

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Ing. Bc. Andrea Halasová

**Příspěvek k hodnocení prodyšnosti oděvních sendvičů
v podmínkách rychle proudícího vzduchu**

AUTOREFERÁT DIZERTAČNÍ PRÁCE

Název dizertační práce: **PŘÍSPĚVEK K HODNOCENÍ PRODYŠNOSTI
ODĚVNÍCH SENDVIČŮ V PODMÍNKÁCH
RYCHLE PROUDÍCÍHO VZDUCHU**

Autor: **Ing. Bc. Andrea Halasová**

Obor doktorského studia: textilní technika

Forma studia: kombinovaná

Školící pracoviště: katedra oděvnictví

Školitel: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kůs

Školitel specialista:

Liberec 2007

1. Předmět a cíl práce

Předmětem dizertační práce byla problematika prodyšnosti oděvních sendvičů. Vzhledem ke stále rostoucí oblibě sportovního oblečení a náročnosti zákazníků je kladen nárok jak na vývoj a výrobu nových materiálů, tak i na oděvní výrobky samotné. S tímto je úzce spojeno i samotné testování oděvních materiálů a výrobků. V tomto případě se mnohé ze stávajících zkušebních metod jeví jako nedostatečné, protože nepodávají reálný obraz o skutečném chování textilií v reálných podmínkách nošení.

Cílem dizertační práce bylo navrhnout novou metodu hodnocení jedné z nejdůležitějších vlastností oděvních materiálů pro zajištění fyziologického komfortu oděvního výrobku – prodyšnosti. Stávající metody hodnocení prodyšnosti stanovují množství prošlého vzduchu plochou textilie při nastavení tlakového spádu na obou její stranách. Navrhovaná metoda by měla zjišťovat rychlost proudění vzduchu, který projde přes soubor oděvních textilií vrstvených stejným způsobem, jako je tomu u oděvního výrobku v podmínkách větrného počasí. Podnětem ke změně zkoumání prodyšnosti oděvních textilií v podmínkách proudícího vzduchu byla následující úvaha:

Pokud je organismus vystaven proudícímu větru, vůči jehož působení není dostatečně chráněn, dochází k narušení nebo odstranění teplé vrstvy vzduchu v prostoru mezi organismem a oděvní vrstvou, tzv. mikroklimatu, a nahrazení studeným vzduchem. S rostoucí rychlostí větru dochází k rychlejšímu ztrátám tepla z organismu a tím ke snižování jak kožní, tak i tělesné teploty organismu. Organismus reaguje na ztrátu tepla vydáním větší energie na ohřátí vrstvy vzduchu nad pokožkou. Teplo, potřebné na její ohřátí, je odebíráno z pokožky, tento jev je pociťován jako ochlazení. Pocit chladu za větrného počasí je intenzivnější v případě, že je kůže zvlhčená potem nebo je chráněna vlhkým oděvem.

2. Přehled současného stavu problematiky

Propustnost vzduchu – prodyšnost je jednou z nejdůležitějších užitných vlastností plošných textilií. U textilií pro oděvní účely ovlivňuje termofyziologický komfort, u technických textilií je prodyšnost více či méně žádána podle účelu použití, např. u textilií pro stany, plachty, padáky, airbasy, filtrační textilie je jedním z nejdůležitějších faktorů určujících jejich funkčnost.

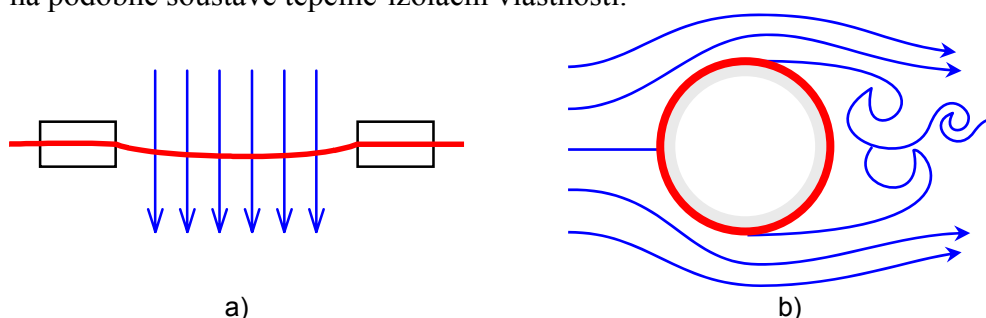
Stanovení prodyšnosti je možné rozdělit do dvou skupin podle přístupu. Jednu skupinu představují metody založené na tvrzení, že porozitu je možné brát jako strukturální ekvivalent propustnosti. V případě, že se zanedbají rozdíly mezi oběma charakteristikami, jak na ně poukazuje Dunn [4], dalo by se mluvit o zjišťování porozity. Hodnotu pórovitosti lze stanovit dvěma způsoby:

- **přímo** – na základě experimentálního měření některé z vlastností, které mají přímou souvislost právě s porozitou daného materiálu. Mezi metody zjišťující porozitu patří optická [11, 13, 14], hustoměrná a objemová metoda např. [3, 7, 10, 16, 19, 20, 22].
- **nepřímo** – na základě teoretických modelů založených na způsobu proudění tekutiny přes textilii nebo na geometrii póru, představujícího základní strukturální jednotku textilie. Modely jsou zaměřeny především na modelování porozity tkanin pro jejich relativně pravidelnou strukturu s opakujícími se základními prvky – vaznými body. Lze je dále členit na modely:
 - charakterizující porozitu na základě popisu proudění tekutiny [7, 12, 17, 18, 26],

- geometrické – popisující porozitu jak ve směru kolmém na plochu textilie [1, 7, 8, 14], ve směru rovnoběžném s plochou tkaniny, tzv. „in-plane porosity“ např. [23, 25], tak i na základě geometrie fraktálů [25, 26].
- predikční – pomocí např. neuronových sítí [2, 15, 24].

Druhou skupinu představují metody experimentálního přímého zjišťování prodyšnosti na základě experimentálních měření pomocí zkušebních přístrojů. Měření prodyšnosti lze rozdělit vzhledem ke geometrii zkoušeného vzorku na:

- „*klasické*“ – vzorek je orientován kolmo (pokud se pomine průhyb textilie způsobený proudícím vzduchem) k proudícímu vzduchu v celé jeho ploše viz obr. č. 1 a). Uspořádání zkoumaného materiálu, stejně jako podmínky měření, je jiné, než je tomu při nošení oděvního výrobku. Tato metoda je vhodná zejména pro měření tkanin, velké problémy nastávají při měření pletenin a roun [9] vzhledem k jejich velké hodnotě prodyšnosti.
- „*alternativní*“ – vzorek je ve tvaru válce (rukáv) či elipsy (trup), což lépe charakterizuje oděvní výrobek. Měřicí soustava je pak umístěna v prostředí proudícího vzduchu (obráz. č. 1 b). Tato metoda by měla přiblížit podmínky měření prodyšnosti k podmínkám vyskytujícím se při reálném nošení oděvů jednak z hlediska rychlosti a charakteru (turbulence) proudění větru jednak z hlediska geometrie zkoumaného vzorku. Problematikou prodyšnosti v takto definovaných podmínkách zkoumal Sobera a kol. v práci [21]. Fan a Keighley v práci [5] měřili na podobné soustavě tepelně-izolační vlastnosti.



Obr. 1: Schéma měření prodyšnosti a) „klasickým“ b) „alternativním“ způsobem.

