hodnotitelů uvedeny také hodnoty měrné tepelné jímavosti. V odborné literatuře [73] lze nalézt tabulku s hodnotami tepelné jímavosti různých typů suchých, vlhkých či zcela mokrých textiliích. Jak uvádí Hes ve své práci [10], praktické hodnoty suchých textilií se pohybují mezi $20\text{--}400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{0,5}\cdot\text{K}^{-1}$. Naměřené hodnoty měrné tepelné jímavosti tedy potvrzují suchý a teplý omak textilie.

Ze získaných hodnot uvedených v příloze 9 lze vyhodnotit subjektivní vnímání termofyziologického komfortu i při dalších úrovních zavlhčení testovaných textilií a získat tak ucelený přehled o vnímání pocitů sucha či vlhka s ohledem na zavlhčení dané textilie. Z výsledků této kapitoly lze tedy usuzovat, že rychlost sušení v lineární části je pro hodnocení sušících křivek z hlediska termofyziologického komfortu zásadní.

5 Zhodnocení výsledků pro vědní obor nebo pro praxi

Původním impulsem pro vytvoření celé práce byl požadavek na hodnocení funkčních materiálů pro Olympijské hry pro firmu Alpine pro. Vzhledem k mé dlouholeté praxi na pozici designér a zároveň mé spolupráci s oddělením materiálů v oblasti výzkumu hodnocení komfortních vlastností textilií na území Asie a Evropy bylo potřeba vyvinout způsob, jak hodnotit materiály určené pro první oděvní vrstvu z hlediska jejich sušících charakteristik.

Současné metody a přístroje nezajišťují přesně definované podmínky měření, především rychlost a druh proudění, nebo jejich způsob hodnocení procesu sušení vzhledem k termofyziologickému komfortu není dostačující. Výsledkem této disertační práce proto byla realizace nového způsobu měření rychlosti a celkové doby sušení textilií včetně analýzy naměřených sušících křivek.

Nový přístroj včetně prezentovaného způsobu hodnocení lze tedy zařadit mezi stávající metodiky týkající se termofyziologického komfortu. Naměřené sušící křivky včetně spočítaných rychlostí sušení jsou tedy významným parametrem pro posuzování kvality textilií určených především pro první oděvní vrstvu.

V současné době je podána patentová přihláška, aby bylo možné případně přístroj uvést i do praxe.

6 Doporučení na pokračování práce v daném tématu a oboru

Další výzkum v této oblasti by bylo vhodné zaměřit i na jiné textilie, především složitější pletářské vazby, textilie z různě profilovaných vláken či jejich kombinace. Z naměřených výsledků by pak bylo možné navrhnout i nové textilní struktury, které umožní velmi rychlý proces sušení i při intenzivním pocení. Současní výrobci textilií pro spodní oděvní vrstvu se zaměřují především na rychlý rozvod vlhkosti v ploše, avšak neřeší již skutečnou velikost efektivní vlhkosměnné plochy. V případě extrémní zátěže nebo vysoké okolní teploty však může dojít k úplnému zalití textilie potem a schopnost textilií rozvést vlhkost do plochy se v tomto případě neprojeví bohužel tak významně.

V okamžiku úplného zavlhčení textilie je velikost skutečné efektivní vlhkosměnné plochy ovlivněna především vlastní strukturou textilie a bylo by vhodné této oblasti věnovat samostatný výzkum. Dle poznatků z odborných studií je bohužel tato oblast velmi málo prozkoumaná, pravděpodobně i z důvodu nedostačujících současných metodik. Nový přístroj umožňuje hodnotit rychlost sušení i u textilií, které jsou zcela zavlhčené, za přesně definovaných podmínek. Lze na něm tedy provést další výzkum se zaměřením na tuto oblast.

Předložená disertační práce je zaměřena na textilie vhodné pro první oděvní vrstvu, přístroj ale umožňuje i testování textilií, které mají vyšší plošnou hmotnost a bylo by vhodné na tuto práci navázat a ověřit výsledné poznatky i na souboru textilií o vyšší plošné hmotnosti.

Jako další možnost kam směřovat výzkum v této oblasti se nabízí i hodnocení pocitu subjektivního vnímání vlhkosti v textiliích na širší skupině respondentů a případně porovnat získané výsledky i s dalšími termofyziologickými vlastnostmi (například paropropustností textilií v zavlhčeném stavu).

7 Seznam publikovaných prací

7.1 Publikace v odborných časopisech se vztahem ke studované problematice

- [I] HEINISCH, T., P. TĚŠINOVÁ a L. POLOŠČUKOVÁ. Drying speed testing of PES fabric with defined moisture management. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* [online]. 2020, 1(139), 43-49. ISSN: 1230-3666.
Dostupné z: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.5857>
- [II] HEINISCH, T., P. TĚŠINOVÁ a L. POLOŠČUKOVÁ. Moisture management for different air conditions. *Vlakna a textil* [online]. 2017, 24(3), 64-67. ISSN 2585-8890.
Dostupné z: http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2017_3.pdf
- [III] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. New instrument for determination of isothermal drying rate of fabrics at constant air velocity. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. 2019, 14(5). ISSN 1558-9250.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1558925019873482>

7.2 Ostatní publikace v odborných časopisech

- [IV] HEINISCH, T., V. BAJZÍK, R. KNÍŽEK a Z. GREGUŠOVÁ. Effect of the process of lamination microporous nanofiber membrane on the evaporative resistance of the two-layer laminate. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, **677**, 103-108. ISSN 1022-6680. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.677.103>

7.3 Příspěvky ve sbornících

- [V] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. The influence air speed for moisture management. In: *International Ph.D. Students Day – 9th Central European Conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, 40-43. ISBN 978-80-7494-355-3.
- [VI] HEINISCH, T., P. TĚŠINOVÁ a L. POLOŠČUKOVÁ. Moisture management for different air conditions. In: *STRUTEX: structure and structural mechanics of textile fabrics: 21st international conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016, 303-308. ISBN 978-80-7494-269-3.
- [VII] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. Inovation of methodology for moisture management. In: *Workshop for Ph.D. Students of Faculty of Textile Engineering and Faculty of Mechanical Engineering TUL: 20th-23rd September 2016*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016, 44-49. ISBN 978-80-7494-293-8.
- [VIII] HEINISCH, T., V. BAJZÍK, a L. HES. The drying speed of outdoor textiles. In: *TEXSCI'13: textile science 2013: 8th international conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 56. ISBN 978-80-7372-989-9.
- [IX] HEINISCH, T. Problematika měření schnutí u textilií. In: *Workshop pro doktorandy Fakulty textilní a Fakulty strojní Technické Univerzity v Liberci*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 41-45. ISBN: 978-80-7372-987-5.

- [X] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. The creation of textile sandwich fabrics and optimization of their properties. In: *19. STRUTEX: structure and structural mechanics of textile fabrics: 19th international conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012, 167-168. ISBN 978-80-7372-913-4.
- [XI] PEICHOVÁ, T. a V. BAJZÍK. Creation of textile sandwiches fabrics and optimization of their properties due to thermophysiological properties of separate layers of materials. In: *12. World Textile Conference AUTEX*. Zagreb: university of Zagreb, 2012, 1601-1606. ISBN 978-953710549-5.
- [XII] PEICHOVÁ, T. Creation of textile sandwiches fabrics and optimization of their properties due to thermophysiological properties of separate layers of materials. In: *Workshop pro doktorandy Fakulty textilní a Fakulty strojní Technické Univerzity v Liberci*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012, 85-89. ISBN 978-80-7372-891-5.

