



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

PŘENOS TEPLA Z POVRCHU LIDSKÉHO TĚLA - VALIDACE CFD MODELU TEPELNÉHO MANEKÝNA

HEAT TRANSFER FROM THE SURFACE OF THE HUMAN BODY - VALIDATION OF A CFD THERMAL
MANIKIN MODEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Kuruc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Jan Kuruc
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Technika prostředí
Vedoucí práce:	doc. Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Přenos tepla z povrchu lidského těla – validace CFD modelu tepelného manekýna

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelný manekýn je měřicí zařízení pro určení přenosu tepla z povrchu lidského těla. V některých případech však není měření pomocí reálného manekýna možné a je proto nutné využití virtuálních modelů manekýnů například v CFD simulacích. Každý takový model však musí být validován, aby byly známy nejistoty výsledků predikce modelu.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce bude vytvoření a validace CFD modelu na základě experimentů, které byly provedeny pro kalibraci reálného manekýna (experimenty pro kalibraci ekvivalentní teploty a diagramu komfortních zón). Hlavním úkolem pak bude najít vhodnou kombinaci modelů přenosu tepla a proudění, která by věrně simulovala reálné procesy přenosu tepla v průběhu experimentů. K validaci výsledků budou využita data z diplomových prací Hrubanová K. 2016 a Fojtlín M. 2014.

Seznam doporučené literatury:

FOJTLÍN, M. Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekce z povrchu tepelného manekýna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. XY s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.

HRUBANOVÁ, K. Databáze tepelných parametrů oblečení pro systém iHVAC. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 77 s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.

PSIKUTA, Agnes, Jonas ALLEGRINI, Barbara KOELBLEN, et al. Thermal manikins controlled by human thermoregulation models for energy efficiency and thermal comfort research – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2017, 78, 1315-1330 [cit. 2018-10-28]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.04.115

NILSSON, Håkan O. Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models. 2004, University of Gävle.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na CFD simulaci přenosu tepla z tepelného manekýna v kalibračním prostředí a její následnou validaci na základě již provedených experimentů v rámci diplomových prací Ing. Fojtlína a Ing. Hrubanové. Hlavním cílem práce je nalezení a otestování vhodné kombinace fyzikálních modelů a nastavených okrajových podmínek v simulačním modelu tak, aby byly věrně simulovány skutečné procesy přenosu tepla a proudění vzduchu z průběhu validačních experimentů. V průběhu práce bylo simulováno 7 případů na základě jednotlivých měření uskutečněných při experimentech. Za hlavní výsledky simulace lze považovat vypočítané součinitele přestupu tepla segmentů tepelného manekýna pro každý simulovaný případ. Pro experiment Ing. Fojtlína se jedná o součinitele přestupu tepla radiací a konvekcí. Pro experiment Ing. Hrubanové byly zjišťovány celkové součinitele přestupu tepla pro manekýna s pěti zvolenými sestavami oděvů. Validace proběhla porovnáním simulačně a experimentálně určených hodnot součinitelů přestupu tepla. Na základě porovnání bylo možné prohlásit vytvořený simulační model za validovaný.

Klíčová slova

Přenos tepla, lidské tělo, CFD, simulace, tepelný manekýn, součinitel přestupu tepla, proudění vzduchu, tepelný komfort.

ABSTRACT

This master thesis is focused on CFD simulation of heat transfer from a thermal manikin in a calibration environment and its subsequent validation based on the experiments already performed in the master thesis of Ing. Fojtlín and Ing. Hrubanová. The main objective of the work is to find and test a suitable combination of physical models and set boundary conditions in the simulation model so that the actual heat transfer and airflow processes from the validation experiments are faithfully simulated. In the course of the work, 7 cases were simulated based on individual measurements made during the experiments. The calculated heat transfer coefficients of the thermal mannequin segments for each simulated case can be considered as the main results of the simulation. For the experiment of Ing. Fojtlín, these are the heat transfer coefficients by radiation and convection. For the experiment of Ing. Hrubanová, the total heat transfer coefficients for a manikin with five selected clothing assemblies were determined. Validation was performed by comparing the simulated and experimentally determined values of heat transfer coefficients. Based on the comparison, the developed simulation model could be declared validated.

Key words

Heat transfer, human body, CFD, simulation, thermal manikin, heat transfer coefficient, airflow, thermal comfort.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KURUC, Jan. *Přenos tepla z povrchu lidského těla - validace CFD modelu tepelného manekýna* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149476>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fišer.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Přenos tepla z povrchu lidského těla - validace CFD modelu tepelného manekýna** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Jan Kuruc

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Bc. Janu Fišerovi, Ph.D. za ochotu a trpělivost, se kterou přistupoval k vedení této diplomové práce a za poskytnutí odborných rad, které byly nezbytné pro její vypracování. Velký dík patří také konzultantovi práce Ing. Jakobovi Elcnerovi, Ph.D. za množství přínosných rad a poznatků z oblasti termofluidního modelování a za pomoc při tvorbě simulačního modelu. Poděkování za podporu během celého studia náleží i mé rodině.

OBSAH

ÚVOD	15
1 Vymezení cílů a limitů práce	16
2 Teoretický základ	17
2.1 Tepelný komfort	17
2.2 Přenos tepla z lidského těla.....	18
2.2.1 Tepelná bilance lidského těla	19
2.2.2 Metabolická produkce tepla	20
2.2.3 Termoregulace lidského těla	21
2.2.4 Přenos tepla vedením	22
2.2.5 Přenos tepla konvekcí.....	23
2.2.6 Přenos tepla radiací	24
2.3 Vliv tepelného odporu oděvu na přenos tepla z lidského těla	25
2.4 Metody měření a vyhodnocování tepelného komfortu	28
2.4.1 Model PMV-PPD	29
2.4.2 Model komfortních zón a ekvivalentní teplota	30
2.4.3 Vyhodnocování tepelného komfortu pomocí tepelných manekýnů.....	32
2.5 Využití simulačních metod pro vyhodnocování tepelného komfortu.....	33
3 Popis validačních experimentů.....	35
3.1 Popis experimentu diplomové práce Ing. Miloše Fojtlína.....	35
3.1.1 Popis měřicí aparatury.....	35
3.1.2 Postup měření, výpočet součinitelů přestupu tepla	37
3.2 Popis experimentu diplomové práce Ing. Kristýny Hrubanové.....	39
3.2.1 Systém iHVAC a jeho šatník	39
3.2.2 Navržená metodika a postup měření	41
3.2.3 Zpracování naměřených dat	42
4 Návrh řešení simulace	43
4.1 CFD simulační software a použité prostředky.....	43
4.2 Návrh variant simulace na základě experimentů	43
5 3D geometrie a výpočetní síť	45
5.1 Tvorba výpočetní sítě.....	46

5.1.1	Ošetření přístěnné mezní vrstvy, Wall y^+ analýza	48
5.1.2	Tvorba alternativní varianty sítě	52
5.2	Test nezávislosti sítě.....	54
6	Volba fyzikálních modelů.....	57
6.1	Nastavení přenosu tepla radiací.....	58
6.1.1	Test nezávislosti počtu radiačních Patchů	59
7	Simulace experimentu Ing. Fojtlína	61
7.1	Nastavení okrajových podmínek	61
7.1.1	Nastavení parametrů okrajových podmínek pro přenos tepla	63
7.2	Testování simulačních modelů	64
7.2.1	Test vlivu nastavení typu okrajové podmínky zadní stěny.....	64
7.2.2	Test vlivu nastavení Split Ratio	65
7.2.3	Příprava scén, monitorů a měřících bodů pro vyhodnocení výsledků.....	67
7.2.4	Výsledky testování a výběr finálního simulačního modelu.....	68
7.3	Výpočet součinitelů přestupu tepla a vyhodnocení výsledků	69
7.3.1	Výpočet nejistot měření	70
7.3.2	Vyhodnocení výsledků případu měření s nahým manekýnem	71
7.3.3	Vyhodnocení výsledků případu měření s minimalizovanou radiací.....	79
7.3.4	Stanovení součinitele přestupu tepla radiací.....	84
8	Simulace experimentu Ing. Hrubanové	87
8.1	Úpravy parametrů okrajových podmínek pro zadání tepelných odporů	87
8.1.1	Výpočet tepelného odporu	87
8.1.2	Stanovení emisivity povrchů oděvů.....	88
8.2	Výpočet součinitelů přestupu tepla a vyhodnocení výsledků	89
8.2.1	Příprava experimentálních dat pro srovnání a výpočet nejistoty měření....	89
8.2.2	Vyhodnocení výsledků případu měření letního oděvu – sukně.....	90
8.2.3	Vyhodnocení výsledků případu měření letního oděvu – kraťasy	96
8.2.4	Vyhodnocení výsledků případu měření přechodného oděvu.....	98
8.2.5	Vyhodnocení výsledků případu měření lehkého zimního oděvu	100
8.2.6	Vyhodnocení výsledků případu měření těžkého zimního oděvu.....	102
9	DISKUSE.....	104
9.1	Simulace případů experimentu Ing. Fojtlína	104

9.2	Simulace případů experimentu Ing. Hrubanové	106
9.3	Zjednodušení modelu oproti skutečnému experimentu	107
9.4	Limity práce a návrh navazujícího řešení	109
ZÁVĚR		110
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		112
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		115

ÚVOD

Potřeba regulace tělesné teploty doprovází lidské bytosti od samého počátku jejich existence. Spolu s dalšími fyziologickými potřebami lidí byla definována v roce 1943 jako základ pyramidy lidských potřeb amerického psychologa A. H. Maslowa. Možnost regulovat tělesnou teplotu mají lidé pomocí snížení nebo zvýšení tepelného toku ze svého těla. Toho lze docílit kromě procesů probíhajících v lidském těle v rámci vlastní aktivní termoregulace také např. změnou tepelného stavu prostředí nebo úpravou tepelného odporu oděvu. Přenos tepla z lidského těla hraje důležitou roli ve vnímání tepelného komfortu osob, který však z několika důvodů není jednoduché obecně definovat [1].

S narůstajícími požadavky na životní úroveň a s narůstajícím technologickým postupem byly postupně vyvíjeny sofistikovanější metody měření a vyhodnocování tepelného komfortu člověka. Mezi ně patří i modely lidského těla sloužící k simulaci termoregulačních procesů, které v lidském těle probíhají v reakci na tepelný stav prostředí. Tyto modely jsou nazývány tepelnými manekýny a patří mezi nejpřesnější metody měření a vyhodnocování tepelného komfortu (viz kapitola 2.4). Vzhledem k tomu, že taková měření mohou být často náročné na vybavení, čas a prostředky, využívají se pro simulaci termoregulačních procesů lidského těla a vyhodnocování tepelného komfortu také virtuální modely lidského těla. Významnou oblast ve virtuální simulaci fyzikálních dějů jako je přenos tepla představují CFD simulační metody, které jsou podrobněji popsány v kapitole 2.5 a 4.1.

Simulační modely umožňují např. určit vliv simulovaného vnitřního prostředí na organismus člověka pomocí vyhodnocení tepelného komfortu na základě simulace mechanismů přenosu tepla a proudění vzduchu, čímž napomáhají optimalizovat dané prostředí. Tyto modely mohou být využity i pro náhradu skutečných experimentů pro stanovení tepelného komfortu, kde může nastat problém s etikou nebo dokonce vystavením pokusných dobrovolníků nebezpečnému prostředí. Dalšího využití nalézají tyto simulace při návrhu výrobků a produktů, vývoje materiálů pro oděvy nebo také pro optimalizaci systému HVAC v budovách či dopravních prostředcích (viz. kapitola 2.5).

Úvodní kapitola této práce (kapitola 2) představuje teoretický základ pro oblasti, které jsou úzce spjaty s problematikou praktické části práce – CFD simulace přenosu tepla z tepelného manekýna. V dalších kapitolách je podrobně popsán postup tvorby simulačního modelu včetně argumentace uskutečněných kroků včetně popisu experimentů, které sloužily pro validaci vytvořeného modelu a výsledků simulace. Závěrem práce jsou uvedeny a okomentovány výsledky simulace.

1 Vymezení cílů a limitů práce

Cílem práce je vytvoření CFD modelu přenosu tepla z tepelného manekýna na základě experimentů, které byly provedeny pro kalibraci skutečného manekýna v rámci diplomových prací Ing. Fojtlína a Ing. Hrubanové. V rámci simulace budou potom vyhodnoceny součinitele přestupu tepla pro jednotlivé segmenty manekýna, které budou validovány pomocí experimentálně určených dat.

Cíle práce:

- Vytvoření nezávislé výpočetní sítě na základě poskytnuté 3D geometrie.
- Nalezení vhodné sestavy fyzikálních modelů, které umožní věrně simulovat procesy přenosu tepla z tepelného manekýna.
- Připravit optimální kombinaci typů okrajových podmínek a nastavených parametrů ovlivňujících přenos tepla a proudění vzduchu ve výpočetní doméně.
- Simulovat navržené případy a zajistit realistický průběh sledovaných veličin při zachování dostatečné míry konvergence residuí a ustálení výpočtu.
- Vyhodnotit výsledky simulace a validovat je pomocí experimentálních dat.
- Okomentovat případné neshody simulace a experimentu, navrhnout možná alternativní a navazující řešení vedoucí ke zkvalitnění simulace.

Limity práce:

- Simulační model je tvořen pouze pro ustálený stav (Steady state), tudíž simulace nezahrnuje závislost řešených veličin na čase (Unsteady state).
- Výpočetní doména se vztahuje pouze na prostor kalibračního boxu s umístěným manekýnem, děje probíhající v okolí boxu (prostor klimatické komory) nejsou simulací popsány.
- Geometrie použitá pro simulaci je zjednodušena vůči skutečnému stavu:
 - a) V geometrii boxu se nenachází závěsný systém pro manekýna a stativy pro měřicí sondy, které se při konání experimentu v boxu nacházely.
 - b) Stropní část boxu byla v průběhu experimentu opatřena otvorem pro zjednodušení odvodu vzduchu z boxu, což v geometrii není zohledněno.
 - c) Pro případy simulace s oblečeným manekýnem není zohledněn oděv geometricky, pouze úpravou tepelných parametrů dané části manekýna.
- Ve vlastnostech kontinua (vzduchu v prostoru boxu) není zohledněna vlhkost vzduchu.
- V rámci simulace je zanedbáno vedení tepla kondukcí, které má v simulovaných případech minimální vliv.

2 Teoretický základ

V této kapitole jsou postupně popsány oblasti týkající se tepelného komfortu, tepelné pohody a tepelného stavu prostředí, jsou zde uvedeny základní mechanismy přestupu tepla z lidského těla a vysvětleny elementární informace o výměně tepla mezi lidským tělem a okolním prostředím, které jsou nutné pro pochopení principu funkce tepelného manekýna. Další kapitoly jsou zaměřeny na metody měření a vyhodnocování tepelného komfortu, kde je největší pozornost věnována metodám, postupům a nástrojům využitých v diplomových pracích, z nichž vychází tato práce. Závěr kapitoly je věnován virtuálním simulačním metodám využívaným pro vyhodnocování tepelného komfortu a CFD simulacím, jejichž popis pokračuje v kapitole 5.1.

2.1 Tepelný komfort

Tepelný komfort je termín, který definovala asociace ASHRAE jako „stav mysli vyjadřující spokojenost s tepelným stavem prostředí a je výsledkem subjektivního hodnocení“ [5]. Subjektivita je zavedena do definice z důvodu velkého množství fyziologických a psychologických variací mezi lidmi, které ovlivňují výsledné hodnocení tepelného pocitu a tepelného komfortu jedincem. Uvedená spokojenost je obecně považována za takový stav, kdy subjekt nemá potřebu nijak tepelné prostředí měnit. Hlavní faktory ovlivňující výsledné vnímání tepelného stavu jsou tedy tři: fyzikální (zahrnující parametry prostředí a tepelné vlastnosti oděvu), fyziologické (metabolická produkce tepla, tělesné proporce, fyzická kondice, věk, pohlaví, ...) a také psychologické (nálada, zdravotní stav, ...) [16]. Právě proto nelze tepelný komfort objektivně hodnotit a pro jeho hodnocení se často využívá např. statistických dat shromážděných při experimentech, díky kterým lze následně definovat procentuální spokojenost subjektů s tepelným stavem prostředí [5]. Metody a postupy vyhodnocování tepelného komfortu jsou blíže popsány v kapitole 2.4.

Základní sledované parametry prostředí, které tedy přímo ovlivňují tepelný komfort osob v něm se nacházejících, jsou:

- teplota okolního vzduchu,
- střední radiační teplota okolních povrchů,
- povrchová teplota,
- rychlost proudění vzduchu,
- vlhkost vzduchu.

Pokud se jedná o vnitřní prostředí (budovy, dopravní prostředky, ...), můžeme tyto parametry měnit a upravovat tak, abychom nastavili co nejpříznivější podmínky k dosažení tepelné rovnováhy mezi lidským tělem a okolím a následně i k dosažení tepelného komfortu [16].

Za obecně uznávané parametry vnitřního prostředí vyhovující lidskému organismu jsou považovány tyto parametry:

- okolní čerstvý vzduch o teplotě 20 až 24 °C,
- střední radiální teplota cca rovna teplotě vzduchu,
- rychlost proudění cca do 0,5 m/s s přirozeným spektrem,
- relativní vlhkost v rozsahu 40 až 60 % [16].

Pokud uvažujeme subjekt nacházející se ve venkovním prostředí nebo v prostředí, jehož tepelné parametry nelze upravovat, je z fyzikálního hlediska možnost docílit tepelného komfortu upravením tepelného odporu oděvu. Tato oblast je blíže popsána v kapitole 2.3.

Je zřejmé, že z hlediska fyziologie člověka lze sledovat mezi lidmi velké odlišnosti. Tělesná stavba, fyzická kondice, pohlaví, věk, ale také schopnost organismu aklimatizovat se v určitém prostředí, to vše jsou parametry, které se napříč spektrem lidské populace mohou výrazně lišit. Všechny tyto fyziologické aspekty hrají roli v metabolické tvorbě tepla v lidském těle, čímž ovlivňují vnímání tepelného komfortu jedince. Nepopíratelný vliv na vnímání tepelného komfortu má kromě fyziologických predispozic také psychický stav člověka. Do vnímání tepelného komfortu z psychické stránky může vstupovat nálada a duševní rozpoložení člověka, stejně jako jeho zdraví, spokojenost s estetickou stránkou prostředí, ve kterém se nachází, možnost ovládat tepelné parametry prostředí, předchozí zkušenosti a předpoklady týkající se tepelného stavu prostředí a další vjemy. Všechny tyto vlivy jsou podloženy řadou experimentů, které většinou opět zakládají na statistických datech s procentuálním vyhodnocením spokojenosti subjektů s tepelným komfortem [8], [16].

2.2 Přenos tepla z lidského těla

Kromě výše uvedených definic tepelného komfortu existuje další definice, která na tuto problematiku pohlíží z pohledu rovnováhy tepelných toků. Popisuje tepelný komfort jako „stav, kdy okolní prostředí odebírá člověku jeho tepelnou produkci bez mokrého pocení nebo pocitu chladu a tento stav je dotýcným považován za příjemný“ [16]. Z této definice vyplývá, že pro dosažení tepelného komfortu musí platit určitá rovnováha mezi teplem vznikajícím v lidském těle a mezi teplem z něj odváděným. Tato rovnováha je ustanovena v rovnici popisující tepelnou bilanci lidského těla, na kterou je zaměřena podkapitola 2.2.1.

Jednotlivé složky vstupující do rovnice představují faktory přímo ovlivňující tepelný komfort člověka. Ty, které popisují přímý přenos tepla z lidského těla do okolního prostředí, jsou z hlediska zaměření této práce velice podstatné, proto jsou jim věnovány samostatné podkapitoly. Všechny tyto mechanismy přenosu tepla využívají společný zdroj, tedy metabolismus člověka a jeho produkt – metabolické teplo. Proto jsou v některých z následujících kapitol jednoduše přiblíženy procesy vzniku tepla v lidském a jsou také zmíněny termodynamické děje, které v těle probíhají v rámci termoregulace. Děje umožňující přenos tepla z lidského těla se souhrnně považují za součást pasivního systému výměny tepla mezi lidským tělem a okolím. Kromě pasivního systému je součástí lidského těla také aktivní

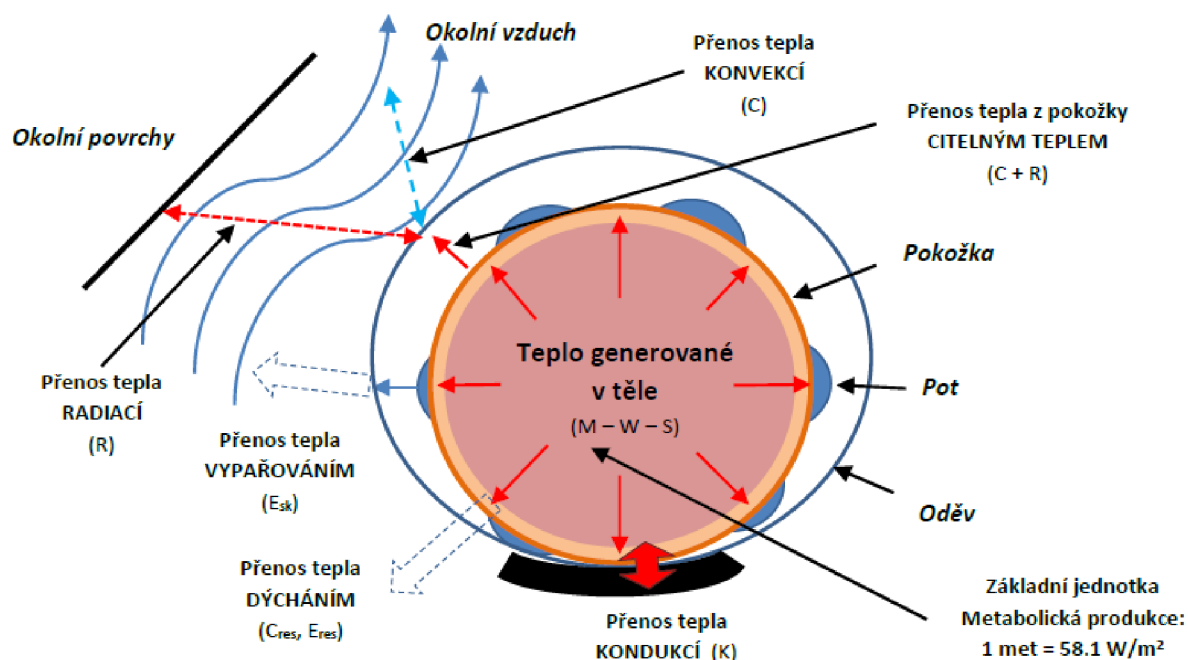
system, jenž umožňuje lidskému tělu spouštět termoregulační mechanismy, které pomáhají k zachování teploty vhodné pro správnou funkci organismu [7].

2.2.1 Tepelná bilance lidského těla

Jak bylo již uvedeno v úvodu kapitoly, základní podmínkou k dosažení tepelného komfortu je stav, kdy z lidského těla odchází přibližně stejné množství tepla jako množství tepla vytvořeného metabolickými procesy v lidském těle. Tuto rovnováhu lze popsat vztahem pro tepelnou bilanci lidského těla, tedy rovnicí (2.1).

$$M - W = (S_{sk} + S_{cr}) + (C + K + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) \quad (2.1)$$

V této rovnici M představuje tělesnou metabolickou produkci tepla a W je vykonaná mechanická práce. Na levé straně se nacházejí jednotlivé mechanismy přenosu tepla, kterými metabolické teplo z lidského těla odchází. Výjimkou jsou členy S_{sk} a S_{cr} , které zohledňují akumulaci tepla v pokožce a v těle. C je potom přenos tepla prouděním neboli konvekcí, K přenos tepla vedením (kondukcí), R přenos tepla zářením (radiací) a E_{sk} představuje teplo, které je tělu odebráno při odpařování vody (potu). Poslední dva členy popisují tepelnou ztrátu dýcháním, C_{res} je konvekční složka přenosu tepla z dechu a E_{res} teplo spotřebované k odpařování vody při dýchání. Všechny tyto členy vyjadřují měrný tepelný tok (nebo také hustotu tepelného toku), tedy tepelný tok z povrchu lidského těla, který je vztažen na plochu [W/m^2]. Grafickou interpretaci všech uvedených mechanismů vstupující do tepelné bilance lidského těla lze vidět na obrázku níže [6].



Obr. 1. Grafická interpretace mechanismů přenosu tepla mezi lidským tělem a okolním prostředím [6].

2.2.2 Metabolická produkce tepla

Látková přeměna neboli metabolismus představuje základní proces probíhající v lidském těle a jeho funkce je nezbytná pro přežití. Látkovou přeměnou jsou z pohledu člověka myšleny procesy přeměny přijatých látek na energii a další jiné látky jako bílkoviny, sacharidy a cukry, které dále organismus zpracovává a využívá. Při těchto přeměnách přirozeně vzniká množství tepla, které je označováno jako metabolické teplo [10].

Část vyprodukovaného metabolického tepla je přenášena do okolí člověka v závislosti na parametrech okolního prostředí a v závislosti na tom, kolik energie je spotřebováno na mechanickou práci prováděnou jedincem (viz rovnice 2.1). Energie spotřebované na mechanickou práci však většinou tvoří pouze malou část této energie (cca do 10 %). Velká část tepla vzniká také ve svalech, kde je energie uvolňována právě z důvodu výkonu mechanické práce. Tepelná produkce ve svalech představuje cca 70 % z celkové produkce tepla člověka a zbylých cca 30 % pochází z energie uvolňované ve vnitřních orgánech. Celkové množství tepelné energie produkované člověkem je však závislé na intenzitě prováděné fyzické činnosti a na jeho hmotnosti. Pro popis tepelného toku z lidského těla se používá tzv. hustota metabolického toku \dot{q}_m (v tepelné bilanci lidského těla označena jako M), což je hodnota metabolického tepelného toku vztažená na 1 m² povrchu lidského těla. Tato veličina je navržena tak, aby došlo k eliminaci vlivu fyzické konstituce člověka, která přímo ovlivňuje povrch jeho těla, hmotnost a výšku [4], [11].

Tab. 1. Tabulka hustoty metabolického tepelného toku při různých činnostech [11].

Činnost	Hustota metabolického tepelného toku \dot{q}_m		Mechanická účinnost η
	[W.m ⁻²]	[met]	
Klidné ležení	46	0,8	0
Sezení, uvolněné	58	1,0	0
Práce vsedě (úřady, školy, laboratoře)	70	1,2	0
Stání, lehká práce (nakupování, laboratoře, lehký průmysl)	93	1,6	0 až 0,1
Stání, střední práce (prodavač, práce v domácnosti, práce na strojích)	116	2,0	0,1 až 0,2
Chůze po rovině 2 km.h ⁻¹	110	1,9	0,1 až 0,2
Chůze po rovině 3 km.h ⁻¹	140	2,4	0,1 až 0,2
Chůze po rovině 4 km.h ⁻¹	165	2,8	0,1 až 0,2
Chůze po rovině 5 km.h ⁻¹	200	3,4	0,1 až 0,2
Těžká fyzická práce (těžký průmysl, stavebnictví) přenášení břemen 50 kg	235	4,0	0,1 až 0,25

Jak bylo určeno, průměrný dospělý Evropan o ploše těla 1,8 m² produkuje v klidu cca 58,1 W/m² tepla. Tato hodnota zůstala v povědomí jako 1 met (metabolismus). V rámci techniky prostředí je nutné sledovat, jak člověk ovlivňuje prostředí svým působením, aby bylo možné prostředí upravovat do stavu člověku příjemného. Proto i metabolický tepelný tok

člověka hraje významnou roli a byly experimentálně zjištěny hodnoty metabolického tepelného toku při různých činnostech, jak lze vidět výše v tabulce 1. [4], [11].

2.2.3 Termoregulace lidského těla

Lidské tělo tedy kromě pasivního systému disponuje také aktivním systémem výměny tepla, jehož základním řídicím prvkem je nervová soustava. Ta zajišťuje pomocí periferních a vnitřních termoreceptorů přenos vjemů do hypotalamu, který je vyhodnocuje a na jejich základě dle potřeb aktivuje termoregulační mechanismy ke snižování nebo zvyšování tělesné teploty. V případě, že lidské tělo pomocí termoreceptorů zaznamená vjem indikující potřebu zvýšení či snížení teploty, projeví se to nejprve provedením některým z úkonů patřících mezi termoregulační chování (přidání/odebrání vrstvy oblečení, zahalení méně prokrvených částí těla, schoulení se, přesun do přívětivějšího prostředí, účelový pohyb atd.). Teprve až v případě, že termoregulační chování nelze využít nebo je pro udržení požadovaného teplotního rozmezí (cca 35,8 – 37,4 °C) nedostatečně účinné, spouští hypotalamus další termoregulační procesy [6], [7].

Termoregulační procesy, které může hypotalamus aktivovat, se obecně dělí dle účelu na ty, pomocí kterých se tělesná teplota snižuje a zvyšuje. Významný vliv na snižování tělesné teploty má jev zvaný vasodilatace cév a pocení. Vasodilatace cév představuje děj, kdy tělo v reakci na zvýšenou teplotu organismu rozšíří příčný průřez cév, čímž se zvýší průtok krve do periferních částí těla. Spolu se zvýšením prokrvení okrajových částí se zvýší také povrchová teplota a spolu s ním tedy i tepelný tok z povrchu člověka do okolí. Tento jev však funguje jen v případě, že povrchová teplota člověka zůstává vyšší, než teplota okolí [7].

V momentě, kdy je teplota okolí vyšší než povrchová teplota člověka, tudíž není možné snižovat tělesnou teplotu vasodilatací cév, přichází na řadu pocení. Tento efektivní způsob ochlazování představuje stav, kdy se pot (voda s obsahem iontů, kyseliny mléčné a močoviny) začne vylučovat na pokožce pomocí potních žláz. Vyloučený pot je z pokožky odpařován, čímž dochází k odebrání tepla z povrchu člověka [7].

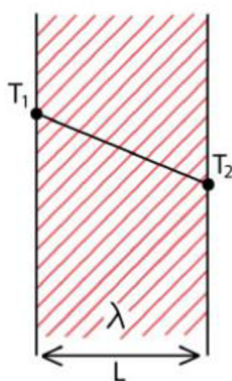
Opačným jevem vasodilatace cév je vasokonstrikce cév, která patří k mechanismům zajišťujícím zvyšování tělesné teploty. V návaznosti na znalost vasodilatace cév lze vasokonstrikci cév popsat jako proces, při kterém tělo zužuje příčný průřez cév, čímž se sníží přenos tepla krví do povrchu periferních částí těla a s tím spojené tepelné ztráty člověka do okolí. Organismus zachovává životně důležité orgány na požadované teplotě a omezuje tepelný tok do životně méně důležitých okrajových částí. To může v extrémních případech vést až ke vzniku omrzlin na periferních částech [7].

V případě, že je přenos tepla z lidského těla do okolí mírně vyšší, než je jeho produkce, nastává v těle proces nazývaný jako chemická termogeneze. Jedná se o zrychlování metabolických přeměn o maximálně 30 – 40 % oproti tepelně neutrálním podmínkám. Tento zvýšený metabolický chod využívá k přeměnám energie převážně tzv. hnědý tuk, který může v těle vznikat vlivem pravidelné expozice těla intenzivním chladným vjemům či častým pobytem v chladném prostředí [6].

V případě, že chemická termogeneze produkuje nedostatečné množství tepla k zachování požadované tělesné teploty, může začít probíhat mechanismus známý jako svalový třes. Ten je projevován zvýšením svalového napětí a může přejít až ve svalové kontrakce. Tímto způsobem tělo generuje teplo potřebné ke zvýšení své teploty. Svalový třes je spouštěn v závislosti na povrchové teplotě pokožky a tělesné teplotě, které jsou vzájemně propojeny. Přesné teploty vedoucí ke spuštění mechanismu nelze jednoznačně určit, protože je známo, že jsou silně ovlivněny aklimatizací subjektu a jeho tělesnými dispozicemi [6].

2.2.4 Přenos tepla vedením

Vedení tepla neboli konduktce patří mezi fenomény přenosu tepla, které jsou spjaty s pohybem částic materiálu, ve kterém se přenos provádí. Na tento mechanismus přenosu tepla, který je dominantní v pevných látkách, může být pohlíženo jako na děj, při kterém se energie v podobě tepla přenáší z míst s vyšší energetickou koncentrací do míst s koncentrací energie nižší. Uvedená tepelná energie je přenášena pomocí elementárních částic materiálu, které kmitají kolem svojí rovnovážné polohy a vzájemnými srážkami si tak předávají část této pohybové energie. Vzhledem k tomu, že částice v místech o vyšší teplotě disponují větším množstvím zmíněné energie, směřuje tepelný tok vždy z teplejších míst do chladnějších. Lze tedy říct, že v případě konduktce je směr tepelného toku orientovaný proti směru tepelného gradientu [7], [9].



Obr. 2. Schéma mechanismu konduktce rovinnou stěnou [4].

Popis přenosu tepla vedením (reprezentovaný měrným tepelným tokem \dot{q}) popisuje pro jednorozměrný případ Fourierův zákon, konkrétně rovnice (2.2). V něm můžeme vidět, že součinitel tepelné vodivosti λ figuruje v rovnici se záporným znaménkem, které zohledňuje zmíněný směr tepelného toku proti směru teplotního gradientu, který je popsán členem $\frac{dT}{dx}$.

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [W/m^2] \quad (2.2)$$

Z pohledu přenosu tepla z lidského těla nastává konduktce v případech, ve kterých se člověk dotýká určitou částí těla okolních předmětů (podlaha, židle, stěny, apod.). Vzhledem k velice nízké tepelné vodivosti vzduchu ho lze považovat za tepelný izolant, tudíž přenos tepla

vedením vzduchem z lidského těla můžeme zanedbat. Přenos tepla vedením z lidského těla do okolí je podstatný v případech, kdy je člověk oblečen, a je tedy nutné brát v potaz tepelný odpor oděvu, který je podrobněji okomentován v kapitole 2.3 [4], [7].

2.2.5 Přenos tepla konvekcí

Přenos tepla konvekcí (prouděním) je stejně jako kondukce spjat s pohybem částic tekutiny účastníci se tepelné výměny spolu s povrchem tělesa, které tekutina obtéká a proudí kolem něj. Konvekce se z fyzikálního hlediska skládá z dvou mechanismů. Energie je podobně jako u kondukce přenášena pomocí náhodného pohybu molekul, tentokrát však v tekutině. Ta může kolem povrchu tělesa proudit, a to buď přirozeně vlivem rozdílu hustot (způsobené teplotním rozdílem) nebo nuceně – působením určité vnější síly (např. pomocí ventilátoru). Proudění potom napomáhá přenosu tepla mezi tekutinou a obtékaným tělesem. Tento způsob přenosu tepla samozřejmě probíhá pouze za stavu, kdy existuje rozdíl mezi teplotami tělesa a tekutiny a je obecně popsán Newtonovým ochlazovacím zákonem (2.3) [4], [9].

$$\dot{q} = h (T_s - T_a) \quad (2.3)$$

kde:

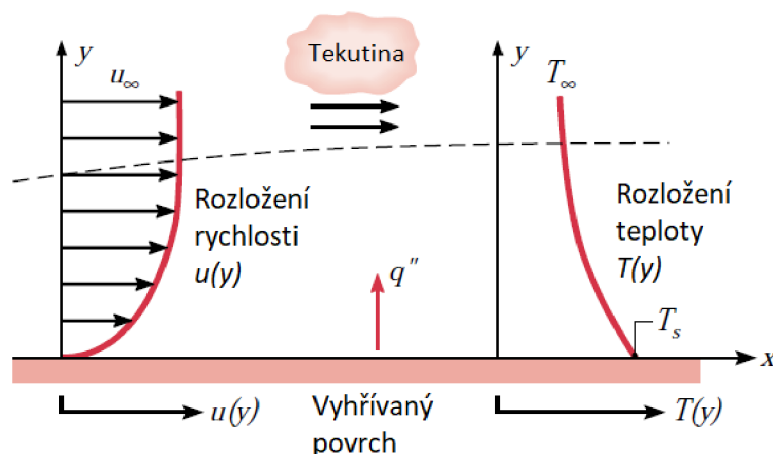
\dot{q}	je měrný tepelný tok	[W/m ²],
h	je součinitel přestupu tepla	[W/m ² K],
T_s	je teplota povrchu obtékaného tělesa	[°C],
T_a	je teplota okolního vzduchu	[°C].

Z Newtonova ochlazovacího zákona jsou zřejmé veličiny ovlivňující přenos tepla konvekcí. Zatímco teploty povrchu tělesa a okolního vzduchu jsou ve většině případů poměrně snadno měřitelné či zjištělné, součinitel přestupu tepla představuje složitě zjištělnou veličinu, která je ovlivněna řadou dalších významných parametrů. Mezi tyto parametry patří charakter proudění (laminární, turbulentní), vlastnosti tekutiny (viskozita, smáčivost, ...), geometrie obtékaného tělesa a další. Součinitel přestupu tepla je předmětem mnoha studií a experimentů. Často bývá určován empiricky v závislosti na dané problematice nebo je jeho hodnota ověřována pomocí CFD simulací (tak jako v této práci). Významným nástrojem pro určování součinitele přestupu tepla jsou také pravděpodobnostní čísla, konkrétně Nuseltovo, Prandtlovo, Reynoldsovo a Grashofovo [7], [9].

Podstatným jevem ovlivňující přenos tepla konvekcí je vznik tzv. přístěnné mezní vrstvy. Jedná se o oblast na rozhraní tekutiny a povrchu obtékaného tělesa, ve které dochází z hlediska proudění k postupnému poklesu rychlosti od rychlosti vnější části proudu neovlivněného povrchem (u_a nebo u_∞) až k nulové rychlosti ve vzdálenosti $y = 0$ (pokud uvažujeme směr osy y kolmý na rovinu povrchu tělesa s počátkem přesně na povrchu). Podobně jako vzniká tato rychlostní přístěnná mezní vrstva, existuje také tepelná mezní vrstva, která může být z hlediska vzdálenosti od stěny větší, menší nebo stejně široká.

Lze uvažovat, že v prostoru vnějšího proudu neovlivněného stěnou je již zmíněná teplota T_a (či T_∞) figurující v Newtonově ochlazovacím zákoně, zatímco přibližováním se opět proti směru

osy y až do vzdálenosti $y = 0$ lze sledovat postupnou změnu teploty až na teplotu povrchu T_s . Mezní vrstvy jsou vyobrazeny na příkladu vyhřívání povrchu obtékaného chladnějším médiem, který lze vidět na obrázku 3. [9].



Obr. 3. Rychlostní a tepelná mezní vrstva (převzato a upraveno z[9]).

Z pohledu určování součinitele přestupu tepla potom lze říct, že jeho hodnota v přístěnné mezní vrstvě klesá především z důvodu snížení rychlosti proudění a změnou teplotního gradientu mezi povrchem a tekutinou. Mezní vrstva tak vytváří jakýsi konvektivní tepelný odpor R_α (který lze v Newtonově ochlazovacím zákoně vyjádřit převedením převrácené hodnoty α do jmenovatele), který způsobí pokles přenášeného tepelného toku mezi povrchem a tekutinou [4].

2.2.6 Přenos tepla radiací

Třetím ze základních mechanismů přenosu tepla je záření neboli radiace. Jedná se o způsob přenosu tepla, který nevyužívá hmotné přenosové médium tak jako konvekce a kondukce, naopak radiace probíhá nejefektivněji v prostředí bez hmotných medií, tedy ve vakuu. Všechna tělesa o konečné povrchové teplotě vyšší než 0 K emitují množství energie nazývané tepelné záření. Toto záření se mezi povrchy přenáší elektromagnetickým vlněním. U látek účastnících se tepelného přenosu radiací lze kromě emisivity ε , schopnosti vyzařovat tepelné záření, určit také transmisivitu μ (schopnost propouštět záření), reflexivitu r (schopnost odrážet záření) a absorptivitu a (schopnost pohlcovat záření). Dle prvního Kirchhoffova zákona platí, že $a + r + \mu = 1$. Schopnost emitovat, pohlcovat a odrážet radiační tepelné záření má i lidské tělo a víme, že spolu s konvekcí je radiace dominantním mechanismem přenosu tepla mezi člověkem a okolím [7], [9].

Tepelný tok vyzářený radiací z povrchu tělesa je vyjádřen ve Stefan-Boltzmannově zákoně (2.4), který je odvozen pro absolutně černé těleso.

$$\dot{q} = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

kde:

\dot{q}	je měrný radiační tepelný tok	[W/m ²],
σ	je Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,669 \cdot 10^{-8}$)	[W/m ² K ⁴],
T	je teplota povrchu černého tělesa	[K].

Aby tento vztah bylo možné použít na běžně se vyskytující objekty (ne pouze absolutně černá tělesa), které jsou z hlediska radiace klasifikovány jako tzv. šedá tělesa, je nutné použít širší variantu Stefan-Boltzmannova zákona, která zohledňuje emisivitu tělesa, plochu tělesa a také tzv. úhlové faktory. Úhlové faktory F vstupují do vztahu v případě, kdy probíhá tepelná výměna zářením mezi dvěma tělesy (povrchy) a geometricky popisují vzájemnou polohu těchto dvou povrchů v prostoru. Stefan-Boltzmannův zákon vyjadřující tepelný tok vyzářený tělesem (označeného jako 1) do okolí (2) je uveden ve vztahu (2.5) níže [4] [7].

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 2} \varepsilon_1 \sigma A_1 T_1^4 \quad (2.5)$$

kde:

$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$	je radiační tepelný tok z tělesa 1 do tělesa 2 (okolí)	[W],
$F_{1 \rightarrow 2}$	je úhlový faktor tělesa 1 vzhledem k tělesu 2 (okolí)	[-],
ε_1	je emisivita tělesa 1	[-],
σ	je Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,669 \cdot 10^{-8}$)	[W/m ² K ⁴],
A_1	je plocha tělesa 1	[m ²],
T_1	je povrchová teplota tělesa 1	[K].

Pro určení tepelného toku z okolí (nebo obecně tělesa 2) do tělesa 1 lze použít stejná rovnice, ve které však figurují veličiny vztažené k tělesu 2, tedy emisivita, plocha, teplota povrchu tělesa 2 a úhlový faktor $F_{2 \rightarrow 1}$ [7].

2.3 Vliv tepelného odporu oděvu na přenos tepla z lidského těla

V předchozích kapitolách shrnujících mechanismy výměny tepla mezi lidským tělem a okolím bylo zmíněno, jak velký vliv má na tuto výměnu radiace a konvekce. V některých případech je pro výměnu podstatný také přenos tepla vedením, a to například tehdy, kdy je člověk v přímém kontaktu s jiným povrchem o rozdílné teplotě, než je povrchová teplota dané části těla člověka. Přenos tepla vedením však hraje mnohem větší roli ve složeném přestupu tepla mezi člověkem a okolím v momentě, kdy je člověk oblečen do oděvu.

Pro popsání tepelného odporu oděvu je nejprve nutné uvést vztah pro přenos tepla kondukcí rovinnou stěnou, čehož dosáhneme úpravou rovnice (2.6). Člen reprezentující teplotní gradient je nahrazen konkrétním teplotním rozdílem mezi jednotlivými stranami stěny a vzdáleností mezi stranami stěny (tloušťkou stěny).

$$\dot{q} = \lambda \frac{\Delta T}{\delta} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} \quad (2.6)$$

kde:

\dot{q}	je měrný tepelný tok	[W/m ²],
λ	je součinitel tepelné vodivosti	[W/mK],
δ	je tloušťka stěny	[m],
T_1	je teplota povrchu první strany stěny	[°C],
T_2	je teplota povrchu druhé strany stěny	[°C].