3. Použité metody

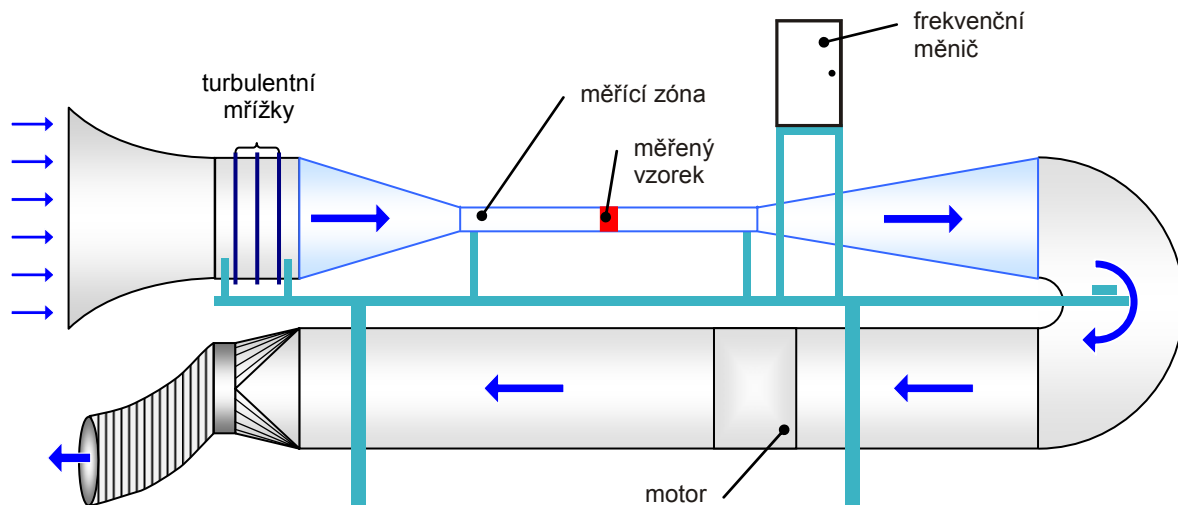
3.1 Měření prodyšnosti v aerodynamickém tunelu

Měření prodyšnosti v podmínkách rychle proudícího vzduchu v laboratorním aerodynamickém tunelu (obráz. č. 2) bylo aplikováno na soubor 62 oděvních sendvičů. Tyto byly sestaveny tak, jak jsou vrstveny v reálném třívrstevném sportovním oděvu, tj. termoprádlo, termoizolační a ochranná vrstva (56 sendvičů). Zbýlých 6 sendvičů bylo sestaveno pouze z prvních dvou vrstev.

Rychlost proudění vzduchu pod vrstvou oděvního sendviče byla měřena v přípravku, jenž simuloval lidskou paži oblečenou v rukávu bundy. Přípravek byl zkonstruován tak, aby byla mezi válečkem představujícím lidskou paži a spodní textilií oděvního sendviče konstantní mezera 10 mm. V polovině výšky a šířky meziprostoru byla měřena rychlost proudění vzduchu procházející přes zmiňovaný oděvní sendvič. Rychlost byla měřena celkem na 15-ti místech po obvodu přípravku. Vzdálenost jednotlivých měřících míst odpovídala úhlu 24°. Pro měření rychlosti proudění vzduchu v oblasti meziprostoru byly použity dvě robustní kuličkové termoanemometrické sondy fy. TESTO s měřící kuličkou o průměru 3 mm.

Měření prodyšnosti oděvních sendvičů v podmínkách rychle proudícího vzduchu v aerodynamickém tunelu bylo provedeno při rychlostech proudění vzduchu 5, 10, 13, 15 a 20 m·s⁻¹. Pro zabezpečení korektních podmínek měření byly vzorky utěsněny tak, aby do měřicího mezikruží proudil pouze vzduch, který prošel měřeným oděvním sendvičem.

K hodnotám rychlosti pro jednotlivé úhly (v_φ) byla stanovena průměrná rychlost proudění pod oděvním sendvičem \bar{v}_φ a úhel, na jehož pozici byly naměřena maximální rychlost proudění φ_{\max} . Do analýzy celkového souboru dat pro jednotlivé nastavované rychlosti byly zahrnuty i parametry oděvních sendvičů, jež mají vliv na prodyšnost – prodyšnost oděvního sendviče (AP) měřená klasickým způsobem na přístroji SDL M 021S, tloušťka (h) a plošná hmotnost sendviče (m). Hodnoty tloušťky a prodyšnosti měřené klasickým způsobem jsou pro všechny rychlosti v tunelu stejné.



Obr. 2: Schéma otevřené větrné trati.

3.2 Měření prodyšnosti „klasickým“ způsobem

Měření prodyšnosti klasickým způsobem bylo provedeno na přístroji SDL M 021S. Měřeny byly vždy všechny vrstvy oděvního sendviče najednou, podle toho, jak se vrstvy v souboru oblečení. Měření jednotlivých vrstev představovalo problém vzhledem k velké prodyšnosti použitých oděvních materiálů, především spodní a termoizolační vrstvy (pleteniny, rouna). Z uvedeného důvodu bylo od záměru měření jednotlivých vrstev materiálu upuštěno. Kromě normou (ČSN EN ISO 9237) stanoveného tlakového spádu 100 Pa, jež odpovídá dynamickému tlaku vyvolanému prouděním vzduchu o rychlosti 13 m·s⁻¹, byly oděvní sendviče měřeny i pro tlakové spády 15, 58, 131 a 232 Pa. Tyto tlaky dle Bernouliho rovnice (1) odpovídají rychlostem proudění nenarušeného proudu vzduchu 5, 10, 15 a 20 m·s⁻¹, jež byly použity i pro měření v aerodynamickém tunelu.

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (1)$$

kde p_d dynamický tlak [Pa],
 v rychlost proudění vzduchu [m·s⁻¹],
 ρ měrná hmotnost [kg·m⁻³].

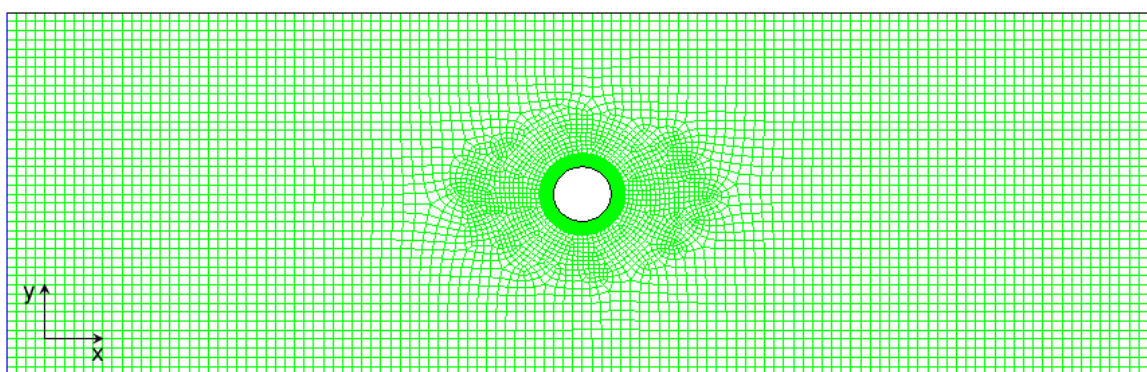
Data rychlosti naměřené v aerodynamickém tunelu, stejně jako i data prodyšnosti měřené „klasickým“ způsobem byly posuzovány pomocí metod exploratorní analýzy vícerozměrných dat. Aplikována byla korelační analýza jejímž cílem bylo prozkoumat lineární závislosti mezi rychlostmi měřeními pod jednotlivými úhly, jakož i dalšími parametry oděvních sendvičů. Pro stanovení struktury a vzájemných vazeb, jak mezi znaky,

tak i mezi objekty byla aplikována analýza hlavních komponent (Principal Components Analysis – PCA) a analýza shluků (Cluster Analysis – CLU).