7.4 Citace k publikaci autora [II] uvedené v databázi Scopus

- [XIII] LEGERSKÁ, J., D. ONDRUŠOVÁ a J. KRMELA. Evaluation of thermal insulation properties and dynamic moisture transfer of knitted fabrics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, **776**(1), ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/776/1/012100>
- [XIV] ARABULI, S., V. VLASENKO a V. MARTINKOVÁ. Liquid moisture transport performance of textiles. Evaluation of surface water absorbency of terry fabrics. *Vlákna a textil* [online]. 2018, **25**(2), 3-7. ISSN 2585-8890. Dostupné z: http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2018_2_1.html
- [XV] BENLTOUFA, S., I. OUESLATI, A. BOUGHATTAS a F. FAYALA. Saturation rate determination during ascendant, horizontal and descendant capillary rise using electrical resistivity. *Vlákna a textil* [online]. 2018, **25**(2), 14-18. ISSN 2585-8890. Dostupné z: http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2018_2_3.html
- [XVI] LEGERSKÁ, J. Evaluation of surface water absorbency of terry fabrics. *Vlákna a textil* [online]. 2018, **25**(2), 59-63. ISSN 2585-8890. Dostupné z: http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2018_2_10.html

8 Seznam použité literatury

- [1] AATCC Test Method 195-2009. *Liquid moisture management properties of textile fabrics*. USA: AATCC Committee RA63, 2009.
- [2] AATCC Test Method 199-2011. *Drying time of textiles: Moisture analyser method*. USA: AATCC Committee RA63, 2011.
- [3] AATCC Test Method 200-2017. *Drying rate of fabrics: Heated plate method*. USA: AATCC Committee RA63, 2017.
- [4] AATCC Test Method 201-2014. *Drying rate of fabrics: Heated plate method*. USA: AATCC Committee RA63, 2014.
- [5] TNI CEN/TR 16422. *Klasifikace termoregulačních vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [6] ISO 17616: 2014. *Textiles: Determination of moisture drying rate*. Geneva: International organization for standardization, 2014.
- [7] JIS L 1096: 1999. *Testing methods for woven fabrics: Drying speed*. Tokyo: Japanese Standards Association, 1999.
- [8] HOLEČEK, O. *Sušení*. In: *Pedagogika: labchi* [online]. VŠCHT Praha, 2014 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/labchi/S.pdf>
- [9] HES, L., V. BAJZÍK a I. DOLEŽAL. A new index of thermal comfort of sport dresses and underwear in wet state. In: *International conference on emerging trends in traditional & technical textiles*. India, 2014, 10-14. ISBN 978-93-5156-700-4.
- [10] BARTÁK, M. *Úvod do přenosových jevů pro Inteligentní budovy* [on-line]. Praha: České vysoké učení technické, 2010 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/33812217-Uvod-do-prenosovych-jevu-pro-inteligentni-budovy.html>
- [11] FOURT, L., A. M. SPOKNE, D. FRISHMAN a M. HARRIS. The Rate of Drying of Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 1951, **21**(1), 26–33 [cit. 2019-01-01]. ISSN 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/004051755102100107>
- [12] SOUSA, L.H.C.D., A. M. SCARMAL, O.C. MOTTA LIMA, N.C. PEREIRA a E. S. MENDES. Generalization of the drying curves in convective a conductive/convective textile fabric drying. In: *Drying 2004 - Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*. Brazil: São Paulo, 2004, vol. A, 710-717. ISBN 85904573119788590457312.
- [13] HEMZAL, K. a J. CHYSKÝ. *Přenosové jevy v technice prostředí*. Praha: České vysoké učení technické, 1983.
- [14] HAGHI, A. K. and H. GHANADZADEH. A study of thermal drying process. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2005, 12(6), 654-663. ISSN 0971-457X
- [15] HES L. a V. BAJZÍK. Determination of the in - plane water vapour resistance of selected fabrics. In: *Proceeding of the ITTC Congress*. Izmir, 2018.
- [16] HES, L. a M. BOGUSLAWSKA-BACZEK. The effect of ribs on cooling ability of wetted shirt knits at low air velocity. In: *22nd International Conference STRUTEX*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, 2018.
- [17] GÜNTHER, P. A. S., G. BRUNELLO, E. C. BIANCHINI a J. L. PAIVA. In: *Proceedings of the Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. Campinas, 1984, 318-329.
- [18] BRUNELLO, G., J. L. PAIVA, P. A. S. GÜNTHER a E. C. BIANCHINI. Estudo da Cinética de Secagem de Pasta Celulósica em Leito Fixo: Modelo de Capilarida de. In: *Secagem no DEQ-EPUSP, RBE, Caderno de Engenharia Química*. 1992, 4, 147-152.
- [19] SOUSA, L. H. C. D. Estudo da secagem de materiais têxteis. *Doctor Thesis*. Maringá, 2003.
- [20] MOTTA LIMA, O. C. The methodology of generalized drying curves applied to paper drying. *Acta Scientiarum*. 2000, **22**(5), 1173 - 1177.

- [21] KRASNIKOV, V. The methods of analysis and calculation of drying kinetics. *Drying*. 1980, 57-62. ISBN-10 0070439761. ISBN 13 9780070439764.
- [22] CIESIELCZYK, W. Universal drying curve. *Drying*. 1996, 103-110. ISBN-10 8386903066. ISBN-13 978-8386903061.
- [23] YIOTIS, A. G., A. K. STUBOS, A. G. BOUDOUVIS, I. N. TSIMPANOIANNIS a Y. C. YORTSOS. Pore-Network Modeling od Isothermal Drying in Porous Media. *Transport of Porous Media* [online]. 2005, **58**(1,2) 63-86. [cit. 2019-05-20]. ISSN 1573-1634. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11242-004-5470-8h>
- [24] HAMDAROU, M. A. BAFFOUN, K. B. CHAABEN a F. HAMDAROU. Experimental Study and Mathematical Model to Follow the Drying Phenomenon of Knitted Textile Fabric. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. 2013, **8**(3), 70-76. [cit. 2019-01-05]. ISSN 1558-9250. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/155892501300800308>
- [25] LI, Y., J. H. KEIGHLEY a I. F. G. HAMPTON. Physiological responses and psychological sensations in wearer trials with knitted sportswear. *Ergonomics*. 1988, **31**(11), 1709-1721. ISSN 0014-0139
- [26] LAING, R. M., CH. A. WILSON. S. E. GORE, D. J. CARR a B. E. NIVEN. Determining the Drying Time of Apparel Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2007, **77**(8), 583-590 [cit. 2013-03-13]. ISSN: 1746-7748. Dostupné z: <http://doi.org/10.1177/0040517507078232>
- [27] HOLMÉR, I. Heat exchange and thermal insulation compared in woollen and nylon garments during wear trials. *Textile research journal*, 1985, **55**(9), 511-518. ISSN: 0040-5175.
- [28] Li, Y. Perceptions of temperature, moisture and comfort in clothing during environmental transients. *Ergonomics*. 2005, **48**(3), 234-248. ISSN 0014-0139
- [29] Li, Y., B. V. HOLCOMBE, a F. APCAR. Moisture buffering behavior of hygroscopic fabric during wear. *Textile research journal*. 1992, **62**(11), 619-627. ISSN 0040-5175
- [30] BAKKEVIG, M. K. a R. NIELSEN. Impact of wet underwear on thermoregulatory responses and thermal comfort in the cold. *Journal of Ergonomics*. 1994, **37**(8), 1375-1389. ISSN 0014-0139.
- [31] FILINGERI, D., D. FOURNET, S. HODDER a G. HAVENITH. Mild evaporative cooling applied to the torso provides thermoregulatory benefits during running in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine and Science of Sports* [online]. 2015, 25(1), s200-210. [cit. 2020-01-20]. ISSN:1600-0838. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/sms.12322>
- [32] NIELSEN R. Sweat Accumulation in Clothing in the Cold. In: *Performance of Protective Clothing, Fourth Volume*. J. McBriarty & N. Henry (Eds.). 1992, 281-294. Dostupné z: <https://doi.org/10.1520/STP19168S>
- [33] BAKKEVIG, M. K. a R. NIELSEN. The impact of activity level on sweat accumulation and thermal comfort using different underwear. *Journal of Ergonomics*. 1995, **38**(5), 926-939. ISSN 0014-0139.
- [34] HES, L. a J. HOLUBOVA. The effect of air gaps on cooling of a body. In: *Proceedings of the AUTEX International Textile Conference 2008*. Biella, 2008.
- [35] HES, L. a M. ARAUJO. Simulation of the effect of air gaps between the skin and a wet fabric on resulting cooling flow. *Textile Research Journal* [online]. 2010, **80**(14), 1488–1497 [cit. 2019-01-08]. ISSN 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517510361797>
- [36] CASA, D. J. Exercise in the heat. I. Fundamentals of thermal of physiology, performance implications, and dehydration. *Journal Athletic of Training* [online]. 1999, **34**(3), 246-252. [cit. 2020-01-20]. ISSN: 1062-6050. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1322918/pdf/jathtrain00007-0030.pdf>
- [37] NAYAK, R. a R. PADHYE. *Manikins for Textile Evaluation*. Oxford: Woodhead Publishing, 2017. ISBN 9780081009093.