Výsledný tepelný odpor materiálu stěny proti šíření tepla vedením R_λ [m²K/W] lze následně vyjádřit převedením součinitele tepelné vodivosti do jmenovatele a jeho sloučením s tloušťkou stěny, jak lze vidět v rovnici (2.7) [4].

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{\frac{\delta}{\lambda}} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{R_\lambda} \quad (2.7)$$

Vzhledem k tomu, že první část praktické části této práce je zaměřena na numerickou simulaci experimentu Ing. Fojtlína, kde se vyskytuje i měření tepelného toku z nahého manekýna, je nutné konkretizovat, jakým způsobem se teplo přenáší z neoblečeného člověka. V takovém případě se teplo přenáší do okolí radiací a konvekcí, jak popisuje rovnice (2.8).

$$\dot{q}_n = \frac{T_p - T_a}{R_k} \quad (2.8)$$

kde:

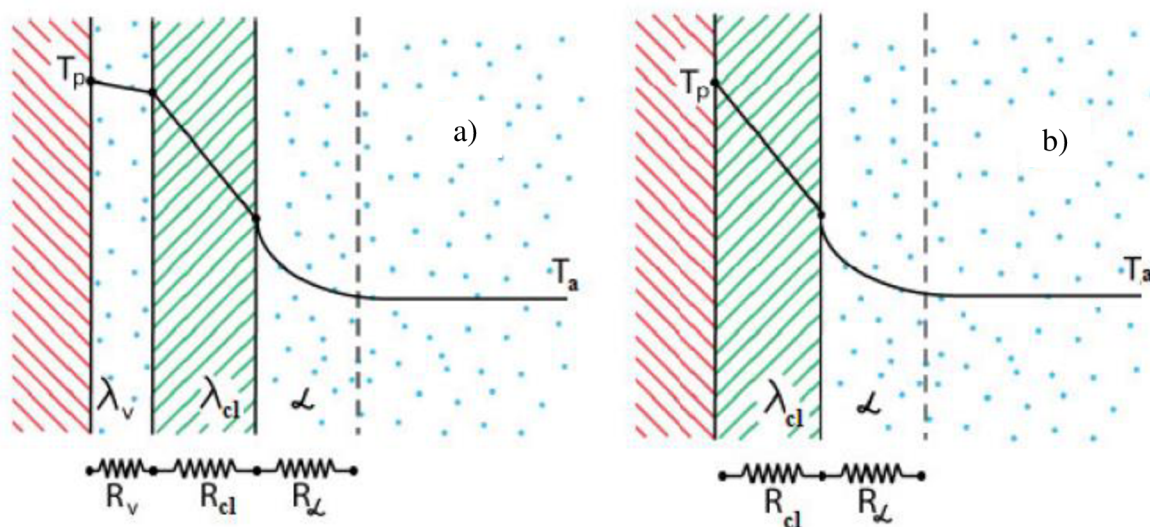
\dot{q}_n	je měrný tepelný tok z neoblečeného člověka	[W/m ²],
R_k	je kombinovaný konvekční a radiační tepelný odpor	[m ² K/W],
T_p	je teplota pokožky člověka	[°C],
T_a	je okolní střední radiační teplota	[°C].

Oděv lze potom zjednodušeně uvažovat jako zmíněnou rovinnou stěnu, která disponuje tepelným odporem R_{cl} [m²K/W]. Ve skutečnosti se však teplo přenášené většinou z člověka do okolí dostává z pokožky do oděvu přes vzduchovou vrstvu, která z hlediska přenosu tepla představuje dodatečný konvekční tepelný odpor R_v [m²K/W], protože v ní se teplo přenáší konvekcí. Na vnějším povrchu oděvu teplo odchází směrem do okolí opět konvekcí a také radiací, takový měrný tepelný tok \dot{q}_o [W/m²] lze popsat rovnicí (2.9).

$$\dot{q}_o = \frac{T_p - T_a}{R_k + R_{cl} + R_v} \quad (2.9)$$

Vzhledem k tomu, že vzduchovou vrstvu pod oděvem nelze přesně specifikovat či měřit, a zároveň víme, že je součástí každého oděvu, není uvažován její odpor zvlášť, ale zahrnuje se do tepelného odporu oděvu. Potom lze tepelný tok z oblečeného člověka vyjádřit rovnicí (2.10) [4].

$$\dot{q}_o = \frac{T_p - T_a}{R_k + R_{cl}} \quad (2.10)$$



Obr. 4. Schéma prostupu tepla oblečením a) se zahrnutím vzduchové vrstvy, b) se vzduchovou vrstvou uvažovanou jako součást oděvu [4].

Jak je znázorněno na obrázku 4., jednotlivé vrstvy představující tepelný odpor na sebe sériově navazují a lze využít analogii se skládáním odporů v Ohmově zákonu pro určení celkového tepelného odporu více vrstev materiálu, které disponují rozdílnými hodnotami tepelného odporu. Považujeme-li vrstvy materiálu za složenou stěnu, platí rovnice (2.11).

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_\lambda} \quad (2.11)$$

Potom lze pro náš případ sečíst tepelný odpor oděvu R_{cl} (zahrnující již odpor vzduchové vrstvy) a kombinovaný radiační a konvekční tepelný odpor R_k . Dostaneme tak celkový tepelný odpor $R_T = R_{cl} + R_k$ [4].

Tepelný odpor je v rámci oděvů běžně zjišťovanou veličinou. Pro oděvy byla stanovena bezrozměrná veličina I_{cl} (nazývaná *clo*), která je definovaná jako $I_{cl} = R/0,155$. Tato hodnota se tedy rovná tepelnému odporu $R = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ a byla odvozena pro běžný mužský oblek ze začátku 20. století (kalhoty, košile s dlouhým rukávem, vesta a sako) [4].

2.4 Metody měření a vyhodnocování tepelného komfortu

Jako bylo několikrát zmiňováno v předchozích kapitolách, pocit tepelného komfortu vychází z velké části ze subjektivního vnímání tepelného stavu prostředí. Proto není jednoduché stanovit objektivní způsoby jeho měření a vyhodnocování. Se změnami ve výrobním sektoru a globální industrializaci výroby na začátku 20. století začaly vyvstávat požadavky na bezpečnost a kvalitu pracovního prostředí. Již v této době začali lidé vnímat důležitost tepelného komfortu právě v rámci zachování kvality pracovního prostředí. Prostředky k určování tepelného komfortu byly v závislosti na technologickém pokroku však značně omezené a tak byly ke stanovení tepelného komfortu využívány pouze hodnoty získané měření teploty, vlhkosti vzduchu, později zohledněné typem oděvu apod.. S postupem výzkumu a s přibývajícím pozorností věnovanou tepelnému komfortu byly vyvíjeny sofistikovanější metody jeho vyhodnocování [6], [7].

V současné době již víme, že hlavním cílem hodnocení tepelného stavu prostředí je kvantifikace parametrů jednotlivých fenoménů ovlivňujících tepelnou výměnu mezi lidským tělem a okolím (jak bylo popsáno v kapitole 2.2). Tato kvantifikace je uskutečňována pomocí měřících sond, čidel, senzorů či tepelných manekýnů, které napomáhají přesně přímo určit intenzitu mechanismů přenosu tepla. Pro následné vyhodnocení tepelného komfortu je však nutné využití modelů, které popisují lidskou termofyziologii nebo mohou být využity i modely konkrétních případů. Současné využívané metody měření a vyhodnocování tepelného komfortu lze rozřadit dle přístupu do těchto skupin [6].

Hodnocení na základě měření parametrů tepelného stavu prostředí – tento přístup zahrnuje metody využívající pasivních sond, čidel a senzorů ke stanovení hodnot parametrů definujících tepelný stav okolního prostředí, které jsou podstatné pro přenos tepla mezi lidským tělem a okolím. Intenzita přenosu tepla je následně určena pomocí přepočtových vztahů a regresních modelů. Významným zástupcem z této skupiny přístupu je Fangerův PMV-PPD model [6].

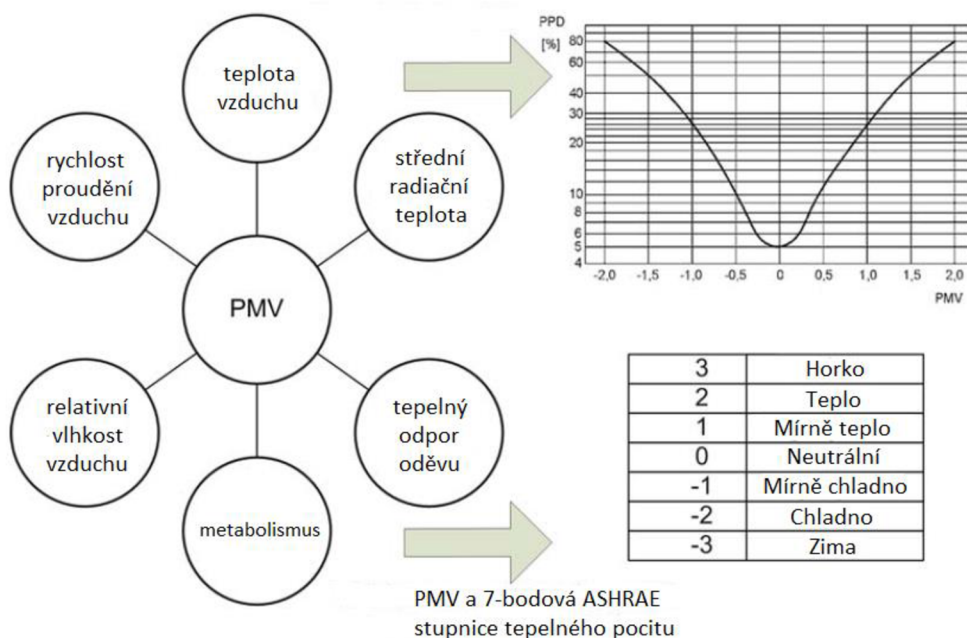
Hodnocení na základě měření sondami a aktivními senzory – aktivní senzory na rozdíl od pasivních simulují také tepelný tok z lidského těla tím, že jsou vyhřívány (např. pomocí elektrické energie). Pomocí regresních modelů je potom možné vyhodnotit předpokládaný tepelný komfort průměrného člověka, pro kterého je model vypracován. Při měření lze využít možnosti volby pozice měřících zařízení tak, aby jejich rozložení a orientace v prostoru odpovídala pozici skutečného člověka, čímž mohou být přesněji zohledněny vlivy jednotlivých mechanismů přenosu tepla z lidského těla [6].

Hodnocení na základě měření s tepelnými manekýny – tento přístup využívá tzv. tepelných manekýnů, figurín, které jsou vytvořeny dle anatomie lidského těla a slouží k simulaci tepelné produkce lidského těla. Jedná se tedy svým způsobem o přesnější variantu sestavy aktivních senzorů, která však zohledňuje důležitý faktor, jenž je právě geometrie a tvar lidského těla. Na základě tepelných toků z jednotlivých částí manekýna reprezentující části lidského těla lze podrobněji vyhodnotit opět i s pomocí matematických modelů lidské termofyziologie výsledný tepelný komfort [6].

Hodnocení na základě dotazování pokusných osob – představuje postup, který využívá přímou interakci dobrovolníků s prostředím. Tyto dotazované osoby v rámci experimentu subjektivně vyhodnocují tepelný pocit a tepelný komfort pomocí vyplňováním speciálních dotazníků. Vzhledem k zavedení co nejvyšší míry objektivity je důležité provádět experiment se skupinou lidí. Tato měření jsou většinou časově a organizačně náročná, ale jejich provádění hraje významnou roli především ve validaci ostatních přístupů [6].

2.4.1 Model PMV-PPD

Metoda PMV-PPD představuje jeden z nejvýznamnějších modelů pro vyhodnocování tepelného komfortu. V roce 1970 ho vytvořil dánský profesor Ole Fanger, který jej založil na řadě experimentů zaměřených na analýzu přenosu tepla z lidského těla ve vnitřním prostředí. Fangerovým cílem bylo vytvořit metodu vyhodnocování tepelného komfortu pro inženýry v oborech chlazení a vytápění, která by umožnila odhadovat nejvyšší možnou procentuální spokojenost dané skupiny lidí pro různé kombinace tepelných parametrů prostředí, vykonávaných činností a oděvů. V roce 1984 byl zařazen do normy ČSN ISO 7730. Experimenty, které byly použity jako podklad pro vznik tohoto modelu, byly provedeny formou měření s velkým počtem dotazovaných osob (přes 1000). V rámci těchto měření byly osoby vystavovány mírnému vnitřnímu prostředí. Osoby poté na sedmibodové stupnici definovanou asociací ASHRAE hodnotily svůj tepelný pocit v daném prostředí. Stupnice lze vidět na obr. 5 [6], [7], [12].



Obr. 5. Vstupní parametry PMV, závislost PMV a PPD a ASHRAE stupnice tepelného pocitu (převzato a upraveno z [12]).

Index PMV (Predicted Mean Vote = *předpokládané střední hodnocení*) je definován tak, že předpokládá a predikuje průměrný hodnocení tepelného pocitu danou početnou skupinou dotazovaných osob pro určitou kombinaci tepelných parametrů prostředí, aktivity a oblečení.

Jednotlivé vlivy, které index PMV zahrnuje, jsou uvedeny na obrázku 5.. Tyto parametry Fanger svázal s měrným tepelným tokem a metabolickou produkcí lidského těla sníženou o mechanickou práci pomocí funkční závislosti. Vztahy mezi uvedenými parametry jsou popsány řadou rovnic [6] [12].

Předpokládané procento nespokojených, neboli Predicted Percentage of Dissatisfied vyjadřuje index PPD, který je funkční závislostí PMV. Index PPD vyjadřuje spokojenost lidí s tepelným pocitem, tedy s hodnotou indexu PMV. Hodnota indexu PMV = 0 představuje ideální stav parametrů ovlivňujících tento index. Hodnotě PMV = 0 odpovídá PPD s 5 % nespokojených. Obecně jsou podmínky klimatu považovány za akceptovatelné, když se hodnota indexu PMV vyskytuje v rozmezí -0,5 do 0,5, což představuje z hlediska PPD maximálně 10 % nespokojených. Původní varianta modelu má řadu nedostatků, jako například rozdílné vnímání chladu a tepla lidským tělem, nezohlednění nehomogenního prostředí (obtěžování průvanem nebo vertikální rozložení teplot). Některé z nedostatků byly v průběhu dalších let zohledňovány pomocí korekcí, přidání dalších indexů atd. [7].

2.4.2 Model komfortních zón a ekvivalentní teplota

Model vyhodnocování tepelného komfortu, který vytvořil doktor Nilsson pro prostředí kabin dopravních prostředků v rámci svojí disertační práce v roce 2004, rozvinul práci Wyona a kolektivu z roku 1989. Základem pro Nilssonem vytvořené tzv. diagramy komfortních zón je totiž princip ekvivalentní teploty, který je výsledkem mnoha starších studií a prací včetně práce Wyona a kolektivu. Ekvivalentní teplota t_{eq} [°C] představuje interpretaci určité výsledné teploty, kterou pociťuje člověk v daném prostředí s různými nehomogenními parametry okolního prostředí. Můžeme tak díky ní jednoduše určit vliv různých typů nehomogenních prostředí na tepelný tok z lidského těla. Nejedná se tedy o měřitelnou teplotu, ale její hodnota je určována výpočtně, například pomocí následujícího vztahu (2.11) vycházejícího ze vztahu odvozeného prof. Nilssonem (1999) pro případ přenosu tepla z tepelného manekýna [6], [7], [13].

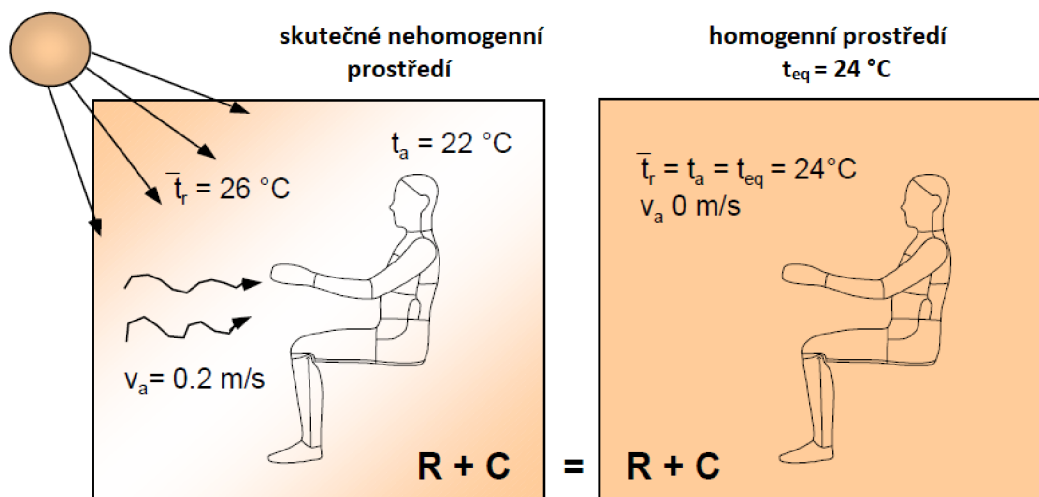
$$T_{eq} = T_s - \frac{\dot{q}_{real}}{h_{cal}} = T_s - (R_{cl} + R_a) \cdot \dot{q}_t \quad (2.11)$$

kde:

T_{eq}	je ekvivalentní teplota	[K],
T_s	je povrchová teplota tepelného manekýna	[K],
\dot{q}_{real}	je měrný tepelný tok mezi povrchem manekýna a skutečným okolním prostředím	[W/m ²],
h_{cal}	je součinitel přestupu tepla z virtuální kalibrace v homogenním prostředí	[W/m ² K],
$(R_{cl} + R_a)$	je celkový tepelný odpor (oblečením a konvekci)	[m ² K/W],
\dot{q}_t	je měrný tepelný tok citelného tepla	[W/m ²].

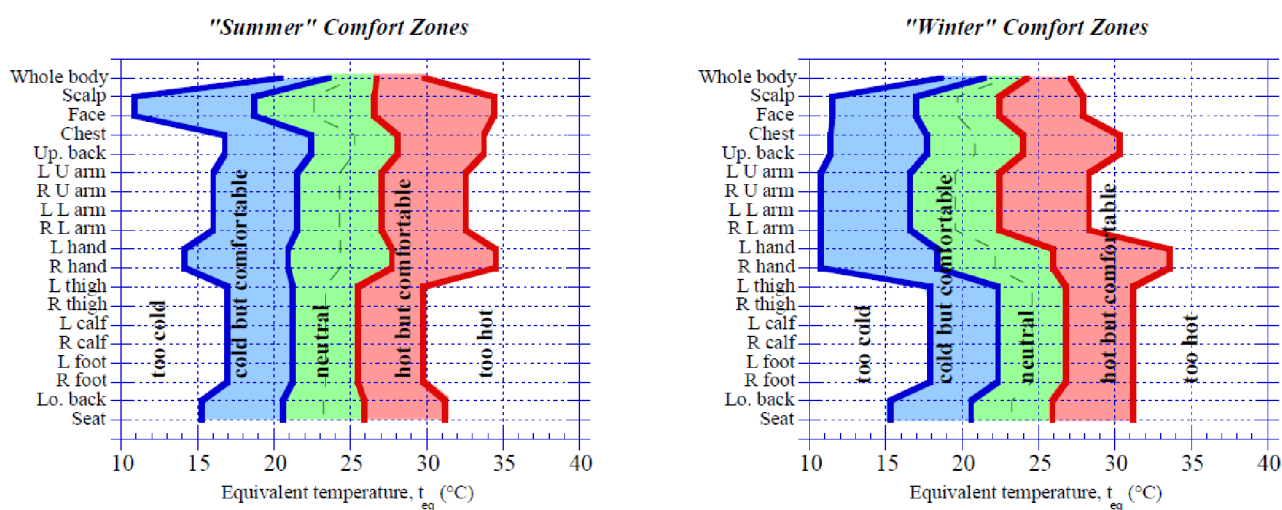
Pomocí ekvivalentní teploty lze analyzovat působení nehomogenního prostředí na člověka a vyhodnotit jeho tepelný pocit a komfort. Vyhodnocení probíhá děleně na 18 různých částech lidského těla, kdy se pro každou část určuje lokální ekvivalentní teplota. Celková

ekvivalentní teplota se poté určí prostřednictvím průměru lokálních ekvivalentních teplot vážených plochou jednotlivé části. Příklad aplikace ekvivalentní teploty je vyobrazen na obrázku 6. [7], [13].



Obr. 6. Znárodnění principu ekvivalentní teploty (převzato a upraveno z [13]).

Na ekvivalentních teplotách je dále postaven model komfortních diagramů, který obsahuje pět komfortních zón představujících tepelný pocit (nepříjemně teplo, příjemné teplo, neutrálně, příjemně chladno, nepříjemně chladno). Hranice těchto komfortních zón jsou definovány hodnotami ekvivalentní teploty, a to pro každou ze zmiňovaných částí lidského těla na základě tepelné izolačních vlastností oděvu a vzduchové vrstvy reprezentující mezní vrstvu. Ekvivalentní teploty určované pro daný případ na základě naměřených parametrů prostředí se potom porovnávají s empiricky určenými diagramy komfortních zón, které vytvořil prof. Nilsson v rámci své disertační práce [6], [7].



Obr. 7. Diagramy komfortních zón prof. Nilssona pro letní a zimní oblečení [13].

Tyto diagramy byly definovány pomocí experimentálního měření s dobrovolníky a tepelnými manekýny, kteří byli vystaveni různým variantám nastavení klimatu. Dobrovolníci hodnotili pomocí sedmistupňové škály MTV (Mean Thermal Vote) tepelný pocit a komfort pro jednotlivé části těla. Byl také sledován tepelný tok ze segmentů manekýnů a na základě těchto dat byla následně pomocí rovnice (2.11) vyhodnocena ekvivalentní teplota s příslušným tepelným pocitem osob. Po dalším statistickém zpracování dat a definování potřebných vztahů bylo možné následně sestavit a definovat rozsah všech komfortních zón diagramu. Nilssonovy diagramy komfortních zón pro letní a zimní oděv lze vidět na obrázku 7. Nutno dodat, že dle definice lze za celkový tepelný komfort považovat stav, kdy se pocit na všech částech těla a i celkový tepelný pocit (Whole body) nacházejí v neutrální zóně [6], [7], [13].

2.4.3 Vyhodnocování tepelného komfortu pomocí tepelných manekýnů

Mezi nejpřesnější experimentální nástroje využívané pro hodnocení tepelného komfortu jsou tepelní manekýni. V úvodu kapitoly bylo uvedeno, že tepelní manekýni jsou měřicí systémy, které jsou konstruovány tak, aby simulovaly lidskou termofyziologii. Hlavním aspektem, který odlišuje tepelné manekýny od jiných aktivních měřicích systémů, je právě tvar lidského těla. Díky němu můžeme pomocí sledování tepelných toků z vyhřívaného manekýna přesně určit tepelný pocit a následně i tepelný komfort osoby vyskytující se v prostředí s danými tepelnými podmínkami.

Primárním důvodem vzniku a vývoje tepelných manekýnů bylo minimalizování nejistot měření a rizik spojených s experimenty využívajících pokusných dobrovolníků. Původ tepelných manekýnů se datuje k roku 1920, kdy v rámci Lékařské fakulty Harvardské univerzity začaly vznikat první prototypy tehdejších tepelných manekýnů v podobě torza tvořeného převážně plechovými trubkami. Výzkum byl zaměřen na objasnění zvýšení fyziologické únavy pracovníků s fyzicky náročným zaměstnáním. Postupem dalších let směřoval vývoj manekýnů do militární oblasti, kde se nově navrhovaní tepelní manekýni využívali k testování vojenské výstroje pro extrémní klimatické podmínky nebo byli využíváni např. pro sledování výdrže vojáků v protichemických oblecích. V armádním prostředí se vývoj držel i další roky, tepelní manekýni také později hráli významnou roli při měření tepelných odporů oděvu v textilním průmyslu. S postupem výzkumu v oblasti tepelného komfortu přibývaly také funkce, kterými tepelní manekýni disponovali [6].

V současnosti vývoj dospěl do bodu, kdy existují tepelní manekýni disponující kromě elementární funkce vyhřívání povrchu také dalšími funkcemi přesněji simulujícími i další způsoby přenosu tepla z lidského těla. U nejmodernějších modelů je povrch manekýna tvořen speciálním materiálem imitujícím lidskou kůži přítomností umělých pórů, díky kterým může být simulováno ochlazování lidského těla pocením. Systém pocení může být také propojen s aktivním termofyziologickým modelem, který na základě informací ze systému sond a snímačů manekýna dokáže řídit povrchovou teplotu a také míru pocení. Stejně tak je pomocí přídatných zařízení u nových modelů možné simulovat dýchání a s ním spojený přenos tepla. Tepelní manekýni jsou v současnosti většinou dodáváni i se softwarem pro ovládání, sledování stavu měření a vyhodnocování výsledků měření [6].

2.5 Využití simulačních metod pro vyhodnocování tepelného komfortu

Jelikož vyhodnocení tepelného komfortu může v určitých případech představovat náročný proces, je v současnosti běžné pro vyhodnocení tepelného komfortu využívat simulačních modelů různých druhů. Využití numerické simulace může usnadnit řadu komplikací a procesů spojených s vyhodnocováním tepelného komfortu jinými způsoby, které jsou popsány v předchozích kapitolách. Realizace experimentů pro hodnocení tepelného komfortu se sondami či tepelnými manekýny může být však často náročná na vybavení, finance a dostupný čas. Experimenty s pokusnými osobami naopak mohou představovat v určitých aplikacích etické problémy s vystavováním osob nepříjemným vlivům zkoumaného prostředí. Nejen kvůli těmto komplikacím jsou v současnosti pro vyhodnocení tepelného komfortu často využívány výpočetní simulační modely – numerické simulace. Protože model představuje zjednodušenou interpretaci skutečného problému, rozhoduje složitost problému a požadovaná přesnost řešení při výběru simulační metody. V rámci těchto simulací lze vytvořit virtuální model řešeného problému a pomocí matematických modelů popisujících fyzikální pozadí problematiky následně vyhodnotit požadované veličiny ovlivňující tepelný komfort nebo využít přímo zakomponovaných funkcí k vyhodnocení tepelného komfortu [6].

Simulační modely jsou běžně využívány při vývoji, navrhování a optimalizaci zařízení sloužících k úpravě vnitřního prostředí budov a dopravních prostředků, HVAC systémů, materiálů pro oděvy atd. Pro tyto oblasti je nutné modelování přenosu tepla a hmoty, proudění tekutin a termofyziologie lidského těla. Simulace určené k vyhodnocování tepelného komfortu tedy kombinují velkou škálu modelů, proto lze následně rozdělit modely dle komplexnosti aspektů, které jsou v modelech zahrnuty. Mezi tyto aspekty patří např. symetrie a homogenita prostředí a zátěže (nesymetrické x symetrické) a časová ustálenost termofyziologie a fyzikálních dějů (statický model, dynamický model a kombinovaný – kvazidynamický model) [6].

Simulaci uvedených dějů umožňují tyto simulační metody:

Bilanční 0D/1D metody – tyto metody popisují mechanismy přenosu tepla, proudění, stavy vlhkého vzduchu atd. buď jako 0D problém, tedy formou základních energetických bilančních rovnic nebo také jako 1D problém, kdy je provedena diskretizace problému do jedné osy (např. vstup tepla stěnou v jednom kolmém směru). Z hlediska času mohou tyto metody využít přístup statického nebo dynamického modelu. Mezi přední zástupce softwaru využívajícího těchto metod patří Matlab/Simulink, Trnsys, Modelica a jiné [6].

Bilanční 2D a kvazi 3D metody – vycházejí z 0D a 1D metod s nástavbou představující diskretizaci v další ose, což výrazně rozšíří možnosti a přesnost řešení, ale také nároky na výpočetní výkon. Některé mechanismy přenosu tepla jako je kondukce lze pomocí těchto modelů řešit ve 2D, některé, jako např. konvekce, jsou řešeny stále bilančně nebo částečně bilančně. Naopak pro výpočet přenosu tepla radiací lze využít možnosti výpočtu úhlových faktorů [6].

CFD metody – Computational fluid dynamics neboli *Výpočetní dynamika tekutin*, představuje metody, které využívají kompletních 3D modelů řešených problémů v kombinaci s matematickými modely popisujícími podrobně fyzikální fenomény oblastí jako je proudění tekutin, přenos tepla nebo také např. akustika. Z hlediska přesnosti výpočtů se jedná o nejdokonalejší metody z výše uvedených z důvodu úplného definování 3D geometrie řešeného problému. Přesnost řešení tedy závisí také na kvalitě 3D modelu. Protože CFD metody využívají nejsložitějších modelů ze všech uvedených, znamená to i vyšší nároky na výpočetní výkon. Konkrétnější popis postupů, které CFD metody využívají, je uveden v kapitole 4.1. V dalších kapitolách věnovaných zpracování praktické části této práce jsou také popsány a vysvětleny některé použité funkce a přístupy využití v rámci tvorby simulačního modelu v programu využívající CFD metody – StarCCM+ [6], [14].

Kosimulační metody – jak bylo uvedeno v odstavci výše, CFD metody vyžadují pro numerické řešení dostatečný výpočetní výkon, který představuje hardwarové a také časové nároky. Z toho důvodu existují i druhy simulačního softwaru, který kombinuje 0D/1D metody s CFD. Tohoto přístupu bývá využito např. u virtuálních modelů vozidel a dopravních prostředků, kdy kompletní tvorba 3D modelu kabiny a následné využití pro CFD simulace představuje velice komplexní problém [6].

3 Popis validačních experimentů

Aby bylo možné co nejpřesněji simulovat průběh experimentů a na jejich základě validovat CFD model tepelného manekýna, je nejprve nutné přesně popsat experimenty, uvést vstupní parametry, naměřené a zjišťované veličiny, použité postupy a výpočty, vlastnosti použitých materiálů a použité měřicí zařízení. V následujících podkapitolách bude toto učiněno postupně pro diplomovou práci Ing. Miloše Fojtlína a pro diplomovou práci Ing. Kristýny Hrubanové.

3.1 Popis experimentu diplomové práce Ing. Miloše Fojtlína

Hlavním cílem této diplomové práce bylo za pomoci experimentálního měření stanovit součinitele přestupu tepla radiací a konvekcí pro jednotlivé části tepelného manekýna za stanovených laboratorních podmínek. K měření byl využit tepelný manekýn laboratoře Odboru termomechaniky a techniky prostředí (dále jen OTTP) Newton od společnosti Measurements Technology Northwest, který je doplněn o software ThermDAC8. Experiment byl prováděn v prostředí klimatické komory nacházející se taktéž v laboratořích OTTP. Byly provedeny 2 varianty měření, co se polohy manekýna týče - jedno měření vsedě a druhé ve stoje. V rámci této diplomové práce budou vytvořeny simulační modely pro měření s manekýnem vsedě [2].

3.1.1 Popis měřící aparatury

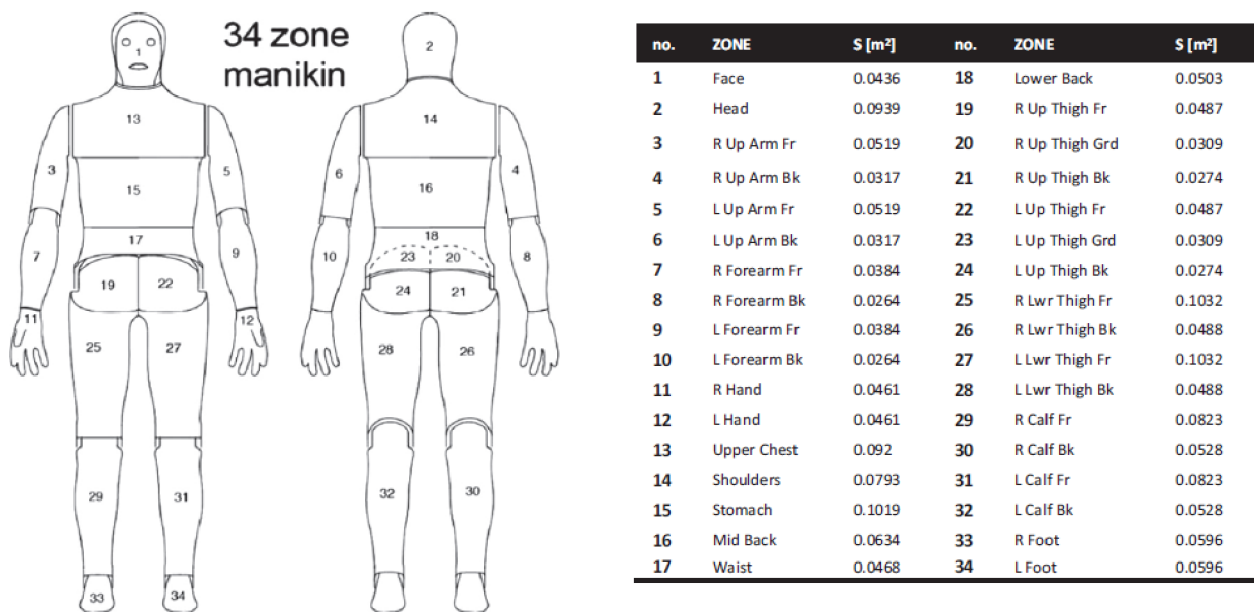
Tepelný manekýn Newton je sestaven z 34 na sobě nezávisle vyhřívaných segmentů z tepelně vodivého uhlíkového kompozitu a z polohovatelných kloubů, které zajišťují pohyblivost jednotlivých částí a umožňují polohovat manekýna dle potřeby. Části simulující produkci metabolického tepla jsou rozděleny logicky dle fyziologie člověka (viz Obr. 8) a jsou vyhřívány pomocí odporových drátů, které se nachází pod povrchovou vrstvou a umožňují zároveň měření povrchové teploty. Manekýn je ovládán pomocí softwaru ThermDAC8, kde lze nejen sledovat hodnoty naměřené řadou dalších sond a měřičů, kterými manekýn disponuje, ale také lze pomocí něj řídit tepelný výkon manekýna, povrchovou teplotu a podobně. V případě tohoto experimentu byly všechny části manekýna nastaveny na povrchovou teplotu 34 °C [2].

Nezbytné pro správné provedení měření bylo dosažení parametrů okolního prostředí uvedených v normě ČSN EN ISO 14505-2 [17]. Ta předepisuje pro podobné experimenty následující podmínky:

$$t_a = t_r = 24 \text{ °C} \pm 0,2 \text{ °C}, v_a = 0,05 \text{ m/s}, \Delta t_{0,1-1,1m} < 0,4 \text{ °C},$$

kde:

t_a	je teplota okolního prostředí	[°C],
t_r	je radiační teplota okolních ploch	[°C],
v_a	je rychlost proudění okolního vzduchu	[m/s],
$\Delta t_{0,1-1,1m}$	je rozdíl teplot ve výšce 0,1 – 1,1 m nad podlahou boxu	[°C].



Obr. 8. Schéma rozdělení manekýna do zón s tabulkou ploch pro jednotlivé zóny [3].

K dosažení normou předepsaných podmínek bylo provedení experimentu realizováno v prostředí klimatické komory OTTP. V této klimatické komoře lze dosahovat následujících parametrů vnitřního prostoru:

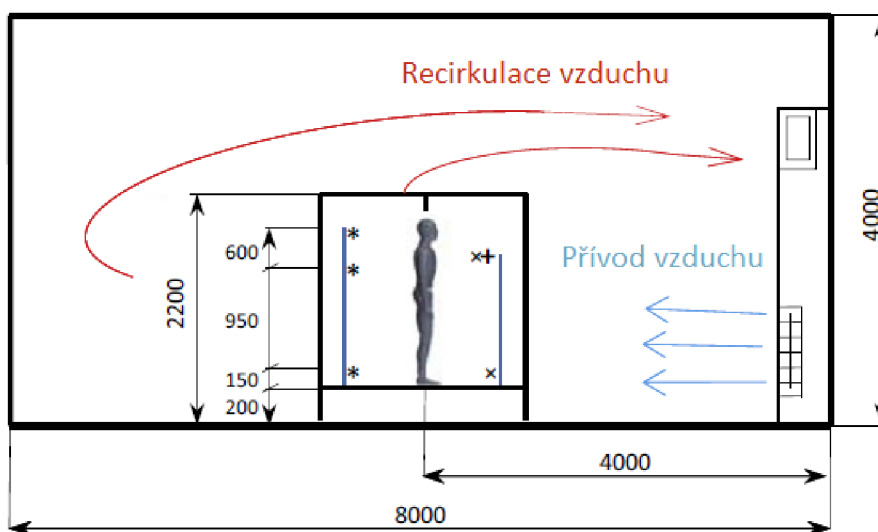
- teplota vzduchu od -40 do 85 °C,
- relativní vlhkost vzduchu cca 10 až 80%,
- solární zisky do 10 kW.

Součástí měřicí aparatury byl kromě klimatické komory a tepelného manekýna také kalibrační box o vnitřních rozměrech 2 x 2 x 2 m sestavený Ing. Milošem Fojtlínem z hliníkových profilů a černé netkané textilie o nízké plošné hmotnosti 50 g/m², aby docházelo k minimální akumulaci tepla. Stěny boxu z černé tkaniny se z hlediska radiace svými fyzikálními vlastnostmi blíží k dokonale černému tělesu. Tepelný tok radiací je považován za maximalizovaný. Kalibrační box byl použit v souladu s požadavkem na vytvoření homogenního prostředí uvedeným normou ČSN EN ISO 14505-2 [17] a jeho původním autorem je H. O. Nillson, který ho popsal a navrhl pro svoji dizertační práci [2].

Tento kalibrační box, ve kterém je pro měření umístěn manekýn, slouží ke stabilizaci podmínek prostředí klimatické komory a minimalizování vlivů jako např. proudění vzduchu z výustek vzduchotechniky klimatické komory a podobně. Box byl umístěn na geometrický střed podlahy klimatické komory a jeho podlaha byla odsazena 20 cm od podlahy skutečné. Během prvních zkoušek měření bylo odhaleno, že na přední stěnu boxu dopadající proud vzduchu z výustek klimatizační jednotky komory vytváří v boxu proudění vzduchu o rychlostech vyšších než je normou předepsaných 0,05 m/s. Pro ustálení rychlosti byla přidána ještě jedna vrstva tkaniny na tuto stěnu, čímž byla rychlost proudění ustálena na rozmezí 0,05 – 0,1 m/s. Spolu s následným napnutím a uchycením textilie ve více bodech bylo následně

dosaženo uspokojivého stavu. Proud vzduchu proudící přes přední stěnu boxu byl dostatečně homogenizovaný. Po testovacích měřeních bylo rozhodnuto vytvořit ve stropu boxu otvor s přibližnými rozměry 0,5 x 0,5 m, díky kterému bylo dosaženo kvalitnějšího větrání boxu a posílení stoupavého proudu vznikajícího přirozenou konvekcí [2].

Aby mohlo být zajištěno dodržení podmínek předepsaných normou, byly do boxu také umístěny měřicí sondy, které po čas experimentu snímaly stav teploty, vlhkosti vzduchu a rychlosti proudění vzduchu. Pozice jednotlivých sond jsou znázorněny na obrázku 9., kde je vyobrazen manekýn ve stoje, ale pozice sond jsou stejné i pro pozici vsedě.



Obr. 9. Pozice senzorů umístěných v kalibračním boxu. * Testo 435-2/-4, × Pt100, + anemometr se žhavenou kuličkou (převzato a upraveno z [3]).

K měření teploty byly využity 2 bezdrátové sondy Pt100 (TM Newton), teplotu za manekýnem měřily 3 bezdrátové sondy Testo 435-2/-4. Rychlost vzduchu proudícího do boxu byla měřena pomocí anemometru se žhavenou kuličkou Value Tester – model 8475. Relativní vlhkost byla měřena sondou TM Newton umístěnou ve stejné pozici jako anemometr. Teplotu v klimatické komoře monitorovaly 2 sondy Testo 435-2/34 umístěné u bočních stěn komory ve výšce 1,4 m [2], [3].

3.1.2 Postup měření, výpočet součinitelů přestupu tepla

V první fázi měření probíhalo zhotovení kalibračního boxu, dále pak příprava měřicí soustavy v klimatické komoře, umístění manekýna do boxu, zavedení všech měřících sond a snímačů. Pro zahájení měření bylo nutné nastavit parametry prostředí v klimatické komoře a po spuštění komory sečkat cca 2 až 3 hodiny do ustálení teploty vzduchu na 24 °C. Současně s tím byl spuštěn i systém manekýna, jenž byl nastaven na požadovanou teplotu 34 °C. Po ustálení tepelného toku z manekýna do okolního prostředí bylo spuštěno logování dat, které je uskutečňováno každou sekundu po dobu jedné hodiny. Po uplynutí tohoto času bylo měření ukončeno, manekýn i komora vypnuta a prostor komory vyvětrán. Měření každého ze stavů bylo provedeno 3x. [2]

Jelikož pomocí tepelného manekýna nelze přímo měřit součinitele přestupu tepla, byla pro jejich zjištění zvolena metoda využívající zaznamenaný kombinovaný tepelný tok (radiací a konvekcí) z povrchu manekýna. Vedení tepla kondukcí bylo zanedbáno z důvodu kontaktu manekýna s jinými povrchy pouze na velmi malé ploše (chodidla nohou). Měření tepelného toku z jednotlivých částí manekýna bylo navrženo ve dvou variantách. První měření proběhlo s nahým manekýnem, kdy byl tepelný tok z povrchu manekýna realizován přirozenou konvekcí a radiací. Tento proces popisuje rovnice (3.1) [2].

$$\begin{aligned} \dot{q}_0 &= \dot{q}_k + \dot{q}_r \\ \dot{q}_0 &= h_k \cdot (T_{sk} - T_a) + h_r \cdot (T_{sk} - T_r) \end{aligned} \quad (3.1)$$

kde:

\dot{q}_0	je celkový měrný tepelný tok z povrchu manekýna	[W/m ²],
\dot{q}_k	je měrný tepelný tok konvekcí z povrchu manekýna	[W/m ²],
\dot{q}_r	je měrný tepelný tok radiací z povrchu manekýna	[W/m ²],
h_k	je součinitel přestupu tepla konvekcí	[W/m ² ·K],
h_r	je součinitel přestupu tepla radiací	[W/m ² ·K],
T_{sk}	je teplota povrchu manekýna (34°C)	[°C],
T_a	je okolní teplota vzduchu	[°C],
T_r	je střední radiální teplota okolních stěn	[°C],

Jelikož je z tohoto měření nemožné určit jednotlivé složky součinitelů přestupu tepla, byla uskutečněna druhá varianta měření, ve které byl manekýn potažen hliníkovou folií, která sníží emisivitu povrchu, čímž se dle Stefan-Boltzmannova zákona minimalizuje radiální složka tepelného toku. Předpokládá se, že přenos tepla je poté uskutečňován pouze konvekcí. Dosazením této podmínky do rovnice celkového tepelného toku byl získán vztah, ze kterého lze následně vyjádřit součinitel přestupu tepla konvekcí, viz rovnice (3.2) a (3.3) [2].

$$\dot{q}_0 = h_k \cdot (T_{sk} - T_a) + h_r \cdot (T_{sk} - T_r) \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = 0 \rightarrow h_r = 0$$

$$\dot{q}_0 = h_k \cdot (T_{sk} - T_a)$$

$$h_k = \frac{\dot{q}_0}{(T_{sk} - T_a)} \quad (3.3)$$

Součinitel přestupu tepla radiací byl následně vyjádřen z rovnice (3.1), kam byl dosazen výše vypočítaný součinitel přestupu tepla konvekcí. Pro předpoklad, že $T_a = T_r$, můžeme rovnici dále zjednodušit na následující tvar v rovnici (3.4).

$$\begin{aligned} h_r &= \frac{\dot{q}_0}{(T_{sk} - T_r)} - \frac{h_k \cdot (T_{sk} - T_a)}{(T_{sk} - T_r)} \\ h_r &= \frac{\dot{q}_0}{(T_{sk} - T_r)} - h_k \end{aligned} \quad (3.4)$$

Po ukončení měření a zpracování všech dat byly vyhodnoceny součinitele přestupu tepla konvekcí i radiací pro všechny segmenty manekýna. Dále byl proveden rozbor nejistot měření, na jehož základě byly určeny směrodatné odchylky. Výsledky měření lze vidět na grafech v kapitole 7.