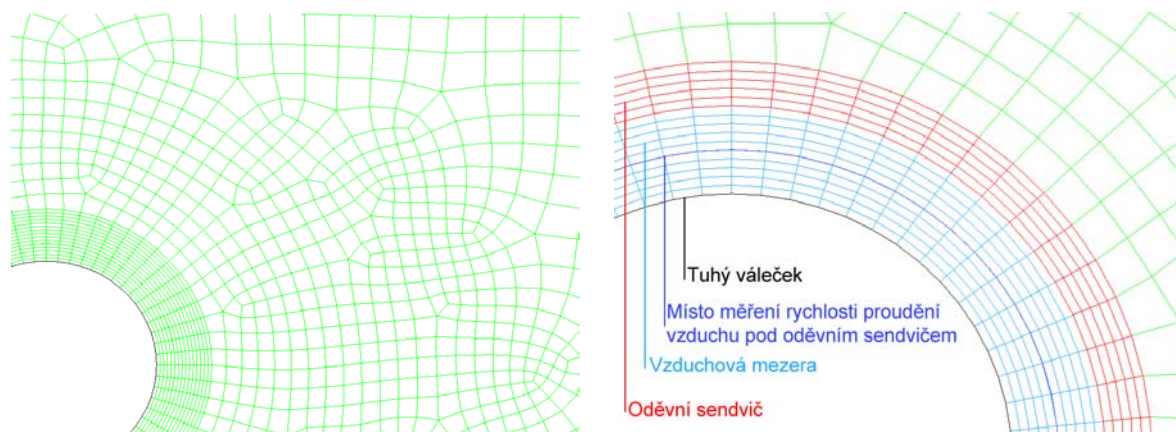
3.3 Modelování proudění vzduchu pomocí FEM

Matematický model simulující obtékání válce „oblečeného“ do textilního sendviče byl vytvořen ve 2D geometrii. Měřicí zóna aerodynamického tunelu je modelována jako obdélník s rozměry $0,4 \times 1,2$ m, uprostřed něhož je umístěn váleček s textilním sendvičem. Podobně jak u měření v aerodynamickém tunelu, tak i v případě modelu, je mezi tuhým válečkem a oděvním sendvičem zachována konstantní mezera v šíři 10 mm (na obr. č. 4 je znázorněna světle modrou barvou). Celkově je síť tvořena 6 671 čtyřúhelníkovými elementy rozdělenými do tří zón. Výpočtová síť numerického modelu je znázorněna na obr. č. 3. Úkol byl řešen pomocí software FLUENT®, jenž představuje jeden z nejpoužívanějších komerčních softwarů v oblasti CFD.

Účelem modelu je porovnání výsledků naměřených v aerodynamickém tunelu s numerickým CFD modelem.



Obr. 3: Výpočtová síť numerického modelu vytvořená v preprocesoru GAMBIT.



Obr. 4: Detail výpočtové sítě numerického modelu vytvořený v preprocesoru GAMBIT.

Oděvní sendvič byl tvořen soustavou oděvních textilií s různou strukturou. Vzhledem ke složitosti struktury, zejména termoizolační vrstvy sendviče, bylo přijato zjednodušení a oděvní sendvič byl modelován jako jedna komplexní porézní vrstva (na obr. č. 4. je oděvní sendvič znázorněn červenou barvou).

Do modelu byly zadány okrajové podmínky jako rychlost proudění vzduchu na vstupu tunelu, intenzita turbulence a porozita oděvního sendviče. V této fázi přípravy

modelu bylo nejdůležitějším úkolem právě stanovení parametrů prodyšnosti textilního sendviče, který byl modelován jako porézní vrstva.

Porézní vrstva sendviče byla modelována pomocí modulu v řešeném modelu „*porous media*“, kde se jako okrajové podmínky zadávají parametry porézního materiálu α a C_2 pro směry 1 a 2. V modelovaném případě koresponduje směr 1 s osou x a směr 2 s osou y a směrový vektor proudícího vzduchu se souřadnicemi $[1, 0]$. Tloušťka porézní vrstvy je v modulu dána přímo geometrii modelu.

Parametry α a C_2 byly stanoveny ze vztahu, jenž je kombinací Darcyho zákona a setrvačných ztrát (představují druhý člen vztahu), jenž je znám jako Brinkman-Forchheimerův vztah [6]:

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2\right), \quad (2)$$

kde Δp tlakový spád [Pa],
 μ dynamická viskozita [Pa·s],
 α koeficient prodyšnosti [m^2],
 v rychlost proudění vzduchu [$m \cdot s^{-1}$],
 C_2 koeficient setrvačných ztrát [m^{-1}],
 ρ měrná hmotnost [$kg \cdot m^{-3}$].

Ve vztahu (2) vystupují dvě neznámé veličiny (α , C_2), avšak předchozí vztah lze zapsat jako polynom druhého stupně bez absolutního členu ve tvaru:

$$-\Delta p = Av + Bv^2, \quad (3)$$

přičemž koeficienty A , B lze zjistit pomocí lineární regrese z experimentálních dat měření prodyšnosti, konkrétně ze závislosti tlakového spádu Δp na rychlosti v . Z regresní rovnice se nakonec vyjádří parametry porézního materiálu $\frac{1}{\alpha}$ a C_2 dle vztahů:

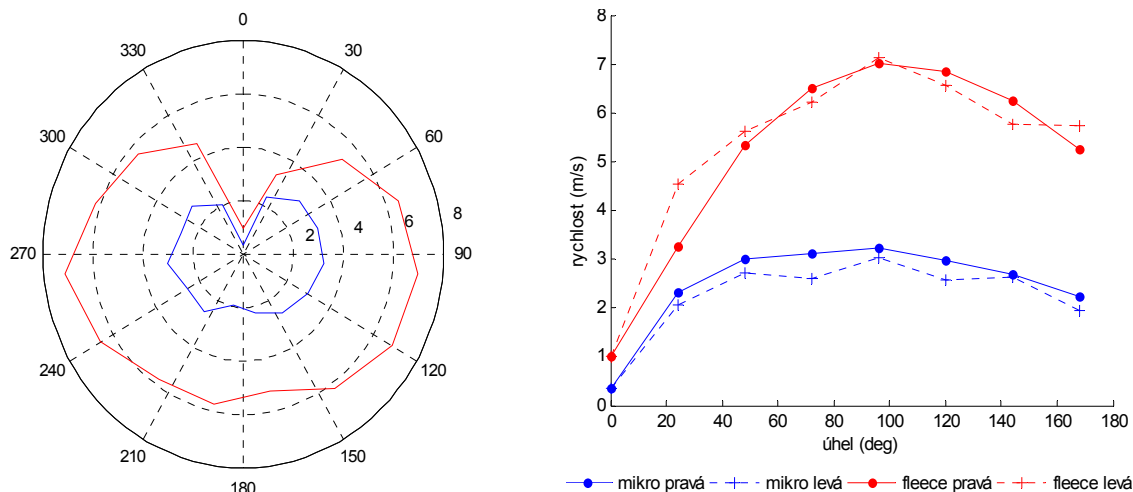
$$\frac{1}{\alpha} = \frac{A}{\mu}, \quad C_2 = \frac{2 \cdot B}{\rho}, \quad (4, 5)$$

4. Přehled dosažených výsledků

4.1 Experimentální měření v aerodynamickém tunelu

Analýza hlavních komponent (PCA) a shluková analýza (CLU) odhalily tři základní shluky v datech, které byly seskupeny na základě prodyšnosti oděvních sendvičů. Shluk „*wind*“ charakterizuje skupiny, kde jako ochranná vrstva byly použity materiály s membránou či zátěrem. U druhé skupiny – „*mikro*“ byla třetí vrstva z mikrovláken a poslední shluk „*fleece*“ tvořili dvouvrstvé sendviče.