- [38] HAVENITH, G., H. UEDA, H. SARI a Y. INOUE. Required clothing ventilation for different body regions in relation to local sweat rates. In: *2nd European Conference on Protective Clothing (ECPC), "Challenges for Protective Clothing"* [online]. Švýcarsko: Montreux, 2003. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://www.academia.edu/1411568/Required_clothing_ventilation_for_different_body_regions_in_relation_to_local_sweat_rates?auto=download
- [39] CROW, R. M. a R. J. OSCYEVSKI. The Interaction of Water with Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 1998, **68**(4), 280–288. [cit. 2020-01-21]. ISSN: 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/004051759806800406>
- [40] YANILMAZ, M. a F. KALAOGLU. Investigation of wicking, wetting and drying properties of acrylic knitted fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2012, **82**(8), 820–831 [cit. 2019-01-21]. ISSN 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517511435851>
- [41] FANGUEIRO, R., A. FILGUEIRAS, F. SOUTINHO a X. MEIDI. Wicking Behavior and Drying Capability of Functional Knitted Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2010, **80**(15), 1522–1530 [cit. 2019-01-24]. ISSN 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517510361796>
- [42] SARICAM, C. a F. KALAOGLU. Investigation of the Wicking and Drying Behaviour of Polyester Woven Fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* [online]. 2014, **105**(3), 73-78 [cit. 2019-01-25]. ISSN 1230-3666. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/258196581_Investigation_of_wicking_wetting_and_drying_properties_of_acrylic_knitted_fabrics
- [43] BESKISIZ, E., N. UCAR a A. DEMIR. The Effects of Super Absorbent Fibers on the Washing, Dry Cleaning and Drying Behavior of Knitted Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2009, **79**(16), 1459-1466 [cit. 2019-01-01]. ISSN: 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517508095606>
- [44] LAING, R. M., CH. A. WILSON., S. E. GORE, D. J. CARR a B. E. NIVEN. Determining the Drying Time of Apparel Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2007, **77**(8), 583-590 [cit. 2013-03-13]. ISSN: 1746-7748. Dostupné z: <http://doi.org/10.1177/0040517507078232>
- [45] HU, J., Y. LI, K. YEUNG, A. S. W. WONG a W. XU. Moisture Management Tester: A Method to Characterize Fabric Liquid Moisture Management Properties. *Textile Research Journal*. 2005, **75**(1), 57-62. ISSN: 0040-5175.
- [46] TROYNIKOV, O. a W. WARDININGSIH. Moisture management properties of wool/ polyester and wool/bamboo knitted fabrics for the sportswear base layer. *Textile Research Journal* [online]. 2011, **81**(6), 621–631 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517510392461>
- [47] SUPUREN, G., N. OGLAKCIOGLU, N. OZDIL a A. MARMARALI. Moisture management and thermal absorptivity properties of double-face knitted fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2011, **81**(13), 1320-1330. [cit. 2019-01-05]. ISSN: 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517511402122>
- [48] PRAHSARN, C., R. L. BARKER a B. S. GUPTA. Moisture Vapor Transport Behavior of Polyester Knit Fabrics. *Textile Research Journal* [online]. 2005, **75**(4), 346–351 [cit. 2019-01-01]. ISSN: 1746-7748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0040517505053811>
- [49] VARGA, K., A. KLJUN, M. F. NOISTERNIG, R. N. IBBETT, J. GRUBER, J. SCHLANGEN, U. J. GRIESSER a K. CH. SCHUSTER. Physiological investigation of resin-treated fabrics from Tencel® and other cellulosic fibres. *Lenzinger Berichte*. 2009, **87**, 135-141. ISSN: 0024-0907
- [50] CHAU, K. H., K. P. M. TANG a CH. W. KAN. Constant Temperature Drying Rate Tester: Real-Time Water Evaporation Measurement of Fabrics. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2018, **67**(11), 2635–2647 [cit. 2019-01-08]. ISSN: 1557-9662. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8338066>

- [51] TANG, K. P. M., Y. S. WU, K. H. CHAU, C. W. KAN a J. T. FAN. Characterizing the transplanar and in-plane water transport of textiles with gravimetric and image analysis technique: Spontaneous Uptake Water Transport Tester. *Scientific Reports* [online]. 2015, 5, 1-6 [cit. 2019-01-08]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/srep09689.pdf>
- [52] DEMA, M., C. TURNER, H. SARI-SARRAF a E. HEQUET. Machine Vision System for Characterizing Horizontal Wicking and Drying Using an Infrared Camera. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* [online]. 2016, 12(2), 493-502 [cit. 2019-12-08]. ISSN: 1941-0050. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7377070>
- [53] ISO 11092: 2014. *Textiles - Physiological effects - Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test)*. 2. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
- [54] AATCC Test Method 79. *Test Method for Absorbency of Textiles*. USA: AATCC Committee RA63, 2003.
- [55] VITÁSKOVÁ, M. *Porovnání stávajících metod pro testování rychlosti schnutí u pletenin: Comparison of existing methods to test the speed of knits drying*. Liberec, 2015. Bakalářská práce. Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci, Katedra hodnocení textilií. Vedoucí bakalářské práce Tereza Heinisch.
- [56] KOSTKUBOVÁ, B. *Hodnocení termofyziologických vlastností první oděvní vrstvy pro sportovní účely: Evaluation of termophysiological characteristics of the first layer of clothes in sportswear*. Liberec, 2013. Diplomová práce. Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci, Katedra oděvnictví. Vedoucí diplomové práce Tereza Heinisch.
- [57] DĚDIČOVÁ, K. *Vliv konstrukce a počtu vrstev textilií na termofyziologické vlastnosti: Influence of construction and number of textile layers on thermal-physiological properties*. Liberec, 2012. Diplomová práce. Fakulta textilní Technické univerzity v Liberci, Katedra hodnocení textilií. Vedoucí diplomové práce Tereza Peichlová.
- [58] HEINISCH, T. Problematika měření schnutí u textilií. In: *Workshop pro doktorandy Fakulty textilní a Fakulty strojní Technické Univerzity v Liberci*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 41-45. ISBN 978-80-7372-987-5.
- [59] HEINISCH, T., V. BAJZÍK, a L. HES. The drying speed of outdoor textiles. In: *TEXSCI'13: textile science 2013: 8th international conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 56. ISBN 978-80-7372-989-9.
- [60] HEINISCH, T., P. TĚŠINOVÁ a L. POLOŠČUKOVÁ. Moisture management for different air conditions. *Vlakna a textil* [online]. 2017, 24(3), 64-67. ISSN 2585-8890. Dostupné z: http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2017_3.pdf
- [61] HEINISCH, T., TĚŠINOVÁ, P a L. POLOŠČUKOVÁ. Drying speed testing of PES fabric with defined moisture management. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* [online]. 2020, 1(139), 43-49. ISSN: 1230-3666. Dostupné z: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.5857>
- [62] ČSN ISO 139:2005. *Textilie - Normální ovzduší pro klimatizování a zkoušení*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [63] BROŽ, J., V. ROSKOVEC a M. VALOUCH. *Fyzikální a matematické tabulky*. Praha: SNTL, 1980.
- [64] KOLAT, Pavel. *Přenos tepla a hmoty*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 1986.
- [65] LIENHARD, J. H. *A Heat Transfer Textbook*. 3. vyd. Cambridge: Phlogiston Press, 2003. ISBN-10 0971383529, ISBN-13 978-0971383524
- [66] K. LABOUTKA a T. SUCHÁNEK. *Výpočtové tabulky pro vytápění: vztahy a pomůcky*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2001. 208 s. ISBN 80-02-01466-9.