3.2 Popis experimentu diplomové práce Ing. Kristýny Hrubanové

Ing. Kristýna Hrubanová se ve své diplomové práci věnovala tepelnému komfortu v kabině automobilu. Mezi hlavní cíle její práce patřil návrh metodiky pro měření součinitele přestupu tepla z tepelného manekýna dle dostupných norem, dále pak upřesnění hodnot tepelných odporů sestav oděvů patřících do šatníku systému iHVAC a následné stanovení diagramů komfortních zón, které systém využívá k predikci tepelného komfortu v kabině automobilu. Měření součinitele přestupu tepla spolu s upřesněním hodnot tepelných odporů oděvů bylo prováděno experimentálně za pomoci tepelného manekýna Newton, který je blíže popsán v předchozí podkapitole věnované diplomové práci Ing. Fojtlína. Experimenty se uskutečnily opět v prostoru klimatické komory OTTP. Z důvodu, že byly použity stejné přístroje a měřicí aparatura jako v práci Ing. Fojtlína, nebude již tato kapitola obsahovat detailnější popis těchto zařízení. Z experimentů, které byly Ing. Hrubanovou provedeny, budou v rámci této diplomové práce vytvořeny CFD simulační modely přenosu tepla z tepelného manekýna oblečeného postupně do pěti sestav oblečení systému iHVAC tak, jak to proběhlo i experimentálně. V rámci těchto simulací budou vyhodnoceny součinitele přestupu tepla z manekýna, které budou následně porovnány s experimentálně určenými hodnotami. Porovnání bude sloužit jako validační prvek k vytvořeným simulacím.

3.2.1 Systém iHVAC a jeho šatník

Systém iHVAC vznikl v rámci projektu „Inovativní řízení HVAC systému kabiny automobilu jako součást asistenčního systému řidiče“, který probíhal v letech 2014 až 2017 v rámci spolupráce VUT Brno a ŠKODA AUTO a. s. Výstupním produktem byla soustava softwaru, hardwaru, algoritmu a vizualizačního systému pro snímání teplot kritických částí lidského těla, aby bylo možné následně včas upozornit řidiče na možný vznik tepelné nepohody. V rámci systému by poté řidič mohl změnit nastavení klimatizačního systému pomocí dotykové obrazovky. Jelikož systém využívá databázi tepelných odporů ke stanovení ekvivalentní teploty, pomocí níž vyhodnocuje finální tepelný stav v kabině, je součástí systému i tzv. virtuální šatník, pomocí kterého může řidič zadat některou z přednastavených sestav oblečení dle svého skutečného stavu oděví. Tato možnost tak napomáhá lepší predikci a vyhodnocení tepelného komfortu [4].

Na základě dostupného šatníku v aplikaci řídicího systému iHVAC a informacích o běžném oblečení používaném reálnými řidiči bylo vytvořeno pět modelových sestav oděvů. V tabulce 2. [4] lze vidět jednotlivé díly oblečení pro každou sestavu.

Tab. 2. Přehled měřených kombinací oděvů [4].

část těla	léto		přechodné období	zima	
	I-sukně	II- kraťasy	III-přechodný	IV-lehký	V-těžký
hlava	vlasý	vlasý	vlasý	vlasý	vlasý
torzo	tričko	tričko	tričko+košile	tričko+mikina	tričko+ mikina+zimní bunda
ruce	bez rukavic	bez rukavic	bez rukavic	bez rukavic	rukavice
nohy	sukně	kraťasy	kalhoty	kalhoty	kalhoty
chodidla	sandále	sandále	pevné boty	pevné boty	pevné boty

Pro určení tepelných odporů oděvů a následného porovnání s původními hodnotami byl využit princip ekvivalentní teploty (blíže popsáný v kapitole 2.4.2). Z rovnice (2.11) byl pro každý segment vyjádřen součinitel přestupu tepla (zahrnující přenos tepla konvekcí i radiací), jehož převrácená hodnota se rovná celkovému tepelnému odporu R_T . Jak bylo objasněno v kapitole 2.3, tento celkový odpor obsahuje jednak tepelný odpor oděvu a dále tepelný odpor proti konvekcí R_k , který je potřeba znát, aby bylo možné z rovnice $R_T = R_{cl} + R_k$ odečíst a vypočítat tak výsledný tepelný odpor oděvu. Jako odpor proti konvekcí byla zvolena referenční hodnota $0,065 \text{ m}^2\text{K/W}$, která odpovídá kalibrační konstantě senzorů ekvivalentní teploty (jedná se o odpor mezní vrstvy senzoru), a to z důvodu využití této hodnoty ve výpočtech a při určování diagramu komfortních zón a ekvivalentní teploty systémem iHVAC. V následujících tabulkách jsou uvedeny původní a dále nově experimentálně určené hodnoty tepelných odporů pro jednotlivé díly oblečení využitě v sestavách. Vzhledem k tomu, že porovnávání tepelných odporů není předmětem této práce, ale budou pouze využity experimentálně naměřené hodnoty pro simulaci, nejsou uvedeny tepelné odpory všech oděvů, ale pouze příklady pro hlavu a tělo. Přesný postup celého experimentu a výpočtů je popsán v následující podkapitole [4].

Tab. 3. Tepelný odpor – tělo [4].

skupina	segment	R _{cl} [m ² K/W]							
		Tshirt		Shirt		Sweatshirt		Winter jacket	
		původní	nový	původní	nový	původní	nový	původní	nový
TORSO	Chest	0,150	0,118	0,240	0,232	0,299	0,318	x	0,999
	Back upper	0,120	0,104	0,214	0,211	0,261	0,268	x	0,991
	Back lower	0,231	0,240	0,318	0,280	0,342	0,322	x	1,002
	L up arm	0,144	0,098	0,222	0,199	0,245	0,251	x	0,757
	R up arm	0,144	0,101	0,222	0,187	0,244	0,253	x	0,709
	L lo arm	0,059	0,048	0,168	0,137	0,189	0,152	x	0,610
	R lo arm	0,059	0,051	0,168	0,137	0,189	0,156	x	0,662

Tab. 4. Tepelný odpor – hlava [4].

skupina	segment	R _{cl} [m ² K/W]	
		Hair	
		původní	nový
HEAD	Scalp (hair)	0,137	0,131
	Face	0,044	0,042

3.2.2 Navržená metodika a postup měření

Prvním krokem Ing. Hrubanové v rámci návrhu metodiky pro měření součinitele přestupu tepla tepelným manekýnem bylo vyhodnocení a porovnání tepelného odporu jednotlivých skladeb oděvů, jak bylo popsáno v předchozí podkapitole. Tento experiment byl navržen na základě současně platných a dostupných norem za použití měřicích zařízení, kterými disponuje OTTP. Mezi tato zařízení patří klimatická komora a tepelný manekýn Newton, popsané v kapitole 3.1. Dále byl využit také již popsáný kalibrační box Ing. Fojtlína a měřicí přístroj TESTO. Tento mobilní multifunkční přístroj slouží k analýze parametrů okolního vzduchu. K měření jednotlivých veličin využívá řadu externě připojených sond, kterými může následně měřit teplotu, vlhkost, rychlost proudění vzduchu, absolutní tlak, intenzitu turbulence a koncentraci CO₂. V rámci měření byla k přístroji připojena multifunkční sonda pro měření proudění, teploty a vlhkosti vzduchu, která doplnila data ze dvou teplotních čidel, anemometru a vlhkoměru napojeným přímo na manekýna [4].

Jak bylo zmíněno výše, experimentální měření s cílem určit tepelné odpory oděvů bylo provedeno na základě využití ekvivalentní teploty pro jednotlivé segmenty. Na tepelného manekýna umístěného v poloze vsedě do kalibračního boxu, nacházejícího se v geometrickém středu podlahy klimatické komory, byla nastavena povrchová teplota $T_p = 34 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Pro okolní prostředí byly zvoleny 3 kalibrační teploty dle doporučení normy ČSN 14505-2 [17]. Jedná se o teploty 20 °C, 24 °C a 28 °C. V kapitole 3.1 je uvedeno, že pomocí tepelného manekýna nelze přímo měřit součinitele přestupu tepla. Z toho důvodu Ing. Hrubanová měřila tepelné toky z jednotlivých částí, na základě kterých byly potom součinitele přestupu tepla h_{cal} a výsledné tepelné odpory R_T vypočítány. Pro výpočet byly dále dle rovnice (3.5) využity povrchové teploty jednotlivých segmentů T_{sk} a teplota okolního vzduchu T_a [4].

$$h_{cal} = \frac{\dot{q}_0}{T_{sk} - T_a} \quad (3.5)$$

Povrchové teploty jednotlivých segmentů byly měřeny senzory zabudovanými v manekýnovi a teplota okolního vzduchu T_a představuje průměrnou teplotu z dvou teplotních čidel Pt100, které jsou součástí měřicího systému manekýna. Vlhkost vzduchu v klimatické komoře byla udržována na 40 % a její dodržení zajišťovala sonda umístěná v bodě polohy vrchní teplotní sondy. Ve stejném místě měřil anemometr rychlost proudění vzduchu, která se dle naměřených dat pohybovala pod maximální požadovanou rychlostí 0,1 m/s, a to především díky použití kalibračního boxu. Umístění sond je vyobrazeno v předchozí kapitole na obr. 9. [4].

Takto nastavený systém byl využit postupně pro pět výše uvedených sestav oděvů. Měření každé sestavy zahrnovalo 3 „testy“, každý pro jednu teplotu okolního vzduchu, Test 1 (24 °C), Test 2 (20 °C) a Test 3 (28 °C). Norma ISO 15831 [18] totiž doporučuje provést kalibraci minimálně ve třech teplotách a z určených h_{cal} následně vytvořit průměr, což sníží vliv teploty na kalibraci. Z důvodu výrazného snížení tepelných toků pod limitních 20 W/m² (uváděných normou) při měření „teplejších oděvů“ v Testu 3 byl následně stanoven dodatečný Test 4 s teplotou 16 °C. Před startem měření a logováním dat bylo nutné komoru a manekýna zapnout, nahřát a stabilizovat podmínky. Po dvouhodinové stabilizaci bylo spuštěno měření a logování dat, které trvalo 20 minut. Dále byla změněna použitá sestava oděvů, následovala hodinová stabilizace na daný oděv a poté opět započalo měření a zaznamenávání dat. Postupně tak bylo v rámci daného testu naměřeno všech pět sestav oděvů s následujícím pořadím: I (letní – sukně), II (letní – kraťasy), III (přechodný), IV (zimní – lehký), V (zimní – těžký). Každý test byl proveden jiný den [4].

3.2.3 Zpracování naměřených dat

Po započatém zaznamenávání dat (logování), které trvalo vždy 20 minut pro dané měření s periodou zapisování dat 10 s, následovalo zpracování dat softwarem ThermDAC8 dodávaným s manekýnem. Tato data byla exportována a jejich následné vyhodnocení provedla Ing. Hrubanová v programu Excel. Vyhodnotila nejprve průměrné hodnoty tepelného toku a teplotu pro každý segment, poté však byly segmenty sloučeny do 12 větších zón dle lidské fyziologie (paže, předloktí, spodní a horní záda, obličej atd.) a tepelné toky z párových orgánů byly sloučeny do průměrné hodnoty. Data pro jednotlivé sestavy oděvů byla sloučena aritmetickými průměry z jednotlivých měření dle teplot (testů). Dále byly pro každou ze zón pomocí rovnice (3.5) vypočítány součinitele přestupu tepla. Pro porovnání experimentálně určených hodnot součinitelů přestupu tepla s hodnotami ze simulace však budou využity tepelné toky a teploty pro každý segment manekýna zvlášť. V rámci interpretace výsledků uvedla Ing. Hrubanová také výpočet nejistot měření a vypočtené hodnoty implementovala do výsledků měření [4].

4 Návrh řešení simulace

Hlavním cílem této diplomové práce je vytvoření CFD modelu pro simulaci přenosu tepla konvekcí a radiací z tepelného manekýna v řízeném kalibračním prostředí. Pro validaci vytvořeného modelu jsou využity experimenty Ing. Fojtlína a Ing. Hrubanové popsané v předchozích kapitolách. V této kapitole bude stručně nastíněn postup v rámci navrženého řešení, použitý software a také způsob vyhodnocení a porovnání veličin ze simulací a experimentů, pomocí kterých budou výsledky simulace validovány.

4.1 CFD simulační software a použité prostředky

Pro vytvoření simulačního modelu a simulaci zadaných případů byl zvolen CFD (*computational fluid dynamics - výpočetní dynamika tekutin*) simulační software Simcenter StarCCM+ společnosti Siemens, verze 2210 (17.06.007). Přístup k tomuto programu byl poskytnut Odborem termomechaniky a techniky prostředí FSI VUT pomocí vygenerovaného licenčního klíče. V průběhu práce byl v rámci OTTP pro výpočty umožněn přístup na výpočetní stanici, která umožnila urychlit průběh výpočtů.

CFD simulace jsou široce používaným nástrojem v oblastech týkajících se hlavně proudění tekutin, přenosu tepla a látky. Tyto fyzikální děje lze v rámci CFD předpovídat matematickým řešením řídicích rovnic popisujících právě jednotlivé fyzikální fenomény. Existuje několik přístupů a metod pro výpočetní dynamiku tekutin, které se liší například způsobem popisu skutečného problému – diskretizace. Zjednodušeně řečeno, diskretizace vyjadřuje proces rozdělení geometrie řešeného případu do dílčích částí, které lze následně definovat v prostoru a také v čase a následně pomocí systému rovnic popisujících fyzikální děje stanovit vztahy mezi jednotlivými částmi. Mezi nejčastěji používané metody diskretizace patří Metoda konečných prvků, Metoda konečných objemů, Metoda konečných diferencí a další. Star CCM+ využívá Metody konečných objemů, kdy je původní objem domény (řešené geometrie) rozdělen na síť menších kontrolních buněk. V rámci např. popisu proudění a přenosu tepla jsou mezi buňkami sdíleny a vypočítávány veličiny ovlivňující tyto fyzikální děje, které jsou popisovány pro většinu softwarů např. pomocí Navier-Stokesových rovnic, které využívá i StarCCM+ [14], [15].

4.2 Návrh variant simulace na základě experimentů

Po nastudování experimentů Ing. Fojtlína a Ing. Hrubanové a obdržení dat z měření jimi provedených bylo vyhodnoceno, že bude nutné simulovat 7 různých případů, všechny s manekýnem vsedě umístěným v kalibračním boxu a v prostředí určeném normou ČSN EN ISO 14505-2 [17] (popsáno v kapitole 3.1). V rámci práce Ing. Fojtlína se jedná o dva případy – měření s nahým tepelným manekýnem a měření s manekýnem pokrytým hliníkovou folií pro minimalizaci radiačního tepelného toku. V rámci práce Ing. Hrubanové bylo stanoveno vytvoření 5 variant simulací – pro každou ze sestav oděvů jedna.

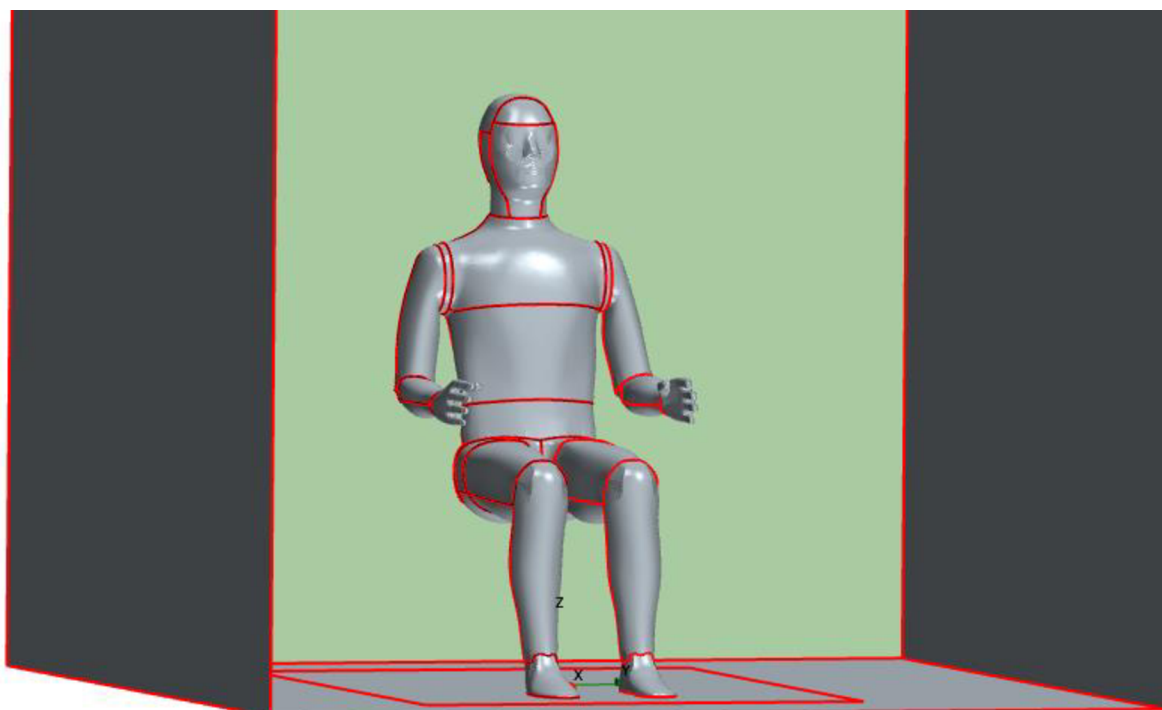
Cílem je vytvoření vhodné sítě, návrh vhodné kombinace fyzikálních modelů a nastavení okrajových podmínek tak, aby měrné tepelné toky \dot{q} [W/m²] z jednotlivých

segmentů manekýna co nejpřesněji dosahovaly hodnot měrných tepelných toků z manekýna při experimentech. Na základě hodnot měrných tepelných toků, povrchových teplot jednotlivých částí manekýna a okolní teploty budou následně vypočteny součinitele přestupu tepla h [W/m²K] pro každý z 34 segmentů tepelného manekýna. Pro experiment Ing. Hrubanové to budou celkové součinitele přestupu tepla h_{cal} pro jednotlivé varianty dle sestav oděvů (viz kapitola 3.2). Pro měření Ing. Fojtlína půjde v případě s nahým manekýnem o kombinovaný součinitel přestupu tepla (radiace + konvekce) h_{celk} a v případě s hliníkovým potahem se bude jednat o součinitel přestupu tepla konvekcí h_k . Následně bude pomocí těchto dvou součinitelů vypočítán součinitel přestupu tepla radiací h_r (viz kapitola 3.1) a hodnoty obou součinitelů budou porovnány s experimentálně určenými. Stejně tak budou s experimentálními hodnotami porovnány i hodnoty součinitelů přestupu tepla získané ze simulací zaměřených na případy Ing. Hrubanové. Pro experimentálně získaná data z obou prací budou také definovány nejistoty měření a do výsledných hodnot měrných tepelných toků a součinitelů přestupu tepla určených pro srovnání se simulací budou zakomponovány i chybové úsečky vyjadřující určené nejistoty měření.

Vzhledem k povaze experimentů bylo vhodné vybrat nejprve jeden výchozí referenční případ, pro který bude postupně tvořen simulační model. Až bude simulace výchozího případu hotova a bude vyhodnocena jako dostatečně přesná (pomocí porovnání simulačně a experimentálně určených měrných tepelných toků ze segmentů manekýna), můžou být vypracovány další simulace dalších případů, kde bude využito nastavení parametrů sítě, zvolených fyzikálních modelů a nastavení některých okrajových podmínek ze simulace výchozího případu. Jako výchozí případ byl zvolen případ Ing. Fojtlína s nahým manekýnem, protože se z hlediska tvorby simulace jedná o nejjednodušší experiment (pouze holé tělo manekýna bez tepelných odporů oděvů, nastavena emisivita povrchu, nejjednodušší použité nastavení tepelné definice okrajové podmínky – Thermal Specification, ...). Jedná se tedy o případ představující vhodný základ pro tvorbu simulace dalších případů. Proto bylo v průběhu práce na simulaci vytvořeno několik testovacích variant modelu, které kombinují různá nastavení simulace (výpočetní síť, nastavení okrajových podmínek atd.). Tyto testovací varianty budou postupně uvedeny a částečně popsány v kapitolách týkajících se tvorby konkrétních částí simulace, při kterých vznikly.

5 3D geometrie a výpočetní síť

Prvním krokem v rámci tvorby modelu simulace přenosu tepla z tepelného manekýna umístěného v kalibračním boxu je zhotovení 3D geometrie simulovaného objektu a okolního prostředí. Proces vytváření geometrie může být uskutečněn přímo v integrovaném 3D editoru programu StarCCM+ nebo může být proveden externím editorem a následně je možné geometrii do StarCCM+ nahrát. Tvorba 3D geometrie nebyla v rámci této diplomové práce prováděna, protože z důvodu velké tvarové složitosti tepelného manekýna byl 3D model vytvořen pomocí technologie 3D skenování. Dále byl přidán model kalibračního boxu (3D model krychle o daných rozměrech boxu) a pomocí operace Boolean subtract (*Booleovský rozdíl*) pro objekty manekýna a boxu vznikl výsledný objekt manekýna umístěného v prostoru boxu s materiálem vyplňujícím box a přesně obklopujícím geometrii manekýna. Tento materiál představuje vzduchovou výplň boxu, kterou je nutné do simulace zakomponovat. Geometrii je nutné před tvorbou sítě rozdělit na části (pomocí tzv. Region based nebo Part based přístupu), které budou následně představovat okrajové podmínky řešené domény. Geometrie manekýna byla rozdělena na jednotlivé segmenty (34 segmentů + klouby) a geometrie boxu byla rozdělena na 7 částí (6 stěn + plocha představující pevnou podstavu pod manekýnem). Geometrii s rozdělením na okrajové podmínky lze vidět na obr. 10. Takto připravená geometrie sedícího manekýna v kalibračním boxu byla poskytnuta vedoucím práce doc. Janem Fišerem pro další zpracování.



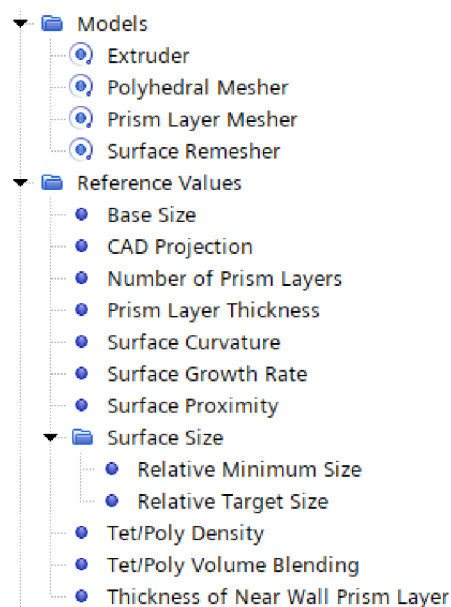
Obr. 10. Geometrie manekýna v kalibračním boxu s naznačeným rozdělením okrajových podmínek pomocí tzv. Feature curves.

Před tvorbou sítě je ještě většinou žádoucí zkontrolovat geometrii a pomocí diagnostiky Surface Repair (*Oprava povrchu*) vyhledat případná problematická místa na geometrii, kde např. povrch geometrie není spojitý, obsahuje volné hrany nebo dochází ke kolizím částí povrchu. Tyto chyby mohou vzniknout hlavně při importu 3D modelu do prostředí programu StarCCM+. Byla tedy provedena diagnostika a nebyly nalezeny žádné chyby, které by znemožnily tvorbu sítě.

5.1 Tvorba výpočetní sítě

Na tvaru a velikosti buněk závisí kvalita řešení, tudíž při tvorbě určitého modelu je nutné vytvořit síť, která přesně odpovídá původní geometrii případu a zároveň je dostatečně jemná, aby nedocházelo ke zkrslení vypočítaných hodnot. Z tohoto důvodu bylo žádoucí vytvořit více variant sítě, aby bylo možné posoudit vliv vytvořené sítě na výsledky simulace. V této části je nyní popsáno nastavení finální zvolené varianty sítě. Další varianty a průběh testu nezávislosti sítě bude okomentován v kapitole X.X.

Následujícím krokem v rámci tvorby simulačního modelu je tedy tvorba výpočetní sítě, která představuje základní operaci pro simulování daného případu. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, je nutné vytvořit výpočetní síť (mesh), která rozdělí objem původní 3D geometrie na menší objemové buňky, na kterých je potom řešiči vyhledáváno řešení fyzikálních rovnic. StarCCM+ disponuje několika modely tvorby sítě (tzv. meshery). Na obr. 11 jsou uvedeny vybrané meshery včetně parametrů definujících charakter sítě. Níže jsou popsány jejich funkce a uvedeny hodnoty parametrů určující velikosti buněk a velikosti stran buněk.



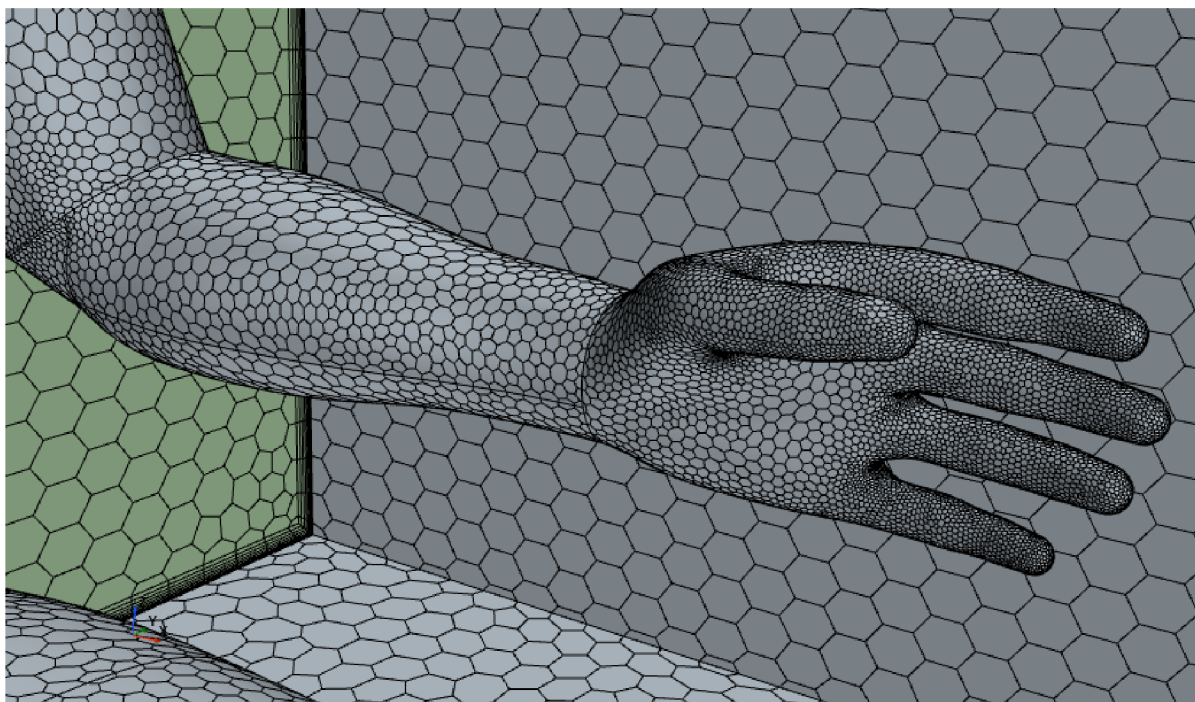
Obr. 11. Zvolené modely tvorby sítě.

Základním zvoleným mesherem je běžně používaný Polyhedral Mesher, který na dělení domény používá mnohostěnné buňky. Dále byl zvolen Prism Layer Mesher, který nám umožní sledovat blízkost povrchu tím, že přidá na vnější stranu objektu prismatickou vrstvu buněk, díky které můžeme blíže popsat proudění v blízkosti povrchu. Posledním základním mesherem je Surface Remesher, který zajistí kvalitu povrchu sítě pevného objektu a napomáhá i lepšímu generování prismatické mezní vrstvy. Model Extruder, který umožní vysunutí zvolené okrajové podmínky o určitou vzdálenost, byl přidán po průběžném testování, když se vyskytl problém s rozhraním dvou výstupů (blíže vysvětleno v kapitole 7.1) [19], [20].

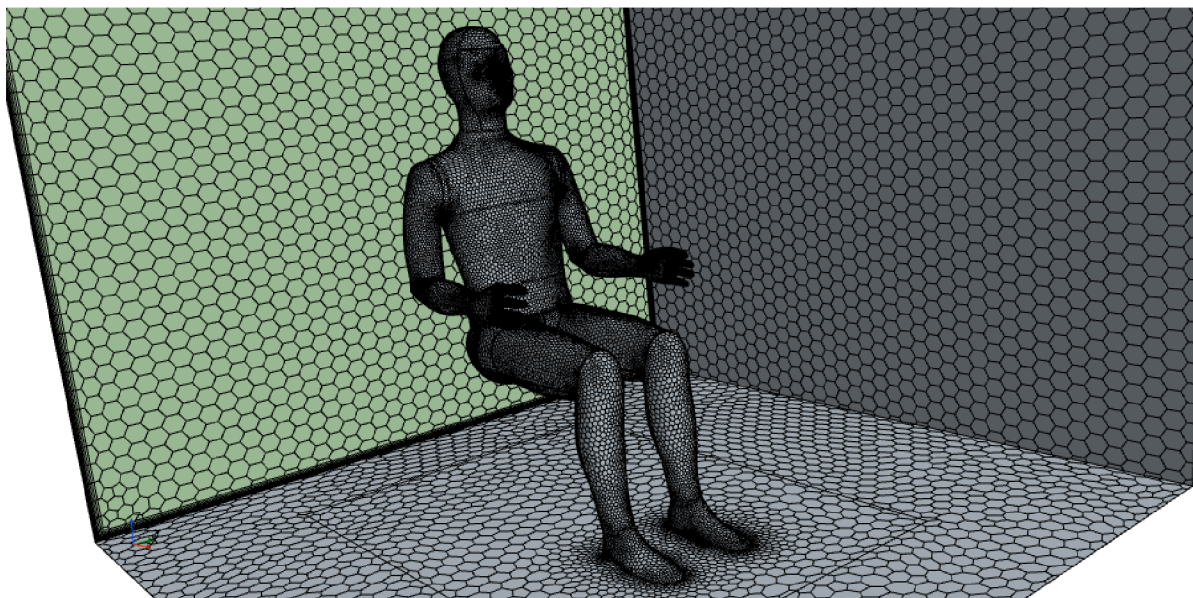
Nastavení základních parametrů sítě:

- Referenční rozměr určující velikost buňky – Base Size = 0,01 m,
- Relative Minimum Size = 0,005 m (50 % z Base Size),
- Relative Target Size = 0,05 m (500 % z Base Size).

Ostatní parametry byly ponechány na výchozích hodnotách. Nastavení parametrů definujících prismatickou mezní vrstvu je popsáno v podkapitole 5.1.1. Výše uvedené hodnoty parametrů se vztahují obecně k celému objemu řešené domény. Meshery sice automaticky detekují místa, kde je geometrie složitější a v závislosti upravují velikost buněk, i přesto bylo pro některé části manekýna nutné nastavit parametry určující velikost buňky zvlášť. To bylo provedeno zvolením možnosti Customize Surface Size u okrajové podmínky představující danou část. Poté bylo možné v sekci Mesh Values definovat hodnoty Relative Minimum Size a Relative Target Size určující velikost buněk tak, aby síť v dané části byla dostatečně jemná. Tato lokální zjemnění sítě byla provedena na většině okrajových podmínek popisujících manekýna, protože výchozí velikost buňky 0,01 m byla navržena tak, aby síť nebyla tvořena příliš vysokým počtem buněk, protože se zvyšujícím se počtem buněk roste výrazně čas na provedení iterace. Navíc prostor, který představuje vzduchovou výplň boxu, není kromě přímé blízkosti manekýna nutné dělit na velmi malé buňky, protože zde nepotřebujeme proudění a přenos tepla sledovat s takovou přesností. Příkladem části s aplikovaným lokálním zjemněním jsou např. ruce (segmenty Hand_R_11 a Hand_L_12), kde byl parametr Relative Minimum Size nastaven na 0,001 m (10 % z Base size) a Relative Target Size na 0,01 m (100 % z Base size). Detail levé ruky se zjemněním sítě lze vidět na obr 12. Obr. 13. zachycuje pohled na síť manekýna a stěny kalibračního boxu. Výsledná síť se skládala z 1 097 230 buněk, 6 644 732 stěn a 5 234 574 vertexů (body, které lze vnímat jako vrcholy buněk společné pro sousedící buňky).



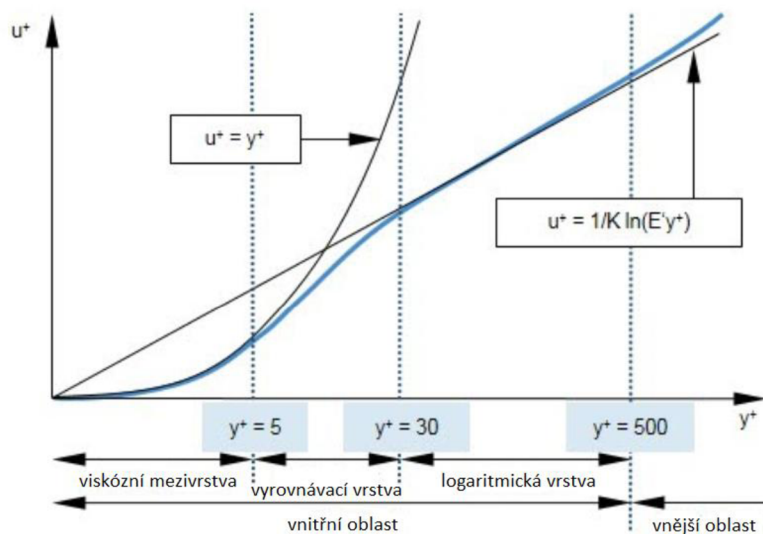
Obr. 12. Detail ruky s viditelným zjemněním sítě na dlani a prstech.



Obr. 13. Výpočetní síť na objektu manekýna a vnitřních stěnách boxu.

5.1.1 Ošetření přístěnné mezní vrstvy, Wall y^+ analýza

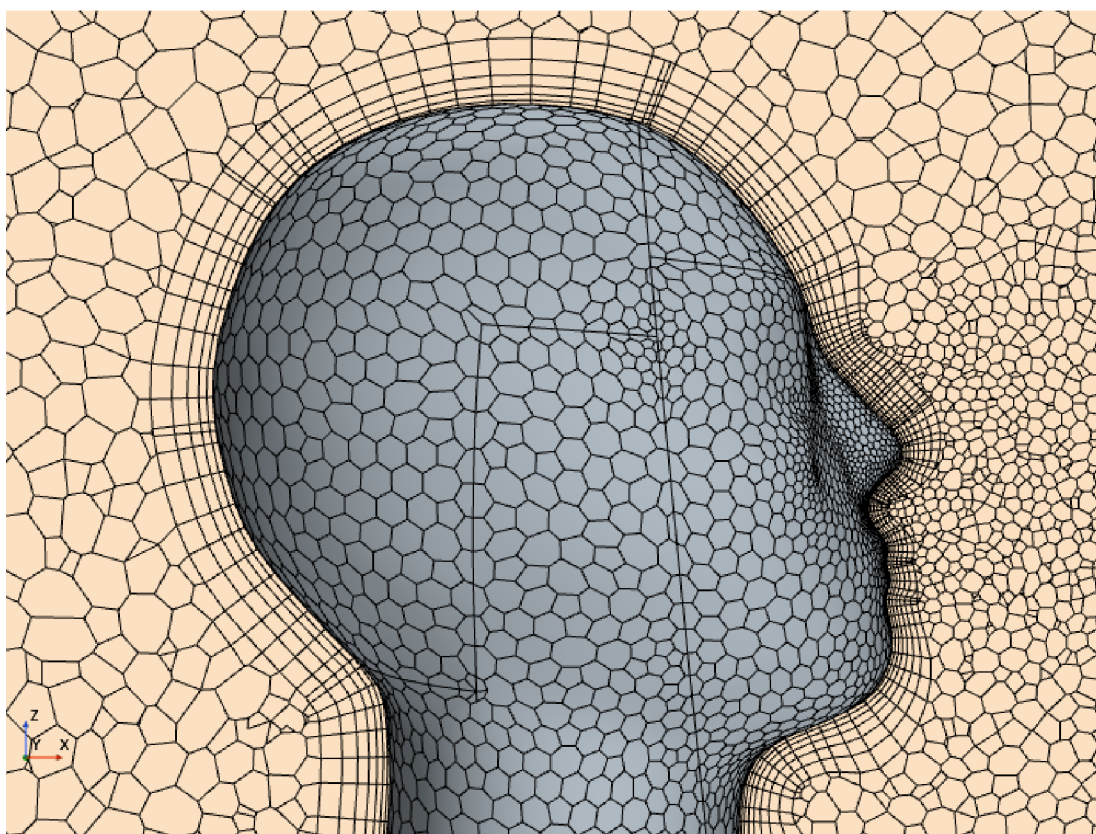
Vzhledem k faktu, že pro řešené případy je nutné sledovat přesně chování proudění vzduchu v přístěnné mezní vrstvě, byl zvolen tzv. Low Wall y^+ přístup, tedy přístup, při kterém se hodnota funkce Wall y^+ na povrchu sledovaného objektu drží kolem 1 a ideálně v těsně pod 1, maximálně však do 5. V blízkosti obtékaných povrchů vznikají turbulence, které mají vliv na charakter a rychlost proudění vzduchu a tedy i přenos tepla, a proto je nutné pro naše případy přesně popsat vývoj rychlosti v blízkosti povrchu manekýna, tedy v přístěnné mezní vrstvě (kapitola 2.2.5). Funkce Wall y^+ je bezrozměrná veličina popisující vzdálenost hranic třech hlavních oblastí mezní vrstvy od povrchu (viz obr. 14). V obrázku lze také vidět veličinu u^+ , která je funkcí y^+ . Jedná se o stěnovou tangenciální složku vektoru rychlosti, která také hraje významnou roli v určování průběhu rychlosti v přístěnné mezní vrstvě [20].



Obr. 14. Hlavní oblasti mezní vrstvy s vyobrazenou závislostí u^+ a y^+ [20].

Pro správný výpočet skutečného průběhu rychlosti i ve viskózní vrstvě je třeba nastavit výšku buňky prismatické mezní vrstvy nejbližší k povrchu, protože vzdálenost jejího středu od povrchu následně figuruje ve výpočtu $Wall\ y^+$. Dalším předpokladem pro dodržení Low $Wall\ y^+$ přístupu je jemné pokrytí mezní vrstvy prismatickými buňkami, proto byl nastaven parametr počtu buněk prismatické vrstvy Number of Prism Layers na 8 buněk. Tento počet buněk byl vyhodnocen jako dostatečný. Šířka přístěnné mezní vrstvy Prism Layer Thickness byla nastavena na 0,025 m. Tloušťka nejbližší buňky ke stěně (Thickness of Near Wall Prism Layer) byla po iteračním testování, kdy byla postupně měněna její hodnota a byl sledován vliv na hodnotu $Wall\ y^+$, nastavena na 0,0008 m [20].

Pro vyhodnocení funkce $Wall\ y^+$ na jednotlivých segmentech manekýna byla využita vytvořená skalární scéna, ve které bylo pro okrajové podmínky definující segmenty manekýna zvoleno vyobrazení hodnoty funkce $Wall\ y^+$. Hodnotu funkce $Wall\ y^+$ pro výsledné nastavení je vyobrazeno na obr. 16. Dále byl v simulaci vytvořen Report (*Zpráva*), který po svém spuštění vypočítá pomocí funkce Surface Average (*Povrchový průměr*) průměrnou hodnotu $Wall\ y^+$ pro všechny segmenty manekýna. Pomocí průměru funkce $Wall\ y^+$ z ploch segmentů bylo možné sledovat, zda se hodnoty pohybují pod 1. K vyhodnocení bylo také nutné mít nastavené některé modely fyziky a dále i vstup a výstup proudícího vzduchu, což je popsáno v dalších kapitolách.

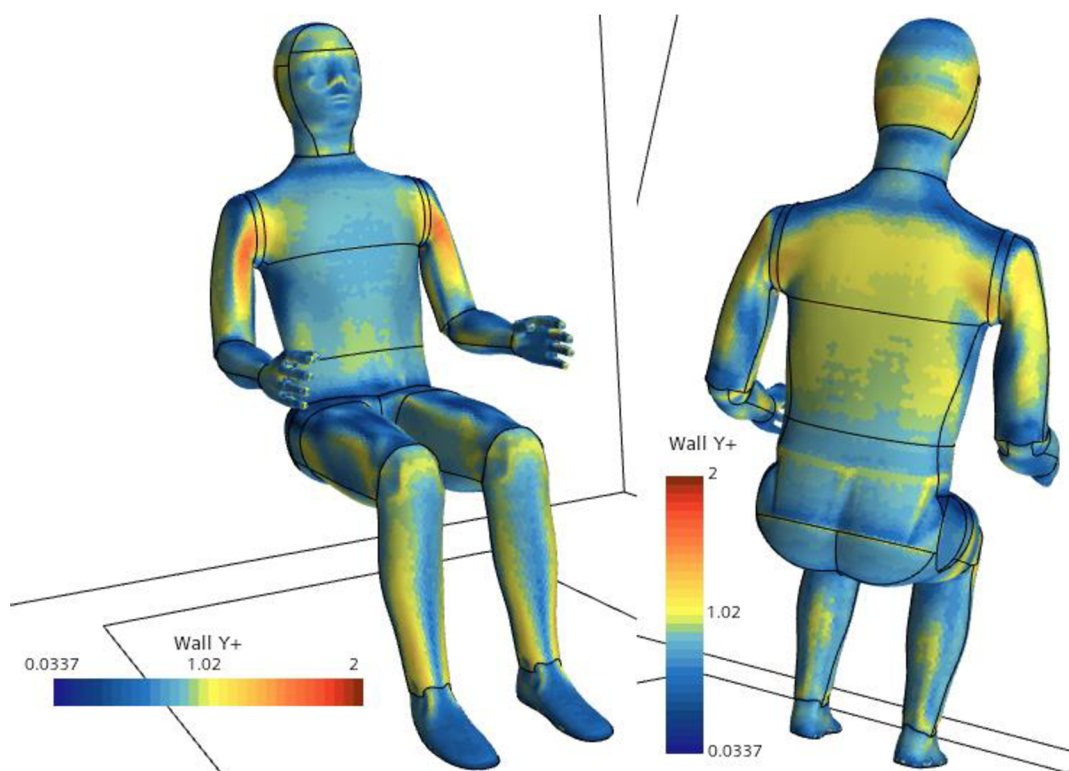


Obr. 15. Detail sítě hlavy s viditelnou prismatickou mezní vrstvou.