Výsledky experimentálního měření rychlosti proudění vzduchu pod vrstvou oděvního sendviče v podmínkách rychle proudícího vzduchu v laboratorním prostředí vykazují nesymetričnost podél osy proudění vzduchu v aerodynamickém tunelu. Na obr. č. 5 jsou znázorněny výsledky pro vybrané sendviče typu „*fleece*“ a „*mikro*“ a to jak v polárním, tak i klasickém $X - Y$ grafu. Vzhledem ke geometrii úlohy je tato nesymetričnost neočekávaná a je možné, že negativně ovlivňuje výsledky experimentu. Její původ lze hledat pravděpodobně v konstrukci samotné větrné tratě.



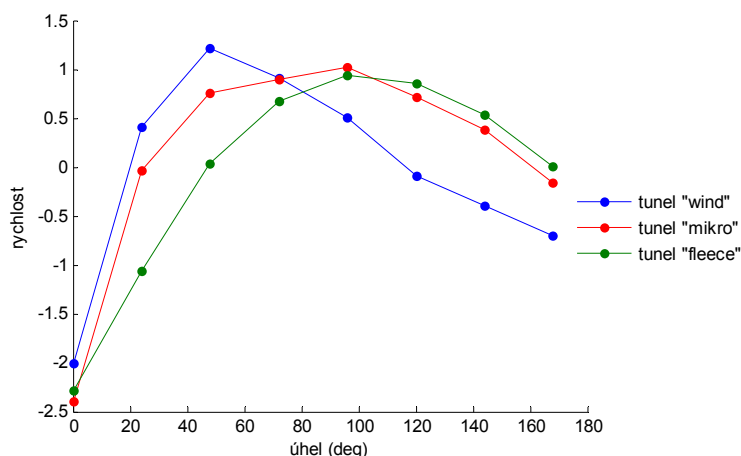
Obr. 5: Rychlost proudění vzduchu pod oděvním sendvičem pro sendvič typu „fleece“ a „mikro“.

Pro snadnější porovnání profilu rychlosti proudění vzduchu pro jednotlivé typy sendvičů byla provedena standardizace dat rychlosti proudění vzduchu podle vztahu:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (1)$$

kde: y_{ij} standardizovaný znak v j -tém sloupci,
 x_{ij} původní prvek v j -tém sloupci,
 \bar{x}_j průměr prvků j -tého sloupce,
 s_j směrodatná odchylka střední hodnoty prvků j -tého sloupce.

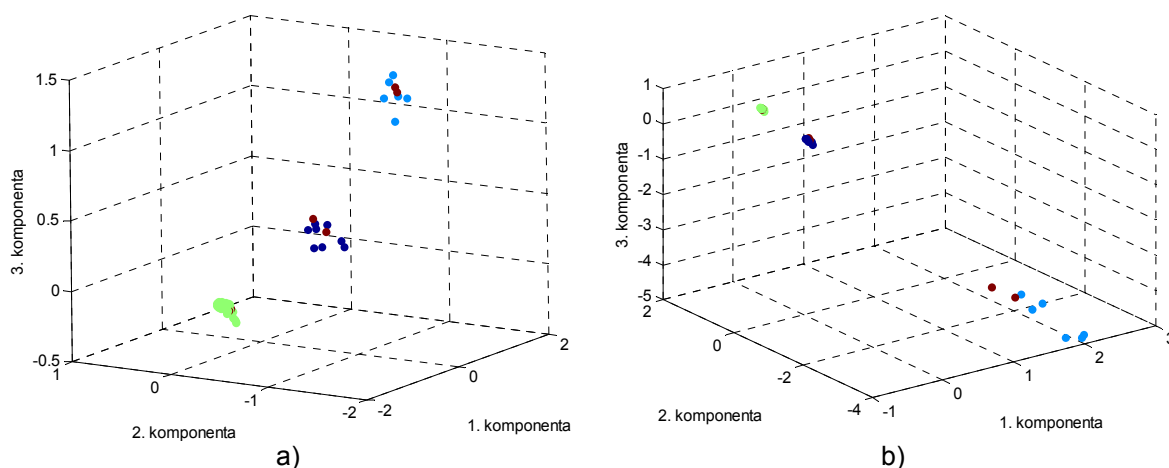
Standardizovaná data rychlosti jsou vynesena do grafu (obr. č. 6), z něhož je patrné, že pro sendvič typu „wind“ má rychlost z oblasti předního stagnačního bodu velmi strmý nárůst a maxima dosahuje kolem úhlu 45°. Pokles rychlosti od maxima směrem k zadnímu stagnačnímu bodu je pozvolnější než nárůst a má téměř lineární trend. Pro sendviče typu „mikro“ dosahuje rychlost svých maxim kolem úhlu 95°. Nárůst rychlosti u sendviče typu „mikro“ je strmější na rozdíl od sendviče typu „fleece“. Průběh poklesu rychlosti směrem k zadnímu stagnačnímu bodu je téměř shodný u obou typů oděvních sendvičů.



Obr. 6: Standardizovaná rychlost proudění vzduchu pod oděvním sendvičem při rychlosti proudění vzduchu $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro všechny typy sendvičů.

4.2 Porovnání měření v tunelu a klasického způsobu

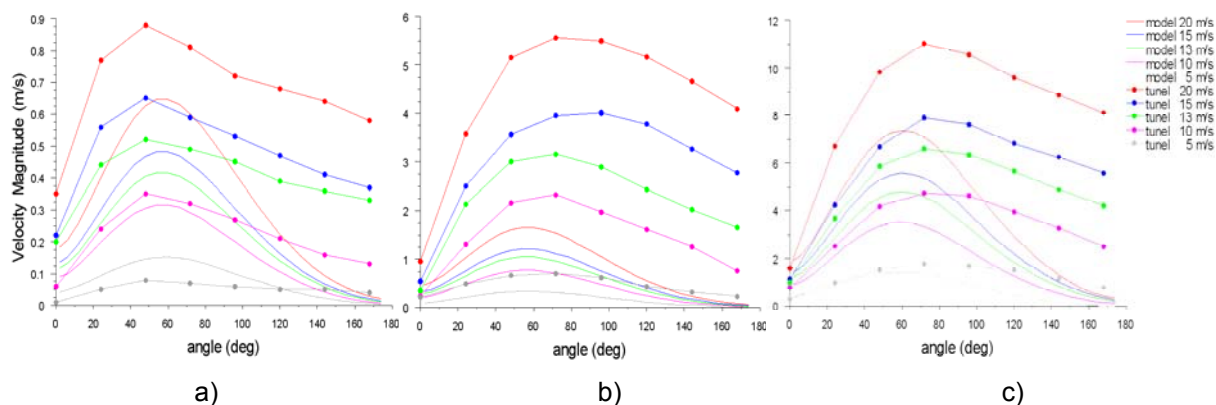
Analýza hlavních komponent (PCA) a shluková analýza (CLU) dat prodyšnosti měřené „klasickým“ způsobem prokázaly naprosto stejnou strukturu dat co se týče počtu a složení jednotlivých shluků. Výsledky analýzy struktury dat se potvrdily i při dodatečném proměření a zařazení kontrolních, dat a to jak pro hodnocení prodyšnosti klasickým způsobem tak, i v případě měření rychlosti proudění pod oděvním sendvičem v aerodynamickém tunelu. Výsledky jsou zobrazeny na obr. č. 7, jenž znázorňuje scatter grafy pro obě srovnávané metody měření. Kontrolní data jsou zobrazena hnědou barvou.



