

## Oponentský posudek dizertační práce

# Determination of Clothing Evaporative Resistance for Thermo-physiological Modelling Using a Thermal Mannequin

Zjišťování výparného odporu oděvů s využitím manekýna pro využití v simulačních modelech termo-fyziologie

**Autor dizertační práce:** Ing. Róbert Toma

**Autor oponentského posudku:** Ing. Kamila Lunerová, Ph.D., Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i.

Předložená dizertační práce se zabývá problematikou měření tepelně-izolačních vlastností oděvů pomocí tepelného manekýna NEWTON za účelem využití naměřených hodnot jako vstupních dat pro termofyziologické modely určené pro odhad tepelné zátěže člověka při vybraných aktivitách. V rámci řešení dizertační práce se autor podílel na zavedení nového způsobu měření odporu oděvu proti vypařování na základě nejnovějších poznatků ze zahraničí s využitím stávajícího vybavení domovského pracoviště na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (FSI VUT, klimatická komora a tepelný manekýn NEWTON) a na porovnání výsledků naměřených na FSI VUT v Brně se zavedenými pracovišti v zahraničí. Výsledky dizertační práce tedy nejenom dokládají schopnost autora řešit komplexní vědeckou problematiku, ale zároveň jsou i přínosem pro celou vědeckou komunitu v oblasti měření odporu oděvu proti vypařování a optimalizace termofyziologických modelů. V neposlední řadě dizertační práce přispívá i k prezentaci pracoviště FSI VUT s výhledem jeho zapojení do výzkumných úkolů v tuzemském i zahraničním měřítku.

### Obsah práce

Dizertační práce je členěna do 6 kapitol + doprovodné seznamy a 4 přílohy, které obsahují stěžejní publikace v recenzovaných odborných časopisech a které podrobně popisují vlastní výzkumné úkoly řešené v rámci dizertační práce. V úvodní první kapitole autor uvádí stručné zavedení do problematiky tepelné zátěže, odhadu tepelné zátěže při práci, využití simulačních termofyziologických modelů a požadavků na vstupní data do těchto modelů. Z uvedeného vyplývá výzkumná potřeba co nejrealističtějšího měření tepelně-izolačních vlastností oděvů. Zatímco měření tepelné izolace včetně lokálních hodnot je uspokojivě řešené díky vlastní konstrukci měřicího přístroje – tepelného manekýna NEWTON – měření odporu oděvu proti vypařování včetně lokálních hodnot je mnohem komplexnější problematika. Autor stanovuje obecné cíle své práce – vybrat a vyzkoušet spolehlivou metodu na měření odporu oděvu proti vypařování pomocí tepelného manekýna NEWTON na FSI VUT v Brně, porovnat různé metody měření, ověřit reprodukovatelnost a přesnost měření ve srovnání s daty naměřenými na zavedeném pracovišti univerzity v Lundu pomocí tepelného manekýna TORE, zhodnotit použitelnost výpočetních vztahů a různých korekcí pro výpočty navržených v zahraničních publikacích pro oděvy s různými hodnotami tepelné izolace. V kapitole 2 jsou stručně a přehledně popsány používané způsoby měření odporu oděvu proti vypařování se zaměřením na různé typy tepelných manekýnů a možnosti simulace pocení. Dále jsou zde uvedeny různé metody výpočtu odporu oděvu proti vypařování (metoda měření úbytku hmotnosti a metoda měření tepelných ztrát) a srovnány jejich výhody a omezení včetně shrnutí různých vnějších faktorů ovlivňujících měření. V kapitole 3 jsou stručně shrnuta „bílá místa“ výše uvedené problematiky. V kapitole 4 jsou následně vymezeny konkrétní cíle a dílčí úkoly pro postupné řešení dizertační práce a je uveden přehled

5 recenzovaných článků autora, ve kterých jsou jednotlivé konkrétní cíle řešeny, dále i 7 příspěvků (články v odborných časopisech, příspěvky na konferencích), které se zabývají danou problematikou, a dalších 7 příspěvků, na nichž se autor podílel, ale vlastního tématu dizertační práce se týkají pouze částečně. V kapitole 5 jsou podrobněji popsány zjištěné výsledky a závěry u 5 stěžejních recenzovaných článků autora s odkazem na podrobnější popis v příložených publikacích: I - Ověřování Fialova modelu tepelného komfortu (FMTK) a jeho aplikace na odhad tepelné zátěže při práci v ochranných oděvech proti chemikáliím, kdy bylo mj. ověřeno, že pro optimální výsledky FMTK modelu je nutné zadávat co nejpřesnější vstupní data, včetně lokálních hodnot odporu oděvu proti vypařování. Publikace II popisuje experimenty zaměřené na měření plošného faktoru oděvu a lokálních hodnot tepelné izolace a odporu oděvu proti vypařování, srovnání 5-7 různých metod na jejich měření a vliv polohy manekýna/těla na tyto lokální hodnoty. Článek III popisuje různé metody výpočtu tepelné izolace a odporu oděvu proti vypařování dle norem ISO 9920 nebo EN 342 a srovnání s hodnotami experimentálně naměřenými pomocí tepelného manekýna TORE, optimalizace měření odporu oděvu proti vypařování, ověřování korekcí výpočtů pro oděvy s různou tepelnou izolací a vliv nepřesných vstupních dat na výsledky predikčního termofyziologického modelu PHS (Predicted Heat Strain). V následujícím článku IV jsou zjištěné poznatky aplikovány na predikci tepelné zátěže pomocí modelu PHS u zemědělských pracovníků při 8h práci v ochranných oděvech v tropických podmínkách. Článek V (připraven k publikaci) se zabývá reprodukovatelností měření odporu oděvu proti vypařování na 14 soupravách ochranných oděvů pomocí dvou různých tepelných manekýnů (TORE/NEWTON) ve dvou různých laboratořích, kdyby byly zjištěny statisticky významné rozdíly v naměřených hodnotách, pravděpodobně díky mírně odlišnému tvaru těla tepelného manekýna a různým rozměrům klimatické komory. V kapitole 6 je pak celkový souhrn výsledků za několik let výzkumu a doporučení a náměty na další výzkum do budoucna.