Stejně jako byla velikost základních buněk upravena pro segmenty manekýna, které jsou tvarově složitější nebo menší, lze stejným způsobem upravit i parametry prismatické mezní vrstvy. Kritickými místy pro tvorbu prismatické vrstvy byly ruce (části kolem prstů) a také hlava, proto byl otestován vliv změny hlavních parametrů Thickness of Near Wall Prism Layer a Prism Layer Thickness na výsledný tvar buněk sítě a na hodnotu funkce Wall y^+ . Ukázalo se, že změny v parametrech prismatické mezní vrstvy nemají zásadní vliv na tvar buněk vrstvy kolem prstů, protože základ pro prismatické buňky tvoří stěny buněk na povrchu, které jsou u většiny segmentů zjemněny tak, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Proto bylo ponecháno výchozí nastavení prismatické vrstvy pro celou síť. Na obr. 15 lze vidět detail vrstvy kolem segmentů hlavy a obličje.

První zaměření na hodnoty funkce Wall y^+ proběhlo v rámci tvorby sítě, kdy byly postupně pomocí nastaveného proudění vzduchu do kalibračního boxu dle reálného měření (přívod vzduchu z čelní stěny kalibračního boxu směrem k manekýnovi a odvod zadní stěnou a stropem, viz kapitola 3.1) sledovány hodnoty funkce Wall y^+ na povrchu manekýna. Vzhledem k tomu, že se jednalo pouze o pomocné stanovení funkce, které sloužilo k nastavování parametrů prismatické vrstvy, nebudou výsledky nijak uváděny. Při tvorbě sítě bylo dbáno na to, aby se sledovaná hodnota funkce Wall y^+ pohybovala pro všechny segmenty pod požadovanou 1, což bylo v rámci testování s provizorním nastavením proudění v boxu dodrženo. Jak bude popsáno v dalších kapitolách, proudění bylo však výrazně ovlivněno přenosem tepla mezi manekýnem a prostředím boxu, tudíž pro tuto fázi tvorby simulace nebylo možné přesně určit rychlosti proudění vzduchu a s tím spojené hodnoty funkce Wall y^+ .

Obrázek 16. zachycuje skalární scénu s vyhodnocením funkce Wall y^+ na povrchu tepelného manekýna z již dokončené finální simulace experimentu Ing. Fojtlína - měření s nahým manekýnem, ve kterém byly zvoleny všechny použité modely fyziky a byl nastaven přenos tepla. Lze vidět, že většina povrchu vykazuje hodnoty pod 1 (světle modrá barva). Problematická místa lze sledovat v přední části paží, kde se hodnoty pohybují až kolem 1,5. Způsobuje to nejspíše zvýšená rychlost proudění vzduchu v těchto oblastech, která je výsledkem kombinace proudění směrem k manekýnovi od čelní stěny boxu (vstup přiváděného vzduchu) se stoupavým prouděním vzduchu vznikajícím kolem povrchu manekýna. Tyto hodnoty však nejsou nijak problematické pro další výpočty. Důležité je vyhodnocení průměrné hodnoty funkce Wall y^+ pro jednotlivé segmenty manekýna pomocí Reportu (Obr. 17.), kde vychází hodnoty pro paže (segmenty 3 a 5) kolem 0,88, což je ideální hodnota. Je zde také potvrzeno, že povrchy všech segmentů splňují průměrnou hodnotu funkce Wall y^+ pod 1 a ideálně v blízkosti 1.



Obr. 16. Skalární scéna s vyhodnocením hodnot funkce $Wall y^+$ na povrchu manekýna (simulace experimentu Ing. Fojtlina – měření s nahým manekýnem).

Part	Value	Manikin_in_box: Face_Face_1	7.925391e-01
Manikin_in_box: Arm_Lower_L_Bk_10	6.968656e-01	Manikin_in_box: Face_Hair_1	8.557034e-01
Manikin_in_box: Arm_Lower_L_Fr_9	6.902658e-01	Manikin_in_box: Foot_L_34	6.394410e-01
Manikin_in_box: Arm_Lower_L_joint	8.216153e-01	Manikin_in_box: Foot_R_33	6.373666e-01
Manikin_in_box: Arm_Lower_R_Bk_8	6.906846e-01	Manikin_in_box: Hand_L_12	6.812754e-01
Manikin_in_box: Arm_Lower_R_Fr_7	6.931091e-01	Manikin_in_box: Hand_R_11	6.821096e-01
Manikin_in_box: Arm_Lower_R_joint	8.257542e-01	Manikin_in_box: Head_Hair_2	8.170339e-01
Manikin_in_box: Arm_Upper_L_Bk_6	8.597017e-01	Manikin_in_box: Head_Skin-and-neck_2	8.598932e-01
Manikin_in_box: Arm_Upper_L_Fr_5	8.883704e-01	Manikin_in_box: Chest_Upper_13	7.724915e-01
Manikin_in_box: Arm_Upper_L_joint	8.073852e-01	Manikin_in_box: Shoulders_14	8.636599e-01
Manikin_in_box: Arm_Upper_R_Bk_4	8.552683e-01	Manikin_in_box: Stomach_15	7.944446e-01
Manikin_in_box: Arm_Upper_R_Fr_3	8.751770e-01	Manikin_in_box: Thigh_join_L	6.131914e-01
Manikin_in_box: Arm_Upper_R_joint	7.754852e-01	Manikin_in_box: Thigh_join_R	6.183437e-01
Manikin_in_box: Back_Lower_18	8.018600e-01	Manikin_in_box: Thigh_Lower_L_Bk_28	7.123834e-01
Manikin_in_box: Back_Midd_16	9.395827e-01	Manikin_in_box: Thigh_Lower_L_Fr_27	7.445301e-01
Manikin_in_box: Calf_L_Bk_32	7.956098e-01	Manikin_in_box: Thigh_Lower_R_Bk_26	7.138668e-01
Manikin_in_box: Calf_L_Fr_31	9.075581e-01	Manikin_in_box: Thigh_Lower_R_Fr_25	7.409296e-01
Manikin_in_box: Calf_R_Bk_30	7.963216e-01	Manikin_in_box: Thigh_Upper_L_Bk_24	5.780042e-01
Manikin_in_box: Calf_R_Fr_29	9.073749e-01	Manikin_in_box: Thigh_Upper_L_Fr_22	5.704876e-01
Manikin_in_box: Face_Face_1	7.925391e-01	Manikin_in_box: Thigh_Upper_L_Grd_23	7.631890e-01
Manikin_in_box: Face_Hair_1	8.557034e-01	Manikin_in_box: Thigh_Upper_R_Bk_21	5.774822e-01
Manikin_in_box: Foot_L_34	6.394410e-01	Manikin_in_box: Thigh_Upper_R_Fr_19	5.459009e-01
Manikin_in_box: Foot_R_33	6.373666e-01	Manikin_in_box: Thigh_Upper_R_Grd_20	7.656665e-01
		Manikin_in_box: Waist_17	7.577691e-01
		Total:	7.769760e-01

Obr. 17. Výpis z Reportu vyhodnocující průměrnou hodnotu funkce $Wall y^+$ pro povrch segmentů manekýna simulace experimentu s nahým manekýnem.

Udržení hodnot funkce Wall y^+ bylo zajištěno i v dalších simulovaných případech – měření s manekýnem pokrytým hliníkovou folií a měření s oděvy v rámci experimentu Ing. Hrubanové. Pro všechny tyto případy platí, že rychlost proudění v blízkosti povrchu manekýna, která zásadně ovlivňuje výsledek funkce Wall y^+ , je přibližně stejná (případ s Al folií) nebo nižší (případy s oděvy) než u referenčního případu – s nahým manekýnem. U případů s oděvy totiž platí, že průměrné hodnoty Wall y^+ na povrchu manekýna klesají s postupným přidáváním tepelných odporů oděvů, protože společně s tím se snižuje povrchová teplota segmentu (ve skutečnosti povrchová teplota oděvu), a proto klesá i rychlost proudění způsobená ohřevem vzduchu v blízkosti povrchu manekýna.

5.1.2 Tvorba alternativní varianty sítě

Jak bylo naznačeno, v rámci tvorby sítě vznikaly na některých segmentech problémy s pokrytím povrchu prismatickou mezní vrstvou. Většinou se jednalo o stav, kdy prismatická mezní vrstva nekopírovala pravidelně povrch, ale její struktura a vrstvení byly částečně narušeny z důvodu tvarových specifik konkrétního segmentu. Tyto nedokonalosti v mezní vrstvě nepředstavují zásadní problém pro další práci a výpočet, bylo však nutné ověřit, jak velký je jejich vliv na výsledné tepelné toky ze segmentů manekýna po ustálení výpočtu. Proto byl po konzultaci s konzultantem práce Ing. Jakubem Elcnerem, Ph.D. navržen postup vytvoření alternativní sítě, která bude využívat jiný mechanismus tvorby prismatické mezní vrstvy a kde by mohly být problematické části sítě pokryty lépe.

Hlavní změnou oproti síti popsané výše je volba použitého mesheru. Pro tuto síť byl zvolen místo Polyhedral Mesheru a Prism Layer Mesheru model Advancing Layer Mesher, který kombinuje klasické meshery vytvářející mnohostěnné nebo čtyřstěnné buňky (Polyhedral a Tetrahedral Mesher) s modelem přidávajícím prismatickou vrstvu Prism Layer Mesher. Postupuje však tak, že vytvoří nejprve kolem povrchů jednotlivých tzv. Oblastí nebo Dílů (*Regions* nebo *Parts*) vrstvu prismatických buněk a následně vyplňuje zbylý prázdný objem polyedrickými nebo tetraedrickými buňkami. Typ těchto buněk lze ve vlastnostech modelu změnit, pro dodržení shodnosti s původní sítí byly zvoleny polyedrické buňky.

Hlavní parametry sítě určující rozměry základních buněk byly nastaveny takto:

- Base Size = 0,02 m,
- Relative Minimum Size = 0,003 m (15 % z Base Size),
- Relative Target Size = 0,08 m (400 % z Base Size).

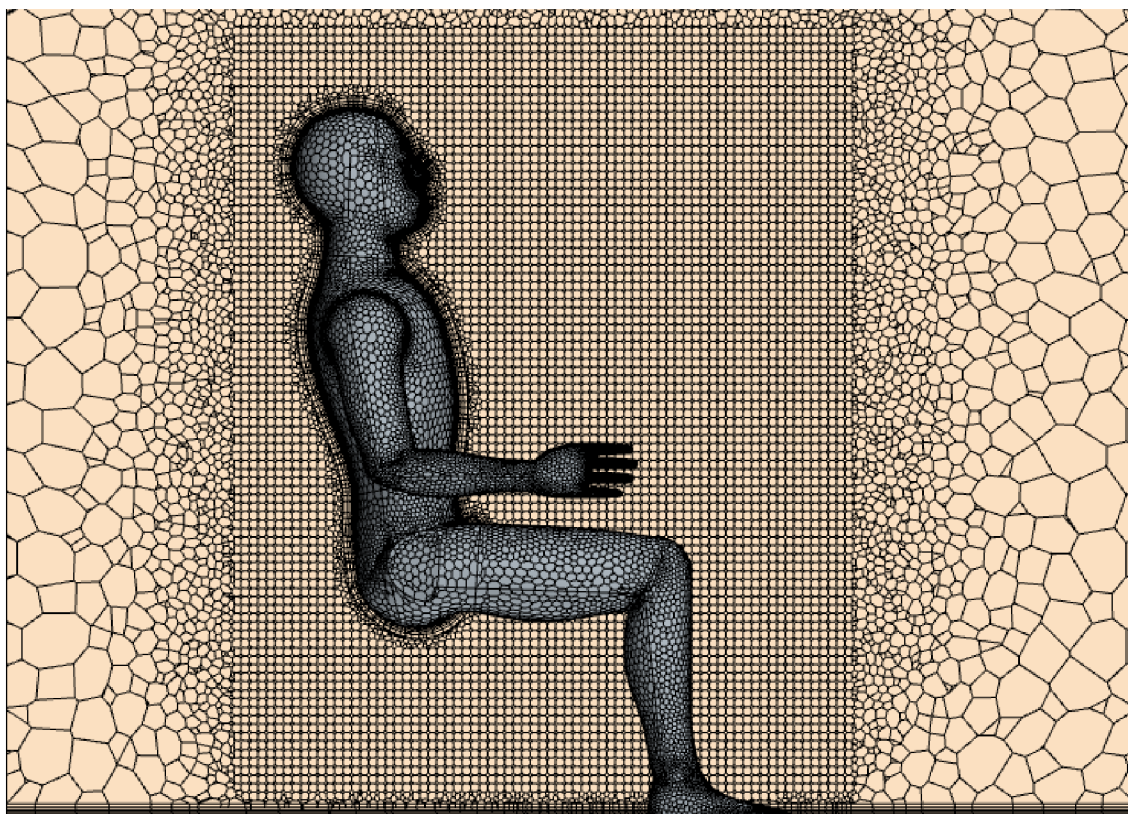
Parametry definující buňky prismatické mezní vrstvy:

- Thickness of Near Wall Prism Layer = 0,0008 m,
- Prism Layer Thickness = 0,024 m (120 % z Base Size).

Stejně jako u původní varianty sítě došlo i u této varianty ke zjemnění buněk sítě na určitých tvarově rozmanitějších částech manekýna (hlava, ruce, nohy, ...) pomocí úpravy parametrů ovlivňující velikost stěn buňky (Relative Minimum Size a Relative Target Size) na okrajových podmínkách daných částí. Hodnoty parametrů definujících prismatickou vrstvu nebylo nutné

nijak lokálně upravovat, proto bylo u všech okrajových podmínek ponecháno výchozí nastavení pro celou síť, stejně jako u původní varianty.

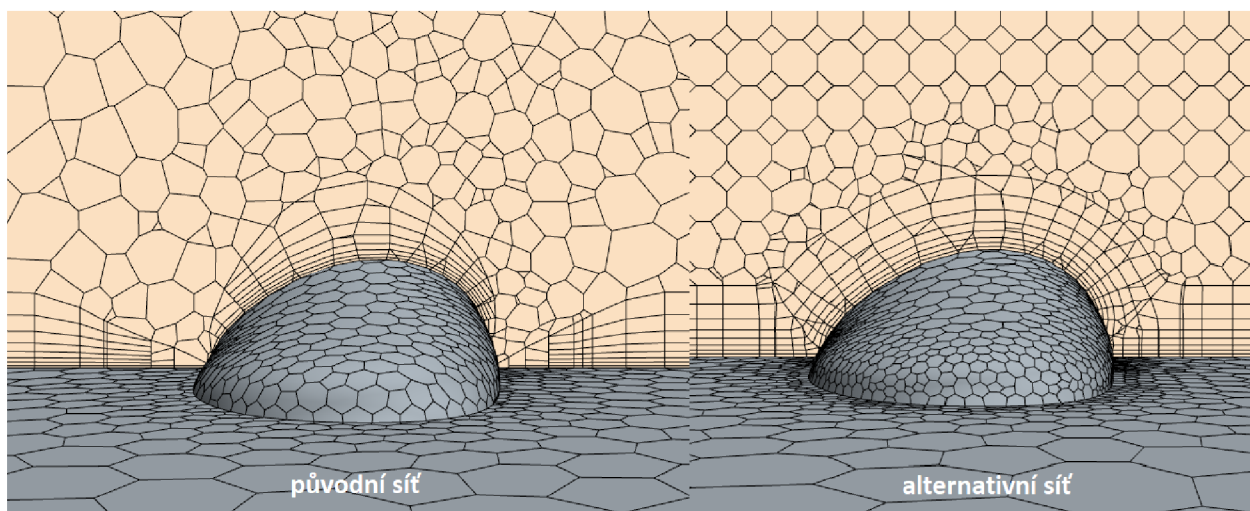
Druhou výraznou změnou v tvorbě alternativní výpočetní sítě bylo zakomponování lokálního zjemnění sítě v oblasti definované vlastním vytvořeným objemovým tělesem. To bylo uskutečněno pomocí funkce Volume Shapes (*Objemové Tvary*), pomocí které lze vytvořit řadu 3D těles, které mohou sloužit různým účelům při práci se sítí. Prostřednictvím této funkce byl vytvořen kvádr o rozměrech 1,2 x 0,8 x 1,5 m, který byl umístěn tak, aby obklopoval celý objekt manekýna. V sekci Continua - Mesh lze poté najít sekci Volumetric Controls (*Objemové řízení*), kde byl vytvořen nový Volumetric Control, byl přidán vytvořený kvádr a pro něj poté navoleny meshery, které má v konkrétním objemu program využít pro tvorbu sítě. Zvolen byl Advancing Layer Mesher. Dále zde došlo ke specifikaci velikosti buňky pomocí nastavení parametru Relative Size na 0,015 m (75 % z výchozí Base Size). Po dokončení tvorby sítě – tzv. meshování vznikla takto vypadající síť (Obr. 18.). Lokální zjemnění sítě kolem manekýna mělo být užitečné pro přesnější popis proudění vzduchu kolem manekýna a s tím spojený přenos tepla. Tato síť se skládá z 1 312 055 buněk, 8 020 337 stěn a 6 387 248 vertexů.



Obr. 18. Řez alternativní sítí využívající Advanced Layer Mesher a Volumetric Control

Pro ověření splnění jednoho z hlavních požadavků, za účelem kterého byla alternativní síť vytvářena (zlepšení rovnoměrnosti prismatické vrstvy na kritických částech sítě), byly porovnány segmenty rukou (prsty) a nohou (chodidla) alternativní a původní varianty sítě. Na obázku 19. jsou porovnány náhledy na řez sítě v místě pravého chodidla z alternativní a původní sítě. Při pohledu na tvar prismatické vrstvy obou sítí vidíme, že v alternativní síti

vrstva lépe kopíruje tvar chodidla v bočních částech, které přecházejí ve spodní část, která je v kontaktu s podlahou. Krajiní části nejsou pro proudění sice tolik důležité jako vrchní část, která je pokryta dobře v obou sítích, ale i tak lze usoudit, že kvalitnější síť v této části je síť alternativní. Na prstech bylo také pozorovatelné lehké zlepšení v pokrytí prismatickou vrstvou, ale zdaleka ne takto markantní jako u chodidel. Problém je, že mezi prsty by muselo dojít k takovému zmenšení celé prismatické vrstvy, aby mezi nimi mesher dokázal vygenerovat prismatickou vrstvu jednoho prstu, standardní buňky a ještě druhou prismatickou vrstvu. To by vyžadovalo výrazné zúžení prismatické vrstvy, které není optimální a navíc by to způsobilo zbytečné navýšení počtu buněk.



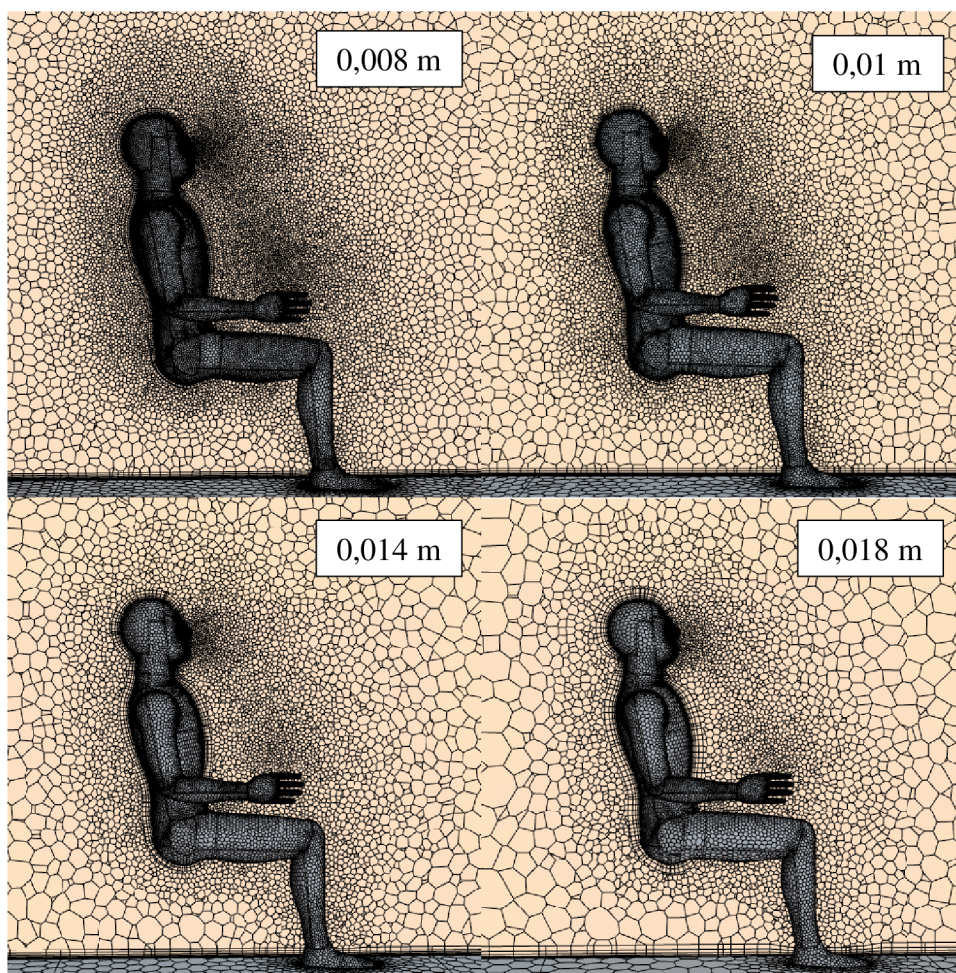
Obr. 19. Porovnání prismatické vrstvy kolem chodidel vytvořené v rámci původní a alternativní sítě.

5.2 Test nezávislosti sítě

Bylo řečeno, že síť rozděljuje skutečnou geometrii problému na buňky, na kterých potom probíhají výpočty řízené řešiči. Je tedy zřejmé, že proces převodu geometrie na síť zásadně ovlivňuje vstupní faktory pro výpočet. Přestože by měla být síť po vytvoření zkontrolována diagnostikou, která vyhodnotí, o kolik procent se změnil objem sítě vůči objemu výchozí geometrie, ne vždy je tím zajištěno, že převod nebude mít vliv na výpočet. Proto je u složitějších geometrií zvykem provádět tzv. test nezávislosti sítě, který má odhalit případný vliv nastavení parametrů sítě na výsledky simulace. V rámci podložení výsledků byl tedy proveden test nezávislosti sítě.

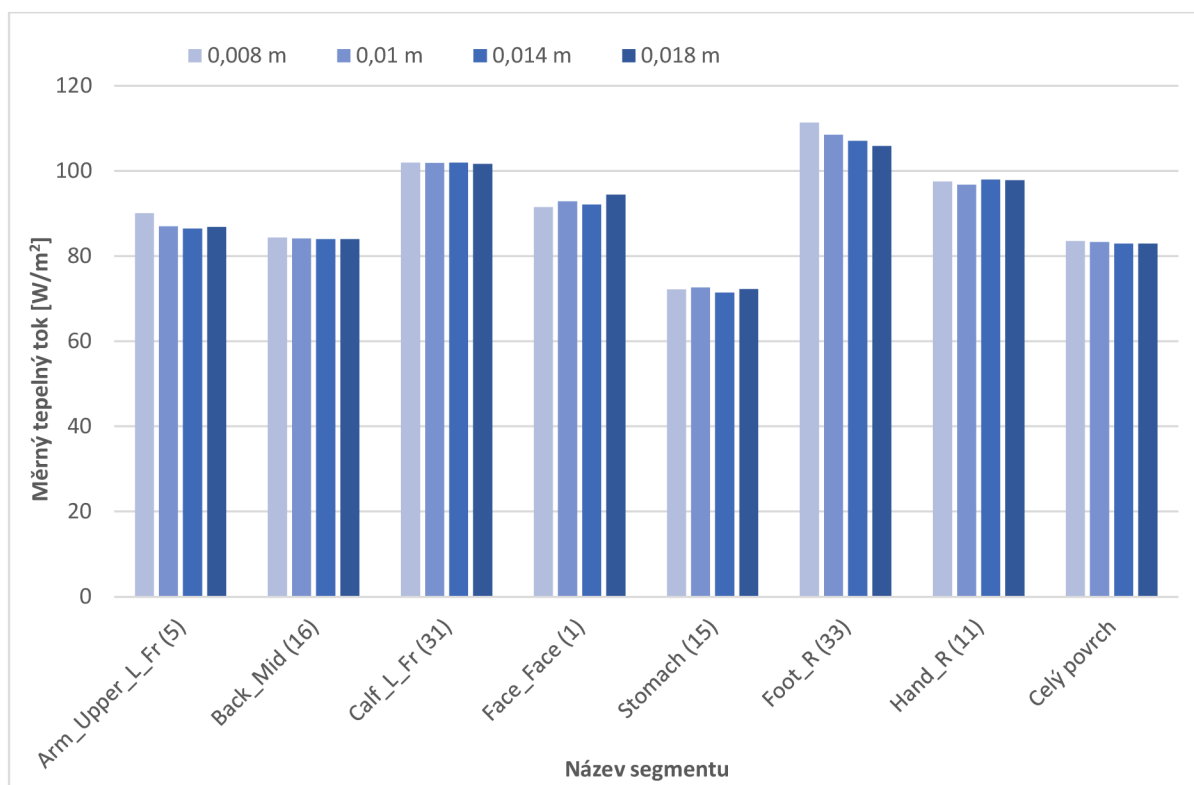
Navržený test nezávislosti sítě po dohodě s konzultantem práce Jakubem Elcnerem představuje vytvoření dalších tří sítí s rozdílně nastavenou hodnotou Base Size, jakožto základního kritéria velikosti vytvořených buněk. Je nutné dodat, že test nezávislosti sítě byl zhotovován až ve finální fázi tvorby simulace, když byla na základě testovacího simulování vybrána finální kombinace sítě, nastavení fyzikálních modelů a okrajových podmínek. Test nezávislosti je tedy proveden pro původní síť, která vyšla z dalšího testování popsaného v následujících kapitolách jako nejpřesnější. Navržené hodnoty Base Size byly: 0,008 m, 0,014 m a 0,018 m. Důležité bylo také upravení poměru tzv. radiačních Patchů ku plochám povrchu,

kteří se účastní radiace (vysvětleno v další kapitole), tak, aby se vždy celkový počet Patchů rovnal pro všechny testovací sítě. Test je proveden pro případ experimentu Ing. Fojtlína – měření s nahým manekýnem. Pro výpočet bylo ponecháno nastavení fyzikálních modelů, okrajových podmínek a dalších faktorů simulace, které jsou součástí finální varianty simulace a jejich volbu a testování lze najít v kapitole 7. Na obrázku 20. jsou zobrazeny řezy testovacími sítěmi v místě tepelného manekýna.



Obr. 20. Náhled na řezy sítě s uvedenými hodnotami Base Size.

Po provedení a ustálení výpočtů byly vyhodnoceny výsledné měrné tepelné toky z jednotlivých částí tepelného manekýna a byly porovnány změny, které v nich nastaly. Bylo by příliš obsáhlé a zbytečné uvádět porovnání každého segmentu, proto byly zvoleny reprezentativní segmenty pro každou část lidského těla, které budou představovat změny v oblastech, ve kterých se nacházejí. Hlavním faktorem pro porovnání sítě bude celkový měrný tepelný tok z celého povrchu manekýna. Vyhodnocené měrné tepelné toky pro jednotlivé varianty sítě dle zvolené velikosti Base Size (0,008, 0,01, 0,014 a 0,018) jsou zachyceny v grafu na obrázku 21..



Obr. 21. Porovnání hodnot měrných tepelných toků ze zvolených referenčních segmentů manekýna pro sítě s uvedenými velikostmi Base Size v rámci testu nezávislosti sítě.

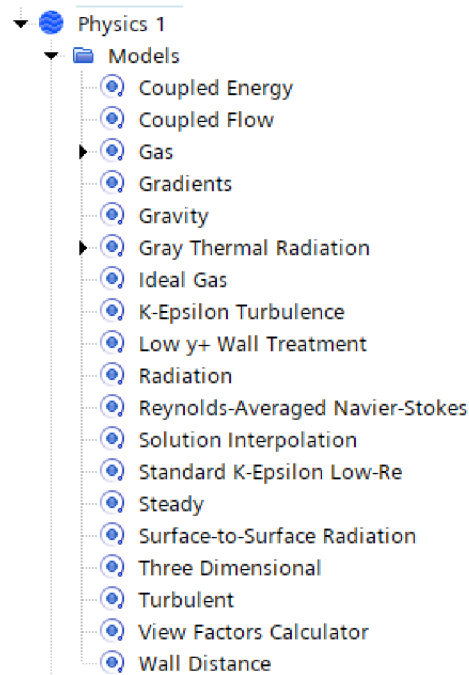
Z výsledných hodnot měrných tepelných toků lze vyvodit, že pro většinu segmentů neexistuje žádný jednoznačný trend, dle kterého by se hodnoty výrazně měnily. Měrné tepelné toky z většiny segmentů se pro všechny varianty nastavení Base Size nemění o více než 1 W/m^2 , což je akceptovatelné rozpětí pro tuto veličinu. Největší rozdíl v hodnotách měrných tepelných toků napříč testovacími sítěmi lze pozorovat na segmentech chodidel (cca 6 W/m^2), kde je zdrojem změn nejspíše charakter přístěnné mezní vrstvy, u které byly pozorovány lehké změny tvaru. Vliv kvality přístěnné mezní vrstvy je nepopíratelně nejdůležitějším aspektem, který ovlivňuje výsledné tepelné toky z manekýna. Proto bylo po prvním provedeném testu nezávislosti sítě, kde byla tloušťka vrstvy nastavena pevně na hodnotu $0,025 \text{ m}$ pro všechny sítě, nastavena relativně k Base Size, tudíž se měnila dle ní a bylo tak možné pozorovat i vliv změn přístěnné mezní vrstvy.

Na základě výsledků a srovnání celkového měrného tepelného toku z manekýna bylo možné vytvořenou původní sítí (Base Size = $0,01 \text{ m}$) prohlásit za dostatečně jemnou a nezávislou. Jako pomůcka k určení nezávislosti sítě sloužily i experimentální hodnoty měrných tepelných toků z měření Ing. Fojtlína, které budou uvedeny a použity v dalších částech práce. Tyto hodnoty napomohly ke srovnávání s hodnotami ze simulace pro ověření, zda se pro určitou sítí jednotlivé tepelné toky neodchylují příliš od reálných naměřených hodnot.

6 Volba fyzikálních modelů

Velice důležitou částí simulovaného problému je tzv. fyzikální kontinuum, které reprezentuje simulovanou látku (tekutinu nebo pevné těleso), jejíž chování chceme v rámci simulace popisovat a sledovat. V Star-CCM+ je kontinuum interpretováno jako soubor modelů, které představují jednotlivé fyzikální zákony. Tyto modely jsou aktivovány v rámci nastavení kontinua a určují například zda je kontinuum trojrozměrné nebo dvojrozměrné, zda je tvořeno pevnou látkou, kapalinou či plynem, zda je jeho chování závislé na čase atd. Jedná se o základní modely definující kontinuum z fyzikálního hlediska. Některé z modelů zaměřených na specifický fyzikální fenomén mohou následně vyžadovat volbu dalších modelů nutných pro přesné definování fyziky kontinua (např. model plyn/kapalina → model proudění → model turbulence). Mimo volby fyzikálních modelů je v rámci nastavení fyziky kontinua možné také zadat Vstupní podmínky (*Initial conditions*) a Referenční hodnoty (*Reference values*), které se ke kontinuu vztahují a je často nutné je stanovit pro správný průběh následného výpočtu [20].

V rámci tvorby simulace výchozího případu (Ing. Fojtlín – měření s nahým manekýnem) byly zvoleny následující fyzikální modely (Obr. 22.). Tyto modely byly ponechány i pro tvorbu dalších simulací, pouze byly nastavovány hodnoty fyzikálních veličin u okrajových podmínek dle použitého oblečení nebo pokrytí manekýna (Al folie). Modely byly postupně voleny od volby trojrozměrného řešení, dále byl vybrán model Steady, který je používán pro časově ustálené stavy, tedy stavy, kdy jsou řešené rovnice upraveny tak, že jsou nezávislé na čase. Potom byl zvolen typ kontinua Gas (*Plyn*) a na základě poznatků nastudovaných v [21] a [22] byl zvolen model Coupled Flow, který je pro simulování přenosu tepla, kde hraje významnou roli přirozená konvekce, robustnější a přesnější, je však náročnější na výpočetní výkon.



Obr. 22. Zvolené modely fyziky.

Model Coupled Flow je řešič, který řeší rovnice zachování kontinuity, hybnosti a energie jako spojenou soustavu, ne zvláště jako Segregated Flow [20]. Jako model popisující stavovou rovnici plynu byl následně zvolen Ideal Gas, který používá zákon ideálního plynu pro určení hustoty plynu jako funkce teploty a tlaku [20]. Tento model byl zvolen na základě poznatků z [23], kde bylo také popsáno jako možné ponechat plyn nastavený jako stlačitelný, což bylo učiněno. Pro model Gas byl dále zvolen předdefinovaný materiál Air (*Vzduch*), kde jsou definovány fyzikální veličiny popisující tento typ kontinua (molární hmotnost, dynamická viskozita, tepelná vodivost atd.).

Dalším důležitým zvoleným modelem je model Turbulence, který zajistí, že v simulovaném kontinuu bude moct probíhat turbulentní proudění. Automaticky přidáním řešičem pro výpočet turbulentního proudění je model RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Navazujícím řešičem pro turbulentní proudění je K-Epsilon model, konkrétně Standart K-Epsilon Low-Re, který je dle [24] běžně používaným modelem pro proudění s nízkým Reynoldsovým číslem, což naše případy jsou (způsobeno hlavně nízkými rychlostmi proudění). Následně automatický model All y^+ Wall Treatment byl změněn na Low Wall y^+ Treatment, a to z důvodu zvolení Low Wall y^+ přístupu pro ošetření přístěnné mezní vrstvy (blíže popsáno v kapitole 5.1.1).

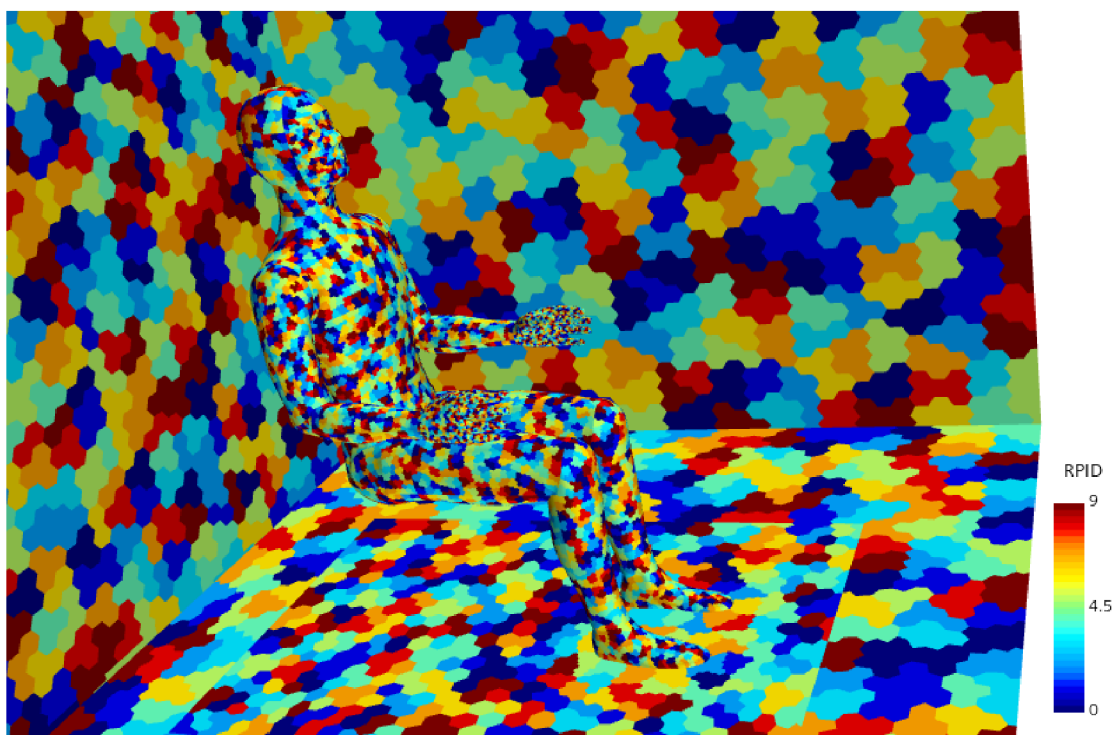
Z kategorie dalších přidavných modelů byl vybrán model Gravity, který je důležitý pro zaimplementování gravitačních sil, které ovlivňují proudění způsobené přirozenou konvekcí. Protože v rámci simulace je žádoucí nastavit i přenos tepla radiací, byl zvolen model Radiation, který následně automaticky nabídl možnost zvolení submodelu řešící přenos tepla radiací. Na základě charakteru simulovaného problému a informací zjištěných v [25] byly zvoleny modely Surface-to-Surface Radiation a Gray Thermal Radiation. V návaznosti na to bylo nutné přidat hodnotu radiační teploty kontinua, jež je shodná s výchozí teplotou kontinua (vzduchu) v prostoru boxu, tedy 24 °C, a nastavit radiační teploty pro každý z povrchů účastnících se výměny tepla radiací, což je popsáno v kapitolách komentujících tvorbu daných případů.

Mezi hodnoty Referenčních hodnot byl ve vlastnostech kontinua přidán atmosférický tlak 101 325 Pa (pro podmínky 0 m. n. m. a 15 °C) a hodnota gravitačního zrychlení 9,81 m/s², ostatní hodnoty byly ponechány na výchozím stavu. Ve složce Iničiační podmínky byla upravena Static Temperature (*Statická teplota*) na vstupní hodnotu teploty vzduchu v boxu před začátkem experimentu, tedy 24 °C, a byla nastavena vstupní rychlost kontinua v boxu na 0,1 m/s směrem svisle nahoru, a to z důvodu usnadnění průběhu výpočtu, kdy řešitel lépe začíná výpočet, když mezi hodnotami vstupní rychlosti není jen 0 m/s.

6.1 Nastavení přenosu tepla radiací

Pro zajištění správné funkce přenosu tepla radiací nestačí pouhé zvolení fyzikálních modelů sloužících k simulaci radiace. Výše uvedené zvolené modely zohledňující vzájemnou radiaci mezi povrchy Surface-to-Surface Radiation (dále S2S) a Gray Thermal Radiation jsou založeny na metodě využívající výpočet tzv. View factors (lze volně přeložit jako *Úhlové faktory*). Tyto faktory slouží k zohlednění orientace ploch účastnících se výměny tepla radiací vůči sobě. Model S2S využívá k vyhodnocování těchto faktorů vygenerované plochy, které nazýváme Patches (lze přeložit jako *nálepky, záplaty*). Na těchto Patches jsou vytvářeny paprsky (*Beams*), pomocí kterých model vyhodnocuje úhlové faktory. Počet paprsků na jeden Patch ovlivňuje přesnost a dobu výpočtu úhlových faktorů. Výchozí hodnota počtu paprsků (*Number of Beams*) na jeden Patch je 1024, ale tato hodnota byla dle [25] snížena na polovičních 512, a to především z důvodu snížení doby na provedení iterace, která byla po snížení cca o polovinu kratší. Pořád se však jedná o dostatečný počet k zajištění požadované přesnosti výpočtu úhlových faktorů [20].

Radiační Patches jsou generovány na vytvořené objemové síti v závislosti na poměru Patch/Face Proportion, který udává procentuální pokrytí stěn (Faces) na povrchu objektů účastnících se radiace radiálními Patches. Výchozí nastavení Patch/Face je 100 %, tedy stav, kdy každá stěna je pokryta jedním Patchem. Takovým způsobem vygenerované Patches však významně prodlužují dobu výpočtu a pro většinu aplikací postačí nastavení Patch/Face na 20 %, jak bylo uvedeno v [26]. Po nastavení počtu paprsků a poměru Patch/Face byla vytvořena skalární scéna (viz Obr. 23.), ve které bylo nastaveno rozlišení vytvořené funkce RPID tak, aby každý Patch byl na malých oblastech vyobrazen různými barvami tak, aby šly rozlišit hranice mezi jednotlivými Patches. Po vygenerování vyšel výsledný počet Patchů na 12 887.



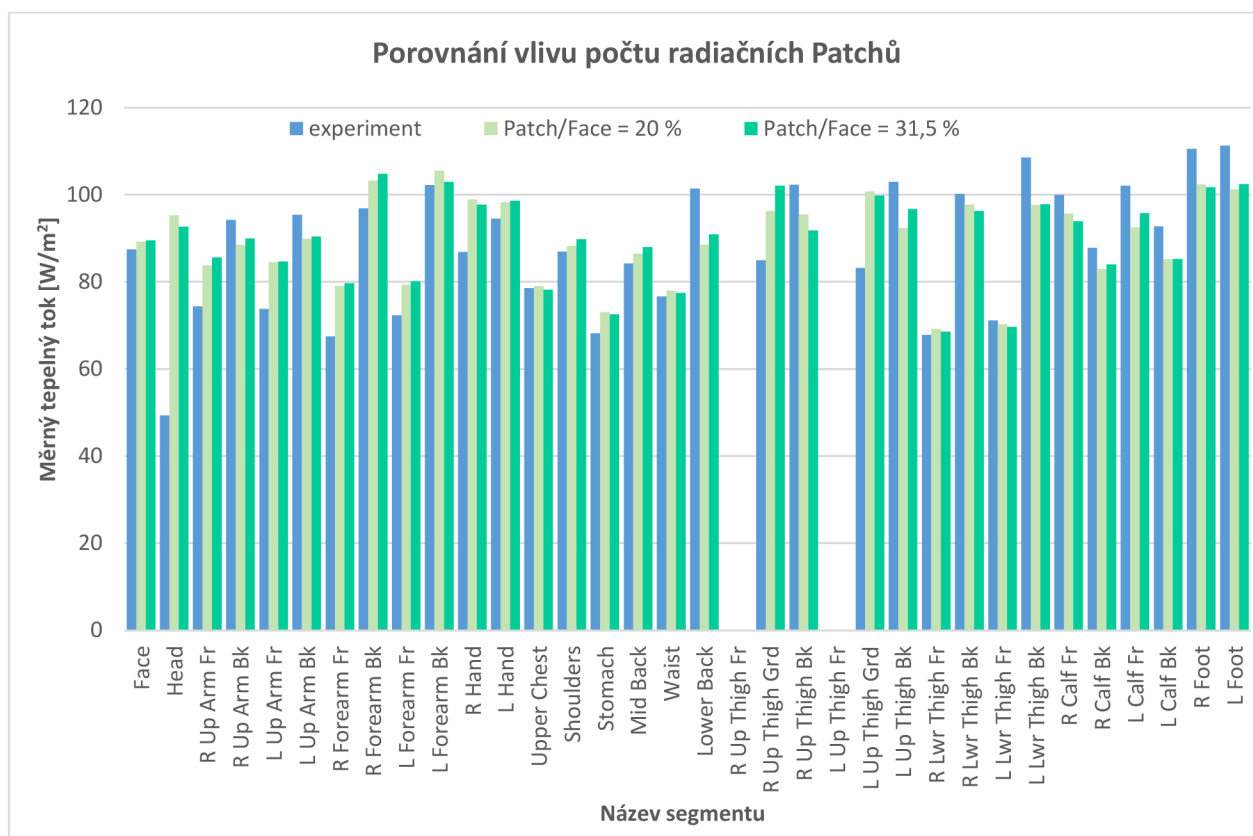
Obr. 23. Skalární scéna zachycující vygenerované radiální Patche.