Obr. 7: Scatter graf pro a) rychlost proudění vzduchu v aerodynamickém tunelu $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) měření prodyšnosti klasickým způsobem pro tři vysvětlující komponenty.

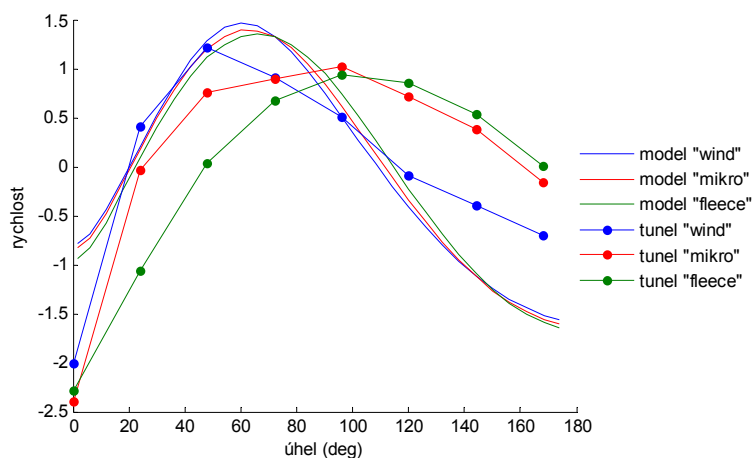
4.3 Porovnání experimentu a simulace

Rychlosti proudění vzduchu pod oděvním sendvičem získané experimentálním měřením jakož i matematickou simulací jsou, pro jednotlivé typy sendvičů, znázorněny na obr. č. 8. Již na první pohled je patrné, že data z obou experimentů mají jiný trend a to i navzdory skutečnosti, že v obou případech byla snaha o zachování stejných podmínek. Ve všech třech případech byly hodnoty rychlosti v mezeře u měření v tunelu vyšší a s většími rozdíly mezi jednotlivými rychlostmi proudění okolního vzduchu i když pro sendviče typu „wind“ a „fleece“ měly nasimulované rychlosti tendenci se „dotahovat“ na hodnoty naměřené. V případě sendviče typu „mikro“ byla rychlost v mezeře znatelně nižší a pro maximální rychlost proudění vzduchu v tunelu $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ byla hodnota simulované rychlosti nižší téměř o 75%.



Obr. 8: Porovnání hodnot rychlosti proudění vzduchu pro oděvní dvourstvý oděvní sendvič typu a) „wind“, b) „mikro“, c) „fleece“.

Pro snadnější porovnání trendu rychlosti proudění vzduchu pod vrstvou oděvního sendviče jsou na obr. č. 9 znázorněny standardizované hodnoty rychlosti pro experimentálně naměřené a simulované hodnoty. Na rozdíl od experimentálních měření má rychlost proudění pod oděvním sendvičem získaná simulací (pro všechny tři typy sendvičů) relativně stejný trend, přičemž tento je kolem maxima téměř symetrický s relativně strmým náběhem i poklesem. Maxima rychlosti jsou dosažena kolem úhlu 60°. V oblasti předního stagnačního bodu jsou hodnoty rychlosti získané simulací vyšší než u hodnot rychlosti získaných experimentálním měřením. V oblasti zadního stagnačního bodu je situace opačná – rychlosti predikované simulací dosahují nižších hodnot než rychlosti získané experimentálním měřením v aerodynamickém tunelu.



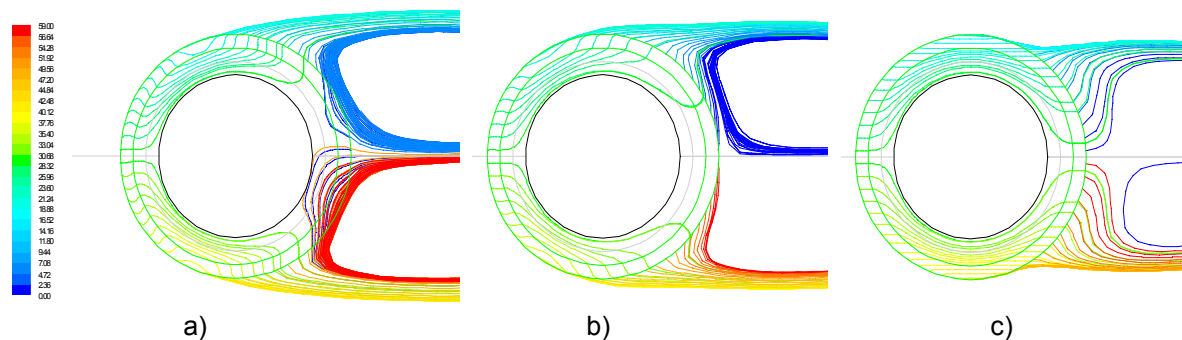
Obr. 9: Porovnání standardizované rychlosti (měřené a simulované) proudění vzduchu pod oděvním sendvičem pro rychlost proudění vzduchu $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.4 Simulace – nastavení parametrů prodyšnosti

Vzhledem ke skutečnosti, že porovnání naměřených a nasimulovaných rychlostí prokázalo jisté neshody a navíc v řešeném případě není zcela evidentní jakým způsobem by měla být porozita oděvního sendviče vlastně modelována, byly provedeny i experimenty s alternativním nastavením parametrů α a C_2 pro směr 1 a 2:

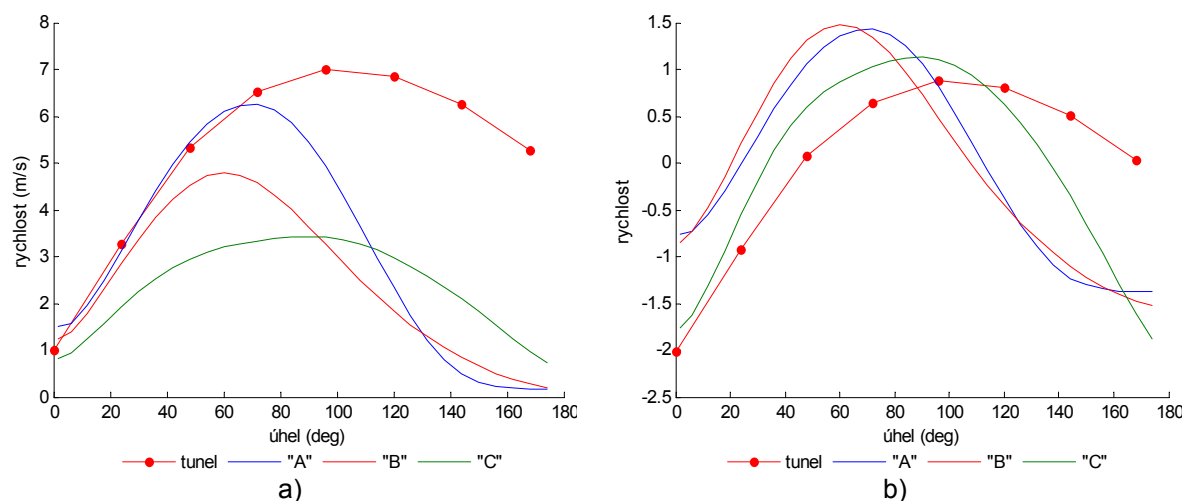
- typ „A“** – u tohoto typu nastavení jsou pro směr 2 zadány nulové hodnoty porézních parametrů,
- typ „B“** – představuje doposud popisované definice porézní oblasti v simulačním modelu, kde jsou v obou směrech zadány stejné hodnoty porézních parametrů.
- typ „C“** – u tohoto typu nastavení jsou pro směr 2 zadány řádově vyšší hodnoty porézních parametrů.