- [67] HES, L. a P. SLUKA. *Úvod do komfortu textilií*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-926-0.
- [68] SCHLICHTING, H. *Boundary Layer Theory*. 6. vyd. New York: McGrawHill Book Company, 1968.
- [69] HEINISCH, T., V. BAJZÍK a L. HES. New instrument for determination of isothermal drying rate of fabrics at constant air velocity. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. 2019, **14**(5) [cit. 2020-08-08]. ISSN: 1558-9250.
- [70] ČSN EN 12751:2000. *Textilie - Odběr vzorků vláken, nití a plošných textilií ke zkouškám*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [71] MUGGEO, V. Segmented: An R Package to Fit Regression Models with Broken-Line Relationship. *R news* [online]. 2008, **8**(1), 20-25. [cit. 2020-05-08]. ISSN 1609-3631.
- [72] ŘEHÁK, J. a B. ŘEHÁKOVÁ. *Analýza kategorizovaných dat v sociologii*. Praha: Academia, 1986.
- [73] HES, L. An indirect method for fast evaluation of surface moisture absorptivity of shirt and underwear fabrics. *Fabric and Textiles*. 2014, **7**(2), 91-96. ISSN: 1335-0617.

9 Curriculum Vitae

Osobní údaje

Jméno a příjmení	Tereza Heinisch
Adresa	Na Výšinách 438/10, Liberec 460 05
Mobil	777 598 797
E-Mail	tereza.heinisch@tul.cz
Narozena	19. 8. 1982 v Opočně
Stav	vdaná

Dosažené vzdělání

Období	2008 – 2011
Titul	Ing.
Škola	Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní
Obor	Textilní a oděvní technologie
Období	2007 - 2010
Titul	Bc.
Škola	Technická univerzita v Liberci, Fakulta pedagogická
Obor	Učitelství odborných předmětů
Období	2005-2008
Titul	Bc.
Škola	Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní
Obor	Textilní návrhářství a technologie
Období	2002-2005
Titul	DiS.
Škola	Vyšší odborná škola oděvního návrhářství v Praze
Obor	Oděvní návrhářství
Období	1998-2002
Dosažená kvalifikace	Maturitní zkouška
Škola	LTI textilní Ústí nad Orlicí
Obor	Modelářství a návrhářství oděvů

Schopnosti a znalosti

Jazykové znalosti	anglický jazyk mírně pokročilý, základy německého jazyka
--------------------------	--

Počítačové znalosti a dovednosti	MS Office, Adobe Illustrator, Adobe Photoshop, Adobe Indesign, CAD systém Invesmark FUTURA 7.0
---	---

Praxe a zaměstnání

Období	říjen 2018 – dosud
Pozice	pracovník výzkumu na Katedře hodnocení textilií, TUL
Období	2017 – dosud
Pozice	externí spolupráce s firmou ŠIJEMDĚTEM.cz - návrhy potisků na plošné textilie
Období	říjen 2014 - dosud
Pozice	OSVČ - grafik - tvorba podkladů pro katalogy, letáky, loga, návrhy pletených doplňků, úprava fotografií pro webové stránky
Období	červen 2014 – prosinec 2014
Pozice	vyhodnocování mikroskopických snímků ve firmě ELMARCO s.r.o
Období	2014
Pozice	externí spolupráce s firmou ALTISPORT.cz s.r.o – návrh a zajištění výroby celé kolekce volnočasového oblečení
Období	2011 - 2014
Pozice	externí spolupráce s firmou Pro Nell s. r. o na pozici designér a technolog sportovních oděvů, tvorba samostatné kolekce
Období	2007 - 2020
Pozice	designér a technolog ve firmě Alpine pro, a.s., návrhy celých kolekcí, včetně návrhu celé slovenské olympijské kolekce pro rok 2012
Stáže	
Období	1. 7. 2012 - 30. 9. 2012 a 1. 7. 2013 - 30. 9. 2013
Místo	podíl na novém systému testování a označování materiálů pro účely kontroly kvality na materiálovém oddělení ve firmě Alpine pro, a.s.
Období	říjen 2002 – listopad 2002
Místo	Španělsko Sevilla – odborná stáž v rámci programu EU pro odborné vzdělávání Leonardo da Vinci

10 Stručná charakteristika dosavadní odborné, výzkumné a vědecké činnosti

Doktorské studium

Seznam zkoušek	Přenos tepla v porézních strukturách, 7. 5. 2012 Nanovlákná a nanotechnologie, 13. 2. 2013 Transportní procesy při tvarování, 26. 3. 2013 Experimentální technika oboru, 7. 10. 2013 Matematická statistika a analýza dat, 10. 3. 2016
SDZ	Státní doktorská zkouška vykonána dne 19. 06. 2019 s celkovým hodnocením prospěl(a).

Pedagogická činnost

Výuka	Hodnocení jakosti, ZS 2011, ZS 2012, ZS 2013 Administrativa na PC, LS 2013 Tajemník u SZ v letech 2013, 2016, 2020
Vedení DP a BP	David Macoun, <i>Porovnání metod pro testování propustnosti pro vodní páry</i> , DP, 2015 Monika Vitásková, <i>Porovnání stávajících metodik pro testování rychlosti schnutí u pletenin</i> , BP, 2015 Stanislava Černá, <i>Porovnání výrobního procesu vybraného oděvního výrobku v České republice a v Číně</i> , DP, 2014 Zdeňka Gregušová, <i>Vliv laminace na termofyziologické vlastnosti při tvorbě sendvičových textilií</i> , DP, 2014 Bára Kostkubová, <i>Hodnocení termofyziologických vlastností první oděvní vrstvy pro sportovní účely</i> , DP, 2013 Karolína Dědičová, <i>Vliv konstrukce a počtu vrstev textilií na termofyziologické vlastnosti</i> , DP, 2012

Výzkumné projekty

SGS č. 21199, Alternativní testování vrstvených materiálů s textilní komponentou při kontaktu s vlhkostí, spoluřešitel, 2017
SGS č. 21148, Inovace metodiky měření pro management vlhkosti při různých klimatických podmínkách, hl. řešitel, 2016

SGS č. 48005, Tvorba nové metodiky pro vyhodnocení rychlosti schnutí textilií, hl. řešitel, 2013

SGS č. 4851, Optimalizace vlastností textilních laminátů vzhledem k naměřeným vlastnostem jednotlivých vrstev, hl. řešitel, 2012

Ostatní projekty

Projekt č. 16840, 3P-Praxe pro praxi, lektor pro absolvování povinné praxe, 2013

11 Vyjádření školitele doktorandky

Vyjádření školitele doktorandky

Doktorandka: Ing. Tereza Heinisch

Disertační práce: **K problematice sušících křivek jako parametru komfortu**

Předložená disertační práce je zaměřena na rychlosti sušení textilií. Proto, aby byla studentka schopna rychlost sušení měřit, navrhla a zkonstruovala přístroj, který umožňuje sledovat rychlost sušení v čase za konstantních izotermických podmínek. Přístroj rovněž umožňuje regulaci rychlosti ustáleného proudění okolního vzduchu nad testovaným vzorkem.