6.1.1 Test nezávislosti počtu radiálních Patchů

Je zřejmé, že počet Patchů může ovlivnit přenos tepla radiací, protože nedostatečně jemné pokrytí by mohlo způsobit nepřesnosti v tepelném toku radiací mezi povrchem manekýna a stěnami boxu. Z toho důvodu bylo po konzultaci s konzultantem a na základě informací z [26] navrženo provést test nezávislosti počtu radiálních Patchů, který měl případný vliv na měrné tepelné toky z povrchu manekýna odhalit.

Pro účely testu nezávislosti počtu radiálních Patchů byla využita alternativní síť z kapitoly 5.1.2, protože s ní bylo v době vytváření testu pracováno a zároveň bylo výhodné provést test na ní, neboť tato síť byla využita i pro další testování jiných vlivů, které budou popsány v dalších částech. Pro spuštění testu bylo nutné nastavit typy okrajových podmínek a zadat požadované vstupní hodnoty, což je popsáno v kapitolách komentující simulované případy. Test byl prováděn opět na případu Ing. Fojtlína – měření s nahým manekýnem, varianta se zadní stěnou boxu nastavenou jako Wall (Stěna). Pro jeden testovací model byl

poměr Patch/Face ponechán na hodnotě 20 % (8 309 Patchů). Druhý případ obsahoval nastavení Patch/Face na 31,5 % (12 620 Patchů), a to z důvodu zachování počtu Patchů na hodnotě blízké pro původní síť při Patch/Face = 20 % pro porovnávání jiných vlivů při dalším testování. Na grafu na obrázku 24. lze vidět porovnání měrných tepelných toků z jednotlivých segmentů manekýna pro oba testovací modely a pro skutečné hodnoty měrných tepelných toků zjištěné experimentálně.



Obr. 24. Graf měrných tepelných toků ze segmentů manekýna pro testovací modely použité pro zjištění vlivu počtu radiačních Patchů.

Na základě výsledných hodnot měrných tepelných toků byl vyhodnocen vliv radiačních patchů při uvedeném nastavení poměru Patch/Face za zanedbatelný. Neexistuje žádný jednoznačný trend vývoje nepřesnosti v datech při navýšení poměru a rozdíly mezi hodnotami pro většinu segmentů se pohybují maximálně v rozmezí 1 až 2 W/m². Proto byl po provedení testu stanoven poměr Patch/Face = 20 % za dostatečný i pro původní variantu sítě. Rozdíl mezi experimentálními a simulačními hodnotami měrného tepelného toku u segmentu hlavy je způsoben absencí tepelného odporu vlasů, který ještě nebyl v době testování přidán z důvodu hledání řešení nastavení okrajové podmínky Convection.

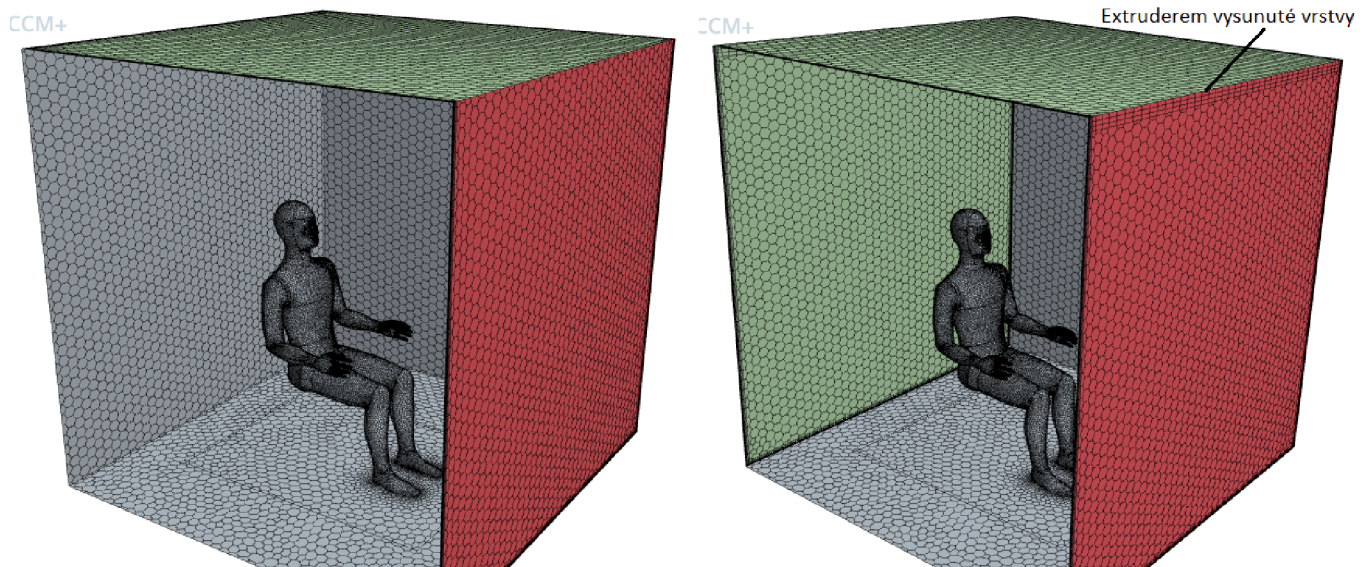
7 Simulace experimentu Ing. Fojtlína

Základem pro tvorbu simulačních modelů byl experiment Ing. Miloše Fojtlína, jehož měření součinitelů přestupu tepla z nahého manekýna sloužilo jako výchozí případ pro tvorbu všech simulačních modelů. Podrobný popis experimentu lze nalézt v kapitole 3.1. V této kapitole bude postupně uvedeno nastavení okrajových podmínek pro oba simulované případy – měření s nahým manekýnem a měření s manekýnem potaženým Al folií pro minimalizaci radiace. Dále budou pro model měření s nahým manekýnem uvedeny další testy, které proběhly v rámci hledání optimální kombinace použitých typů okrajových podmínek a následně budou srovnány hlavní vytvořené varianty simulace a uveden výběr nejpresnější varianty, která bude použita pro simulaci ostatních případů. V závěru budou uvedeny výpočty výsledných součinitelů přestupu tepla včetně komentáře.

7.1 Nastavení okrajových podmínek

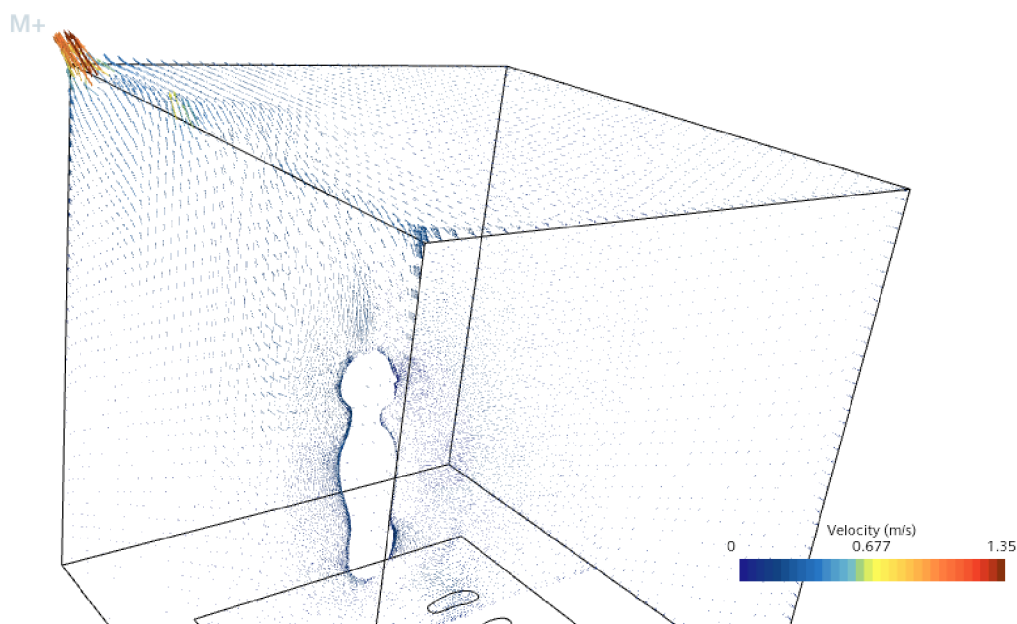
Po vytvoření sítě a nastavení fyzikálních modelů pokračovala práce na konkrétním nastavení okrajových podmínek, kde bylo třeba zvolit typ a následně zadat vstupní fyzikální hodnoty dle dat z provedeného experimentu. Pro všechny okrajové podmínky povrchů (povrch manekýna, stěny boxu) byl nastaven typ okrajové podmínky jako Wall (*Stěna*). Výjimku tvoří čelní stěna kalibračního boxu, kterou při měření proudila většina vzduchu přiváděného do prostoru boxu, proto byla tato okrajová podmínka nastavena jako Inlet (*Vstup*) a byl v jejích fyzikálních vlastnostech nastaven rychlost proudění na konstantních 0,1 m/s. Z experimentu nelze určit jednoznačně průtoky vzduchu vstupujícího a vystupujícího z boxu, proto byl nastaven Vstup dle naměřených hodnot rychlosti proudění před čelní stěnou, které jsou v souladu s normou předepsanými hodnotami (viz kapitola 3.1).

Z experimentu je zřejmé, že většina vzduchu vystupujícího z boxu proudila stropem boxu, kam byl v průběhu experimentu přidán i otvor na zlepšení proudění a tepelné výměny. Proto byl za typ okrajové podmínky stropu zvolen typ Pressure Outlet (*Tlakový výstup*), který je běžně používaným typem pro tyto aplikace. V průběhu testovacích simulací se však po nastavení všech vstupních hodnot objevil problém s rychlostním polem v prostoru boxu, kdy se kolem manekýna tvořilo nepřírozené rychlostní spektrum, a také nastala výrazná cirkulace vzduchu v prostoru za manekýnem. Proto byla okrajová podmínka změněna na Outlet (*Výstup*). Část vzduchu také nejspíše procházela zadní stěnou boxu (stěnou za manekýnem), protože však nebylo prováděno žádné měření průtoku, nelze určit jaké množství. Proto byl navržen postup, ve kterém se otestuje několik kombinací nastavení okrajové podmínky zadní stěny a na základě porovnání měrných tepelných toků ze segmentů manekýna bude zvolena varianta, která se bude nejvíce blížit naměřeným hodnotám. Při nastavení zadní stěny jako Outlet automaticky vznikne u okrajových podmínek nastavitelný parametr Split ratio (*Dělicí poměr*), jehož hodnota určuje, jaké množství vzduchu odchází daným Outletem. Tento poměr není z experimentu znám, proto byly navrženy 3 varianty (zadní stěna:strop): 1:1, 0,33:1 a 0,1:1. Průběh a výsledky testování jsou uvedeny v následující podkapitole 7.2.1. Na obrázku 25. lze vidět 2 hlavní varianty nastavení okrajové podmínky zadní stěny – jednou jako Wall, podruhé jako Outlet.



Obr. 25. Pohled na síť pro 2 hlavní varianty nastavení typu okrajové podmínky zadní stěny. Nalevo jako Wall, napravo jako Outlet.

Při použití dvou Outletů bylo pro okrajovou podmínku popisující stropní část boxu bylo nutné zavést tzv. Extruder, což je model tvorby sítě, který umožní vysunutí určité okrajové podmínky o určitou vzdálenost. Bylo tedy pro strop nastaveno vysunutí okrajové podmínky o 0,05 m směrem ven z boxu s použitím 3 vrstev. Toto vysunutí sloužilo pro eliminaci problému s rozhraním Outletů, kde docházelo k nereálnému zvýšení rychlosti proudění vzduchu (viz Obr. 26.). Přidání Extruderu však tento problém vyřešilo. Tři vrstvy vysunuté ze stropu pomocí Extruderu lze vidět na obrázku 25..



Obr. 26. Vektorová scéna rychlostí s řezem vedeným středem manekýna a viditelným zvýšením rychlosti v rohu boxu v důsledku styku dvou Outletů.

7.1.1 Nastavení parametrů okrajových podmínek pro přenos tepla

Z pohledu fyzikálních parametrů byly pro okrajové podmínky stěn kalibračního boxu definovány zásadní veličiny pro přenos tepla – radiační teplota (24 °C), tedy teplota, která vstupuje do výpočtu radiačního tepelného toku a dále emisivita, reflektivita a transmisivita povrchu, kdy je emisivita nastavena na 1 (v experimentu je uvedeno, že tmavě černá tkanina byla zvolena z důvodu její emisivity blízké 1, viz kapitola 3.1). Transmisivita byla zvolena nulová a reflektivita se automaticky dopočítala taktéž na 0 dle 1. Kirchhoffova zákona. Pro stěny, jejichž typ je definován jako Wall (levá a pravá stěna, obě části podlahy) byl zvolen i typ teplotní okrajové podmínky Thermal Specification (*Tepelná specifikace*) Temperature (*Teplota*), který umožní, aby se okrajová podmínka účastnila tepelné výměny konvekcí pomocí definované Static Temperature (*Statická teplota*), představující povrchovou teplotu stěn boxu, která je shodná s teplotou vzduchu v boxu, tedy 24 °C.

Teplotní okrajové podmínky definující segmenty manekýna byly pro simulaci měření s nahým manekýnem nastaveny jako typ Temperature, což umožní zadat povrchovou teplotu pro každý segment Static Temperature. Tato teplota nastavená na 34 °C pro všechny segmenty kromě rozdělených segmenty obličejů a hlavy, které jsou pokryty vlasy, je hlavním parametrem vstupujícím do přenosu tepla konvekcí. Segmenty hlavy a obličejů jsou v simulaci rozděleny, protože je při experimentu částečně pokrývaly vlasy. Vznikly tak dvojice segmentů Face_Hair_1, Face_Face_1 a Head_Hair_2 a Head_Skin-and-neck_2, kde je každá část definovaná vlastní okrajovou podmínkou.

Okrajové podmínky částí, které jsou pokryty vlasy, mají typ teplotní okrajové podmínky Thermal Specification nastavený na Convection (*Konvekce*), a to proto, že u typu Temperature nelze nastavit na okrajovou podmínku tepelný odpor vlasů, který bylo nutné na povrch manekýna nastavit, aby byla přítomnost vlasů simulována. Teplotní okrajová podmínka typu Convection umožňuje simulovat přenos tepla na vnější straně stěn, obklopujících výpočetní doménu. Toho bylo využito při zohlednění pokrývky hlavy (vlasů), ale také oděvu pro následující simulaci případů Ing. Hrubanové. Při použití této podmínky je nutné splnit rovnici rovnováhy tepelných toků, které procházejí přes danou okrajovou podmínku:

$$q_{conv,ext} = q_{cond} = q_{conv} \quad (7.1)$$

neboli

$$h_{\infty} \cdot (T_{\infty} - T_{surf,ext}) = h_{\infty} \cdot (T_{surf,ext} - T_{surf})/R_{cl} = h_c \cdot (T_c - T_{surf}) \quad (7.2)$$

kde h_{∞} je součinitel přestupu tepla konvekcí na vnější straně povrchu, T_{∞} je teplota okolí na vnější straně okrajové podmínky, $T_{surf,ext}$ je teplota povrchu na vnější straně výpočetní domény, T_{surf} – teplota povrchu, který představuje okrajovou podmínku řešené domény, R_{cl} – tepelný odpor oděvu/pokrývky hlavy, h_c – součinitel přestupu tepla počítaný v rámci simulace, T_c – teplota okolí počítaná v rámci simulace. Aby bylo možné výše uvedené rovnice splnit, je nutné programu zadat hodnoty h_{∞} , T_{∞} a R_{cl} . Hodnoty h_c , T_c , $T_{surf,ext}$ a T_{surf} jsou vypočteny řešičem v rámci numerické simulace.

Vzhledem k našemu případu, kdy teplotní okrajová podmínka byla aplikována na povrch tepelného manekýna, který byl při experimentu vyhříván na konstantní teplotu 34 °C a uvnitř manekýna nedochází k přenosu tepla konvekcí, je nutné výše uvedené hodnoty zadat s ohledem na tuto skutečnost. Naším cílem je, aby T_{surf} , odpovídající v reálu teplotě povrchu manekýna dosahovala hodnoty 34 °C. Toho docílíme tak, že definujeme hodnotu $T_{\infty} = 34$ °C a minimalizujeme rozdíl teplot ($T_{\infty} - T_{surf,ext}$) u rovnice pro $q_{conv,ext}$. Toho docílíme maximální možnou hodnotou součinitele přestupu tepla na vnější straně h_{∞} . Maximální hodnota, kterou lze v programu předepsat je cca 1.10^{300} W/m², což je dostatečně vysoká hodnota pro splnění minimalizace teplotního rozdílu popsaného výše. Parametr Thermal Resistance (*Tepelný odpor*), tedy R_{cl} bylo poté možné nastavit na 0,089 m²K/W, což je tepelný odpor použitých vlasů, který naměřila Ing. Hrubanová ve své diplomové práci [4].

V modelu simulace případu s nahým manekýnem byla nastavena emisivita povrchu všech segmentů na 0,98 dle informací z diplomové práce Ing. Pavlíka [28], transmisivita ponechána na 0 a dopočítaná reflektivita potom 0,02. Pro druhý simulovaný případ Ing. Fojtlína – měření s manekýnem potaženým hliníkovou folií – byl rozdíl pouze v nastavení emisivity povrchu segmentů manekýna. U všech částí kromě rukou, které byly dle Ing. Fojtlína příliš tvarově složité na přesné obalení folií, byla zadána emisivita povrchu na 0,025 (dle [3]), transmisivita na 0 a automaticky dopočítaná reflektivita vyšla 0,975.

7.2 Testování simulačních modelů

Při procesu hledání optimální kombinace nastavení typů okrajových podmínek a použité výpočetní sítě byly vytvořeny následující varianty simulačních modelů, které byly simulovány:

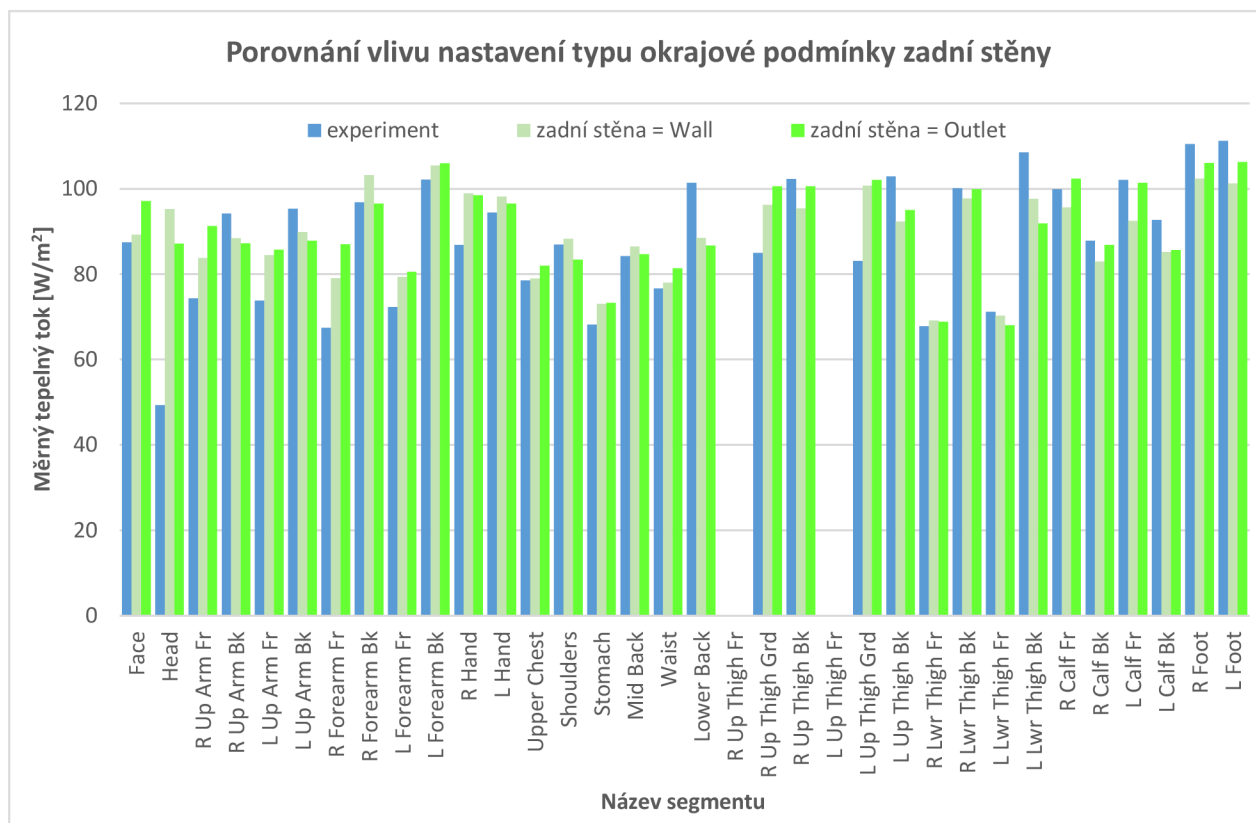
- Původní síť, zadní stěna = Outlet, Split Ratio 1:1, Patch/Face = 20 %,
- Původní síť, zadní stěna = Outlet, Split Ratio 0,33:1, Patch/Face = 20 %,
- Původní síť, zadní stěna = Outlet, Split Ratio 0,1:1, Patch/Face = 20 %,
- Původní síť, zadní stěna = Wall, Patch/Face = 20 %,
- Alternativní síť, zadní stěna = Wall, Patch/Face = 20 %,
- Alternativní síť, zadní stěna = Wall, Patch/Face = 31,5 %,
- Alternativní síť, zadní stěna = Outlet, Split Ratio 1:1, Patch/Face = 20 %.

Alternativní síť byla využita pro ověření vlivu počtu radiálních Patchů, což bylo okomentováno v kapitole 6.1.1. Dále bylo s použitím alternativní sítě provedeno testování vlivu nastavení typu okrajové podmínky zadní stěny, který je popsán v následující podkapitole. A také bylo uskutečněno testování vlivu nastavení Split Ratio při použití sítě se dvěma Outlety za pomoci původní sítě (kapitola 7.2.2).

7.2.1 Test vlivu nastavení typu okrajové podmínky zadní stěny

Jelikož nebylo možné na základě dostupných informací z měření jednoznačně určit, zda bude z hlediska tvorby simulačního modelu přenosu tepla z tepelného manekýna v kalibračním boxu přesnější nastavit zadní stěnu boxu jako Wall nebo Outlet, byl proveden test, který měl stanovit, při použití jakého typů okrajové podmínky se výsledky simulace více blíží reálně naměřeným

hodnotám. Pro srovnání experimentu a simulace bude opět použito měrných tepelných toků ze segmentů manekýna. Test byl proveden na alternativní výpočetní síti. U obou variant byl parametr Patch/Face ponechán na 20 % a u varianty se zadní stěnou jako Outletem byl ponechán parametr Split Ratio na 1:1 (výchozí hodnota, která byla navíc na základě testu popsaného v další podkapitole vybrána jako finální). Na obrázku 27. jsou uvedeny srovnané hodnoty měrných tepelných toků naměřené při experimentu Ing. Fojtlína a hodnoty z obou testovacích variant.



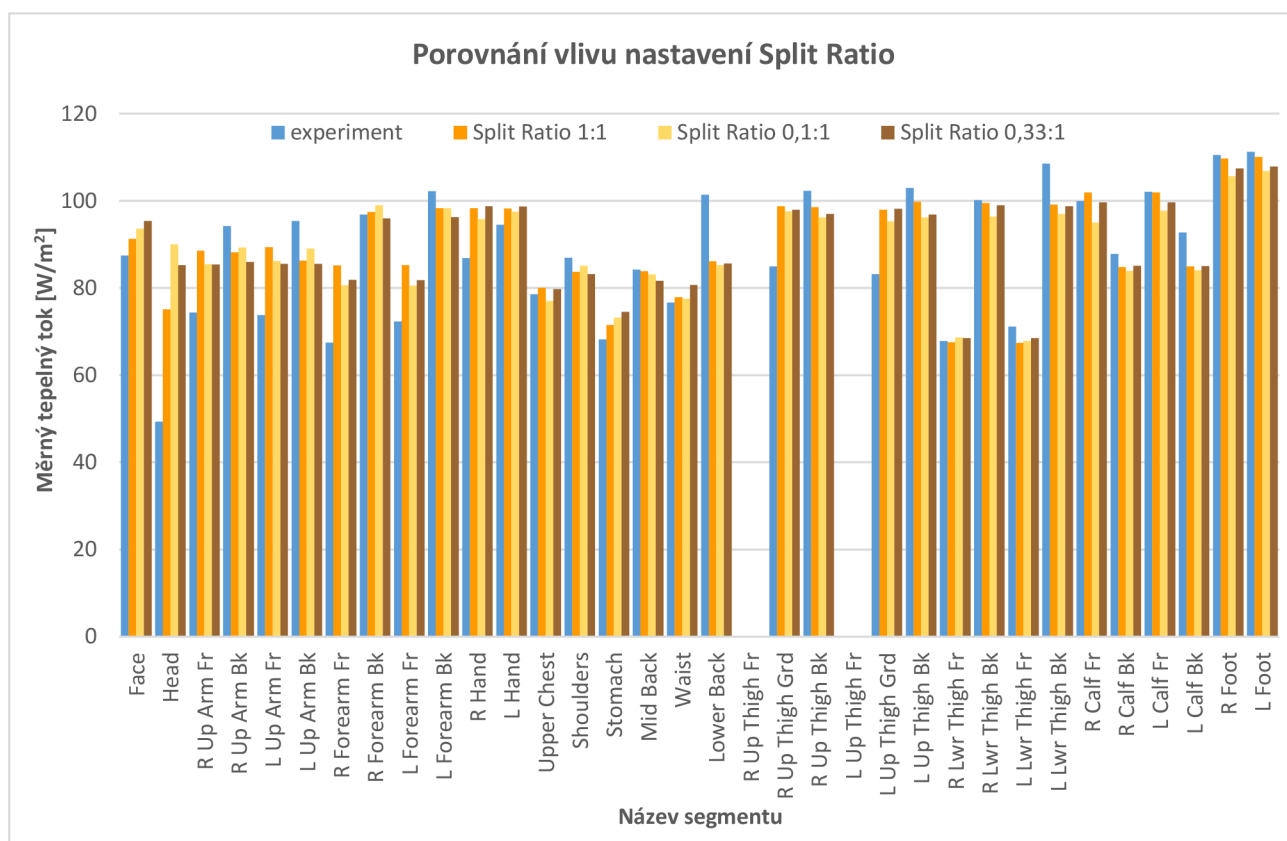
Obr. 27. Graf měrných tepelných toků ze segmentů manekýna pro testovací modely použité pro zjištění vlivu nastavení typu okrajové podmínky zadní stěny.

Uvedené výsledky naznačují, že mezi hodnotami obou variant nastavení typu okrajové podmínky zadní stěny nenastaly žádné jednoznačné rozdíly, na základě kterých by šlo prohlásit některou z variant za nevhodnou. Proto budou obě varianty zařazeny do závěrečného přesného porovnání na základě vypočtených odchylek (viz kapitola 7.2.4). Je nutné dodat, že rozdíl mezi experimentálními a simulačními hodnotami měrného tepelného toku u segmentu hlavy je způsoben absencí tepelného odporu vlasů, který ještě nebyl v době testování přidán z důvodu hledání řešení nastavení okrajové podmínky Convection.

7.2.2 Test vlivu nastavení Split Ratio

Varianta sítě se dvěma Outlety vyžaduje nastavení poměru vzduchu opouštějícího prostor boxu. Bylo již uvedeno dříve, že v rámci experimentu nebyl nijak monitorován průtok vzduchu vstupujícího do boxu ani vzduchu z boxu odcházejícího. Proto byly pouze na základě znalostí

o vznikajícím stoupavém proudění, které je způsobeno ohřevem vzduchu o tepelného manekýna v rámci přirozené konvekce, vytvořeny odhady, které tvoří základ pro navržené poměry odcházejícího vzduchu. Je zřejmé, že i vzhledem k přítomnosti otvoru ve stropní části boxu pro usnadnění proudění, bude větší část vzduchu odcházet stropem. Protože však přiváděný vzduch proudí do boxu přes čelní stěnu boxu o rychlosti max. 0,1 m/s, lze předpokládat i určité proudění vzduchu směrem od přední stěny boxu k zadní. Proto je možné, že i část vzduchu odchází skrz zadní stěnu. Aby bylo možné porovnat vliv nastavení Split Ratio, byly zvoleny tři již uvedené poměry. Poměr 1:1 jako výchozí nastavení znamená, že polovina odcházejícího vzduchu je odváděna stropem a druhá zadní stěnou. Poměr 0,33:1 znamená, že necelých 25 % vzduchu odchází zadní stěnou a zbytek stropem. Poměr 0,1:1 představuje situaci, kdy zadní stěnou odchází pouze cca 9% vzduchu a zbytek stropem. K porovnání vlivu slouží opět srovnání měrných tepelných toků ze segmentů manekýna vypočtených numerickou simulací, které lze vidět na obrázku 28..



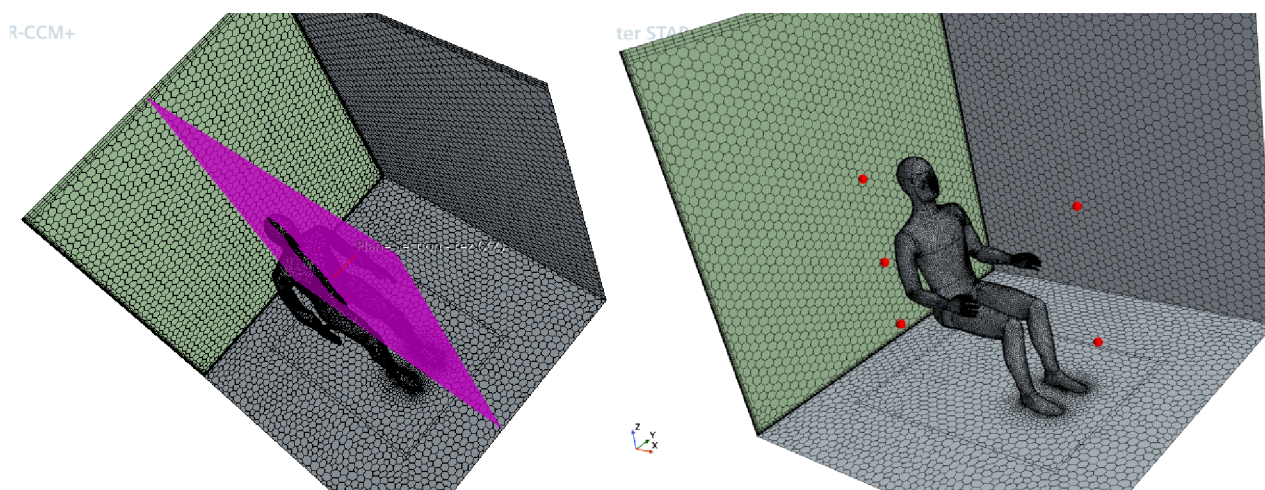
Obr. 28. Graf měrných tepelných toků ze segmentů manekýna pro porovnání vlivu nastavení Split Ratio.

Z rozdílu hodnot měrných tepelných toků z jednotlivých segmentů manekýna pro uvedené varianty Split Ratio lze tvrdit, že neexistuje jednoznačný trend vývoje měrného tepelného toku v závislosti na nastaveném poměru Split Ratio. Rozdíl mezi experimentálními a simulačními hodnotami měrného tepelného toku u segmentu hlavy je způsoben absencí tepelného odporu vlasů, který ještě nebyl v době testování přidán z důvodu hledání řešení nastavení okrajové podmínky Convection. Protože neexistuje dostatečný podklad pro zvolení

poměru, bylo rozhodnuto, že pro další postup bude ponecháno výchozí nastavení Split Ratio na 1:1. Zároveň u této varianty docházelo k nejvýraznější konvergenci residuí (vysvětleno v kapitole 7.2.4).

7.2.3 Příprava scén, monitorů a měřících bodů pro vyhodnocení výsledků

Aby bylo možné přesně sledovat průběh simulace a vypočítat výsledné součinitele přestupu tepla, proběhla v průběhu práce na vytváření simulačních modelů příprava scén, pomocí kterých byl sledován průběh rychlostí, teplot a dalších veličin, které bylo nutné sledovat. Některé z nich byly již uvedeny (např. skalární scéna pro sledování vývoje funkce Wall y^+ , scéna pro vyobrazení vytvořené výpočetní sítě). Pro sledování teplotního a rychlostního pole bylo kromě vytvoření scén nutné v sekci Derived Parts vytvořit roviny, které následně lze přidat do jednotlivých scén k vyobrazení sledované veličiny. Hlavní vytvořená rovina, které je použita ve většině scén pro zobrazení např. teplotního nebo rychlostního pole v prostoru boxu a kolem manekýna je rovina ve směru XZ, který tvoří řez středem manekýna (viz Obr. X.X).



Obr. 29. Řez vnitřním prostorem boxu v místě tepelného manekýna (rovina XZ) a vytvořené Probes pro sledování teploty a rychlosti proudění kolem manekýna.

Důležitým prvkem pro sledování průběhu rychlostí, ale především také teplot jsou tzv. Probes (Sondy), což jsou body, které lze vytvořit v sekci Derived Parts. V těchto bodech je možné si nechat vyhodnotit programem libovolnou veličinu pomocí už dříve zmiňovaného Reportu a dále pak sledovat vývoj sledované veličiny pro každou iteraci při postupném průběhu simulace, čehož lze docílit vytvořením tzv. Monitoru. Je nutné zmínit, že polohy vytvořených Probes nejsou náhodné, ale vycházejí z poloh, kam byly při měření umístěny sondy měřící teplotu nebo rychlost (viz kapitola 3.1). Kromě Monitoru vývoje teploty a rychlosti v uvedených bodech byly vytvořeny Reporty a následně Monitory zaznamenávající vývoj měrných tepelných toků již dříve uvedených referenčních segmentů manekýna, které sloužily pro sledování ustálení výpočtu při průběhu numerické simulace.

7.2.4 Výsledky testování a výběr finálního simulačního modelu

Všechny výše uvedené varianty byly nastaveny a byla spuštěna numerická simulace, která byla ukončena vždy po určitém počtu iterací v momentě, kdy bylo možné výpočet považovat za stabilizovaný. U většiny případů docházelo ke stabilizaci residuí kolem cca 600 – 1000 iterací, výpočet byl pozastaven po 4000 iteracích. Zjednodušeně řečeno residua vyjadřují míru chybovosti numerického řešení a jsou hlavním ukazatelem konvergence iterativního řešení. Naším cílem je u všech residuí jednotlivých veličin dosáhnout co nejvýraznější konvergence při co nejnižších hodnotách residuí. Čím nižší hodnota residua dané veličiny je, tím přesnější je naše numerické řešení [20].

Všechny simulované případy, jejichž výsledky jsou v rámci této práce považovány za validní, byly vždy upraveny a nastaveny tak, že průběh residuí vykazoval dostatečnou míru konvergence. Vysoká míra nestability výpočtu byla vždy důvodem k hledání problému a úpravě simulace. Dalším faktorem, který vyjadřuje stabilitu výpočtu, je sledování průběhu tepelných toků z referenčních segmentů manekýna pomocí Monitoru a také sledování průběhu teplot a rychlostí v okolí manekýna. Grafy průběhu residuí a průběhu sledovaných veličin není nutné uvádět pro všechny varianty, proto budou uvedeny při vyhodnocení výsledků pro finální simulaci.

Po ukončení simulace byla data měrných tepelných toků ze segmentů manekýna vždy vyhodnocena pomocí Reportu a přidána do tabulky v programu Excel. Po provedení testů na vlivy počtu radiálních Patchů a vlivu nastavení Split Ratio pro síť se dvěma Outlety, kde bylo stanoveno, že tyto parametry nemají významný vliv na výsledky simulace, byly zvoleny tyto varianty simulačních modelů, které budou podrobeny výslednému porovnání:

- Původní síť, zadní stěna = Outlet, Split Ratio 1:1, Patch/Face = 20 %,
- Původní síť, zadní stěna = Wall, Patch/Face = 20 %,
- Alternativní síť, zadní stěna = Wall, Patch/Face = 20 %,
- Alternativní síť, zadní stěna = Wall, Patch/Face = 31,5 %,
- Alternativní síť, zadní stěna = Outlet, Split Ratio 1:1, Patch/Face = 20 %.

Na základně porovnání odchylek měrných tepelných toků ze simulace od experimentálně určených bude následně vybrán nejpresnější model, který bude považován za výsledný a stanoví základ pro tvorbu dalších případů. Jelikož segmentů je mnoho a při srovnání hodnot měrných tepelných toků různých variant s experimentálními daty nebylo možné jednoznačně určit nejpresnější variantu, bylo nutné využít vypočtení tzv. absolutní a relativní chyby (odchylky). Pro hodnotu měrného tepelného toku z každého segmentu manekýna byla stanovena absolutní odchylka Δ [-] a relativní odchylka δ [-] dle rovnic 7.3 a 7.4 [29].

$$\Delta = |A - a| \quad (7.3)$$

$$\delta = \frac{\Delta}{|A|} \quad (7.4)$$

Kde A je přesné číslo (pro náš případ tedy naměřená hodnota měrného tepelného toku z měření Ing. Fojtlína) a a je přibližné číslo (hodnota měrného tepelného toku zjištěná pomocí simulace).

Vypočítané absolutní i relativní odchylky pro měrné tepelné toky ze všech segmentů tepelného manekýna byly poté sečteny a jejich sumy tvořily hlavní kritérium při porovnávání přesnosti jednotlivých variant. V tabulce 5. jsou uvedeny sumy absolutních a relativních odchylek pro výše uvedené varianty.

Tab. 5. Hodnoty sum absolutní a relativní odchylky a max. hodnoty absolutní odchylky vyhodnocených pro měrné tepelné toky segmentů manekýna pro různé varianty simulace

Varianta simulačního modelu	suma Δ [-]	suma δ [-]	max. Δ [-]
Původní síť, zad. stěna = Outlet, Split Ratio 1:1, P/F 20 %	201,35	2,43	16,89
Původní síť, zad. stěna = Wall, Patch/Face 20 %	269,49	3,12	17,93
Alternativní síť, zad. stěna = Wall, Patch/Face 20 %	247,08	2,94	21,95
Alternativní síť, zad. stěna = Wall, Patch/Face 31,5 %	269,44	3,09	21,26
Alternativní síť, zad. stěna = Outlet, Split Ratio 1:1, P/F 20 %	228,00	2,73	15,99

Na základě výsledných sum absolutních a relativních odchylek pro jednotlivé varianty simulace byla vyhodnocena jako nejpřesnější varianta s použitím původní sítě, se zadní stěnou nastavenou jako Outlet při Split Ratio 1:1 a s parametrem Patch/Face 20 % s výslednou hodnotou sumy absolutní odchylky 201,35 a relativní odchylky 2,43. V posledním sloupci lze vidět také maximální hodnotu absolutní odchylky, která měla sloužit jako pomocný parametr pro určování nejpřesnější varianty. Bylo důležité, aby výsledná varianta vykazovala nejen co nejnižší sumu absolutní a relativní odchylky, ale také aby maximální odchylka experimentální a simulačně určené hodnoty měrného tepelného toku nebyla příliš vysoká při porovnání s ostatními variantami. Tento požadavek byl pro vybranou síť dodržen.

7.3 Výpočet součinitelů přestupu tepla a vyhodnocení výsledků

Po zvolení finální varianty simulačního modelu bylo možné využít vyhodnocené měrné tepelné toky ze segmentů manekýna k porovnání s experimentálně určenými hodnotami z měření Ing. Fojtlína. Vedoucím práce byly poskytnuty soubory s daty z měření včetně všech třech měření, ze kterých byly vždy tepelné toky zaznamenány. Na základě teploty naměřené dvěma sondami Pt100 umístěných před manekýnem byla určena průměrná okolní teplota vzduchu v kalibračním boxu potřebná pro výpočet součinitelů přestupu tepla. Dle dat ze softwaru tepelného manekýna se povrchová teplota manekýna držela na nastavených 34 °C. V rámci experimentu byly tedy určeny 3 hodnoty součinitelů přestupu tepla, vždy pro každé ze třech opakování měření. Výsledkem měření dané varianty je potom průměrná hodnota měrného tepelného toku pro každý segment a průměrná hodnota součinitele přestupu tepla pro každý segment. Toto vyhodnocení bylo provedeno pro obě varianty – měření s nahým manekýnem a měření s manekýnem potaženým Al folií [3].

V rámci simulace byl zachován postup výpočtu součinitele přestupu tepla tak, jak to bylo provedeno v experimentu. Měrné tepelné toky byly vyhodnoceny Reportem, teplota segmentu manekýna byla nastavena na 34 °C pomocí okrajové podmínky Temperature, což bylo dodrženo a ověřeno pomocí Reportu vyhodnocující povrchovou teplotu daných okrajových

podmínek. Na segmentech, kde byl nastaven tepelný odpor z pomoci teplotní okrajové podmínky Convection, však byla povrchová teplota nižší, protože povrchová teplota, která byla vyhodnocena Reportem, je ve skutečnosti povrchová teplota vlasů a ne povrchu manekýna. Příčinou je přidání tepelného odporu do tepelných vlastností segmentu manekýna, což byla jediná možnost, jak tepelný odpor vlasů (nebo pro další případy i oděvu) do simulace zahrnout. Nebylo totiž v rámci tvorby geometrie možné modelovat jednotlivé kusy oblečení jako 3D objekty. Proto je pro všechny segmenty, kde je použita okrajová podmínka Convection a je přidán tepelný odpor oděvu, uvažována jako povrchová teplota manekýna teplota $T_{\infty} = 34^{\circ}\text{C}$ zadaná jako parametr okrajové podmínky Convection (viz kapitola 7.1.1). Pro vyhodnocení teploty okolního vzduchu v boxu byl využit Report sledující teplotu v Probes umístěných na stejných místech jako sondy Pt100 v kalibračním boxu (viz kapitola 7.2.3). Z těchto dvou hodnot teploty byla vypočítána průměrná hodnota, použitá ve výpočtech.

7.3.1 Výpočet nejistot měření

Pro porovnání simulačních a experimentálních dat měrných tepelných toků a součinitelů přestupu tepla, byly vypočítány nejistoty měření pro tyto veličiny dle postupu, který zvolili Ing. Fojtlín ve své práci [3]. Konkrétně byla stanovena nejistota typu A vyjadřující systematické chyby v opakujícím se měření. Tato nejistota určovaná pomocí výpočtu směrodatné odchylky se pro měření s opakováním nižším než 10 vypočítá pomocí vztahu (7.5) rozšířeného o bezpečnostní faktor k_{uA} .

$$u_A(x) = k_{uA} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.5)$$

kde:

- $u_A(x)$ je nejistota typu A pro měřenou veličinu x ,
- k_{uA} je bezpečnostní faktor,
- n je počet měření,
- x_i je i -tá naměřená veličina,
- \bar{x} je aritmetický průměr měřené veličiny.

Hodnota bezpečnostního faktoru k_{uA} se určuje v závislosti na počtu opakování, jak je uvedeno v tabulce 6..

Tab. 6. Tabulka hodnoty bezpečnostních faktorů v závislosti na počtu opakování měření.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10+
k_{uA}	7	2,3	1,7	1,4	1,2	1,3	1,2	1,2	1

Nejistota typu B nebyla v rámci diplomové práce Ing. Fojtlína určována, proto se nejistota typu C (rovnice 7.6), která vyjadřuje kombinaci nejistoty typu A a B rovná hodnotě nejistoty typu A.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (7.6)$$

Kombinovaná nejistota vyjadřuje interval, ve kterém se s pravděpodobností 68 % nachází přesná hodnota dané veličiny. Pomocí koeficientu rozšíření k_r lze interval spolehlivosti rozšířit na 95 % nebo 99 % dle Gaussova rozdělení. Pro vyhodnocení nejistot Ing. Fojtlín využil rozšíření na 95 % pro $k_r=2$. Výsledná nejistota měření je poté vypočítána pomocí vztahu (7.7) [3].

$$U = k_r \cdot u_C \quad (7.7)$$

Vypočítané nejistoty měření byly interpretovány do uvedených experimentálních hodnot měrných tepelných toků a součinitelů přestupu tepla formou chybových úseček.