Obr. č. 10 znázorňuje proudnice vycházející z vnějšího povrchu sendviče. Zajímavé je zobrazení proudění v oblasti úplavu pro daná nastavení parametrů α a C_2 . U nastavení typu „A“ prochází proudnice z vírů formujících se v úplavu přes vrstvu sendviče, který jakoby vůbec nekladl odpor, a mezeru až k pevnému válci. V následujících dvou typech nastavení („B“ a „C“) proudnice vycházejí z povrchu oděvního sendviče a jsou unášeny víry úplavu. Dle uvedeného obrázku se jeví jako nejpřirozenější právě nastavení typu „B“.



Obr. 10: Zobrazení proudnic vycházejících z vnějšího povrchu sendviče typu „fleece“ pro rychlost proudění 13 m·s⁻¹, nastavení parametrů prodyšnosti typu a) „A“, b) „B“, c) „C“.

Výsledky simulace rychlosti porovnávacích experimentů jsou spolu s výsledky experimentálně měřené rychlosti shrnuty v grafu na obr. č. 11. V grafu na obr. č. 11 a) jsou vyneseny rychlosti experimentálně naměřené a nasimulované pro jednotlivé typy nastavení porézních parametrů (jak byly popsány výše), v závislosti na úhlu po obvodu válce. Z grafu je patrné, že nejvyšší hodnoty rychlosti byly naměřené v experimentálním aerodynamickém tunelu. Naopak nejnižších hodnot bylo dosaženo při počítačové simulaci pro nastavení parametrů prodyšnosti typu „C“. Obr. č. 11 b) znázorňuje standardizované hodnoty rychlosti pro stejné situace jako v předchozím případě. Z tohoto zobrazení je patrná podobnost trendu rychlosti při nastavení typu „A“ a „B“ jenž se liší od ostatních dvou případů. Trendy rychlosti pro nastavení typu „C“ a měření by se daly považovat za podobné v náběhové oblasti, i když u naměřené rychlosti je trend pozvolnější, zejména pak při poklesu rychlosti z oblasti maxima do oblasti zadního stagnačního bodu.

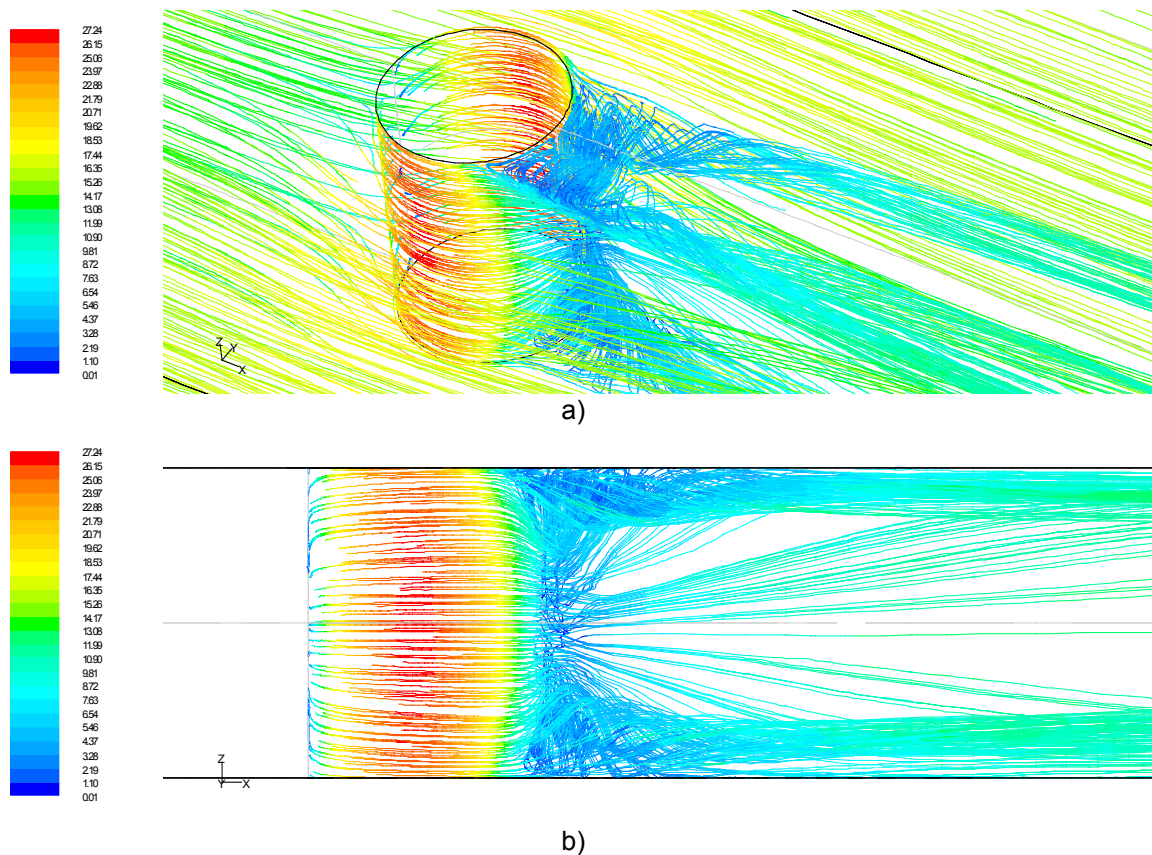


Obr. 11: Rychlost proudění větru v mezeře při proudění vzduchu v tunelu o rychlosti 13 m·s⁻¹ pro dvourvrstvý oděvní sendvič typu „fleece“ a) fyzikální, b) standardizovaná.

4.5 Modelování tunelu

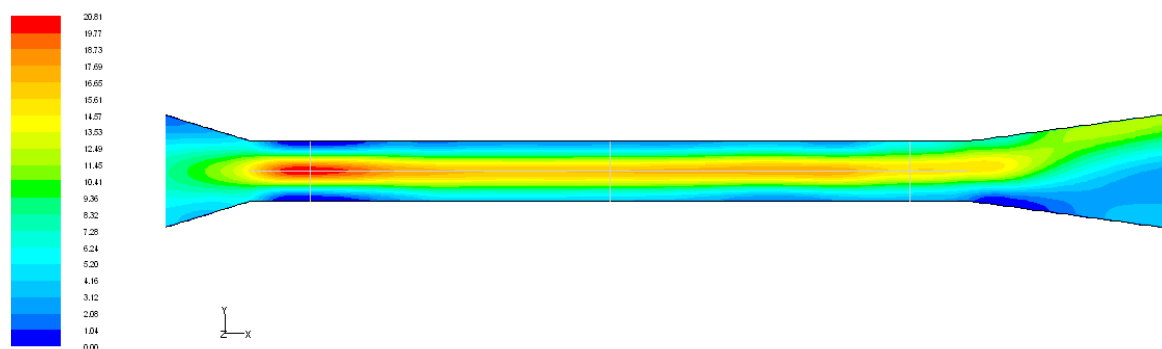
Vzhledem k značným rozdílům ve výsledcích experimentálního měření a simulace byly následně provedeny simulační experimenty, jejichž úkolem bylo zjistit vliv geometrie tunelu na výsledky experimentů. K tomuto účelu byly vytvořeny další dva simulační modely. První případ představuje 3D model obtékání válce v měřicí zóně tunelu rozšířené o konfuzor a difuzor. Obr. č. 12, jenž znázorňuje proudnice (vybarvení dle magnitudy rychlosti) při obtékání válce v aerodynamickém tunelu. Z obrázků je patrné, že proudění u stěn měřicí

zóny je výrazně odlišné od proudění uprostřed výšky obtékaného válce. Z výsledků se dá usuzovat na malou výšku měřicí zóny a možné negativní ovlivnění výsledků experimentálního měření právě vlivem stěn měřicí zóny.