## Posudek na práci

**Stanovisko k aktuálnosti tématu dizertační práce:** Řešení dizertační práce reaguje na rostoucí problém globálního oteplování a jeho vlivu na zdraví člověka se zaměřením na činnost v ochranných oděvech (hasiči, záchranáři, pracovníci v zemědělství apod.). V současné době se většina výrobců ochranných oděvů zaměřuje nejen na zvyšování ochranných vlastností oděvů, ale také na komfort ochranných oděvů a případnou tepelnou zátěž, která může ohrožovat zdraví uživatele oděvu. Pro odhad tepelné zátěže jsou zásadní i tepelně-izolační vlastnosti oděvu. V tomto kontextu přináší výzkum prováděný v rámci dizertační práce velmi přínosné poznatky pro inovativní způsoby měření odporu oděvu proti vypařování, srovnání mezi jednotlivými způsoby měření a výpočtů a typy měřicích systémů (tepelných manekýnů). Dá se očekávat, že prezentované způsoby stanovení odporu oděvu proti vypařování u ochranných oděvů budou využívat i jiné podobně zaměřené laboratoře ve světě. Téma dizertační práce je aktuální a přínosné.

**Stanovisko ke splnění stanovených cílů:** V kapitole 4 jsou jasně definované cíle dizertační práce:

- I. Analyzovat vliv tepelně-izolačních vlastností oděvů na přesnost predikce tepelné zátěže pomocí termofyziologických modelů.

Požadované výsledky jsou přehledně popsány v recenzovaném článku 1 (Pokorný J.,..., Toma R. a kol., 2017). Z výsledků vyplývá, že pro verifikaci různých termofyziologických modelů je nutné mj. zadání co nejpřesnějších lokálních hodnot tepelně-izolačních vlastností oděvů. V recenzovaném článku 4 (Kuklane K., Toma R., Lucas A. I., 2020) jsou popsány predikce termofyziologického modelu PHS s využitím naměřených lokálních hodnot.

- II. Analyzovat rozdíly mezi různými přístupy k měření tepelně-izolačních vlastností oděvů se zaměřením na měření pomocí tepelných manekýnů.

Požadované výsledky jsou přehledně popsány v recenzovaném článku 2 (Fojtlín M.,..., Toma R. a kol., 2019) a v článku 3 (Toma R. a kol., 2020). Z výsledků vyplývá, že naměřené hodnoty tepelně-izolačních vlastností mohou vykazovat značné rozdíly v závislosti na způsobu měření a poloze těla tepelného manekýna, což má následně vliv na přesnost predikce tepelné zátěže pomocí termofyziologických modelů.

- III. Zjistit vliv naměřených lokálních hodnot tepelně-izolačních vlastností oděvů na predikci tepelné zátěže pomocí termofyziologických modelů.

Požadované výsledky jsou přehledně popsány v recenzovaném článku 1 (Pokorný J.,..., Toma R. a kol., 2017), v článku 2 (Fojtlín M.,..., Toma R. a kol., 2019) a v článku 4 (Kuklane K., Toma R., Lucas A. I., 2020).

IV. Zjistit vliv polohy těla a pohybů těla na lokální hodnoty tepelně-izolačních vlastností oděvů.

Požadované výsledky jsou přehledně popsány v recenzovaném článku 2 (Fojtlín M.,..., Toma R. a kol., 2019) a v článku 3 (Toma R. a kol., 2020).

V. Ověřit metodu na měření odporu oděvu proti vypařování pomocí tepelného manekýna včetně optimalizace upřesňujících korekcí výpočtu.

Požadované výsledky jsou přehledně popsány v recenzovaném článku 3 (Toma R. a kol., 2021), článku 4 (Kuklane K., Toma R., Lucas A. I., 2020) a v připravovaném článku 5 (Toma R. a kol., připraveno k odeslání). V uvedených článcích je popsána metoda měření odporu oděvu proti vypařování pomocí umělé „předvlhčené kůže“, různé způsoby výpočtu, návrhy korekcí a jejich ověření pro různé typy podmínek a oděvů.