7.3.2 Vyhodnocení výsledků případu měření s nahým manekýnem

Případ měření s nahým manekýnem byl měřen a simulován, aby bylo možné zjistit celkový součinitel přestupu tepla h_{celk} kombinující přenos tepla konvekcí a radiací pro každý segment tepelného manekýna. Tento součinitel lze určit na základě vztahu (7.8), za předpokladu, že $T_r = T_a$, což pro náš případ platí a je tak nastaveno i v simulaci.

$$h_{celk} = h_k + h_r = \frac{\dot{q}_k}{(T_{sk} - T_a)} + \frac{\dot{q}_r}{(T_{sk} - T_r)} = \frac{\dot{q}_0}{(T_{sk} - T_a)} \quad (7.8)$$

Kde

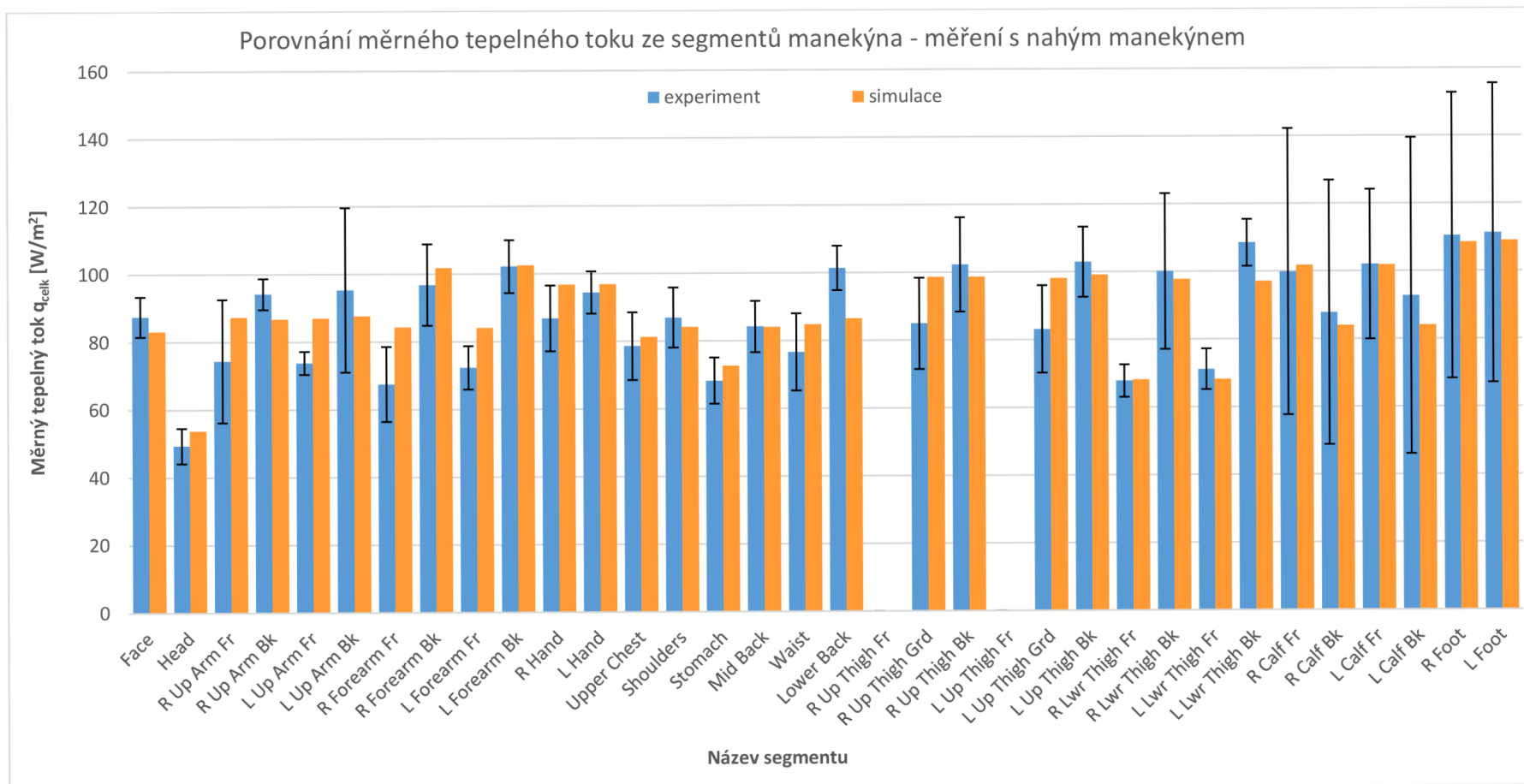
h_{celk}	je celkový kombinovaný součinitel přestupu tepla	[W/m ² K],
h_k	je součinitel přestupu tepla konvekcí	[W/m ² K],
h_r	je součinitel přestupu tepla radiací	[W/m ² K],
\dot{q}_0	je celkový měrný tepelný tok ze segmentu manekýna	[W/m ²],
\dot{q}_k	je měrný tepelný tok konvekcí ze segmentu manekýna	[W/m ²],
\dot{q}_r	je měrný tepelný tok radiací ze segmentu manekýna	[W/m ²],
T_{sk}	je povrchová teplota segmentu	[K],
T_a	je teplota okolního vzduchu	[K],
T_r	je radiační teplota okolních stěn boxu	[K].

V tabulce 7. a na obrázku 30. lze vidět měrné tepelné toky ze simulace a z experimentu. Na experimentálních datech jsou znázorněny chybové úsečky, které reprezentují vypočítanou nejistotu měření. Pomocí součtu a odečtu výsledné nejistoty od dané hodnoty lze potom určit výsledný interval naznačenými chybovými úsečkami. Segmenty 19 a 22 nebyly pro měření zapnuté, protože se jedná o části v pase, které jsou při nastavení manekýna do polohy vsedě zasunuté do těla manekýna. Při srovnání hodnot měrných tepelných toků vidíme, že u 25 z celkových 32 aktivních segmentů se výsledné měrné tepelné toky ze simulace vyskytují

v rozmezí experimentálních hodnot vytyčeném chybovými úsečkami, tedy rozmezí, kde se s 95% pravděpodobností pohybuje skutečná hodnota.

Obrázek 31. a tabulka 8. vyjadřují porovnání součinitelů přestupu tepla zjištění experimentálně a pomocí simulace. Hodnoty určené simulací, které se nacházejí uvnitř intervalu experimentálních hodnot definovaného chybovými úsečkami se oproti předchozímu srovnání měrných tepelných toků snížily, a to na 20 z 30 segmentů. Větší neshody u součinitelů přestupu tepla mohou být způsobeny tím, že existovaly rozdíly mezi teplotami okolního vzduchu vyhodnocenými simulací a mezi teplotami naměřenými. Zatímco v simulaci se teploty držely velice přesně hodnoty 24 °C, při třech opakováních experimentu byly určeny průměrné teploty z obou sond na 24,2 °C, 24,3 °C a 24,5 °C, což je dostatečná odchylka na to, aby se některé ze segmentů posunuly z intervalu dat určených chybovými úsečkami. Neshody mohly nastat také z důvodu výrazného snížení nejistoty měření hodnot součinitelů přestupu tepla u některých segmentů, čímž se snížil i interval pravděpodobné skutečné hodnoty součinitele přestupu tepla. Naproti tomu u segmentu Lower back (*Spodní záda*) existuje jednoznačná neshoda v obou vyjádřených veličinách. Je možné, že síť v této části nebyla dostatečně jemná, což mohlo způsobit odchylky ve výpočtech nebo byly výsledky tohoto segmentu ovlivněny odlišností proudění vzniklých na základě zjednodušení nastavení přívodu a odvodu vzduchu z boxu v rámci tvorby simulace, což je blíže popsáno v diskusi.

Obázek 32. zachycuje teplotní pole na skalární scéně, kde je zřetelný stoupavý proud vznikající podél těla manekýna, který má reálné parametry. Reálný průběh tohoto jevu byl jedním ze základních kritérií pro vyhodnocení validity vytvořené simulace. Další způsob, jak ověřit reálný průběh simulace, je sledování rychlostního pole, které je zobrazeno na obrázku 33.. Residua tohoto případu zachycená na obr. 34. lze považovat za dostatečně konvergující. Nejdůležitější je pro výpočet z hlediska charakteru simulace residuum energie, které po většinu iterací fluktuuje mezi 0,01 a 0,05 a nelze na něm pozorovat žádné výrazné výkyvy. Ustálení výpočtu je doloženo také vývojem měrného tepelného toku z referenčních segmentů zachycených Monitorem na obrázku 35..

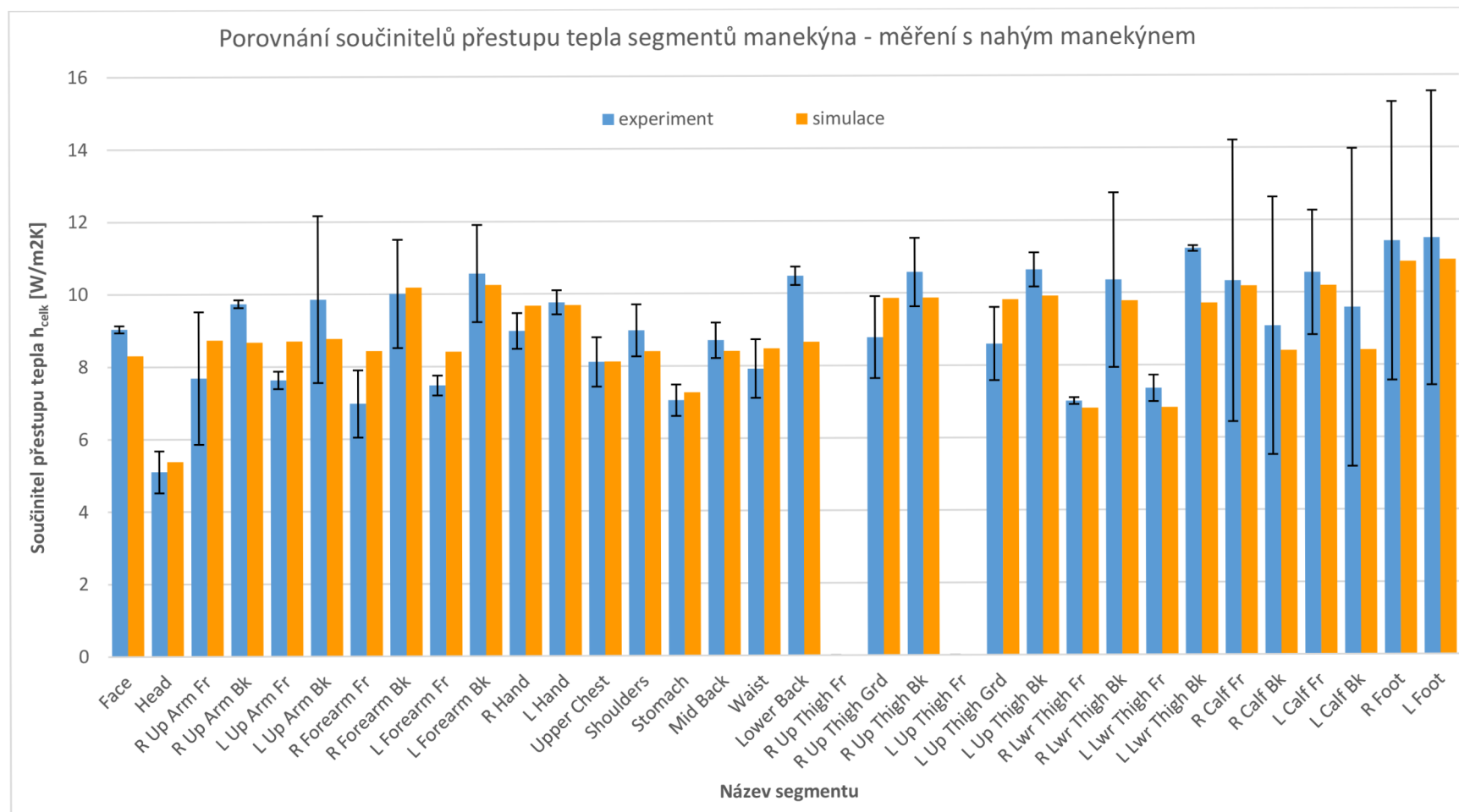


Obr. 30. Graf experimentálních a simulačních hodnot měrných tepelných toků ze segmentů manekýna pro případ měření s nahým manekýnem.

Tab. 7. Tabulka experimentálních a simulačních hodnot měrných tepelných toků ze segmentů manekýna – případ měření s nahým manekýnem.

Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ²]	Simulace [W/m ²]
1	Face*	87,45	83,08
2	Head*	49,33	53,74
3	R Up Arm Fr	74,37	87,29
4	R Up Arm Bk	94,18	86,74
5	L Up Arm Fr	73,79	87,00
6	L Up Arm Bk	95,35	87,67
7	R Forearm Fr	67,46	84,35
8	R Forearm Bk	96,80	101,80
9	L Forearm Fr	72,31	84,08
10	L Forearm Bk	102,17	102,52
11	R Hand	86,83	96,76
12	L Hand	94,45	96,87
13	Upper Chest	78,54	81,25
14	Shoulders	86,95	84,13
15	Stomach	68,22	72,65
16	Mid Back	84,23	84,11
17	Waist	76,64	84,78
18	Lower Back	101,39	86,54
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	84,95	98,63
21	R Up Thigh Bk	102,30	98,66
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	83,14	98,15
24	L Up Thigh Bk	102,90	99,10
25	R Lwr Thigh Fr	67,81	68,14
26	R Lwr Thigh Bk	100,11	97,76
27	L Lwr Thigh Fr	71,16	68,24
28	L Lwr Thigh Bk	108,49	97,11
29	R Calf Fr	99,89	101,80
30	R Calf Bk	87,82	83,99
31	L Calf Fr	102,04	101,86
32	L Calf Bk	92,72	84,10
33	R Foot	110,49	108,49
34	L Foot	111,25	108,98

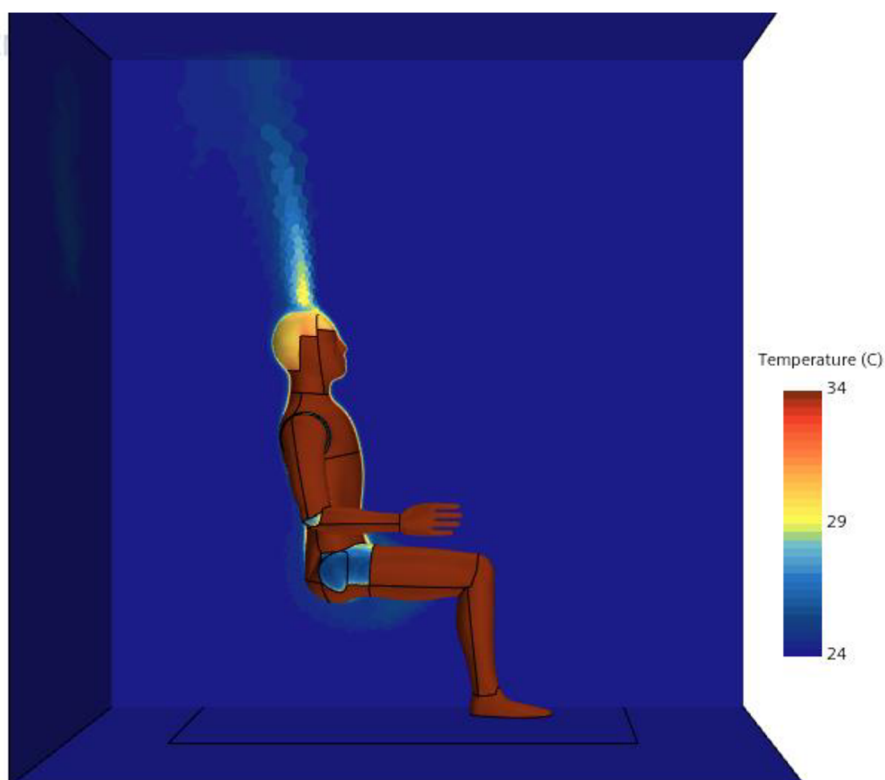
*Jak bylo již uvedeno, tyto segmenty byly v simulaci rozděleny na dvě části – jedna část pokryta vlasy, druhá nepokryta. V rámci vyhodnocení a porovnání dat došlo ke sloučení vyhodnocených toků z těchto částí pomocí průměru váženého plochou dané části.



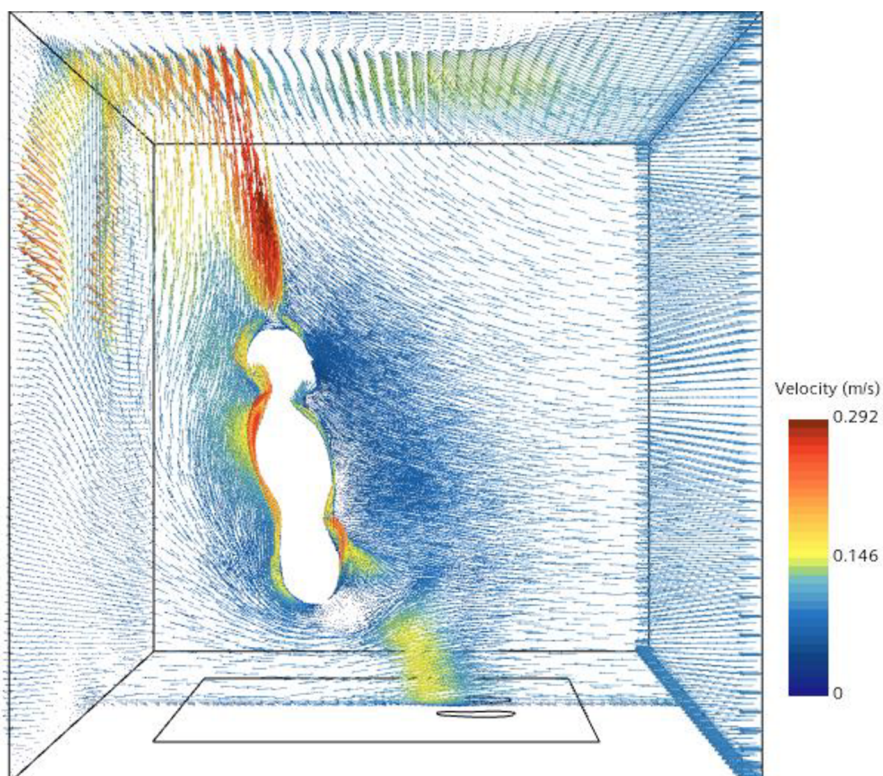
Obr. 31. Graf experimentálních a simulačních hodnot součinitelů přestupu tepla segmentů manekýna pro případ měření s nahým manekýnem.

Tab. 8. Tabulka experimentálních a simulačních hodnot součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna – případ měření s nahým manekýnem.

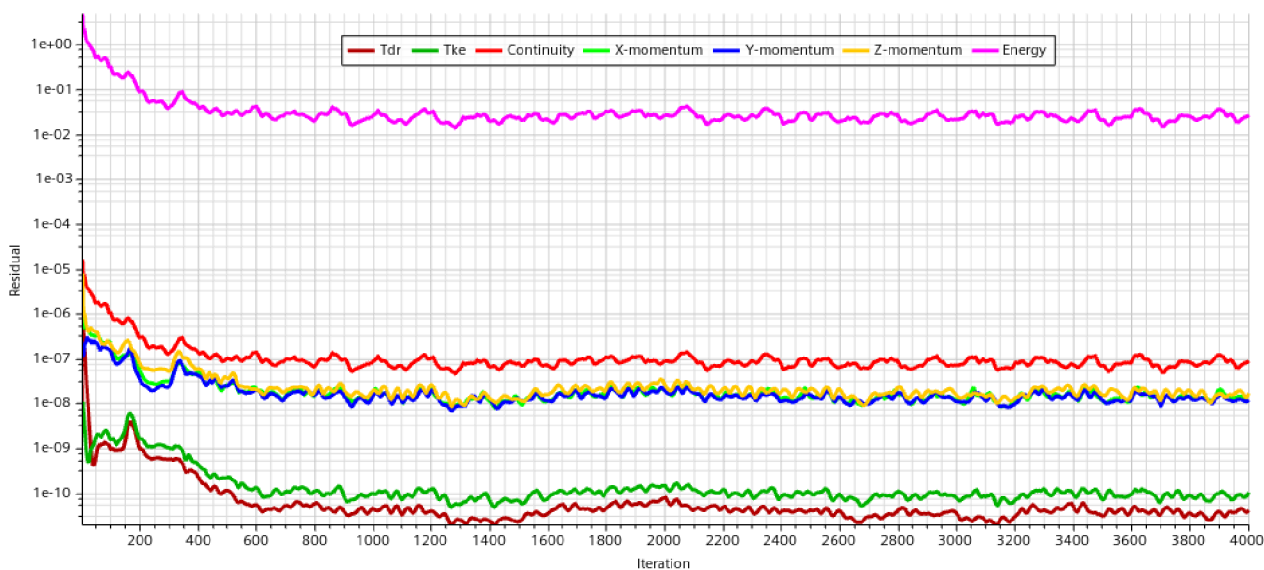
Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ² K]	Simulace [W/m ² K]
1	Face	9,04	8,31
2	Head	5,10	5,37
3	R Up Arm Fr	7,69	8,73
4	R Up Arm Bk	9,74	8,67
5	L Up Arm Fr	7,63	8,70
6	L Up Arm Bk	9,86	8,77
7	R Forearm Fr	6,97	8,43
8	R Forearm Bk	10,01	10,18
9	L Forearm Fr	7,48	8,41
10	L Forearm Bk	10,56	10,25
11	R Hand	8,98	9,68
12	L Hand	9,77	9,69
13	Upper Chest	8,12	8,12
14	Shoulders	8,99	8,41
15	Stomach	7,05	7,26
16	Mid Back	8,71	8,41
17	Waist	7,92	8,48
18	Lower Back	10,48	8,65
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	8,78	9,86
21	R Up Thigh Bk	10,57	9,87
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	8,59	9,81
24	L Up Thigh Bk	10,64	9,91
25	R Lwr Thigh Fr	7,01	6,81
26	R Lwr Thigh Bk	10,35	9,78
27	L Lwr Thigh Fr	7,36	6,82
28	L Lwr Thigh Bk	11,22	9,71
29	R Calf Fr	10,32	10,18
30	R Calf Bk	9,07	8,40
31	L Calf Fr	10,55	10,19
32	L Calf Bk	9,58	8,41
33	R Foot	11,42	10,85
34	L Foot	11,50	10,90



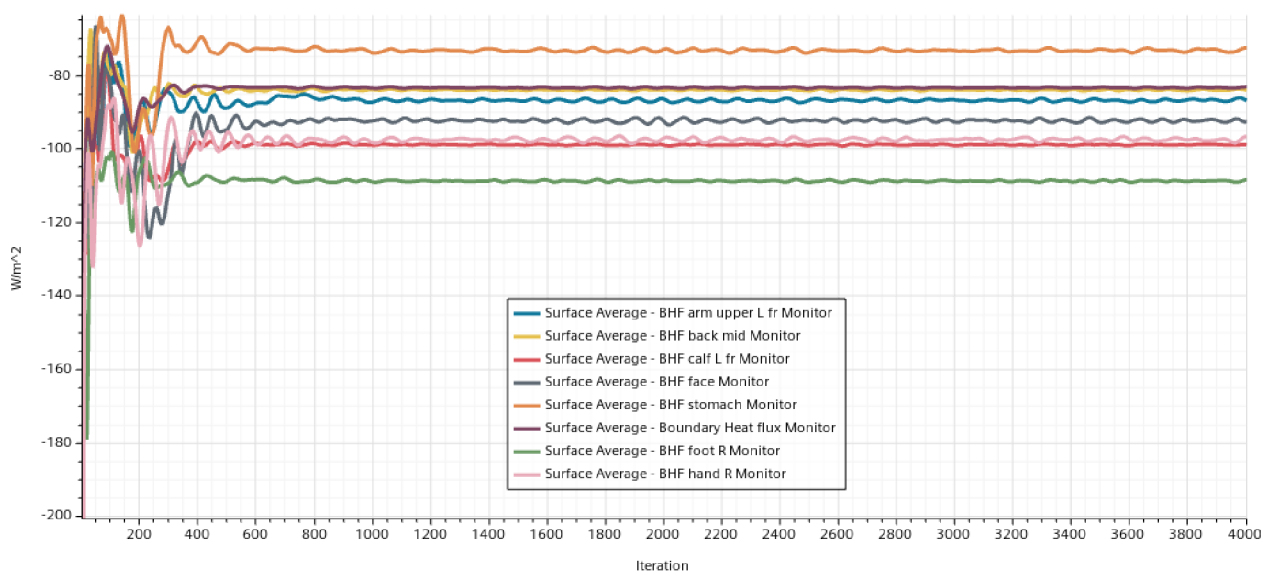
Obr. 32. Skalární scéna s řezem v rovině XZ vyobrazující teplotní pole v kalibračním boxu (případ měření s nahým manekýnem).



Obr. 33. Vektorová scéna s řezem v rovině XZ vyobrazující rychlostní pole v kalibračním boxu (případ měření s nahým manekýnem).



Obr. 34. Průběh residuí v závislosti na iteracích pro případ měření s nahým manekýnem.



Obr. 35. Průběh měrných tepelných toků z referenčních segmentů manekýna pro případ měření s nahým manekýnem.

Je nutné dodat, že funkce Boundary Heat Flux, která je vyhodnocena pomocí Reportu využívající Surface Average (*Plošný průměr*) vyjadřuje měrný tepelný tok ze segmentu manekýna a důvod její záporné hodnoty v Monitoru je pouze znaménková konvence programu Star CCM+, který vyjadřuje kladně toky vstupující do domény a záporně toky vystupující.

7.3.3 Vyhodnocení výsledků případu měření s minimalizovanou radiací

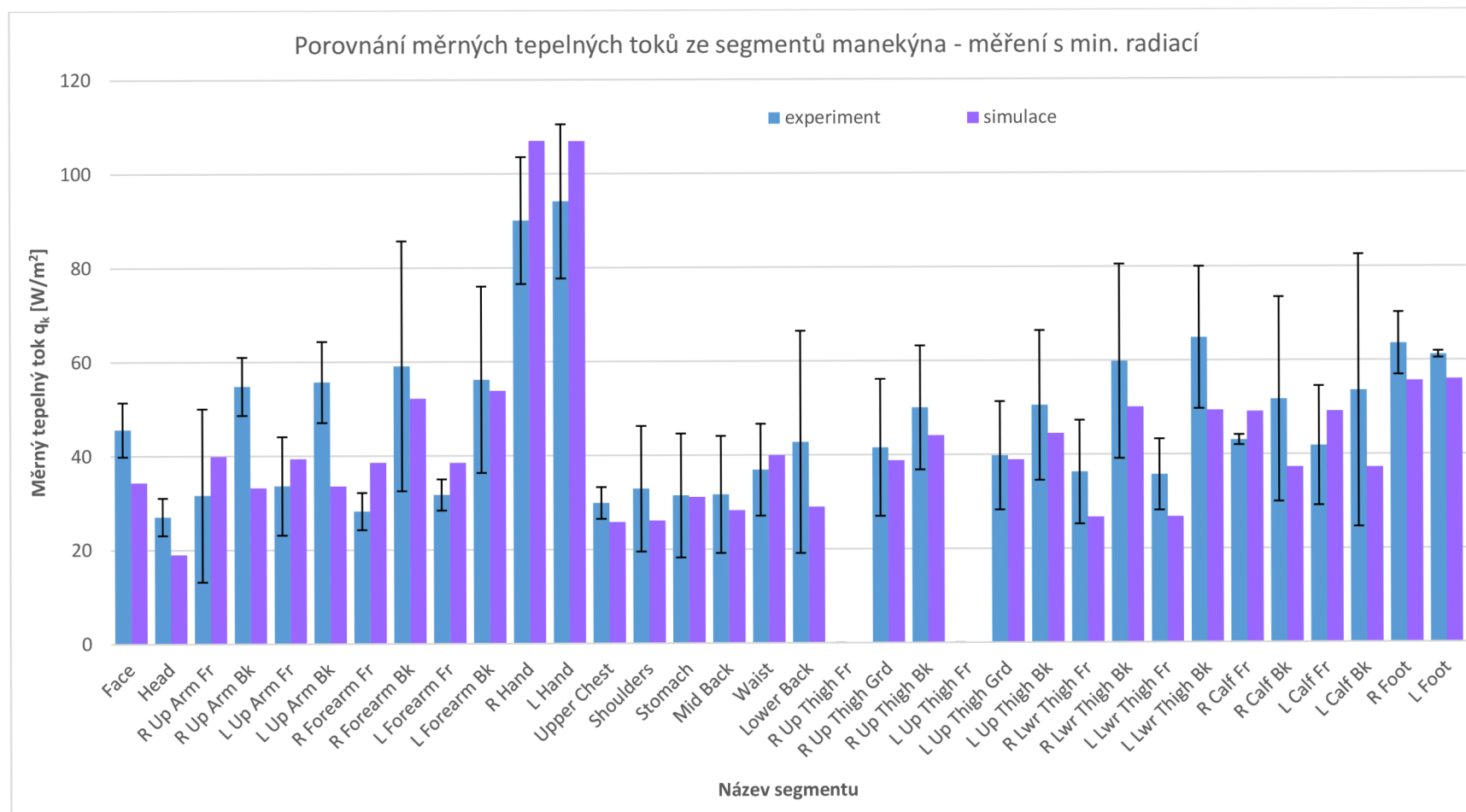
Měření s manekýnem potaženým hliníkovou folií bylo navrženo, aby bylo možné určit jak velká část tepla je přenášena z manekýna pomocí konvekce a pomocí radiace, tedy pro určení součinitelů přestupu tepla těchto fenoménů. Hlavním výsledkem měření a simulace tohoto případu je součinitel přestupu tepla konvekcí h_k , ačkoliv při tomto experimentu je přesto malá část tepla přenášena radiací, protože neexistuje způsob, jak dokonale přenos tepla zářením eliminovat. V rámci tohoto měření byla tedy provedena minimalizace přenosu tepla zářením pomocí minimalizace emisivity povrchu hliníkovým potahem naneseným na manekýna ($\varepsilon = 0,025 \approx 0$). Součinitel přestupu tepla konvekcí pro tento případ lze určit pomocí vztahu (7.9).

$$h_k = \frac{\dot{q}_k}{(T_{sk} - T_a)} \quad (7.9)$$

Kde

h_k	je součinitel přestupu tepla konvekcí	[W/m ² K],
\dot{q}_k	je měrný tepelný tok konvekcí ze segmentu manekýna	[W/m ²],
T_{sk}	je povrchová teplota segmentu	[K],
T_a	je teplota okolního vzduchu	[K].

Hodnoty měrných tepelných toků \dot{q}_k ze simulace a následně vypočítaných součinitelů přestupu tepla h_k jsou uvedeny na grafech v obr. 36. a obr. 37. a v tabulkách 9. a 10.. Z porovnání experimentálně a simulačně určených měrných tepelných toků lze tvrdit, že do rozmezí definované chybovými úsečkami sahají hodnoty 19 z celkových aktivních 32 segmentů manekýna. U součinitelů přestupu tepla dosahuje intervalu 18 segmentů. Většina segmentů nedosahuje na interval pravděpodobně skutečných hodnot o maximálně 15 až 20 %, což je v rámci zjednodušení provedených při tvorbě simulace považováno za přijatelné. Komentář vlivu zjednodušení simulace vůči skutečnému experimentu na výsledky simulace je proveden v diskusi. Scény teplotního a rychlostního pole a také Monitor průběhu tepelného toku z referenčních segmentů a residuí pro tuto variantu již nebude uváděn z důvodu výrazné podobnosti s předchozí variantou.

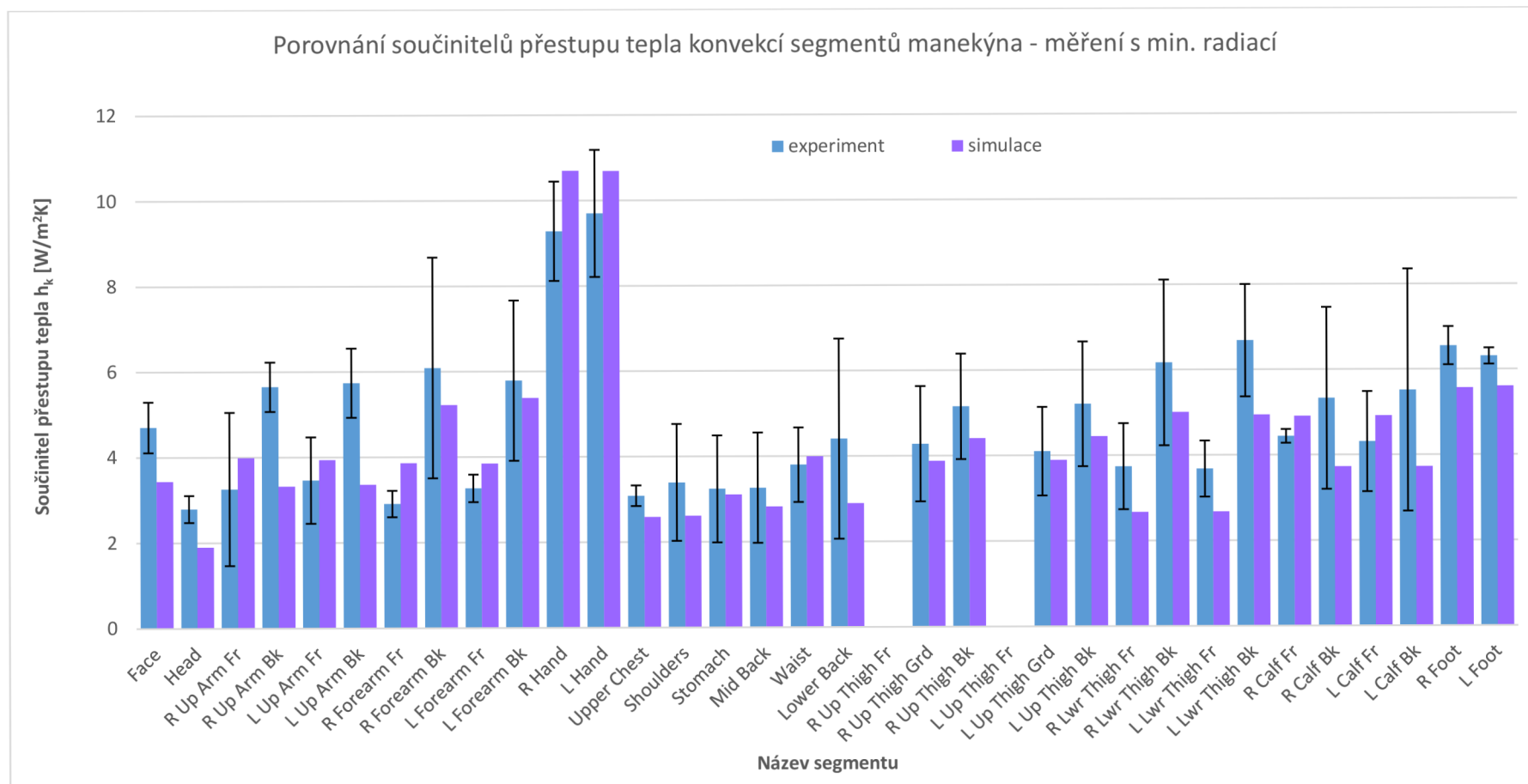


Obr. 36. Graf experimentálních a simulačních hodnot měrných tepelných toků ze segmentů manekýna pro případ měření s minimalizovanou radiací (A1 potahem).

Tab. 9. Tabulka experimentálních a simulačních hodnot měrných tepelných toků ze segmentů manekýna – případ měření s minimalizovanou radiací (Al potahem).

Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ²]	Simulace [W/m ²]
1	Face*	45,61	34,32
2	Head*	27,07	18,99
3	R Up Arm Fr	31,61	39,87
4	R Up Arm Bk	54,80	33,21
5	L Up Arm Fr	33,60	39,37
6	L Up Arm Bk	55,69	33,54
7	R Forearm Fr	28,21	38,57
8	R Forearm Bk	59,09	52,18
9	L Forearm Fr	31,70	38,47
10	L Forearm Bk	56,17	53,81
11	R Hand	90,04	106,98
12	L Hand	94,09	106,88
13	Upper Chest	29,90	25,85
14	Shoulders	32,91	26,13
15	Stomach	31,44	31,09
16	Mid Back	31,65	28,26
17	Waist	36,87	39,96
18	Lower Back	42,77	28,96
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	41,54	38,80
21	R Up Thigh Bk	50,00	44,07
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	39,78	38,90
24	L Up Thigh Bk	50,49	44,47
25	R Lwr Thigh Fr	36,28	26,69
26	R Lwr Thigh Bk	59,85	50,08
27	L Lwr Thigh Fr	35,70	26,72
28	L Lwr Thigh Bk	64,86	49,38
29	R Calf Fr	43,06	49,11
30	R Calf Bk	51,69	37,25
31	L Calf Fr	41,81	49,12
32	L Calf Bk	53,54	37,24
33	R Foot	63,57	55,67
34	L Foot	61,21	56,02

*Jak bylo již uvedeno, tyto segmenty byly v simulaci rozděleny na dvě části – jedna část pokryta vlasy, druhá nepokryta. V rámci vyhodnocení a porovnání dat došlo ke sloučení vyhodnocených toků z těchto částí pomocí průměru váženého plochou dané části.



Obr. 37. Graf experimentálních a simulačních hodnot součinitelů přestupu tepla segmentů manekýna pro případ měření s minimalizovanou radiací (Al potahem).

Tab. 10. Tabulka experimentálních a simulačních hodnot součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna – případ měření s minimalizovanou radiací (Al potahem).

Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ² K]	Simulace [W/m ² K]
1	Face	4,70	3,43
2	Head	2,79	1,90
3	R Up Arm Fr	3,26	3,99
4	R Up Arm Bk	5,65	3,32
5	L Up Arm Fr	3,46	3,94
6	L Up Arm Bk	5,74	3,35
7	R Forearm Fr	2,91	3,86
8	R Forearm Bk	6,09	5,22
9	L Forearm Fr	3,27	3,85
10	L Forearm Bk	5,79	5,38
11	R Hand	9,28	10,70
12	L Hand	9,70	10,69
13	Upper Chest	3,08	2,58
14	Shoulders	3,39	2,61
15	Stomach	3,24	3,11
16	Mid Back	3,26	2,83
17	Waist	3,80	4,00
18	Lower Back	4,41	2,90
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	4,28	3,88
21	R Up Thigh Bk	5,15	4,41
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	4,10	3,89
24	L Up Thigh Bk	5,20	4,45
25	R Lwr Thigh Fr	3,74	2,67
26	R Lwr Thigh Bk	6,17	5,01
27	L Lwr Thigh Fr	3,68	2,67
28	L Lwr Thigh Bk	6,68	4,94
29	R Calf Fr	4,44	4,91
30	R Calf Bk	5,33	3,73
31	L Calf Fr	4,31	4,91
32	L Calf Bk	5,52	3,72
33	R Foot	6,55	5,57
34	L Foot	6,31	5,60

7.3.4 Stanovení součinitele přestupu tepla radiací

Dle postupu popsaného v kapitole 3.1 lze ve stavu, kdy již známe celkový součinitel přestupu tepla a součinitel přestupu konvekcí, zavést rovnici (7.10), která platí při předpokladu $T_a = T_r$

$$h_r = \frac{\dot{q}_0}{(T_{sk} - T_r)} - h_k \quad (7.10)$$

kde:

h_r	je součinitel přestupu tepla radiací	[W/m ² K],
\dot{q}_0	je celkový měrný tepelný tok	[W/m ²],
h_k	je součinitel přestupu tepla konvekcí	[W/m ² K],
T_{sk}	je povrchová teplota segmentu	[K],
T_r	je radiační teplota okolních stěn boxu	[K].

Vypočítané hodnoty součinitelů přestupu tepla radiací h_r na základě experimentálních a simulací určených dat lze sledovat na grafu na obr. 38. a v tab. 11.. Dle postupu Ing. Fojtlína byla pro experimentální hodnoty určena kombinovaná nejistota měření, která je výsledkem součtu čtverců nejistot pro hodnoty z obou měření (viz rovnice 7.11).

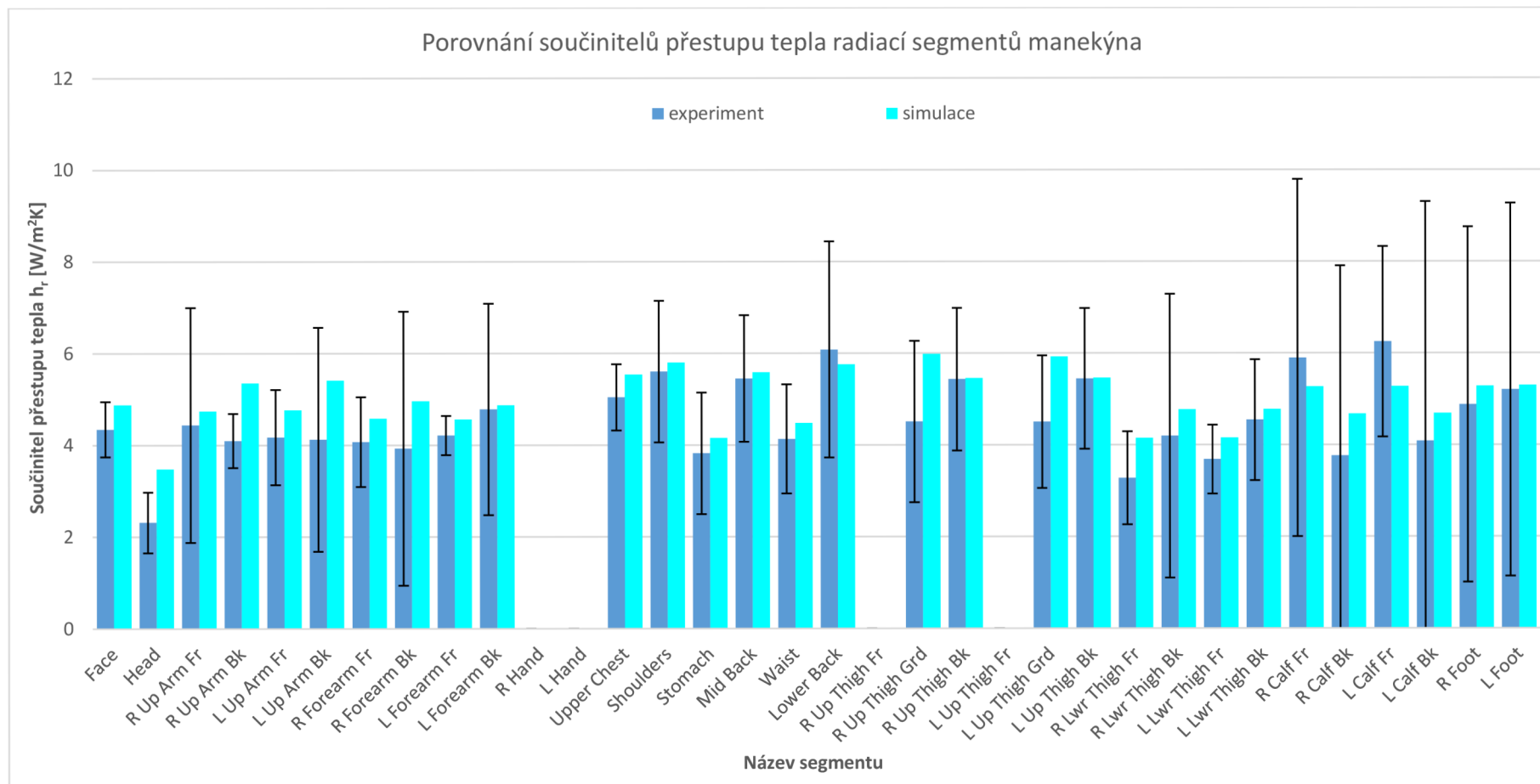
$$u_{Ahr} = \sqrt{u_{Ahcelk}^2 + u_{Ahk}^2} \quad (7.11)$$

kde:

u_{Ahr}	je nejistota typu A pro součinitel přestupu tepla radiací,
u_{Ahcelk}	je nejistota typu A pro celkový kombinovaný součinitel přestupu tepla,
u_{Ahk}	je nejistota typu A pro součinitel přestupu tepla konvekcí.