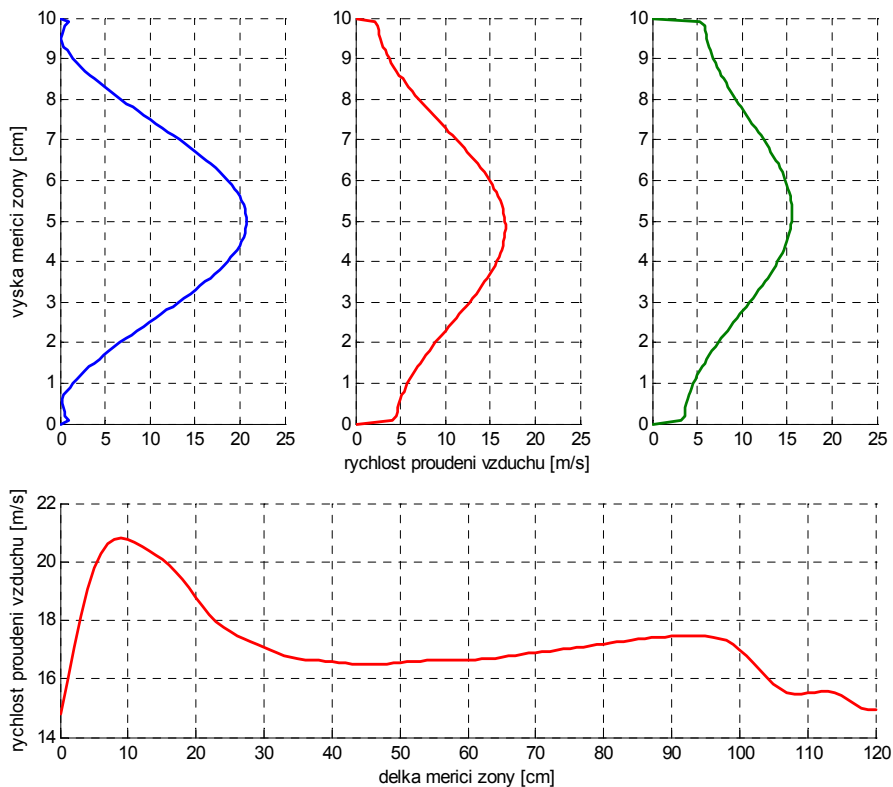


Obr. 12: Proudnic kolem obtékaného válce, a) nabíhající proud s úplavem b) nárys proudnic vycházejících z povrchu válce.

Druhý model představuje 2D geometrii použitého experimentálního tunelu. Na detailu měřicí zóny (obr. č. 13) je, kromě vlivu kolena, jenž způsobuje jakýsi „přesun“ vyšších rychlostí proudění vzduchu ze středu měřicí zóny směrem k „vnější“ straně větrné tratě, patrné i nerovnoměrné rozložení rychlosti na výšce měřicí zóny. Pro lepší představu byl změřen profil rychlosti proudícího vzduchu na třech místech zóny ve vzdálenosti 10, 60 a 110 cm od počátku zóny a ve středu výšky po celé délce měřicí zóny (obr. č. 14). Z grafů zobrazujících rychlostní profil přes výšku zóny je možné pozorovat jednak postupný pokles rychlosti z cca 20 na $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což představuje pokles o zhruba 25%, tak i nesymetrii profilu rychlosti, jenž se projevuje na profilu rychlosti ze středu a konce měřicí zóny. Ostatně zvlnění hlavního proudu vzduchu je možné pozorovat už na detailu zóny a je pravděpodobně způsobeno právě nuceným stočením proudícího vzduchu v kolenu experimentálního tunelu.



Obr. 13: Zobrazení rychlosti proudění vzduchu v měřicí zóně tunelu.



Obr. 14: Profily rychlosti na začátku, ve středu a na konci měřicí zóny.

5. Zhodnocení výsledků a nových poznatků

Vzhledem ke skutečnosti, že oblast prodyšnosti je komplikovanou záležitostí už u samotných textilií, lze tuto dizertační práci považovat pouze za úvod do problematiky měření prodyšnosti oděvních sendvičů v podmínkách rychle proudícího vzduchu.

Závěry laboratorního a simulačního experimentu prokázaly vhodnost navržené metody hodnocení rychlosti proudění vzduchu pod oděvním sendvičem, přestože mezi výsledky obou typů experimentu byly odhaleny určité rozdíly – hodnoty naměřených rychlostí a jejich profil po obvodu válce. Nelze jednoznačně říci, že zmiňované neshody ve výsledcích jsou způsobeny výhradně aerodynamickým tunelem (jeho konstrukcí) nebo výhradně způsobem počítačové simulace řešeného problému (volba řešiče, stanovení koeficientů porézního materiálu, zanedbání deformací). Pro odhalení jak skutečných příčin neshod mezi měřením v aerodynamickém tunelu a matematickou simulací, tak i vzájemných relací mezi rychlostí proudění vzduchu pod oděvním sendvičem a prodyšností měřenou „klasickým“ způsobem je potřeba provést některé úpravy, jenž jsou popsány níže.

Doporučení pro další výzkum:

- Sestrojení nového aerodynamického tunelu přímé otevřené konstrukce s delší a vyšší uzavřenou měřicí zónou. S touto úpravou pak nutně souvisí i výroba nového přípravku pro měření rychlosti proudění vzduchu pod vrstvou oděvního sendviče.
- Identifikace vzájemné relace mezi měřením rychlosti proudění vzduchu pod vrstvou oděvního sendviče a klasického měření prodyšnosti oděvních sendvičů. Toto je podmíněno provedením rozsáhlého počtu experimentálních měření prodyšnosti. Vzájemnou relaci by bylo možné využít pro predikci charakteru proudění pod oděvním sendvičem na základě klasického měření

prodyšnosti. Využití predikce by následně zkrátilo experimentální čas, jelikož měření v aerodynamickém tunelu je časově náročné.

- zahrnutí „tepla“ do celkové analýzy vlivu ochlazování lidského organismu způsobeného proudícím větrem.
- zahrnutí deformací oděvního sendviče způsobených rychle proudícím vzduchem, jenž mohou výraznou měrou ovlivnit výslednou rychlost proudění vzduchu pod oděvním sendvičem. Toto je podmíněno dostatečnou výškou měřicí zóny aerodynamického tunelu stejně jako přizpůsobením přípravku pro měření rychlosti proudění vzduchu pod oděvním sendvičem. V simulačních experimentech je zahrnutí deformací podmíněno schopností určit deformační charakteristiky textilií.