Značná část obyvatel je zatížena sedavým zaměstnáním. Toto se snaží kompenzovat různými sportovními aktivitami, aby se udrželi co nejdéle duševně a fyzicky fit. Pro své sportovní aktivity se lidé snaží používat tzv. „funkční textilie“. V řadě případů se jedná o textilie (trička, bundy atd.) jejichž úkolem je zajistit po co nejdelší dobu pocit komfortu. K jejich hlavním úkolům patří odvod vlhkosti (potu) od povrchu těla popř. zadržení tepla, podle vykonávané aktivity a ročního období. Řada prací se zabývá zajištěním termofyziologického komfortu, avšak sušením, kdy se textilie dostává zpět z nevyhovujícího stavu z termofyziologického hlediska po zvlhčení zpět do vyhovujícího je předmětem zkoumání minimálně. Proto považují řešení této problematiky za aktuální.

Při řešení disertační práce studentka řešila tři okruhy. Prvním, základním bodem bylo vytvořit přístroj, na kterém by bylo možné měřit rychlost sušení. Studentka navrhla a zkonstruovala přístroj, který umožňuje sledovat průběh sušení a ověřila opakovatelnost měření. Ve druhém kroku se zaměřila na sledování materiálového složení na délku sušení. Současně s tím sledovala i vliv rychlosti ustáleného proudění okolního vzduchu na rychlost sušení. Třetím aspektem řešené disertační práce je hodnocení sušících křivek se vztahem k termofyziologickému komfortu vlhkých textilií se zaměřením na moment, kdy textilie přestane být vnímána jako vlhká.

Uvedený přístroj je velkým přínosem disertace, jelikož současně umožňuje zajistit konstantní izotermické podmínky sušení a regulovat rychlost proudění vzduchu nad vzorkem.

Studentka přistupovala k řešení doktorské práce s elánem, pracovitostí a systematicky. Především u ní oceňuji tvůrčí přístup a snahu najít řešení i v plných případech nejasností či problémů, které během řešení disertační práce nastaly. Nepřestala dokud problémy nevyřešila. K experimentům přistupovala zodpovědně a pečlivě. Má smysl pro detail a je perfekcionista.

Studentka prokázala, že je schopna učit se novým věcem a pracovat samostatně. Svoje kvality ukázala rovněž publikováním 4 článků v odborných časopisech.

Výsledky kontroly v IS STAG prokazují minimální shodu. Dle dostupných informací není předložená práce plagiátem.

Podle mého názoru předložená práce splňuje požadavky kladené na disertační práci. Cíle disertační práce byly naplněny. Práci doporučuji k obhajobě.

V Liberci dne 8.9.2020

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.

12 Oponentské posudky disertační práce

Posudek oponentky doktorské disertační práce

Doktorandka: **Ing. Tereza HEINISCH**

Název disertační práce: **K problematice sušících křivek jako parametru komfortu**

Oponentka: **npor. Ing. Jana Švecová, Ph.D.**

Aktuálnost a význam tématu

Disertační práce řeší důležité a velmi přínosné téma. Problematika hodnocení sušících křivek ve vztahu k termofyziologickému komfortu zejména sportovních a ochranných textilií je velice aktuální z několika důvodů:

- Existuje několik metodik, které se problematikou hodnocení sušících křivek zabývají, ale bohužel se liší použitými přístroji, způsoby hodnocení a podmínkami měření, které nejsou jednoznačně definované;
- Návrh a realizace nového měřicího zařízení a tím i nového způsobu měření, které se v současných metodikách nevyskytuje, by odstranilo nedostatky stávajících metod;
- Termofyziologický komfort prokazatelně ovlivňuje výkonnost a pohodu, soustředěnost nositele, což pro aplikaci oděvu ať už pro sport nebo pro vojáky z povolání je velice důležité.

Proto se domnívám, že zvolené téma disertační práce je přínosné a perspektivní.

Cíl disertační práce

Hlavním cílem práce je vytvořit nové zařízení včetně metodiky měření, které bude schopné zajistit stejné izotermní klimatické podmínky pro jednotlivá měření i s možností regulace rychlosti ustáleného proudění okolního vzduchu nad testovaným vzorkem. Předložená disertační práce odpovídá předem zvolenému cíli, který je definován v první kapitole. K naplnění hlavního cíle bylo stanoveno 5 dílčích cílů, které byly postupně rozpracovány a prezentovány v kapitolách sedm a osm. Za stěžejní považuji zejména výstup ve formě porovnání rychlosti sušení v lineárních částech křivek u metody A a B a současně experimentální potvrzení autorčiny domněnky, že právě rychlost sušení je významným parametrem z hlediska hodnocení termofyziologického komfortu. Znalost této problematiky má význam pro vhodnou volbu metodiky pro hodnocení sušících křivek a je tedy zásadní

pro skutečné hodnocení termofyziologického komfortu s ohledem na způsob použití a předpokládaný způsob zavlhčení textilie během nošení.

Zvolené metody zpracování a postup řešení

Vlastní řešení práce má logickou strukturu, odpovídající grafickou a jazykovou úroveň. Práci lze rozdělit na teoretickou a praktickou část. V rozsáhlé a podrobně zpracované rešerši je mimo jiné provedeno porovnání jednotlivých norem z hlediska klimatických podmínek měření. Z rešerše vyplývá nutnost vytvoření nového způsobu testování, který bude mít jednotné podmínky měření a byl by vhodný jak pro textilie z přírodních vláken, tak i pro textilie z vláken syntetických a měl by být součástí stanovení komfortních vlastností textilií. Hlavní pozornost disertační práce je tedy věnována návrhu a realizaci přístroje, který měří za izotermních podmínek. Zvolené metody řešení jsou odpovídající pro tuto oblast vědecké práce.

Zhodnocení dosažených výsledků

Doktorandka po zhodnocení poznatků z předchozích studií ostatních autorů a z jednotlivých norem či metod vytvořila nový prototyp přístroje, který odstranil nedostatky předchozích metod a umožňuje zaznamenávat sušení textilie pomocí vážení vzorků v pravidelných časových intervalech, měnit rychlost proudění a především udržet izotermní podmínky měření za standardních i alternativních klimatických podmínek. Opakovatelnost měření byla ověřena porovnáním regresních přímek, respektive byla vybrána pouze lineární část křivek, která reprezentuje nejdůležitější část sušení. Z výsledků vyplývá, že se zvyšující se rychlostí proudění vzduchu klesá celková doba sušení a zároveň i rychlost sušení v lineární části křivky. V rámci analýzy sušících křivek byly provedeny další experimenty, které byly vyhodnoceny v kapitole sedmé a vedly ke správnému postupu řešení. V závěrečné části práce byl vyhodnocen vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termofyziologický komfort včetně subjektivního hodnocení suchosti či vlhkosti textilie. Porovnání hodnot měrné tepelné jímavosti a měrné tepelné vodivosti vzorku v klimatizovaném stavu a vzorku ve stavu po zavlhčení pomocí metody A na přístroji Alambeta je velmi užitečné. Naměřené hodnoty vykazují statisticky významné rozdíly a byl prokázán významný vliv vlhkosti na termofyziologický komfort nositele.