Součinitele přestupu tepla radiací u segmentů rukou (11) a (12) jsou vyhodnoceny jako nulové, protože ruce nebyly pro měření s hliníkovým potahem pokryty. Zvýšení měrného tepelného toku a součinitele přestupu tepla při měření s Al potahem je pro tento výpočet zanedbáno, jak to vyhodnotil i Ing. Fojtlín pro svůj experiment.

Z grafu a číselných hodnot lze vidět, že rozmezí experimentálních hodnot určeného chybovými úsečkami dosahuje 28 z 30 součinitelů přestupu tepla radiací určených pomocí simulace. Ke zvýšení přesnosti oproti předchozím vyhodnoceným součinitelům došlo částečně nejspíše z důvodu větší zátěže experimentálních hodnot nejistotou obou měření. Komentář porovnání simulačních a experimentálních hodnot pro tento případ je uveden v diskusi.



Obr. 38. Graf součinitelů přestupu tepla radiací určených na základě experimentu a simulace.

Tab. 11. Tabulka hodnot součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna – případ měření s minimalizovanou radiací (Al potahem).

Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ² K]	Simulace [W/m ² K]
1	Face	4,35	4,88
2	Head	2,31	3,47
3	R Up Arm Fr	4,44	4,74
4	R Up Arm Bk	4,09	5,35
5	L Up Arm Fr	4,17	4,76
6	L Up Arm Bk	4,12	5,41
7	R Forearm Fr	4,07	4,58
8	R Forearm Bk	3,93	4,96
9	L Forearm Fr	4,21	4,56
10	L Forearm Bk	4,78	4,87
11	R Hand	0,00	0,00
12	L Hand	0,00	0,00
13	Upper Chest	5,04	5,54
14	Shoulders	5,60	5,80
15	Stomach	3,82	4,16
16	Mid Back	5,45	5,59
17	Waist	4,13	4,48
18	Lower Back	6,08	5,76
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	4,51	5,98
21	R Up Thigh Bk	5,43	5,46
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	4,50	5,93
24	L Up Thigh Bk	5,44	5,46
25	R Lwr Thigh Fr	3,28	4,15
26	R Lwr Thigh Bk	4,19	4,77
27	L Lwr Thigh Fr	3,68	4,15
28	L Lwr Thigh Bk	4,54	4,77
29	R Calf Fr	5,90	5,27
30	R Calf Bk	3,76	4,67
31	L Calf Fr	6,25	5,27
32	L Calf Bk	4,08	4,69
33	R Foot	4,88	5,28
34	L Foot	5,20	5,30

8 Simulace experimentu Ing. Hrubanové

Vytvoření simulačního modelu experimentu Ing. Hrubanové bylo založeno na simulačním modelu pro simulaci případů měření Ing. Fojtlína. Bylo využito otestované varianty sítě, kombinace nastavení typů okrajových podmínek a dalších parametrů, které byly v rámci tvorby simulace definovány, jak je popsáno v kapitole 7. Proto již v této kapitole nebude popisována tvorba simulace, ale budou pouze zmíněny především upravené vstupní parametry a některé úpravy v nastavení okrajových podmínek, které bylo nutné provést pro simulaci případů měření s oděvy. Hlavním cílem kapitoly je uvedení a okomentování výsledků simulace všech pěti případů měření s oděným tepelným manekýnem (letní oděv – sukně, letní oděv – kraťasy, přechodný oděv, lehký zimní oděv a těžký zimní oděv).

8.1 Úpravy parametrů okrajových podmínek pro zadání tepelných odporů

V kapitole 7.1.1 je podrobně popsán důvod využití tepelné okrajové podmínky Convection. Tento typ umožňuje přidání tepelného odporu oděvu na danou okrajovou podmínku, která definuje část manekýna pokrytou oděvem. Proto byly okrajové podmínky pokryté oděvem nastaveny na typ Convection a nepokryté oděvy zůstaly nastaveny jako Temperature. V rámci nastavení povrchové teploty, na kterou byl v experimentu manekýn vyhříván, byla pro obě okrajové podmínky definována teplota 34 °C. Povrchová teplota stěn kalibračního boxu a teplota vzduchu v boxu byly ponechány na 24 °C, tedy normou doporučenou teplotu ČSN EN ISO 14505-2 [17] pro měření s tepelným manekýnem.

Pro každý segment pokrytý oblečením každé varianty oděvu byly vyhodnoceny tepelné odpory na základě dat naměřených Ing. Hrubanovou. Nemohly být použity výsledné tepelné odpory, které jsou uvedeny přímo v práci, protože tyto tepelné odpory se vztahují ke větším segmentům manekýna vzniklých sjednocením segmentů použitých v simulaci.

8.1.1 Výpočet tepelného odporu

K výpočtu tepelného odporu sloužily hodnoty měrných tepelných toků ze segmentů manekýna, povrchové teploty segmentů a teplota okolního vzduchu z měření Ing. Hrubanové. Protože vyhodnocením tepelného odporu pomocí těchto veličin je do tepelného odporu zahrnut i tepelný odpor mezní vzduchové vrstvy (blíže popsáno v kapitole 2.3), bylo nutné tento odpor před zadáním do parametrů okrajové podmínky odečíst. Jelikož v rámci práce Ing. Hrubanové nebylo možné pro většinu segmentů odpor nijak definovat, byl po konzultaci s vedoucím práce navržen postup, při kterém bude odpor mezní vrstvy vypočten z výsledných tepelných toků, povrchových teplot a teploty okolního vzduchu ze simulace případu měření s nahým manekýnem Ing. Fojtlína. Tepelný odpor mezní vrstvy segmentu byl určen na základě rovnice (8.1):

$$R_v = \frac{(T_{sk} - T_a)}{\dot{q}_0} \quad (8.1)$$

kde

R_v	je tepelný odpor mezní vrstvy segmentu	[m ² K/W],
\dot{q}_0	je celkový kombinovaný měrný tepelný tok ze segmentu	[W/m ²],
T_{sk}	je povrchová teplota segmentu	[K],
T_a	je teplota okolního vzduchu	[K].

Následně byl vypočten výsledný tepelný odpor bez vlivu vzduchové vrstvy pro zadání do simulace (rovnice X.X)

$$R_{cl} = \frac{(T_{sk,exp} - T_{a,exp})}{\dot{q}_{exp}} - R_v \quad (\text{X.X})$$

kde

R_{cl}	je tepelný odpor oděvu daného segmentu	[m ² K/W],
\dot{q}_{exp}	je celkový kombinovaný měrný tepelný tok ze segmentu	[W/m ²],
$T_{sk,exp}$	je povrchová teplota segmentu z experimentu	[K],
$T_{a,exp}$	je teplota okolního vzduchu z experimentu	[K].

Postup výpočtu tepelného odporu byl proveden pro všechny varianty oděvů.

8.1.2 Stanovení emisivity povrchů oděvů

Aby bylo docíleno přesného dodržení podmínek pro přenos tepla radiací z povrchu manekýna, bylo nutné u předchozích případů nastavit především emisivitu, ale také následně transmisivitu a reflektivitu povrchu nahého těla. To stejné platí pro oděvy použité k měření. V práci Ing. Hrubanové byly použité oděvy a vyfotografovány. Protože Ing. Hrubanové nepotřebovala vyhodnocovat tepelné vlastnosti materiálů oděvů jako je emisivita, neuvádí je ani v práci. Pro účely simulace je však nezbytné alespoň s určitou přesností definovat emisivity materiálů použitých oděvů pro okrajové podmínky segmentů, které jsou oděvy pokryty.

V článku [30] byla provedena analýza emisivit povrchů pro různé textilie, ze kterých byly použity emisivity materiálů, ze které bylo vyrobeno použité oblečení. Jedná se o bavlnu, která má dle článku průměrnou emisivitu 0,68, dále směs bavlny a polyesteru – emisivita 0,77 (největší část oděvů) a dále čistě polyesterové tkaniny s emisivitou 0,78. Autoři článku také tvrdí, že transmisivita běžné textilie se pohybuje v rozmezí 0,04 – 0,08, na základě čehož byla pro všechny oděvy navržena transmisivita 0,06. Další článek [31], který se věnoval termální analýze sportovní obuvi, poskytl informace o předpokládané emisivitě sportovní obuvi vyrobené ze syntetických materiálů, která byla určena na 0,83 pro oba typy použité obuvi (sandály a pevné boty). Transmisivita byla pro obuv považována za nulovou. V kapitole s výsledky ze simulace měření letního oděvu se sukni jsou uvedeny emisivity zadané k daným okrajovým podmínkám simulace.

8.2 Výpočet součinitelů přestupu tepla a vyhodnocení výsledků

Po nastavení všech tepelných odporů k daným okrajovým podmínkám byla spuštěna numerická simulace všech pěti případů dle měřených oděvů. K ustálení výpočtů docházelo podobně jako u předchozích případů mezi 600 – 1000 iteracemi. Pro zajištění konvergence residuí bylo ponecháno pro většinu případů cca 4000 iterací. Stabilitu výpočtu sledoval i Monitor měrných tepelných toků z referenčních segmentů vytvořený už pro simulaci předchozích případů. Stav teplotního a rychlostního pole byl analyzován pomocí dříve vytvořených scén (kapitola 7.2.3).

Pomocí již nastaveného Reportu byly vyhodnoceny výsledné měrné tepelné toky ze segmentů manekýna. Z Probes umístěných v místech, ve kterých se nacházely sondy pro měření teploty vzduchu v boxu Pt100, byly vyhodnoceny hodnoty teploty okolního vzduchu a povrchové teploty manekýna byly v rámci parametrů okrajových podmínek nastaveny na 34 °C. Součinitele přestupu tepla byly pro každý segment vypočítány dle rovnice 8.2.

$$h_{cal} = \frac{\dot{q}_0}{T_{sk} - T_a} \quad (8.2)$$

kde

h_{cal}	je celkový součinitel přestupu tepla segmentu	[W/m ² K],
\dot{q}_0	je celkový kombinovaný měrný tepelný tok ze segmentu	[W/m ²],
T_{sk}	je povrchová teplota segmentu	[K],
T_a	je teplota okolního vzduchu	[K].

8.2.1 Příprava experimentálních dat pro srovnání a výpočet nejistoty měření

Jelikož v rámci práce Ing. Hrubanové nebyly vyhodnoceny součinitele přestupu tepla z jednotlivých segmentů, byly využity experimentálně určené měrné tepelné toky, povrchové teploty segmentů a průměrná teplota okolního vzduchu pro jejich výpočet dle rovnice (8.2). Protože Ing. Hrubanové ve své práci provedla měření při 4 teplotách okolního vzduchu (16 °C, 20 °C, 24 °C a 28 °C) dle normy ČSN EN ISO 14505-2 [17] a následně využila tyto 4 měření i pro vyhodnocení nejistot měření, byl proveden výpočet součinitelů přestupu tepla každého segmentu pro každou z použitých teplot.

Součinitele přestupu tepla by dle této metodiky měly zůstat přibližně stejné, protože se změnou teploty okolí dojde i ke změně měrného tepelného toku. S použitím hodnot součinitelů přestupu tepla pro všechny 4 teplotní varianty byla vypočtena nejistota typu A rozšířená o pravděpodobnostní rozdělení 95 % (tedy $k_r=2$), tak jak při výpočtu nejistot případu Ing. Fojtlína (viz kapitola 7.2.1). Vyhodnocení nejistot proběhlo pro všechny segmenty ve variantě všech pěti oděvů. Měrné tepelné toky byly u těchto případů využity pro orientační porovnání a nebude pro ně určována nejistota měření. Ing. Hrubanová ve své práci stanovovala také nejistotu typu B, ale pro její vyhodnocení nebyla dostupná potřebná data, proto byl zachován stejný postup, jako u vyhodnocení nejistot případů Ing. Fojtlína.

8.2.2 Vyhodnocení výsledků případu měření letního oděvu – sukně

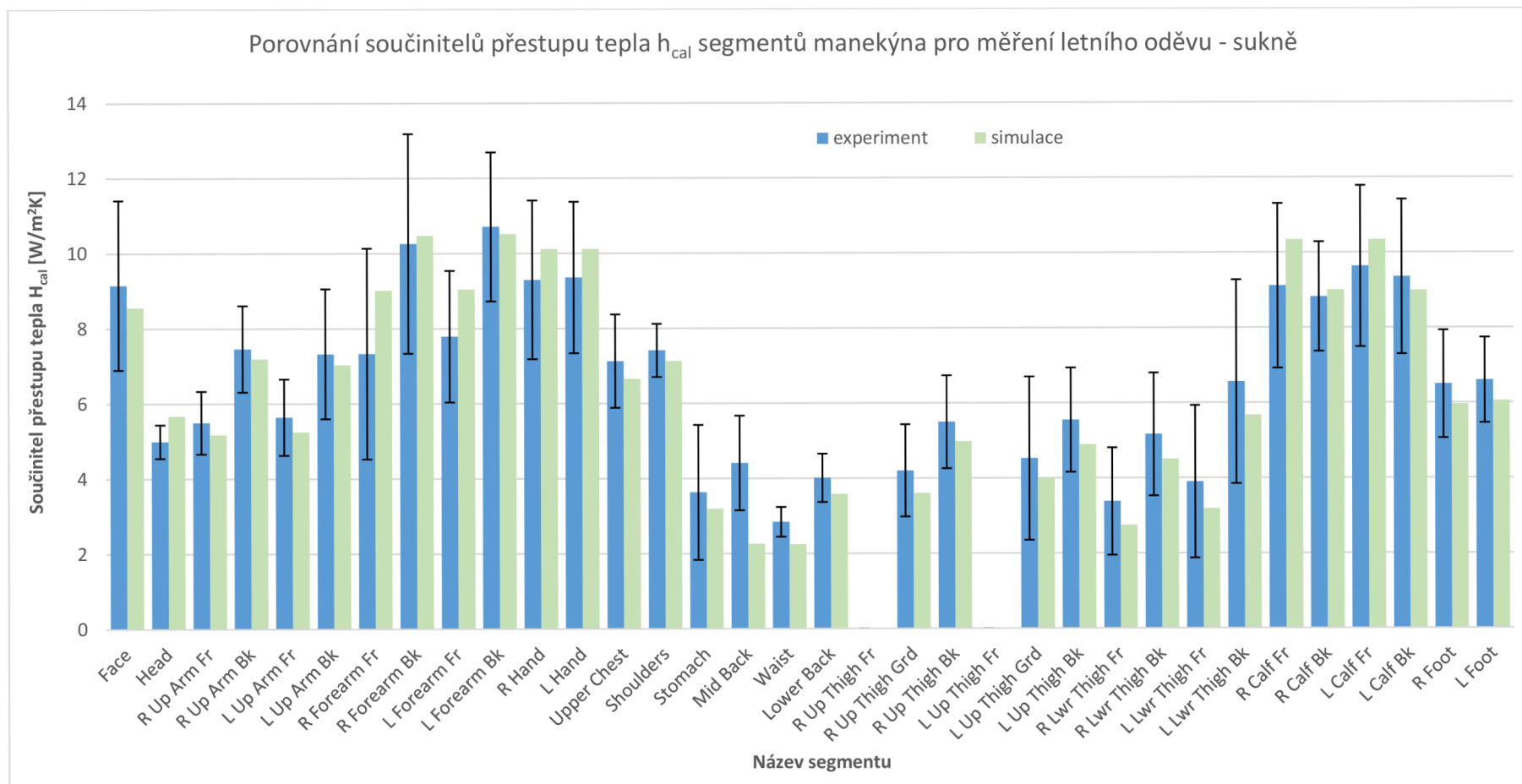
Případ měření letního oděvu se sukní bude považován za reprezentativní případ z hlediska uvedených výsledků, a to hlavně z hlediska scén teplotního a rychlostního pole, simulačních residuí a Monitorů měrného tepelného toku z referenčních segmentů. Všechny tyto výsledné scény a grafy totiž mají velmi podobný průběh nebo zachycují velmi podobné stavy. Pro ostatní případy budou uvedeny pouze výsledné grafy porovnání simulačních a experimentálních hodnot vypočtených součinitelů přestupu tepla. Pro tento případ budou uvedeny i tepelné odpory a emisivity nastavené na okrajové podmínky oděvem pokrytých segmentů (Tab. 12.).

Obr. 39. a tab. 13. zachycuje porovnání experimentálně a simulačně určených součinitelů přestupu tepla pro tento případ. Na obr. 40. a obr. 41. jsou vyobrazeny snímky scén s teplotním a rychlostním polem. V obou polích je zřetelný stoupavý proud kolem manekýna, jenž je považován za základní kritérium pro posouzení realističnosti průběhu simulace. Výsledky simulace a porovnání s experimentem je okomentováno v diskusi.

Tab. 12. Tabulka tepelných odporů a emisivit zadáných do okrajových podmínek oděvem pokrytých segmentů pro případ měření letního oděvu – sukně.

Číslo segmentu	Název segmentu	Tepelný odpor R_{cl} [m^2K/W]	Emisivita ε [-]
3	R Up Arm Fr	0,067	0,875
4	R Up Arm Bk	0,020	0,875
5	L Up Arm Fr	0,063	0,875
6	L Up Arm Bk	0,022	0,875
13	Upper Chest	0,017	0,77
14	Shoulders	0,017	0,77
15	Stomach	0,140	0,77
16	Mid Back	0,108	0,77
17	Waist	0,239	0,77
18	Lower Back	0,134	0,77
20	R Up Thigh Grd	0,137	0,77
21	R Up Thigh Bk	0,080	0,77
23	L Up Thigh Grd	0,119	0,77
24	L Up Thigh Bk	0,080	0,77
25	R Lwr Thigh Fr	0,150	0,77
26	R Lwr Thigh Bk	0,093	0,77
27	L Lwr Thigh Fr	0,110	0,77
28	L Lwr Thigh Bk	0,052	0,77
33	R Foot	0,063	0,905
34	L Foot	0,061	0,905

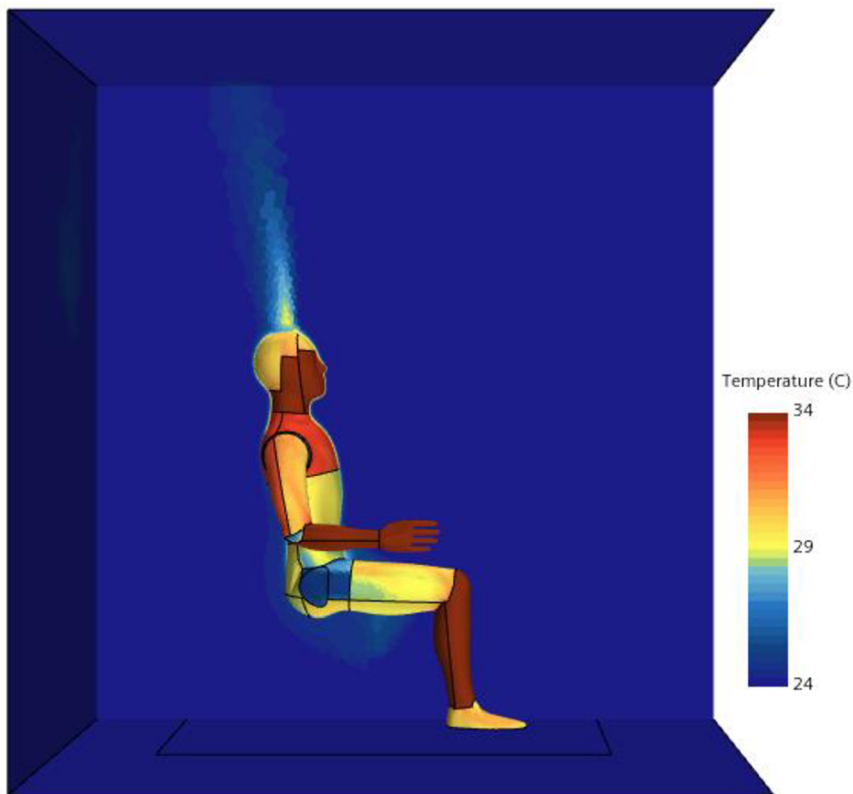
V experimentu mohly nastat případy, kdy oblečení pokrývalo pouze část segmentu a část zůstala nepokrytá, např. segmenty paží v tomto případě, kdy byl manekýn oblečen do trika nebo sandály, které pokrývají pouze část povrchu chodidel. V takových případech byl proveden odhad poměru pokryté a zakryté plochy a na základě toho byl proveden přepočít emisivity pomocí průměru váženého poměrem ploch. Např. pro segmenty paží (3, 4, 5 a 6) bylo vyhodnoceno cca 50% pokrytí plochy segmentu trikem, proto proběhl přepočít emisivity trika (0,77) a emisivity povrchu manekýna (0,98) tímto způsobem: $0,77 \cdot 0,5 + 0,98 \cdot 0,5 = 0,875$.



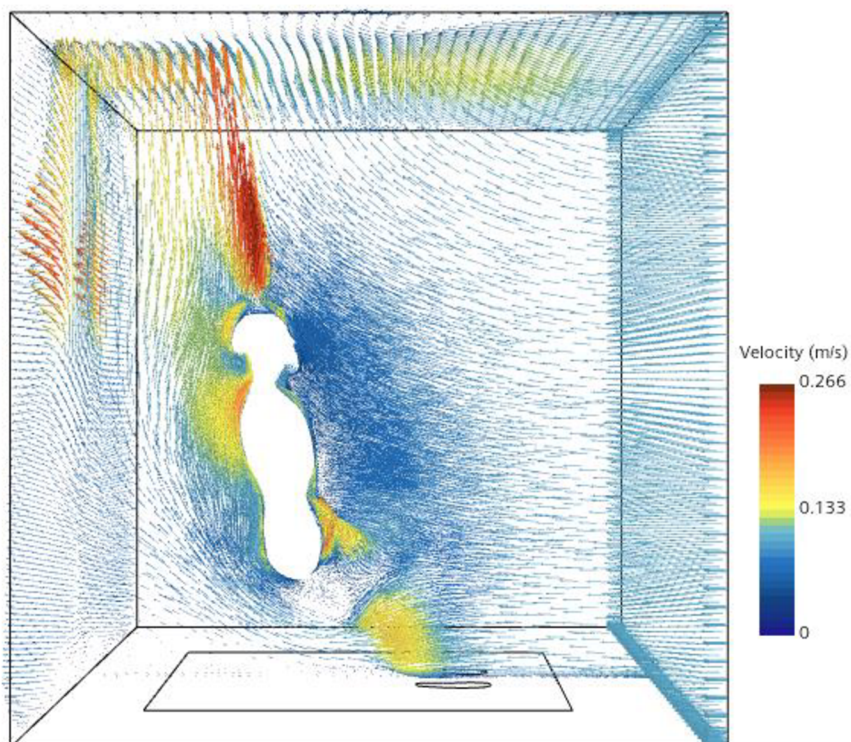
Obr. 39. Graf porovnání experimentálně a simulačně určených součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna pro měření letního oděvu - sukně.

Tab. 13. Tabulka hodnot součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna – případ měření letního oděvu - sukně.

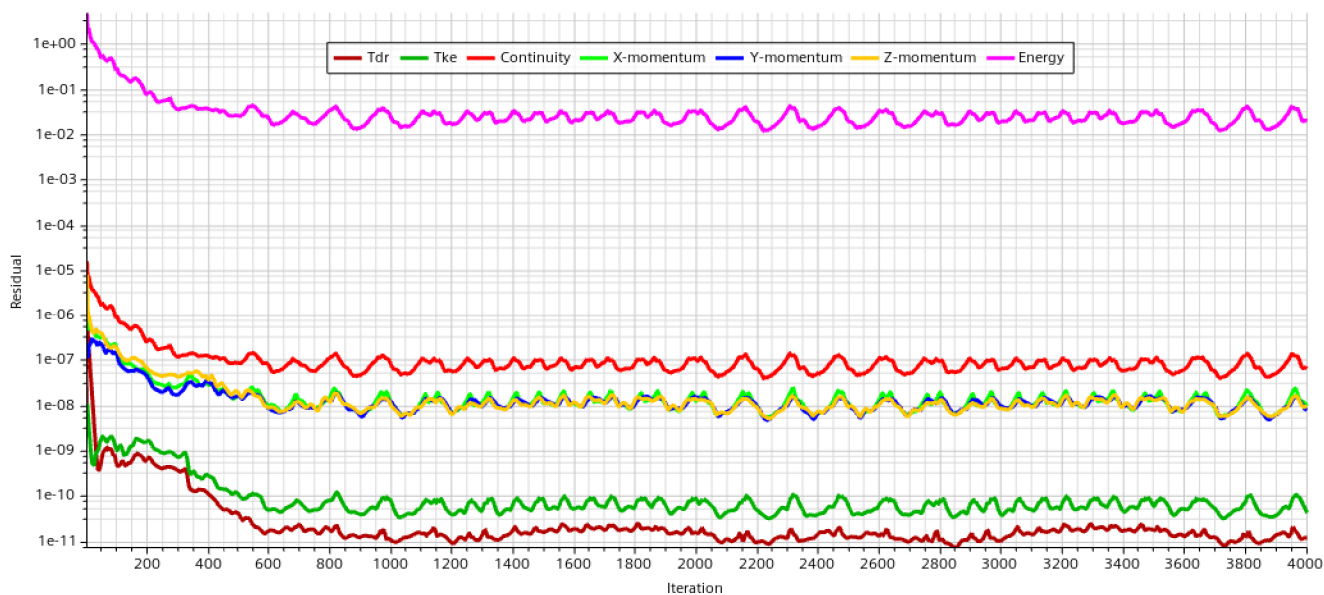
Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ² K]	Simulace [W/m ² K]
1	Face	9,15	8,55
2	Head	4,99	5,67
3	R Up Arm Fr	5,49	5,17
4	R Up Arm Bk	7,46	7,20
5	L Up Arm Fr	5,64	5,24
6	L Up Arm Bk	7,32	7,04
7	R Forearm Fr	7,33	9,02
8	R Forearm Bk	10,26	10,48
9	L Forearm Fr	7,79	9,04
10	L Forearm Bk	10,71	10,52
11	R Hand	9,30	10,12
12	L Hand	9,36	10,12
13	Upper Chest	7,13	6,65
14	Shoulders	7,41	7,13
15	Stomach	3,63	3,20
16	Mid Back	4,41	2,25
17	Waist	2,84	2,24
18	Lower Back	4,01	3,58
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	4,20	3,60
21	R Up Thigh Bk	5,50	4,98
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	4,52	4,01
24	L Up Thigh Bk	5,55	4,89
25	R Lwr Thigh Fr	3,38	2,75
26	R Lwr Thigh Bk	5,16	4,50
27	L Lwr Thigh Fr	3,90	3,19
28	L Lwr Thigh Bk	6,56	5,67
29	R Calf Fr	9,11	10,34
30	R Calf Bk	8,82	9,00
31	L Calf Fr	9,63	10,34
32	L Calf Bk	9,35	8,99
33	R Foot	6,49	5,95
34	L Foot	6,60	6,05



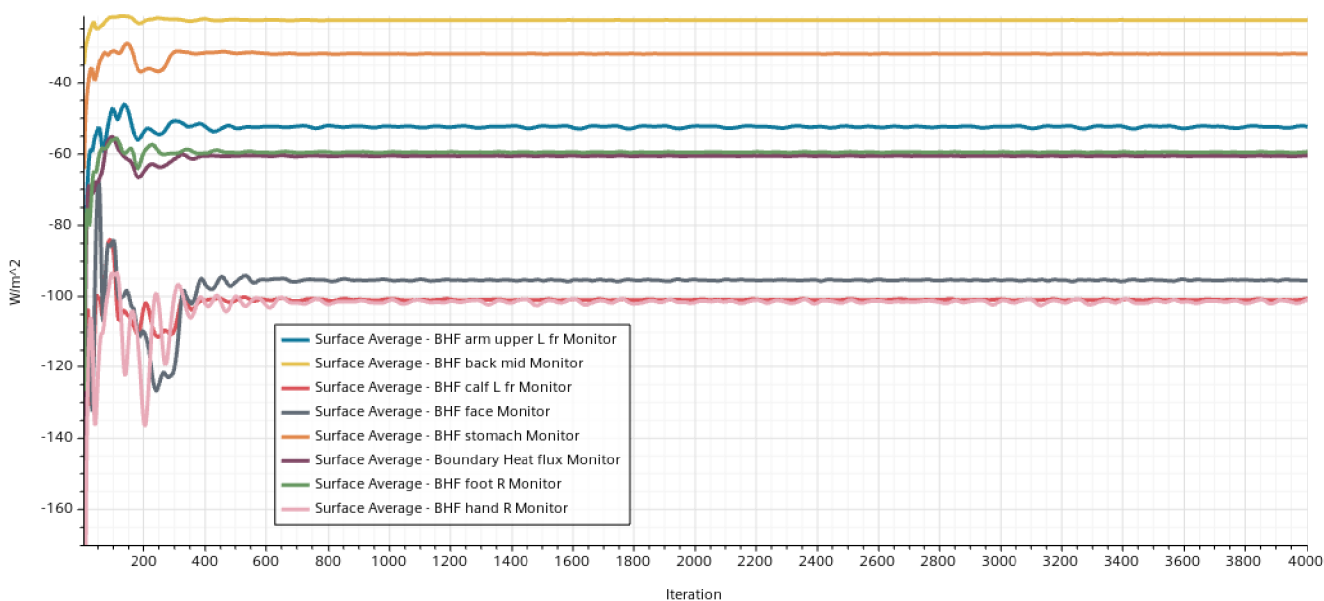
Obr. 40. Skalární scéna s řezem v rovině XZ vyobrazující teplotní pole v kalibračním boxu (případ měření s nahým manekýnem).



Obr. 41. Vektorová scéna s řezem v rovině XZ vyobrazující rychlostní pole v kalibračním boxu (případ měření letního oděvu - sukně).



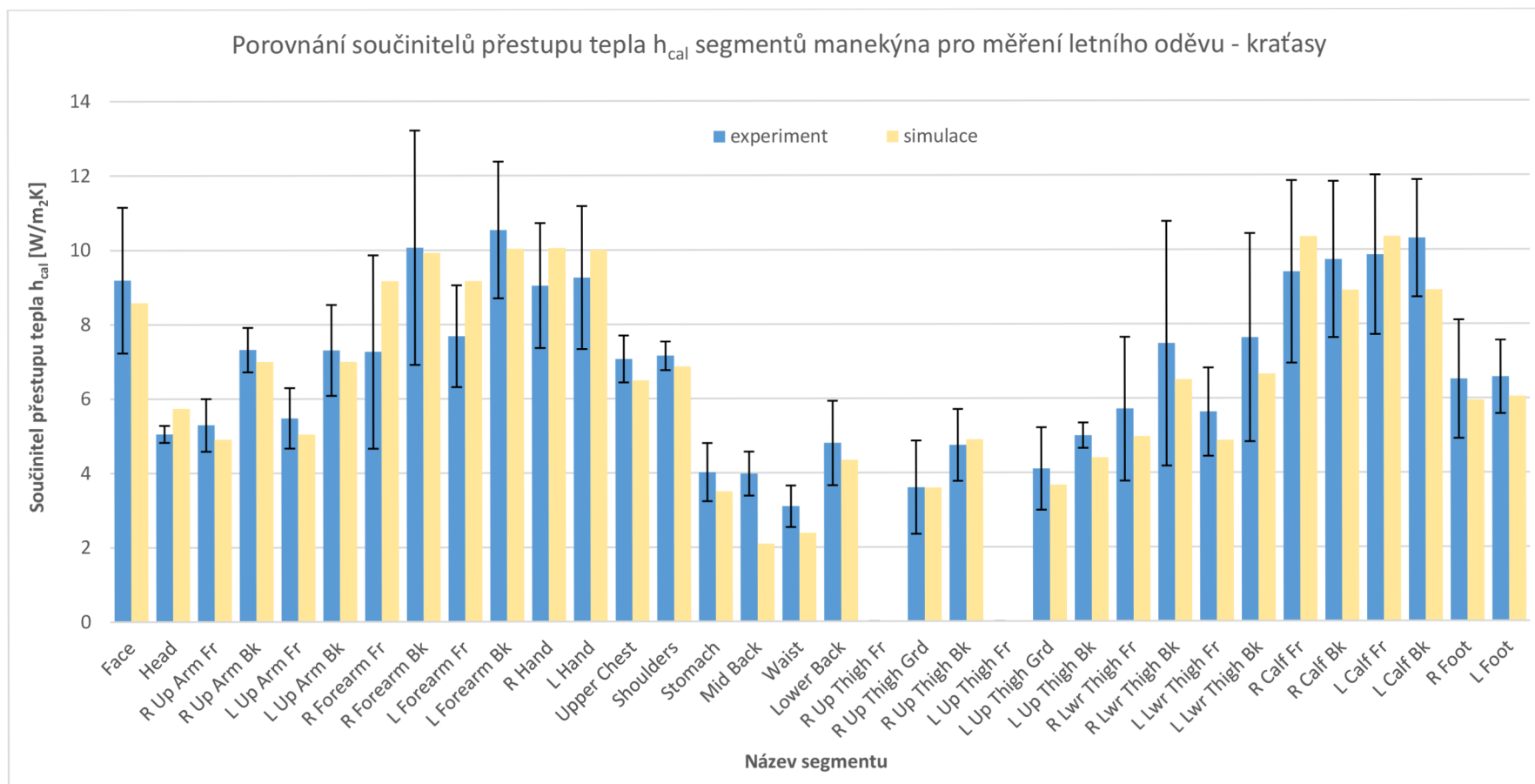
Obr. 42. Průběh residuí pro případ měření letního oděvu – sukně.



Obr. 43. Průběh měrných tepelných toků z referenčních segmentů manekýna pro případ měření letního oděvu - sukně.

Residua tohoto případu zachycená na obr. 42. vykazují dostatečnou míru konvergence. Pro náš případ podstatné residuum energie po většinu iterací pravidelně fluktuuje mezi 0,01 a 0,07 a lze říct, že v jeho průběhu nenastávají výrazné výkyvy. Ustálení výpočtu dokládá také průběh měrného tepelného toku z referenčních segmentů, který můžeme vidět na obr. 43..

8.2.3 Vyhodnocení výsledků případu měření letního oděvu – kraťasy

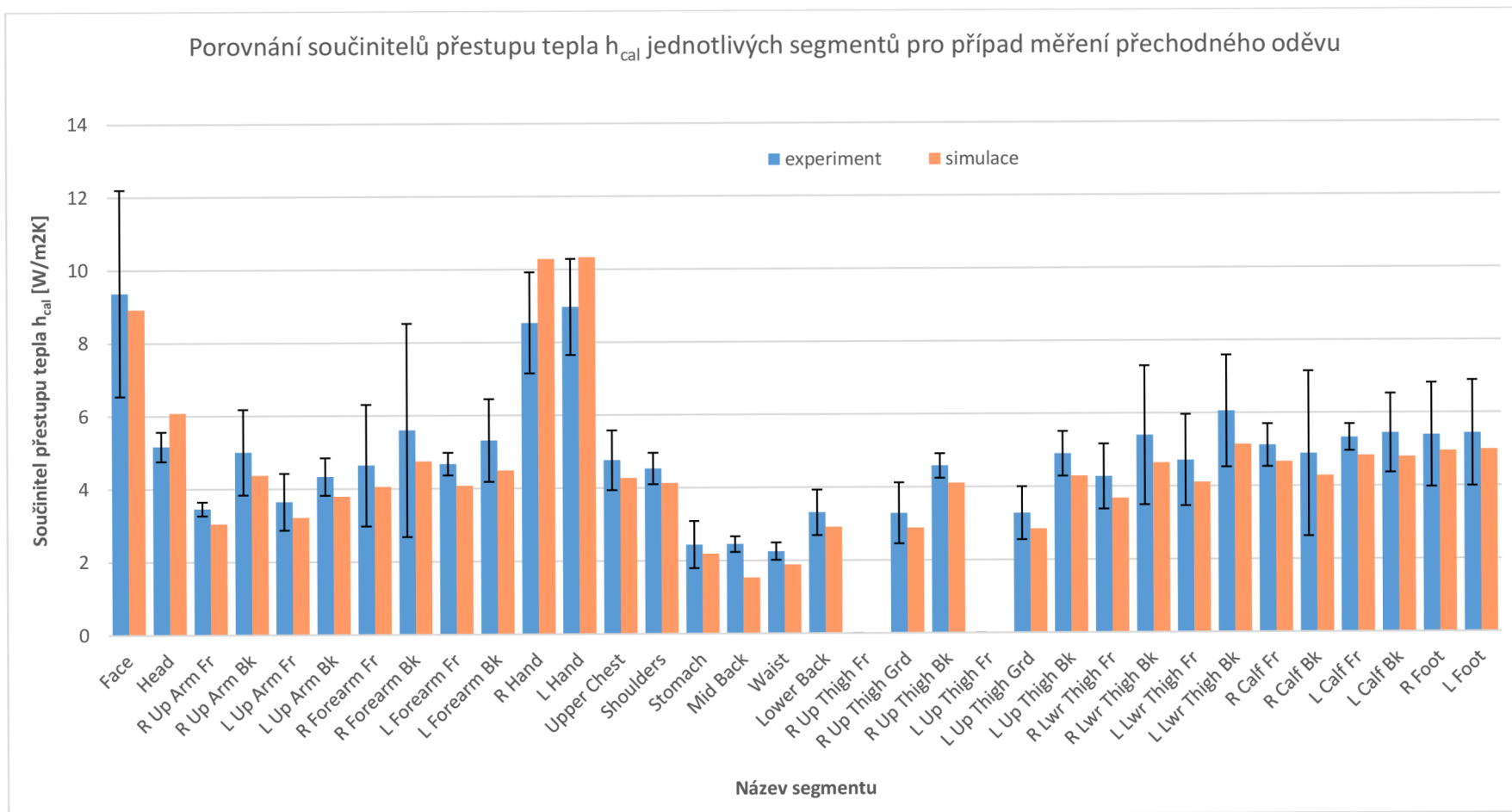


Obr. 44. Graf porovnání experimentálně a simulačně určených součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna pro měření letního oděvu - kraťasy.

Tab. 14. Tabulka hodnot součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna – případ měření letního oděvu - sukně.

Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ² K]	Simulace [W/m ² K]
1	Face	9,19	8,58
2	Head	5,05	5,74
3	R Up Arm Fr	5,29	4,91
4	R Up Arm Bk	7,31	7,00
5	L Up Arm Fr	5,48	5,04
6	L Up Arm Bk	7,30	7,00
7	R Forearm Fr	7,26	9,16
8	R Forearm Bk	10,07	9,92
9	L Forearm Fr	7,68	9,16
10	L Forearm Bk	10,54	10,04
11	R Hand	9,04	10,05
12	L Hand	9,26	10,01
13	Upper Chest	7,06	6,48
14	Shoulders	7,15	6,86
15	Stomach	4,01	3,50
16	Mid Back	3,97	2,09
17	Waist	3,10	2,38
18	Lower Back	4,80	4,34
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	3,60	3,59
21	R Up Thigh Bk	4,74	4,89
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	4,10	3,67
24	L Up Thigh Bk	5,00	4,40
25	R Lwr Thigh Fr	5,71	4,97
26	R Lwr Thigh Bk	7,47	6,50
27	L Lwr Thigh Fr	5,63	4,87
28	L Lwr Thigh Bk	7,63	6,65
29	R Calf Fr	9,40	10,35
30	R Calf Bk	9,73	8,90
31	L Calf Fr	9,86	10,35
32	L Calf Bk	10,30	8,91
33	R Foot	6,51	5,95
34	L Foot	6,57	6,04

8.2.4 Vyhodnocení výsledků případu měření přechodného oděvu

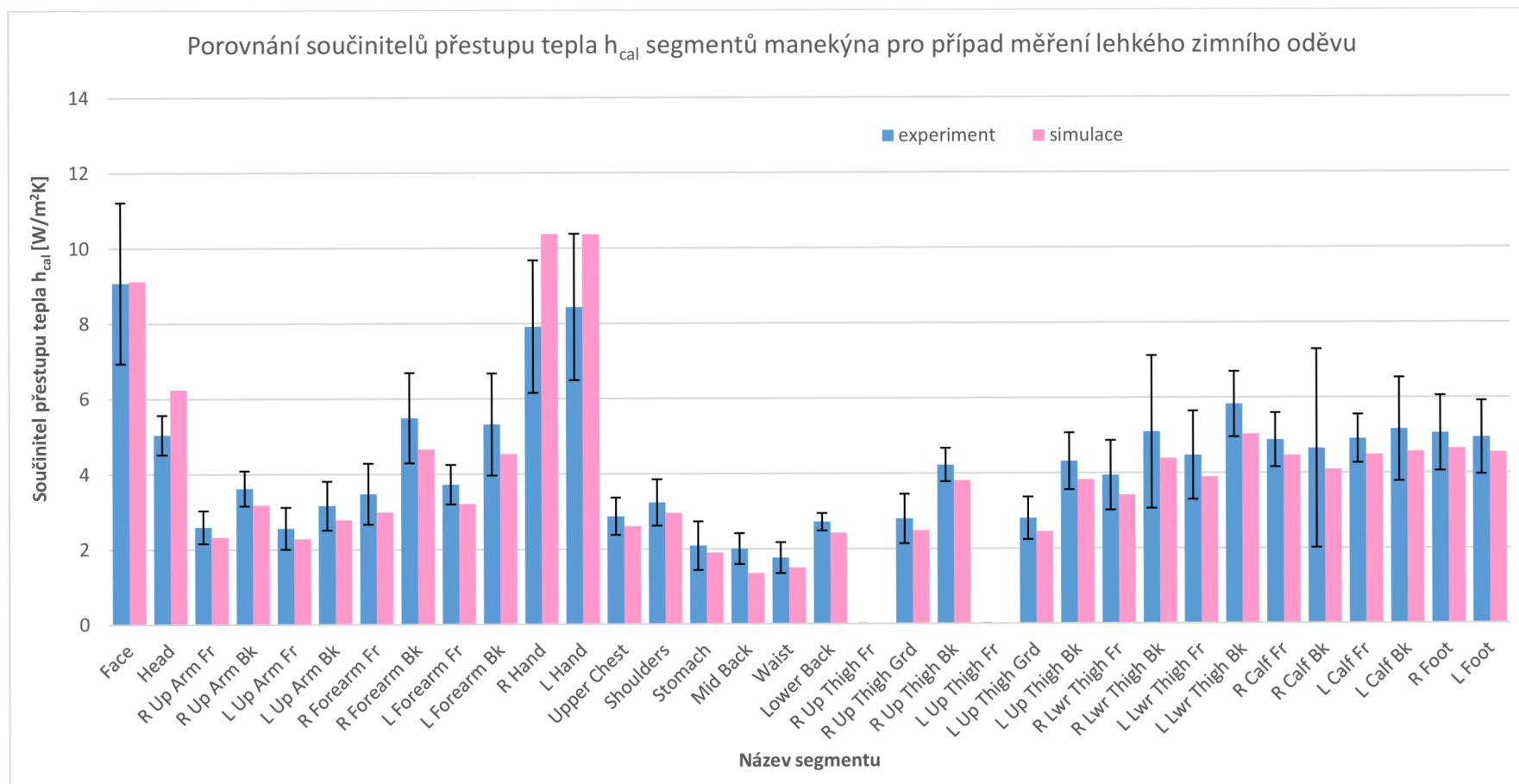


Obr. 45. Graf porovnání experimentálně a simulačně určených součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna pro měření přechodného oděvu.