VI. Zavést tuto metodu na měření odporu oděvu proti vypařování do praxe na pracovišti Energetického ústavu VUT Brno.

Požadované výsledky jsou předmětem připravovaného článku 5 (Toma R. a kol.), který popisuje měření a výpočty odporu oděvu proti vypařování na 14 různých oděvních sestavách pomocí dvou různých tepelných manekýnů – NEWTON na pracovišti VUT v Brně a TORE na Univerzitě v Lundu. Z výsledků vyplývá, že rozdíly mezi naměřenými hodnotami jsou ve většině případů cca 4 %.

VII. Ověřit reprodukovatelnost měření odporu oděvu proti vypařování pomocí tepelného manekýna na dvou odlišných pracovištích.

Požadované výsledky jsou předmětem připravovaného článku 5 (Toma R. a kol.), viz výše.

Stanovené cíle dizertační práce považuji za úspěšně splněné.

#### **Stanovisko k postupu řešení problému a k výsledkům dizertace s uvedením konkrétního přínosu doktoranda:**

Problematika predikce tepelné zátěže pomocí termofyziologických modelů je velmi komplexní záležitost, ve které hrají roli jak vstupní data, tak použité matematické procesy jednotlivých predikčních modelů. Tepelně-izolační vlastnosti oděvů jsou jedním ze zásadních parametrů, které ovlivňují tepelnou bilanci lidského těla, a správně naměřené vstupní hodnoty tak mají zásadní vliv na konečný výsledek predikce. Dle mého názoru autor dizertační práce předložil velmi racionální postup řešení celé problematiky, kdy se mu podařilo zmapovat počáteční nedostatky pro predikce termofyziologických modelů vč. nutnosti precizního naměření celkových i lokálních termo-izolačních parametrů oděvů, a následně se podílel na vývoji a optimalizaci metod měření a souvisejících výpočtů na zahraničním pracovišti, zavedení vyvinuté metody na pracovišti VUT, srovnání naměřených výsledků obou pracovišť a využití naměřených výsledků pro přesnější predikce tepelné zátěže pomocí termofyziologických modelů.

Za hlavní přínos práce a doktoranda považuji jeho spolupráci na vývoji metody s „předvlhčenou kůží“ na zahraničním pracovišti a následném zavedení metody na pracovišti VUT v Brně, což by mohlo velmi rozšířit možnosti zapojení pracoviště VUT do výzkumných, vývojových aktivit i komerčních na tuzemském i mezinárodním poli.

**Stanovisko k významu pro praxi nebo rozvoj vědního oboru:** Metoda „předvlhčené kůže“ na měření odporu oděvu proti vypařování pomocí tepelného manekýna je chytrým praktickým řešením, které umožňuje využívat stávající měřicí zařízení pro další důležitý účel, než je původní určení, tj. měření tepelné izolace i odporu oděvu proti vypařování včetně lokálních hodnot. Představená metoda je přínosem nejen pro pracoviště FSI VUT v Brně, ale i pro další pracoviště ve světě, která využívají podobného tepelného manekýna. Díky tomu pak budou snadněji

dostupná data tepelně-izolačních vlastností oděvů, což otevírá další možnosti pro související výzkumný a vývojový sektor.

**Stanovisko k formální úpravě dizertační práce a její jazykové úrovni:** Z formálního hlediska považuji předloženou dizertační práci za zdařilou. Práce je v angličtině, jazyková úroveň je na odpovídající úrovni, pár drobných překlepů (str. 45, 46, 54) nijak nesnižuje celkovou úroveň práce. Lehce matoucí je mírně odlišný název příloženého článku III vč. citace uvedený na str. 36 a 43 a u vlastního článku. Vzhledem ke stanovení cílů I a III bych uvítala v teoretické části alespoň stručný popis principu termofyziologických modelů a uvedení návazností na vstupní data se zaměřením na tepelně-izolační vlastnosti oděvů.

**Stanovisko k předloženým tezím:** Teze vyhovují požadovanému členění.

**Předloženou dizertační práci hodnotím jako velmi přínosnou a zdařilou a doporučuji ji k obhajobě.**

**Na autora mám následující otázky:**

1. Prováděli jste srovnání hodnot odporu oděvu proti vypařování naměřených metodou „předvlhčené kůže“ s hodnotami naměřenými pomocí tepelných manekýnů jiné konstrukce (zmíněné v kapitole 2.1)?
2. Jsou v Evropě pracoviště, která měří odporu oděvu proti vypařování pomocí tepelných manekýnů se simulací pocení?
3. V článku I z r. 2017 jste srovnávali různé termofyziologické modely se zadáním vstupních hodnot odporu oděvu proti vypařování získanými z literatury. Zkoušeli jste pak udělat podobné simulace i s naměřenými daty odporu oděvu proti vypařování? Pokud ano, je tam vidět nějaký kvalitativní posun v přesnosti predikce některého z použitých modelů?

V Brně, dne 14. 2. 2024

Ing. Kamila Lunerová, Ph. D.