Význam pro praxi nebo rozvoj vědního oboru

Pro vyhodnocení termofyziologického komfortu slouží naměřená data měrné tepelné jímavosti a zároveň subjektivní hodnocení vnímání pocitu sucha či vlhka z textilií. Výsledkem disertační práce je vytvoření zcela nového přístroje, který umožňuje

regulovat rychlost proudění nad měřeným vzorkem v rozsahu $1-5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a udržet během měření téměř izotermní podmínky, které byly ověřeny výpočtem jednotlivých tepelných toků během měření vlhké textilie a také praktickým experimentem, což považují za stěžejní výsledek práce. Nový přístroj zajišťuje odvod vlhkého vzduchu pomocí přesně definovaného proudění nad vzorkem. Z důvodu nutnosti odstranění odchylky vznikající dlouhodobým zatížením vah ve spojení s prouděním nad měřeným vzorkem byl nový přístroj v poslední fázi testování upraven a rozšířen o zvedací mechanismus včetně řízení PLC jednotkou, která v pravidelných intervalech zastavuje proudění a zvedá měřicí člen. Výsledky práce potvrzují, že nové měřicí zařízení včetně otestovaného způsobu hodnocení sušících křivek je schopné poskytovat přesné výsledky pro hodnocení sušících křivek jednotlivých textilií za běžných klimatických podmínek včetně nastavení rychlosti ustáleného proudu vzduchu přímo nad měřeným vzorkem. Práce otvírá další prostor pro pokračování měření v oblasti hodnocení sušících křivek oběma způsoby vlhčení, které nový přístroj umožňuje a pro výzkum a vývoj dalších textilních struktur.

Publikační aktivita

Publikační činnost doktorandky je přiměřená a vztahuje se k tématu předložené disertační práce. Týká se zejména publikování 8 statí ve sbornících a 4 publikací v odborných časopisech. Dále jsou uvedeny 4 citace k publikaci autorky uvedené v databázi SCOPUS.

Dotazy a připomínky k disertační práci:

- Na str. 33 na obrázku 4 ve třetím obdélníku shora mají být správně uvedeny psychologické procesy a ne dvakrát pod sebou fyziologické (i podle originálu citace [15]).
- Na str. 38 mylně uvádíte, že norma ČSN EN 60721 zmiňuje 9 klimatických oblastí. V seznamu použité literatury v bodě [35] uvádíte již novou normu ČSN EN 60721-2-1 z roku 2014. Klasifikace podmínek prostředí – Část 2-1: Podmínky vyskytující se v přírodě – Teplota a vlhkost vzduchu. Ta již na rozdíl od staré normy ČSN IEC 721-2-1 (038900) stanovuje pouze 5 typů klimatu (tropický, aridní, mírný, chladný a polární), které jsou charakterizované hodnotami teploty a vlhkosti vzduchu.
- Ve 3. kapitole se zabýváte oděvním komfortem. Prosím, definujte optimální podmínky oděvního komfortu uživatele oděvu z hlediska teploty pokožky, relativní vlhkosti okolního prostředí, rychlosti proudění vzduchu atd..

Závěrečné hodnocení

Předložená disertační práce splnila předmět a cíle stanovené v úvodu práce. Splňuje požadavky kladené na disertační práce včetně kontroly původnosti, publikační činnosti a proto **d o p o r u č u j i** práci k obhajobě.

V Brně dne 30. 12. 2020

npor. Ing. Jana Švecová, Ph.D.

Fakulta vojenského leadershipu,

Katedra logistiky, UNOB

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra energetických zařízení
Studentská 2, 460 01 Liberec 1

V Liberci, 28. března 2019

Oponentský posudek disertační práce

Ing. Terezy Heinisch

na téma

K problematice sušících křivek jako parametru komfortu

Předložená disertační práce se věnuje problematice sušících křivek a vyhodnocování komfortu na základě parametrů sušících křivek. Práce obsahuje teoretickou část, kde autorka shrnuje poznatky z oboru přenosových jevů, teoretickou část zaměřenou na definici a analýzu komfortu a praktickou část, kde se autorka věnuje návrhu nového zařízení pro určování sušících křivek a jednotlivý testům.

Dosažení stanovených cílů

Autorka si na konci první kapitoly stanovila jeden hlavní cíl a pět dílčích cílů. Hlavním cílem je vytvoření nového zařízení, patrně pro stanovení sušících křivek, popř. pro měření rychlosti sušení, různých textilií.

Dílčí cíle jsou popsány jako:

1. Porovnání metod vlhčení vzorků A a B.
2. Vyhodnocení vlivu rychlosti proudění nad měřenými vzorky.
3. Porovnání izotermních a neizotermních podmínek měření vzhledem k rychlosti sušení.
4. Porovnání výsledků z nového přístroje s naměřenými daty z přístroje MMT.
5. (Určit?) Vliv obsahu přidané vlhkosti v textiliích na termo-fyziologický komfort uživatele včetně subjektivního hodnocení suchosti či vlhkosti textilie (osmá kapitola).

Hlavní cíl byl v práci částečně splněn. Autorka sestavila a otestovala nové experimentální zařízení. Stanovený cíl pokládám za velmi ambiciózní s ohledem na množství dílčích úkolů, které jsou vždy z konstrukcí nového zařízení spojené. V tomto případě se navíc jedná o poloautomatické experimentální zařízení, kde je nutné zkombinovat znalosti z různých oborů (mechanika, mechanika tekutin, termodynamika, elektrotechnika, řídicí systémy). Standardem je, že návrh podobného zařízení probíhá ve větším týmu odborníků. Z práce je patrné, že autorka dosáhla jak časových, tak i finančních limitů pro realizaci zařízení. Nebylo tak patrně možné realizovat další verzi zařízení, které by odstranilo zřejmé nedostatky první verze.

Autorka na novém zařízení provedla řadu experimentů a vyhodnocovala různé parametry. Při těchto experimentech se ukazuje výhoda konstrukce univerzálního zařízení, které umožňuje změnu teploty a rychlosti proudění. Výsledky provedených měření odpovídají předpokladům.

Vlastní popis parametrů experimentálního zařízení, popis konstrukce, fyzických vlastností a parametrů řídicího systému je ale velmi obecný. Na základě uvedených informací není možné navržené zařízení, jeho funkčnost a přínos pro obor náležitě zhodnotit.

Dílčí cíl podle bodu 1 byl splněn. Autorka provedla pečlivé experimenty a přehledně porovnávala výsledky dosažené metodou vlhčení A a metodou vlhčení B. Oponentka, která se oboru sušení textilie nevěnuje, nedokáže posoudit novost výsledků. Při porovnání s odbornými publikacemi předpokládá, že se jedná o výsledky standardně prováděných testů.

Dílčí cíl podle bodu 2 byl splněn. Autorka provedla vyhodnocení vlivu rychlosti proudění na sušící křivky. Pečlivě provedla a vyhodnotila experimenty. Z pohledu oponentky jsou výsledky očekávané. V práci bohužel chybí detailnější teoretický rozbor problému.

Dílčí cíl 3 byl splněn. I zde autorka provedla a pečlivě vyhodnotila řadu experimentů. Oponentka ani zde nedokáže posoudit novost výsledků. Protože se ale jedná o disertační práci, tak by měl experimentální výsledky doprovázet teoretický rozbor. Autorka se omezuje pouze na popis dosažených výsledků.