6. Literatura

- [1] BACKER, S. *The Relationship between the Structural Geometry of a Textile Fabric and Its Properties, Part IV: Interstice Geometry and Air Permeability*. Textile Research Journal, 21, 1951
- [2] BRASQUET, C. – LE CLOIREC, P. *Pressure drop through textile fabrics – experimental data modeling using classical models and neural networks*. Chemical Engineering Science, Vol. 55, p. 2767–2778. 2000.
- [3] CARNALI, J. O. – KOTKIN, C. A. *Determination of the Capillary Nature of Simple Woven Textiles*. Journal of Colloid and Interface Science, 159. p. 319–323. 1993
- [4] DUNN, M. W. *An Abbreviated Introduction to Fluid Flow Modeling & Evaluation*. In: Fiber Architects, Chap. Biotextiles: Fluid Flow Modeling. [cit. 18. 7. 2004] Dostupné na: <http://fiberarchitects.com/biomedical/fluids.html>
- [5] FAN J. – KEIGHLEY J. H. *A theoretical and experimental study of the thermal insulation of clothing in windy conditions*. International journal of clothing science and technology. Vol. 1, No. 1, 1989, pp. 21-29 ISSN: 0955-6222
- [6] FLUENT 6.1 User's Guide. © Fluent Inc. 2003-01-25
- [7] GOOIJER, H. *Flow Resistance of Textile Materials*. Thesis UT Enschede, 1998.
- [8] HAVRDOVÁ, M. *Air Permeability and Structure of Woven Fabrics*. Vlákna a textil, 10 (2) str. 86 – 90, 2003 ISSN 1335-0617
- [9] HOERNER, S. F. *Aerodynamics Properties of Screens and Fabrics*. Textile Research Journal, April 1952, str. 274 – 280.
- [10] JENA, A. – GUPTA, K. *Liquid Extrusion Techniques For Pore Structure Evaluation Of Nonwovens*. [online] International Nonwoven Journal Fall 2003, Vol. 12. No. 3, p. 45 – 53. [cit. 31. 1. 2005] Dostupné na Internetu: www.inda.org/subscript/inj03_3/toc.pdf
- [11] KUTÍLEK, M. *Vlhkost pórovitých materiálů*. Česká matice technická. Roč. LXXXIX, 1984, Č. spisu 422. SNTL Praha: 1984
- [12] MCGREGOR, R. *The Effect of Rate of Flow on Rate of Dyeing. Part II. – The Mechanism of Fluid Flow Through Textiles and its Significance in Dyeing*. Journal of the Society of Dyers and Colourists, Vol. 81, October 1965, pp. 429-438.
- [13] MILITKÝ, J. – HAVRDOVÁ, M. *Hodnocení prodyšnosti vzduchu a porosity medicínských textilií*. TEXCO 99. Ružomberok. Říjen 1999. ISBN 80-7083-360-2
- [14] MILITKÝ, J. – TRÁVNÍČKOVÁ, M. – BAJZÍK, V. *Air Permeability and Light Transmission of Weaves*. International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 11, No. 2/3, 1999, pp. 116-124 ISSN: 0955-6222
- [15] MILITKÝ, J. – KŘEMENÁKOVÁ, D. – VIK, M. – VIKOVÁ, M. *Neural Networks for Porosity and air Permeability Prediction*. 7atc. Hong Kong 2003

- [16] NAGY, V. – KOŠŤÁKOVÁ, E. – VAS, L. M. *Investigation of porosity in polyester staple yarns*. 5th International conference Textil Science 2003, Liberec 2003, pp. 164 – 167, ISBN 80-7083-711-X
- [17] PARTRIDGE, J. F. – MUKHOPADHYAY, S. K. *Mathematical Predictions of Gas Permeability for Automotive Air-Bags*. Journal of Applied Polymer Science, 2000, Vol. 77, p. 2104–2112. John Wiley & Sons, Inc.
- [18] PIERCE, F. T. *Geometrical Principles Applicable to the Design Functional Fabrics*. Textile Research Journal, Vol. 17, No. 3, pp.123-147
- [19] ROBERTSON, A. F. *Air Porosity of Open-Weave Fabric*. Textile Research Journal, December 1950, str. 838 – 857.
- [20] SINGH, M. – MOHANTY, K. K. *Permeability of spatially correlated porous media*. Chemical Engineering Science, Vol. 55, p. 5393–5403. 2000.
- [21] SOBERA, M. P. et al. Convective Heat and Mass Transfer to a Cylinder Sheated by a Porous Layer. *AIChE Journal*. Vol. 49, No. 12, 2003, pp. 3018-3028. ISSN 1547-5905
- [22] STREMBOSZ, W. – WAWSZCZAK, W. *Diffusion modeling of gas filtration processes*. 5th International conference Textil Science 2003, Liberec 2003, p. 154 – 157, ISBN 80-7083-711-X
- [23] ŠIMÁČEK, P. – ADVANI, S. G. *Permeability Model for a Woven Fabric*. Polymer Composites, December 1996, Vol. 17. No. 6, p. 887–899
- [24] TOKARSKA, M. *Neural Model of the Permeability Features of Woven Fabrics*. Textile Research Journal, December 2004, Vol. 74. No. 12. p. 1045 – 1048. ISSN 0040-5175
- [25] YU, B. – LEE, J. *A Simplified In-Plane Permeability Model for Textile Fabrics*. Polymer Composites, October 2000, Vol. 21. No. 5, p. 201–221
- [26] YU, B. – LEE, J. – CAO, H. *A Fractal In-Plane Permeability Model for Fabrics*. Polymer Composites, April 2002, Vol. 23. No. 2, p. 201–221
- [27] Norma – ČSN EN ISO 9237 Textilie. Zjišťování prodyšnosti plošných textilií, listopad 1996.

7. Práce autora se vztahem ke studované problematice

1. HALASOVÁ, A., Methods of textile evaluation at extreme wind conditions – comparison aerodynamical tunnel and numerical simulation. *6th International Conference Textile Science, 2007*. Technical University of Liberec, Liberec: 2007, p. 123-124. ISBN: 978-80-7372-207-4
2. HALASOVÁ, A. – GLOMBÍKOVÁ, V. Air Permeability of Clothing and Extreme Windy Conditions. *Proceedings of 13th international conference STRUTEX*, TU Liberec: 2006, p. 239-244. ISBN: 80-7372-135-X
3. HALASOVÁ, A. et al. Air Permeability Evaluation of Clothing in Extreme Windy Conditions. *Thermal Manikins and Modelling, 2006*, Jintu Fan (ed), The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong: 2006, p. 293-299. ISBN: 962-367-534-8
4. HALASOVÁ, A. et al. Contribution to air permeability evaluation of clothing in windy conditions. *Proceedings of the 20th Scientific conference Hanoi university of technology, 2006*, HUT, Hanoi: 2006, p. 220-225.
5. HALASOVÁ, A., *Vybrané kapitoly z fyziologie odívání*. [elektronické skriptum] Liberec: TUL, 2005. online: <http://skripta.ft.tul.cz/>

6. KŮS, Z. – ŠUBERT, R. – HALASOVÁ, A. – KOTEK, M. – KOPECKÝ, V. Methods of Textiles Evaluation at Extreme Wind Conditions – Model of Wind. *Proceedings of 12th international conference STRUTEX*, TU Liberec: 2005, p. 255-260, ISBN 80-7372-002-7
7. HAVELKA, A. – HALASOVÁ, A. Transport phenomenon at barrier textiles used for sport clothing. *Proceedings of 4th Central European Conference 2005*, TU, Liberec: 2005, p. 141-142, ISBN 80-7083-967-8
8. HALASOVÁ, A. – GLOMBÍKOVÁ, V. The influence of wind on physiological comfort. feeling. *Proceedings of 11th international conference STRUTEX*, Liberec: 2004, p. 243-248. ISBN 80-7083-891-4

8. Summary

This thesis deals with evaluation of air permeability of clothing sandwich. Aim of this work was to propose method for evaluating of above mentioned property in conditions of quickly flowing air. The proposed method should probe air velocity crossing through the set of clothing, superimposed the same way as in clothing in windy conditions. For this purpose laboratory aerodynamical tunnel and simulation model were used. The numerical model was created in CFD system Fluent®. Air velocity under clothing sandwich measured in tunnel was compared with air velocity computed by numerical simulation. In regard of certain differences simulation experiments were performed. Their aim was to discover influence of tunnel geometry on experimental results.

Vydala Textilní fakulta, Technické univerzity v Liberci
jako interní publikaci pod pořadovým číslem 8/2007
v počtu 20 výtisků