Dílčí cíl 4 byl splněn částečně. Autorka provedla měření na zařízení MMT (kapitola 7.5.). Porovnání s výsledky naměřenými novým přístrojem v kapitole, a v celé práci, chybí. Autorka pouze porovnává vhodnost přístrojů pro jednotlivé typy měření.

Dílčí cíl 5 byl splněn. Autorka provedla rozbor vlivu přidané vlhkosti na komfort uživatele. Opět se v kapitole jedná o výsledky pečlivě provedených a zpracovaných experimentů. Novost výsledků pokládá oponentka za nejasnou.

Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky

Text disertační práce neobsahuje ucelený rozbor současného stavu v disertaci řešené problematiky. Autorka odkazuje na práce jednotlivých autorů průběžně v textu disertace. Autorka v práci cituje 134 publikací. Některé z nich patří k základním pilířům moderní fyziky, jiné vycházejí, bohužel, ze vzdálených oborů (stavební fyzika, geologie...) a přejímání informací je tak přinejmenším nevhodné.

V kapitole, která se týká rozboru používaných metod pro analýzu sušících křivek, autorka uvádí parametry vybraných experimentálních zařízení. Autorka parametry a vhodnost jednotlivých zařízení porovnává a náležitě komentuje.

Slabinou disertační práce je kapitola, která se věnuje přenosovým jevům. Oponentce není jasný důvod zařazení této kapitoly. Většina uváděných teorií a vztahů není při vlastním řešení práce použita. Kapitola však obsahuje velké množství chyb a nedostatků, které by se v práci této úrovně vyskytovat neměly. Seznam nejdůležitějších připomínek je uveden na konci posudku.

Teoretický přínos disertační práce

Teoretický přínos práce je možné spatřit v souhrnu informací, které se týkají oděvního komfortu, historie pohledu na oděvní komfort a popisu metod pro jeho vyhodnocení.

Práce rovněž přináší cenné porovnání různých metod pro vyhodnocení parametrů materiálů. Cenným pro další práci je přehled základních parametrů a vlastností různých zařízení pro analýzu procesu sušení.

Praktický přínos disertační práce

V práci jsou prezentované výsledky nových experimentů provedených na novém experimentálním zařízení. Výsledky jsou prezentovány standardní formou. Výsledky ukazují univerzálnost nového zařízení jako jeho největší přínos.

V práci bohužel chybí detailní popis parametrů zařízení, včetně analýzy chyb a nejistoty měření. V práci také chybí porovnání dosažených výsledků s výsledky dosaženými za použití jiných zařízení. Takové porovnání by jistě dostatečně prokázalo vlastnosti a použitelnost nového zařízení.

Vhodnost použitých metod řešení

Popis metod konstrukce nového zařízení je velmi strohý. Autorka se detailně věnuje problematice sdílení tepla žebrem a prostupem tepla do textilie. Na druhou stranu není v práci popsána problematika návrhu zařízení z pohledu proudící tekutiny, není řešená stabilita ani charakter proudění. Práce neobsahuje popis řídicího systému, ani popis použitých algoritmů, chybí parametry klíčových komponent (ventilátory, topení, váhy...).

Experimenty pro naplnění dílčích cílů jsou provedeny na novém zařízení, ale standardními metodami, které jsou vhodně zvolené.

Formální úroveň práce

Po formální stránce má práce dobrou úroveň. Autorka používá jak vlastní, tak i převzaté grafy a obrázky. Tyto jsou pečlivě připravené a mají dobrou grafickou úroveň. Autorka některé informace opakuje v textu několikrát, na různých místech.

Re, Pr, Sc, Le, Gr, Ar, Nu jsou podobností čísla na úrovni fyzikálních veličin. Rozhodně se nejedná o zkratky. Obecně známé zkratky není nutné v seznamu uvádět.

Práce obsahuje minimum gramatických a typografických chyb.

Vybrané připomínky k teoretické části disertační práce:

- 1) Kapitola Seznam použitých symbolů a zkratk
 - Pro označení jednotek u bezrozměrných veličin se správně (z důvodu matematické či rozměrové analýzy) používá (1), nikoliv (-).
 - Proč jsou mezi zkratkami uváděny obecně známé zkratky typu atd., kol., obr., tab., tzv.?
 - Ar, Gr, Le, Nu, Pr, Ra, Re, Sc nepatří mezi zkratky, jsou to veličiny (v literatuře také uváděny pod pojmem bezrozměrná či podobnostní čísla).
- 2) Považuji za nešťastné, že řešerše dané problematiky není uvedena na začátku práce, ale prolíná celou prací.
- 3) Str. 13, druhý odstavec: je uvedeno obecné tvrzení „Následné změny veličin lze vyjádřit diferenciálem funkce prvního řádu [2].“ – Ano, avšak platí, že lze vyjádřit i diferenciálem druhého a vyšších řádů.
- 4) Str. 13, třetí odstavec: „Oproti tomu metody experimentální vycházejí z empirického přístupu, kdy je nutné kvůli nemožnosti změření některých úloh zavést i teorie podobnosti a metody modelování [2].“ – Teorie podobnosti a metody modelování nejsou experimentální metody, ale jedná se o analytické metody.
- 5) Str. 13, čtvrtý odstavec: „Díky experimentálním metodám lze predikovat chování reálných objektů...“ – To nelze. Predikovat lze jen na základě provedené analýzy, ne na základě experimentálních metod.
- 6) Str. 13, čtvrtý odstavec: „Fyzikální podobnost se týká jevů, které lze vyjádřit rovnicemi stejného tvaru. Oproti tomu analogická podobnost označuje podobnost dějů, které lze vyjádřit rovnicemi stejné formy...“ – Jaký je rozdíl mezi rovnicemi stejného tvaru a rovnicemi stejné formy? Tvar a forma jsou synonyma.

- 7) Str. 14: vztah (2) odporuje fyzikálním principům.
- 8) Str. 14: termín dynamická hustota neexistuje.
- 9) Str. 14: Je nutné vybírat náležitě zdroje pro studium. Pokud jsou některé pojmy vykládány některými autory odlišně od standardu, tak není nutné toto zmiňovat. Nutné ale je nepřebírat špatné nebo neúplné informace, viz např. „V některé odborné literatuře [4] se setkáme s pojmem koncentrace hybnosti, který souhrnně označuje součin hustoty tekutiny a rychlosti.“
- 10) Str. 15, první odstavec: konstatování, že „Vedení tepla se uskutečňuje především v pevných tělesech a v nepohybujících se kapalinách...“ – je nepřesné. I v pohybujících se tekutinách je vedení tepla (molekulární přenos) nejvýznamnějším mechanismem pro přenos energie ze stěny do tekutiny.
- 11) Str. 15: rovnice (5) nemá fyzikální základ a její platnost by vedla k „překvapivým“ fyzikálním jevům.
- 12) Str. 15, poslední odstavec: „Fouriérová-Kirchhoffova diferenciální rovnice vedení tepla tedy popisuje nestacionární vedení tepla v prostoru.“ – F-K rovnice v obecném tvaru zahrnuje všechny mechanismy přenosu tepla.
- 13) Str. 16: rovnice (12) nedává smysl.
- 14) Str. 17: „Speciálním případem může být konstantní teplota v čase na povrchu tělesa, či časově i prostorově konstantní podmínka“ – Není jasný smysl věty.
- 15) Str. 17: „Při nestacionárním ohřevu se mění směrnice teplotního povrchu i tepelný tok [5].“ – Není jasné, jak se mění směrnice teplotního povrchu, co je teplotní povrch?
- 16) Str. 18: V rovnici (22) se jedná hustotu difúzního toku, obvykle označovanou jako j_A . Není možné zaměňovat s hustotou hmotnostního toku.
- 17) Str. 19: „V případě jednosměrné difuze se vztah (22) upraví...“ – Neupravuje se vztah (22), ten je platný stále. Hustota hmotnostního toku je ale odlišná od hustoty difúzního toku.
- 18) Str. 19, kap. 2.1.5: Třetí odstavec této kap. souvisí s dynamikou plynů, prouděním stlačitelných tekutin. V práci, kde se rychlosti pohybují na řádově nižších hodnotách, nemá smysl zavádět termín „klidová teplota“. Pr je tak vhodnější popsat jako poměr tloušťek hybnostní a teplotní mezní vrstvy, což následně ukazuje na převládající mechanismus přenosu tepla v mezní vrstvě.
- 19) Str. 19: „Lewisovo číslo Le popisuje jevy, u kterých dochází přívodem tepla i k molekulovému přenosu hmoty“ – Le není omezeno pouze na děje, kdy k přenosu hmoty dochází přívodem tepla.
- 20) Str. 20: V blízkosti stěny se vždy uplatňuje molekulární přenos. Jak tepla, tak hybnosti.
- 21) Str. 20: „U volné konvekce je důležitá část tepelného toku sdílena také sáláním [1].“, tvrzení není vždy platné. Vliv sálání může být dominantní, ale také zanedbatelný. K volné konvekci dochází i při velmi malém rozdílu hustoty tekutiny u stěny a v prostoru.
- 22) Str. 20: Rovnice (28) je ve speciálních případech platná (např. v případě pomalu proudící tekutiny v potrubí velkého průřezu). Nicméně je vhodnější rozlišovat volnou konvekci $Nu = f(Gr, Pr)$ a nucenou konvekci $Nu = f(Re, Pr)$. Takto napsaná rovnice (28) je k diskuzi a nejedná se o obecný tvar.
- 23) Str. 20: V práci se mluví o volné nebo přirozené konvekci. Oboje je správně, ale je vhodné se držet jednotné terminologie.

- 24) Str. 21: Poměr Gr/Re^2 se nazývá Richardsonovo číslo. Archimedovo číslo má odlišný tvar a fyzikální význam.
- 25) Str. 22: „Dle Nusseltova kritéria lze následně odvodit i součinitel přenosu tepla prouděním...“ – Jedná se o součinitel přestupu tepla, nikoliv přenosu.
- 26) Str. 22: Vztah (35) je patrně pouze výsledek úprav kritériální rovnice. Bylo by lepší se stále držet stejného zápisu, než zavádět nové veličiny. Není jasný obor platnosti vztahů, např. pro jak velké mezery vztah platí.
- 27) Str. 23: Kritické Re je označováno Re_{kr} . Re_x je většinou lokální hodnota Re ve vzdálenosti x . Kritická hodnota určuje, že nastaly podmínky k rozvoji turbulentního proudění, tj. že je laminární proudění na mezi stability. Kritické Re pro nástup turbulence neexistuje.
- 28) Str. 24-25: Pozn.: Je vhodné uvést i základní, obecně uváděné, vztahy pro přenos tepla v trubce při laminárním a turbulentním režimu.
- 29) Str. 26, druhý odstavec: Není možné mluvit o mezní vrstvě jako o vrstvě nehybné tekutiny u stěny.
- 30) Str. 26: V rovnici (42) je dáván do rovnosti difuzní tok a celkový hmotnostní tok. To platí pouze v omezeném množství případů. Je proto obvyklé zavádět korekční součinitel pro součinitel přenosu hmoty.
- 31) Str. 27: Skutečně autorka prostudovala publikace PLANCK, M. Theory of heat. Macmillan & Co, 1932 a HEITLER, W. Quantum Theory of Radiation. 2. vyd. Oxford: University Press, 1944?
- 32) Str. 28: „pohltivosti, reflexe a transmise“, je vhodné dodržet zavedenou terminologii (pohltivost, odrazivost, propustnost nebo absorbtivita, reflexivita, transmisivita). *Transmise je zařízení pro mechanický přenos hnací síly a mechanické práce z jednoho zdroje k více spotřebičům.*
- 33) Str. 28, druhý odstavec: Pojem dokonale bílý povrch není obecně zaveden. Možná se jedná o dokonale zrcadlový povrch.
- 34) Str. 29: V kapitole 2.3.1 je složitě popsána poměrně jednoduchá problematika přenosu tepla radiací mezi tělesy s emisivitou nezávislou na teplotě a vlnové délce. Celý postup vede k zavedení součinitele přenosu tepla radiací. Takový postup je v inženýrském pojetí možný. Je nutné ale zmínit a dodržovat přísná omezení a podmínky tak, aby se fyzika „neztratila po cestě“.
- Případné nepřesnosti v kapitole 3 oponentka nehodnotí, neboť se nejedná o její odborné pole působnosti.
- 35) Str. 50: Rovnice (64) se většinou nazývá Laplace-Youngova rovnice.
- 36) Str. 54: D_0 v rovnici (67) není „konstanta související s entropií“ (je ale pravda, že každá termofyzikální veličina s entropií souvisí), ale maximální difuzivita (tj. difuzivita při teplotě blízké se nekonečnu).
- 37) Str. 55: Termín piezometrický gradient souvisí s hydrogeologií. S vazbou na hodnocení textilií si oponentka není jistá.
- 38) Str. 59, poslední odstavec, str. 60, první odstavec: Pojem IR termočlánek je nejasný z pohledu fyzikálního principu měření. Normu ale oponent nemá k dispozici a proto nemůže zhodnotit správnost interpretace.
- 39) Str. 73, první odstavec: Co je myšleno „...přesně definovanými podmínkami rychlosti proudění vzduchu nad vzorkem...“?

Závěr

Disertační práce obsahuje návrh a konstrukci nového experimentálního zařízení a výsledky původních experimentů autorky.

Přínos disertační práce:

- Během řešení disertační práce vzniklo nové, univerzální, experimentální zařízení pro měření sušících křivek.
- Práce obsahuje detailní přehled o problematice oděvního komfortu a o metodách pro analýzu sušení.

Závažné nedostatky práce jsou zejména:

- Šíře řešené problematiky, kdy je v jedné práci řešena konstrukce a následná validace nového experimentálního zařízení spolu s problematikou komfortu. Toto nutně vede k roztržitosti práce.
- Chybějící detailní popis nového experimentálního zařízení a experimentů.
- Chybějící porovnání výsledků s výsledky dosaženými jinou metodou.
- Zásadní chyby v teoretické části, která se věnuje problematice přenosových jevů.
- Autorka předkládá standardní prezentaci výsledků bez náležitého rozboru fyzikální podstaty.

Hodnocení

Předložená disertační práce Ing. Terezy Heinisch „K problematice sušících křivek jako parametru komfortu“ obsahuje celou řadu závažných chyb a nedostatků, kterých by se měl autor práce na úrovni disertace vyvarovat.

Práce zároveň obsahuje, hlavně v pasážích, které se věnují experimentům, řadu původních výsledků autorky. Z předložené disertační práce i z ostatních publikací autorky je možné poznat znalosti problematiky a zájem o obor.

Oponentka doufá, že Ing. Tereza Heinisch dokáže při obhajobě přesvědčit komisi o odborné úrovni předložené práce.

Doporučuji disertační práci Ing. Terezy Heinisch k obhajobě před komisí.

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.

Dotazy k práci:

1. V případě vlhčení textilie pomocí metody A je vzorek ponořen do kapaliny na dobu nejméně 3 hodiny (str. 92). Požadavek patrně vychází z normy. Jaký je důvod tak dlouhé doby pro ponoření vzorku? Po jak dlouhé době očekáváte, že standardní vzorek již více vlhkosti nepřijme?
2. Jaké zásadní vylepšení v navrženém experimentálním zařízení budete realizovat v další fázi?