Tab. 15. Tabulka hodnot součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna – případ měření přechodného oděvu.

Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ² K]	Simulace [W/m ² K]
1	Face	9,37	8,92
2	Head	5,16	6,08
3	R Up Arm Fr	3,46	3,04
4	R Up Arm Bk	5,01	4,37
5	L Up Arm Fr	3,65	3,22
6	L Up Arm Bk	4,34	3,79
7	R Forearm Fr	4,64	4,05
8	R Forearm Bk	5,60	4,75
9	L Forearm Fr	4,67	4,08
10	L Forearm Bk	5,32	4,49
11	R Hand	8,54	10,29
12	L Hand	8,97	10,33
13	Upper Chest	4,76	4,27
14	Shoulders	4,53	4,13
15	Stomach	2,44	2,19
16	Mid Back	2,45	1,53
17	Waist	2,25	1,89
18	Lower Back	3,31	2,92
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	3,29	2,88
21	R Up Thigh Bk	4,58	4,11
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	3,28	2,85
24	L Up Thigh Bk	4,90	4,29
25	R Lwr Thigh Fr	4,27	3,68
26	R Lwr Thigh Bk	5,40	4,64
27	L Lwr Thigh Fr	4,71	4,10
28	L Lwr Thigh Bk	6,05	5,14
29	R Calf Fr	5,12	4,67
30	R Calf Bk	4,88	4,28
31	L Calf Fr	5,33	4,83
32	L Calf Bk	5,44	4,80
33	R Foot	5,39	4,96
34	L Foot	5,44	4,99

8.2.5 Vyhodnocení výsledků případu měření lehkého zimního oděvu

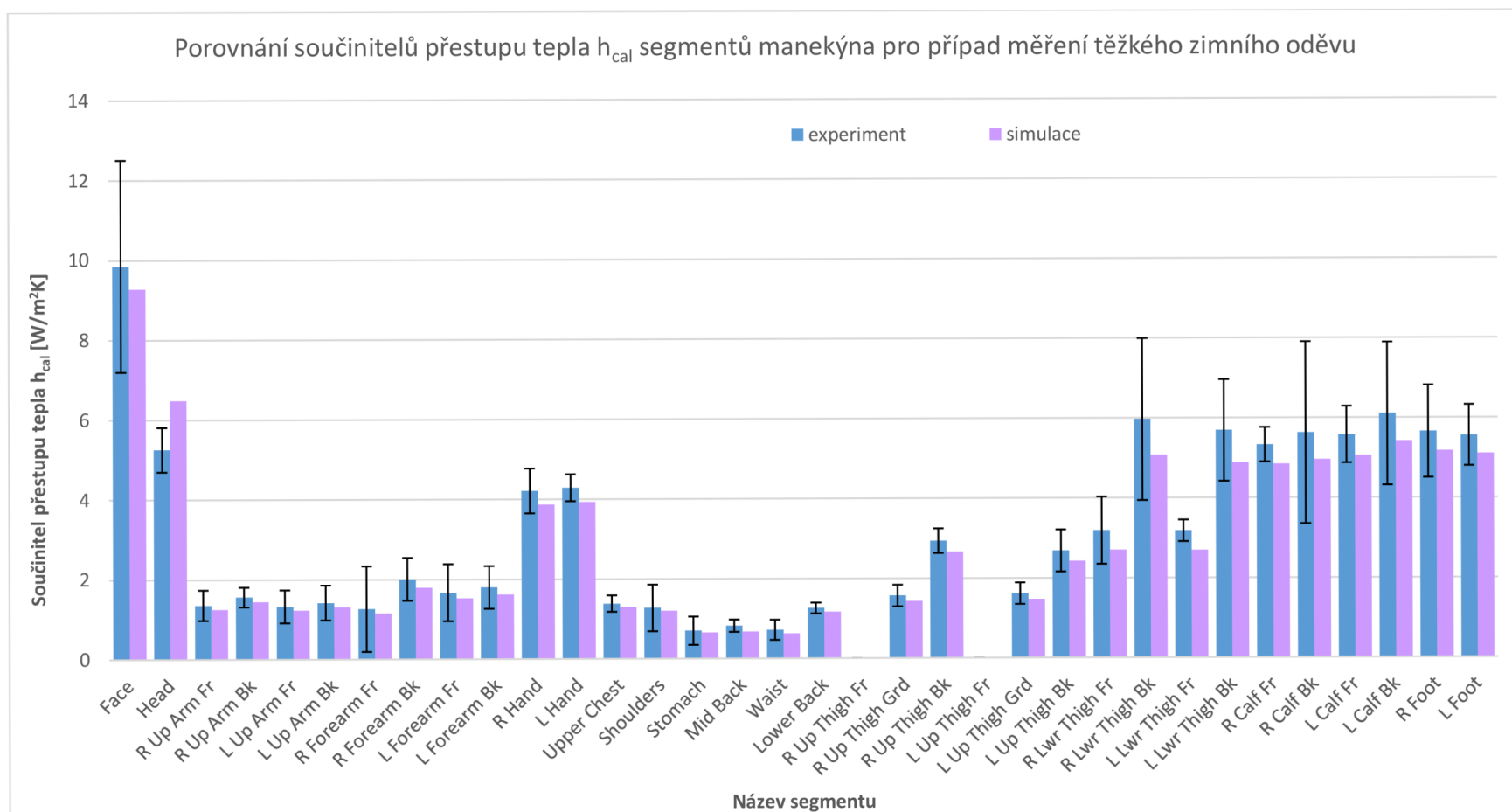


Obr. 46. Graf porovnání experimentálně a simulačně určených součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna pro měření lehkého zimního oděvu.

Tab. 16. Tabulka hodnot součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna – případ měření lehkého zimního oděvu.

Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ² K]	Simulace [W/m ² K]
1	Face	9,08	9,12
2	Head	5,04	6,24
3	R Up Arm Fr	2,59	2,33
4	R Up Arm Bk	3,62	3,17
5	L Up Arm Fr	2,56	2,28
6	L Up Arm Bk	3,16	2,78
7	R Forearm Fr	3,47	2,99
8	R Forearm Bk	5,49	4,66
9	L Forearm Fr	3,72	3,21
10	L Forearm Bk	5,32	4,53
11	R Hand	7,91	10,37
12	L Hand	8,44	10,37
13	Upper Chest	2,87	2,60
14	Shoulders	3,23	2,96
15	Stomach	2,09	1,90
16	Mid Back	2,01	1,35
17	Waist	1,76	1,50
18	Lower Back	2,71	2,42
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	2,79	2,48
21	R Up Thigh Bk	4,22	3,81
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	2,80	2,45
24	L Up Thigh Bk	4,31	3,82
25	R Lwr Thigh Fr	3,94	3,41
26	R Lwr Thigh Bk	5,09	4,39
27	L Lwr Thigh Fr	4,47	3,89
28	L Lwr Thigh Bk	5,82	5,02
29	R Calf Fr	4,87	4,46
30	R Calf Bk	4,64	4,08
31	L Calf Fr	4,90	4,48
32	L Calf Bk	5,15	4,56
33	R Foot	5,05	4,65
34	L Foot	4,94	4,54

8.2.6 Vyhodnocení výsledků případu měření těžkého zimního oděvu.



Obr. 47. Graf porovnání experimentálně a simulačně určených součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna pro měření těžkého zimního oděvu.

Tab. 17. Tabulka hodnot součinitelů přestupu tepla ze segmentů manekýna – případ měření lehkého zimního oděvu.

Číslo segmentu	Název segmentu	Experiment [W/m ² K]	Simulace [W/m ² K]
1	Face	9,85	9,28
2	Head	5,25	6,48
3	R Up Arm Fr	1,36	1,25
4	R Up Arm Bk	1,56	1,44
5	L Up Arm Fr	1,32	1,23
6	L Up Arm Bk	1,42	1,31
7	R Forearm Fr	1,26	1,15
8	R Forearm Bk	2,01	1,80
9	L Forearm Fr	1,67	1,53
10	L Forearm Bk	1,80	1,62
11	R Hand	4,21	3,87
12	L Hand	4,29	3,93
13	Upper Chest	1,38	1,30
14	Shoulders	1,27	1,20
15	Stomach	0,70	0,65
16	Mid Back	0,82	0,68
17	Waist	0,72	0,62
18	Lower Back	1,26	1,16
19	R Up Thigh Fr	0,00	0,00
20	R Up Thigh Grd	1,57	1,43
21	R Up Thigh Bk	2,94	2,67
22	L Up Thigh Fr	0,00	0,00
23	L Up Thigh Grd	1,62	1,47
24	L Up Thigh Bk	2,69	2,43
25	R Lwr Thigh Fr	3,19	2,70
26	R Lwr Thigh Bk	5,97	5,08
27	L Lwr Thigh Fr	3,18	2,69
28	L Lwr Thigh Bk	5,69	4,89
29	R Calf Fr	5,33	4,84
30	R Calf Bk	5,63	4,96
31	L Calf Fr	5,58	5,05
32	L Calf Bk	6,10	5,42
33	R Foot	5,66	5,17
34	L Foot	5,56	5,10

9 DISKUSE

Diskuse je zaměřená na komentář výsledků simulací případů měření Ing. Fojtlína a Ing. Hrubanové. Dále jsou uvedeny a popsány jednotlivé oblasti, kde došlo ke zjednodušení simulace oproti skutečnému experimentu a také jsou okomentovány vytyčené limity včetně navržení směrů možného navazujícího řešení práce.

9.1 Simulace případů experimentu Ing. Fojtlína

První případ zaměřený na simulaci měření Ing. Fojtlína s nahým tepelným manekýnem byl navržen proto, aby bylo možné zjistit celkový součinitel přestupu tepla h_{celk} zahrnující přenos tepla konvekcí a radiací. V grafech na obr. 30. a obr. 31. jsou porovnány experimentálně a simulačně určené hodnoty měrných tepelných toků a součinitelů přestupu tepla segmentů manekýna pro tohle měření. Tato porovnání mají primárně sloužit k ověření přesnosti simulace a její validaci.

Při pohledu na porovnání výsledných součinitelů přestupu tepla h_{celk} lze vidět, že neshody simulovaných hodnot s intervalem experimentálních hodnot, nastávají u segmentů v oblasti obličeje, paží, předloktí, pravé ruky, spodních zad a stehen. U segmentů obličeje a pravé ruky, kde při porovnání měrných tepelných toků hodnoty ze simulace dosahují intervalu experimentálních hodnot, lze říct, že na neshodu součinitele přestupu tepla může mít vliv rozdíl v teplotě okolního vzduchu. Ta byla v rámci experimentu určována průměrem ze dvou teplotních sond umístěných před manekýna pro všechna tři opakování, a poté byl vytvořen výsledný průměr z těchto tří hodnot. V simulaci byla určena průměrem z teplot ve dvou měřicích bodech ve stejných místech, jako byly umístěny sondy. Výsledná teplota okolního vzduchu T_a pro tento případ měření byla v experimentu vyhodnocena jako 24,33 °C, naproti tomu v simulaci se rovnala přesně 24 °C. Tento rozdíl v teplotách mohl způsobit určitou odchylku při výpočtu součinitelů přestupu tepla i u dalších segmentů. Pro minimalizaci vlivu rozdílu teplot v různých oblastech boxu by bylo vhodnější měřit teplotu vzduchu na více místech kolem manekýna. Segment rukou navíc mohl vykazovat méně přesné výsledky z důvodu kvality přístěnné mezní vrstvy, kterou se nepodařilo v rámci tvorby původní sítě dostatečně zkvalitnit.

Při měření měl manekýn na hlavu umístěné umělé vlasy, které zasahovaly i do segmentů obličeje. Tepelný odpor, který vznikl přidáním vlasů, byl do simulace zahrnut při úpravě tepelných vlastností okrajové podmínky, ovšem objekt vlasů z hlediska geometrie mohl ovlivnit také profil a průběh proudění vzduchu v oblasti hlavy a obličeje, což mohlo ovlivnit přenos tepla konvekcí pro segment obličeje a hlavy. Pro součinitel přestupu tepla h_{celk} u segmentů paží a předloktí platí, že simulačně určené hodnoty se nenacházejí v intervalu experimentálních hodnot především u segmentů označených jako Fr (např. L Up Arm Fr – přední část paže), tedy označení pro segmenty orientované směrem dopředu v rámci orientace lidského těla. Tyto segmenty jsou při experimentu nasměrovány naproti čelní stěně, která v simulaci představuje přívod vzduchu do boxu. Jelikož v rámci experimentu nebyl měřen průtok vzduchu do boxu a z něj, byl v simulaci přívod vzduchu nastaven na celou plochu čelní

stěny a byla zadána vstupní rychlost 0,1 m/s dle hodnoty naměřené anemometrem (viz kapitola 7.1). Uvedené zjednodušené nastavení přívodu vzduchu mohlo způsobit, že v simulaci se průběh proudění vzduchu v oblasti před manekýnem lišil oproti průběhu proudění při skutečném experimentu. Odlišnosti v charakteru proudění mohou následně přímo ovlivnit přenos tepla konvekcí, tudíž i výsledné součinitele přestupu tepla. Na výsledné součinitele přestupu tepla ze segmentů manekýna pro tento případ může mít vliv také nastavení okrajových podmínek Outletu, které je spolu s dalšími zjednodušeními simulace vůči experimentu popsáno v následující části diskuze (kapitola 9.3).

U segmentů lýtek a chodidel (segmenty 29 až 34) si lze všimnout nárůstu nejistot měření experimentálních hodnot součinitelů přestupu tepla h_{celk} , které jsou důsledkem problému s infiltrací vzduchu do boxu v oblasti podlahy při provádění experimentu. I přesto, že nejistota měření se pro tyto segmenty nohou pohybuje kolem cca 4 W/m²K, simulační hodnoty součinitelů přestupu tepla se od experimentálních liší maximálně o cca 1,17 W/m²K (segment L Calf Bk 32). U ostatních 20 segmentů se simulačně určené hodnoty nacházejí v rozmezí experimentálních hodnot, což je považováno za uspokojivé.

Případem navazujícím na měření s nahým manekýnem je měření s minimalizovanou radiací, při kterém byl manekýn potažen hliníkovou folií. Pomocí tohoto měření bylo možné určit součinitel přestupu tepla konvekcí h_k , který následně umožnil výpočet součinitele přestupu tepla radiací h_r . Při pohledu na grafy měrných tepelných toků \dot{q}_k a součinitelů přestupu tepla h_k je zřetelné, že nastaly určité odchylky simulačních hodnot od experimentálních. Pro většinu segmentů platí, že simulační hodnoty, které nedosáhly intervalu experimentálních dat, se od uvedených průměrných experimentálních hodnot liší maximálně o 15 až 20 %. Tento rozdíl je s přihlédnutím na zjednodušení simulace přijatelný. Platí také, že simulační hodnoty součinitele přestupu tepla h_k vychází u 18 z 32 aktivních segmentů v rozmezí experimentálních hodnot. Lze si také všimnout, že při provádění experimentu měření s minimalizovanou radiací se podařilo lépe ošetřit infiltraci vzduchu do boxu podlahou, což způsobilo snížení nejistot měření pro hodnoty h_k .

Největší rozdíly mezi experimentálními a simulačními hodnotami h_k nastávají u segmentů R Up Arm Bk (6) a L Up Arm Bk (4), které se nacházejí v zadní části paží. Rozdíl objevující se již v měrných tepelných tocích u těchto segmentů je cca 20 W/m², což odkazuje na výraznou odlišnost v přenosu tepla. Je možné, že v simulaci kolem zadní části paží došlo k nereálnému snížení rychlosti proudění vzduchu, což mohlo být způsobeno zjednodušeným nastavením přívodu a odvodu vzduchu v simulaci oproti skutečnému stavu, které bylo částečně popsáno u předchozího případu výše a bude okomentováno i v kapitole 9.3. Ohřátý vzduch stoupavého proudu nejspíše odcházel v simulaci z oblasti kolem těchto segmentů pomaleji než ve skutečnosti. Pak mohlo dojít ke snížení tepelného toku z těchto segmentů a tím i k podhodnocení výsledných součinitelů přestupu tepla. U žádných dalších segmentů nedochází k výrazným odchýlkám od intervalu experimentálních hodnot. Při porovnání dat z měření bez potahu a s potahem si lze všimnout zvýšení měrného tepelného toku a také součinitele přestupu tepla u segmentů rukou R Hand (11) a L Hand (12) o cca 1 W/m²K, což nastalo z důvodu absence hliníkové folie na těchto segmentech při měření s potahem. U pokrytých segmentů se

totiž radiální tok minimalizoval, což způsobilo zvýšení radiálního toku z rukou, protože již nebyly tolik ohřívány radiálním tokem z ostatních segmentů.

Porovnání experimentálně a simulačně určených součinitelů přestupu tepla radiací h_r (graf na obr. 38), který vychází z výpočtu pomocí zjištěných hodnot h_{celk} a h_k , poukazuje na zvýšené hodnoty nejistot měření z důvodu zatížení výsledků experimentu čtvercem nejistot z předchozích měření h_{celk} a h_k . Zmíněné zvýšení nejistot zapříčinilo rozšíření intervalu experimentálních hodnot součinitelů přestupu tepla. I přesto se podařilo udržet odchylku u mezi simulačními a experimentálními hodnotami kolem 15 % u většiny segmentů, což lze považovat za přesné. Srovnání určilo, že v intervalu experimentálních hodnot se nachází simulační hodnoty všech segmentů kromě hlavy – Head (2) a zadní části paže R Up Arm Bk (4).

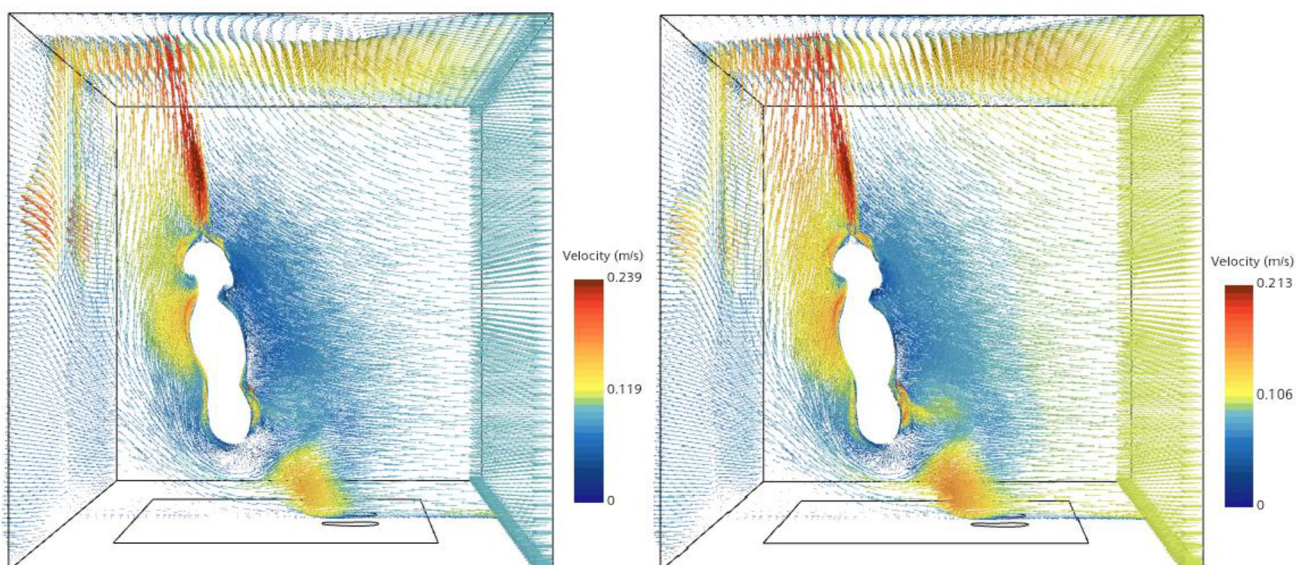
Na základě srovnání výsledných součinitelů přestupu tepla ze simulace a experimentu Ing. Fojtlína lze simulační model a jeho výsledky považovat za validní.

9.2 Simulace případů experimentu Ing. Hrubanové

Vzhledem k velmi podobnému průběhu simulací případů Ing. Hrubanové, ve kterých se jednalo o měření celkových součinitelů přestupu tepla h_{cal} pro přenos tepla z manekýna při použití pěti sestav oděvů, bude komentář výsledků uskutečněn pro všechny sestavy společně. Z grafů a tabulek pro měření s jednotlivými oděvy (strany 92 až 103), v nichž jsou porovnány experimentálně a simulačně určené součinitele přestupu tepla h_{cal} lze sledovat jednoznačný trend snižování experimentálních i simulačních hodnot h_{cal} pro jednotlivé segmenty s rostoucím tepelným odporem oděvu. Lze vidět, že přesnost simulačních hodnot vůči experimentálním se zvýšila v porovnání s případy Ing. Fojtlína.

Pro všech pět sestav oděvů platí, že v intervalu experimentálních hodnot se nachází vždy průměrně 4,6 z 32 aktivních segmentů (letní – sukně: 3, letní – kraťasy: 4, přechodný: 8, zimní lehký: 4, zimní těžký: 4), což představuje uspokojivou přesnost simulace. Mezi segmenty, jejichž simulační hodnoty h_{cal} nedosahují intervalu experimentálních hodnot, patří nejčastěji hlava – Head (2), segmenty spodní části trupu – Mid back (16), Waist (17), Lower back (18) a některé segmenty v oblasti paží. U hlavy lze argumentovat opět možným rozdílem v proudovém poli v oblasti hlavy a pod ní, který může být způsoben přítomností oblečení, např. zimní bundy, která končí pod hlavou a může tím ovlivnit proudění v oblasti hlavy. V simulaci je oblečení reprezentováno pouze změnou tepelného odporu a emisivitou povrchu, tudíž vrstva oblečení není geometricky zahrnuta, a proto může existovat odlišnost v proudění kolem segmentů manekýna. Změna v charakteru proudění poté ovlivňuje přenos tepla konvekcí. Pro segmenty 16, 17 a 18, které se nacházejí v oblasti pasu a zad, mohlo dojít k odchylkám z důvodu překrytí více vrstev oblečení (kalhoty, triko, mikina, bunda), což má dle předpokladů dopad především u sestav oděvů s více vrstvami oblečení. Při skutečném experimentu totiž překrytím vrstev vznikají ohyby, tvoří se mezi vrstvami oděvů vzduchové kapsy, které ovlivňují prostup tepla vrstvou oblečení, tedy i tepelný tok z manekýna a součinitel přestupu tepla. V simulaci je tento aspekt sice částečně zohledněn, protože oblečení je definováno jednotným tepelným odporem získaným z dat experimentu, přesto můžou nastat odlišnosti v průběhu prostupu tepla.

Podstatným kritériem pro ověření korektnosti nastavení fyzikálních modelů a zadaných parametrů fyzikálních veličin je pro případy s oděvy rychlost proudění a s ním spojená intenzita stoupavého proudu kolem manekýna. Dle znalostí vzniku stoupavého proudu by mělo v simulaci být zřetelné snížení rychlosti proudění v závislosti na snížení povrchové teploty segmentů manekýna (které představovaly povrch oblečení) a s tím spojeným snížením tepelných toků z manekýna. Tento jev bylo v rámci simulací možné sledovat, jak lze vidět při porovnání již uvedeného snímku vektorové scény rychlosti pro oděv letní – sukňe (Obr. 41.) na str. 94 se snímky vektorové scény rychlosti pro oděvy přechodný a těžký zimní (Obr. 48.). Důležité je zaměřeni se na rychlost proudění vzduchu v části stoupavého proudu nad manekýnem, kde je dosaženo maxima. Maximum se liší dle simulovaných oděvů, pro letní oděv – sukni je max. rychlost 0,266 m/s, pro přechodný 0,239 m/s a pro těžký zimní 0,213 m/s. Z uvedených maximálních rychlostí je zřetelné snižování rychlosti proudění se zvyšujícím se tepelným odporem oděvu.



Obr. 48. Vektorové scény rychlosti s řezem v rovině XZ pro případy měření přechodného oděvu (vlevo) a těžkého zimního oděvu (vpravo).

9.3 Zjednodušení modelu oproti skutečnému experimentu

Již byla v rámci komentáře výsledků uvedena některá zjednodušení simulace vůči reálnému experimentu, která mohou ovlivnit výsledky simulace a zapříčinit částečný odklon výsledných součinitelů přestupu tepla od experimentálně určených. Tato zjednodušení simulace vůči skutečnému experimentu jsou v souladu s běžným přístupem používaným při tvorbě simulačních modelů, jak bylo uvedeno již v kapitole 2.5. V této části budou uvedena další hlavní zjednodušení, která byla provedena v průběhu tvorby modelu a která mohou mít vliv na všechny simulované případy. Je důležité zmínit, že předpokládaný vliv těchto zjednodušení na průběh přenosu tepla a výsledné součinitele není výrazný natolik, aby se simulace nedala považovat za validní. Je však nutné tato zjednodušení zmínit a uvést jejich případný vliv na sledované veličiny.

Nastavení Outletu a Inletu

Stejně jako nastavení přívodu vzduchu do boxu v simulaci, jehož vliv byl již popsán v kapitole 9.1 (případ měření s nahým manekýnem), může mít vliv na výsledné měrné tepelné toky z manekýna, a tedy i součinitele přestupu tepla, nastavení Outletu, neboli odvodu vzduchu z boxu. V rámci testování kombinace nastavení okrajových podmínek vyšla jako přesnější varianta se dvěma Outlety (strop + zadní stěna) se Split ratio = 1:1. To však nezajišťuje, že zvolená přesnější varianta popisuje přesně podmínky experimentu. Na základě znalostí o vzniku stoupavého proudu (rozdíl hustot teplého a studeného vzduchu) bylo zřejmé, že velká část vzduchu z kalibračního boxu odcházela právě díky stoupavému proudu vzniklého ohřátím vzduchu o manekýna. Jak bylo uvedeno, nemohlo být ověřeno, jak velká část však odchází z boxu stropem a jak velká část vzduchu je ovlivněna prouděním vzniklým přiváděním vzduchu přední stěnou. Zvolená kombinace nastavení okrajových podmínek Outletu a Inletu představuje zjednodušení simulace vůči reálnému stavu, které má vliv na průběh proudění v boxu, a tím pádem i na výsledné měrné tepelné toky a součinitele přestupu tepla.

Geometrická zjednodušení

V kapitole Cíle a Limity práce byla uvedena některá zjednodušení simulace vůči experimentu z hlediska geometrie řešeného problému. První zmiňované zjednodušení se týká přítomnosti stojanu a držáku manekýna, který byl v kalibračním boxu přítomen během experimentu, stejně jako stojany pro měřicí sondy. Všechny tyto objekty ovlivňují proudění vzduchu v boxu (např. vznik turbulencí při obtékání), na kterém je závislý i součinitel přestupu tepla konvekcí. Další oblastí, kde došlo ke geometrickému zjednodušení, jsou oděvy, jak už bylo zmíněno u případů Ing. Hrubanové. Tvorba manekýna s 3D modely oděvů by byla příliš náročná v porovnání s vlivem, který toto zjednodušení představuje. Přesto je podstatné zmínit, že zahrnutí oděvu formou změny emisivity a přidáním tepelného odporu povrchu u daných segmentů nezohlední plně vliv oděvu na přenos tepla. Příkladem je sukně, která pokrývá segmenty stehen. Tyto segmenty jsou opatřeny tepelným odporem založeným na datech z experimentu se sukní, avšak vliv objektu sukně na proudění vzduchu v oblasti mezi stehny se může v rámci simulace a experimentu lišit.

Tvorba radiačních Patchů

Radiační Patche slouží k simulaci ploch účastnících se výměny tepla radiací na základě teorie úhlových faktorů. Jak bylo uvedeno v kapitolách věnovaných tvorbě simulace, v rámci nastavení fyzikálních modelů bylo důležité nastavit poměr Patch/Face vyjadřující procentuální pokrytí stěn buněk na povrchu manekýna vygenerovanými Patches. Přestože byl otestován vliv poměru Patch/Face na výsledky simulace, spojení povrchových ploch buněk pomocí Patches představuje zjednodušení vůči skutečnému stavu.

Předepisování emisivit

Při popisu tvorby simulace bylo řečeno, že emisivita použitých oděvů byla předepisována na segmenty pokryté daným kusem oděvu. Segmenty pokryté částečně byly ošetřeny pomocí průměrem váženým poměrem pokryté a nepokryté plochy, což samotné představuje

zjednodušení oproti realitě. Mohou potom nastat situace, ve kterých např. pro již zmíněné segmenty stehen pokryté sukni může probíhat tepelná výměna zářením z „kůže“ manekýna mezi stehny navzájem. Tento jev může nastat také u dalších částečně odkrytých segmentů a ovlivnit přenos tepla radiací, tedy i s ním související součinitel přenosu tepla.

9.4 Limity práce a návrh navazujícího řešení

Výsledný simulační model byl vytvořen s jistými cíli, ale také limity definujícími oblasti, na které simulace nebude zaměřena. V úvodní části práce byly tyto limity jasně definovány. S pomocí vědomostí a zkušeností nabytých při tvorbě simulace můžeme nyní stanovit, jestli lze některé z těchto limitů posunout a dle nich navázat na práci.

Jedním z předem vytyčených limitů bylo provedení simulace pouze ve Steady state, tedy v ustáleném stavu, kdy nebyl uvažován vliv časové závislosti. Tento limit byl přidán především z důvodu časové náročnosti na tvorbu obou variant. Pro případný další postup by bylo však možné provést simulaci všech případů také se zahrnutím dynamiky popisovaných dějů (Unsteady state).

Po posouzení výsledků simulace případů Ing. Fojtlína a Ing. Hrubanové lze říct, že simulace případů Ing. Fojtlína jsou dle počtu segmentů, jejichž simulační hodnoty součinitelů přestupu tepla se shodují s intervalem experimentálních hodnot, méně přesné než simulace případů Ing. Hrubanové. Nelze jednoznačně určit důvod, nicméně z hlediska nastavení simulace je patrné, že jedním z hlavních rozdílů mezi simulačními modely obou experimentů je použití tepelné okrajové podmínky. Zatímco naprostá většina segmentů u případů Ing. Fojtlína používá typ tepelné okrajové podmínky Temperature, u případů Ing. Hrubanové je z důvodu možnosti zadání tepelného odporu použitý pro všechny segmenty s oděvem typ tepelné okrajové podmínky Convection, jak bylo popsáno v kapitolách týkající se nastavení okrajových podmínek. Je možné, že pro tyto simulované případy se tepelná okrajová podmínka Convection chová přesněji dle skutečného průběhu přenosu tepla z povrchu manekýna než okrajová podmínka Temperature. Tento předpoklad však může být ověřen pouze přepracováním simulace, což vytváří prostor pro navazující práci za účelem zvýšení přesnosti simulačního modelu.

Poslední oblastí, kam by mohla směřovat navazující práce na simulačním modelu, je zavedení vlhkosti vzduchu do simulace. Lze předpokládat, že přidání vlhkosti vzduchu by nijak významněji nemělo ovlivnit výsledky simulace, přesto její zanedbání představuje zjednodušení vůči skutečnosti. Z hlediska zvýšení podobnosti s experimentem a zvýšení přesnosti by však bylo zajímavé vliv přidání vlhkosti vzduchu otestovat. Vlhkost vzduchu by mohla být do modelu implementována pomocí fyzikálního modelu Multiphase flow, který umožní simulovat vícefázové kontinuum, jako je právě vlhký vzduch. Tímto směrem je tedy také možné se v rámci navázání na práci orientovat.

ZÁVĚR

Smysl a přínos této práce je, v souladu s vytyčeným hlavním cílem, vytvoření CFD simulačního modelu přenosu tepla z tepelného manekýna do okolí v kalibračním prostředí. Stěžejní výstup ze simulace představuje výpočet součinitelů přestupu tepla pro dílčí měření v rámci experimentů Ing. Fojtlína a Ing. Hrubanové. Výsledné součinitele přestupu tepla určené pomocí simulace jsou následně validovány experimentálně určenými součiniteli přestupu tepla.

Úvod práce je věnován teoretickému základu potřebnému pro pochopení řešené problematiky. První kapitola teorie popisuje základní definice a vnímání tepelného komfortu. Ve druhé kapitole lze najít základní informace z oblasti přenosu tepla z lidského těla zahrnující témata jako metabolická produkce tepla v lidském těle, základy lidské termoregulace a podobně. V rámci této kapitoly jsou také obecněji popsány mechanismy přenosu tepla z lidského těla – kondukce, konvekce a radiace. Třetí kapitola teoretické části je zaměřena na vliv tepelného odporu oděvu na přenos tepla z lidského těla. Čtvrtá kapitola představuje základní metody a postupy pro vyhodnocování tepelného komfortu obsahující informace o měřicích metodách, nejpoužívanějších modelech tepelného komfortu jako je PMV-PPD nebo princip ekvivalentní teploty + diagram komfortních zón. V závěru kapitoly jsou také blíže představeni tepelní manekýni, jakožto současně nejsofistikovanější používané přístroje pro určování tepelného komfortu. Poslední kapitola shrnuje nejvýznamnější virtuální simulační metody používané v oblasti tepelného komfortu včetně CFD simulací, které jsou ještě dále popsány v kapitole 5.1.

Prvním krokem pro tvorbu simulačního modelu bylo nastudování a následný popis experimentů provedených Ing. Fojtlínem a Ing. Hrubanovou pro jejich diplomové práce. Stěžejní informace nutné pro vytvoření simulačního modelu jsou shrnuty do kapitol 3.1 a 3.2. Navazující čtvrtá kapitola uvádí navržený postup řešení z hlediska tvorby simulace a následného vyhodnocení výsledků.

Kapitolou 5 začíná postupné popisování jednotlivých kroků tvorby simulačního modelu v programu Star-CCM+ včetně vysvětlení a komentáře dílčích kroků a zvolených postupů. Součástí kapitol je také komentář použitých funkcí programu. V této kapitole je popsána práce na výpočetní síti pro řešený problém včetně nastavení parametrů sítě a provedených testů variant výpočetní sítě. Následující kapitola zachycuje proces volby fyzikálních modelů a hledání jejich vhodné kombinace pro přesné simulování procesů přenosu tepla a proudění vzduchu. V kapitolách 7 a 8 lze nalézt již postup nastavování parametrů simulace dle zvolených případů pro jednotlivá měření v rámci validačních experimentů. Součástí kapitoly je vždy jak argumentace zvolených typů okrajových podmínek a zadaných vstupních parametrů, tak i uvedení rovnic použitých pro výpočet součinitelů přestupu tepla. V závěru každé z kapitol lze nalézt výsledné porovnání simulačně a experimentálně určených hodnot, které jsou hlavním podkladem pro validaci vytvořené simulace.

Poslední kapitolu zakončující praktickou část této diplomové práce představuje diskuse, kde je provedeno detailní zhodnocení výsledků simulace, a jsou odůvodněny vzniklé neshody výsledků simulace s experimentem. Součástí diskuse je také shrnutí a popis provedených

zjednodušení simulace vůči skutečnému experimentu, vyhodnocení dodržených cílů a limitů práce, kde jsou také navrženy oblasti, ve kterých lze na tuto práci navázat.

Z výsledků a diskuse plyne, že u žádného z případů nedošlo k výraznému odchýlení simulačních a experimentálních dat, které by představovalo překážku ve validaci simulace. Na základě analýzy výsledků součinitelů přestupu tepla bylo určeno, že simulace případů měření Ing. Fojtlína vykazuje méně přesné výsledky než simulace případů Ing. Hrubanové v porovnání s experimentálními daty. Průměrná odchylka experimentálních a simulačních hodnot součinitelů přestupu tepla segmentů manekýna pro oba simulované případy měření Ing. Fojtlína (h_{celk} a h_k) vychází na $0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pro součinitele přestupu tepla h_{cal} u všech pěti simulovaných případů měření Ing. Hrubanové (pět sestav oděvů) vychází tato průměrná odchylka $0,54 \text{ W/m}^2\text{K}$. V diskusi je tento rozdíl přesnosti přisuzován především vlivu použitého typu teplotní okrajové podmínky, který by však musel být otestován v rámci navazující práce na simulaci. Vzhledem k regulačnímu rozsahu tepelného manekýna (0 až 600 W/m^2) jsou však tyto odchylky součinitelů přestupu tepla zanedbatelné. Dle výsledného porovnání simulačních hodnot součinitelů přestupu tepla s intervaly experimentálně určených hodnot provedeného v diskusi lze však vytvořený simulační model považovat za dostatečně validovaný.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MASLOW, Abraham Harold. *Motivace a osobnost*. Přeložil Pavla LE ROCH. Praha: Portál, 2021. ISBN 978-80-262-1728-2.
- [2] FOJTLÍN, M. *Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekci z povrchu tepelného manekýna*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.
- [3] FOJTLÍN, Miloš, Jan FIŠER a Jícha MIROSLAV. *Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation* [online]. 2016, October 2016, s. 257-264 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: doi:10.1016/j.expthermflusci.2016.04.015
- [4] HRUBANOVÁ, K. *Databáze tepelných parametrů oblečení pro systém iHVAC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 77 s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.
- [5] ANSI/ASHRAE standard 55-2010: *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: ASHRAE, 2010.
- [6] FIŠER, Jan. *Metody hodnocení tepelného komfortu a jejich využití v experimentální a konstrukční praxi*. Brno, 2021, 223 s. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí.
- [7] POKORNÝ, Jan. *Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2012. Disertační práce 164 s., 3 přílohy. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav JÍCHA, CSc.
- [8] NIKOLOPOULOU, Marialena a Koen STEEMERS. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings* [online]. 2003, 35(1), 95-101 [cit. 2023-03-06]. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/S0378-7788(02)00084-1
- [9] INCROPERA, Frank P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6th ed. New York: John Wiley, 2007. ISBN 0-471-45728-0.
- [10] KOPECKÝ, David. Ověření predikce metabolismu na základě vykonávané činnosti [online]. Brno, 2021 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132474>.
- [11] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí: 1. a 2. část* [online]. [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/technika-prostredi/technika-prostredi>. Elektronická skripta. FSI VUT v Brně.
- [12] J. Van Hoof, M. Mazej, and J. L. M. Hensen, "Thermal comfort: Research and practice," *Front. Biosci.*, vol. 15, no. 2, 2010, doi: 10.2741/3645.
- [13] H. O. NILSSON, "Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models," University of Gävle, 2004.

- [14] TSCHIRSCHNITZ, Gustav a Pierre SABROWSKI. Computational Fluid Dynamics Methods Explained. In: *Dive solutions* [online]. 2020 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.dive-solutions.de/blog/cfd-methods>
- [15] What is CFD | Computational Fluid Dynamics?. In: *Simscale* [online]. March 16th, 2023 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>
- [16] FIŠER, Jan. *Tepelný komfort. Škodliviny ve vnitřním vzduchu. Klimatické podmínky*. Technika prostředí. Brno, 2022. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí.
- [17] ČSN EN ISO 14505-2 *Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech - Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty*. Český normalizační institut, srpen 2007.
- [18] ČSN EN ISO 15Ř31: *Oděvy-Fyziologické účinky- Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny*. Český normalizační institut, Praha, 2004.
- [19] Surface and volume extruders in Simcenter STAR-CCM+. In: *Volupe* [online]. 2023, 10 March 2023 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://volupe.se/surface-and-volume-extruders-in-simcenter-star-ccm/>
- [20] Simcenter STAR-CCM+ 2210 User Guide. *Siemens Support Center* [online]. 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: https://docs.sw.siemens.com/cs-CZ/doc/226870983/PL20221114461151086.starccmp_userguide_pdf/pdf?page=146&audience=external&fbclid=IwAR1bAY9yHjNgPMgBuiFNU1jZ3q6h211kdYM8slEVV5BZ-V5wvmiDIHuFgFU
- [21] What are best practices for natural convection cases?. In: *Siemens Support Center* [online]. 26. března 2021 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000034061_EN_US
- [22] Should I use the coupled or the segregated solver for mysimulation?. In: *Siemens Support Center* [online]. October 03, 2017 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000032045_EN_US
- [23] Should I use the Boussinesq approximation or the ideal gas equation?. In: *Siemens Support Center* [online]. June 07, 2018 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000038190_EN_US
- [24] Physic models in STAR-CCM+ (Part IV: turbulence models). <https://theansweris27.com/> [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://theansweris27.com/physic-models-in-star-ccm-part-iv/>
- [25] S2S radiation in Simcenter STAR-CCM+. In: *Volupe* [online]. February 12, 2021 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://volupe.se/s2s-radiation-in-simcenter-star-ccm/>
- [26] General Surface-to-Surface Radiation Tips. In: *Siemens Support Center* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000031511_EN_US
- [27] How to set the radiation patch distribution and check it?. In: *Siemens Support Center* [online]. October 25, 2017 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://support.sw.siemens.com/en-US/knowledge-base/KB000031376_EN_US

- [28] PAVLÍK, V. *Studie vlivu radiačního vytápění a chlazení na tepelnou pohodu řidiče osobního automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 91 s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.
- [29] *Zdroje chyb. Absolutní a relativní chyba*. Praha: [online]. Dostupné také z: <http://mat.fsv.cvut.cz/aznm/predn5.pdf>. Přednáška. České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra matematiky.
- [30] ZHANG, H., T. L. HU a J. Ch. ZHANG. Surface emissivity of fabric in the 8–14 μ m waveband. *The Journal of The Textile Institute*. Taylor & Francis, 2009, 90-94. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/00405000701692486>
- [31] DRAGOŞ, P.F., M.D. ŞUTEU, R. PANCU a S.D. BUHAŞ. Thermal Transfer Analysis for Sports Footwear, for Performance Athletes, during Volleyball Training. *Sustainability*. 2023, 15(652). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/su15010652>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics	
<i>HVAC</i>	Heating, Ventilation, Air conditioning	
<i>ASHRAE</i>	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	
<i>PMV-PPD</i>	Predicted Mean Vote – Predicted Percentage of Dissatisfied	
<i>MTV</i>	Mean Thermal Vote	
<i>OTTP</i>	Odbor termomechaniky a techniky prostředí	
<i>RANS</i>	Reynolds-Averaged Navier-Stokes	
<i>RPID</i>	Radiation Patch ID	
<i>Al</i>	Hliník (chemická značka)	
M, \dot{q}_m	Metabolická produkce tepla	[W/m ²]
W	Vykonaná mechanická práce	[W/m ²]
M	Metabolická produkce tepla	[W/m ²]
S_{sk}	Tepelný tok akumulovaný v pokožce	[W/m ²]
S_{cr}	Tepelný tok akumulovaný v těle	[W/m ²]
C	Přenos tepla konvekcí z lidského těla	[W/m ²]
K	Přenos tepla kondukcí z lidského těla	[W/m ²]
R	Přenos tepla radiací z lidského těla	[W/m ²]
K	Přenos tepla kondukcí z lidského těla	[W/m ²]
E_{sk}	Teplo odebírané z těla odpařováním vody (potu)	[W/m ²]
C_{res}	Konvekční složka přenosu tepla z dechu	[W/m ²]
E_{res}	Teplo spotřebované k odpaření vody při dýchání	[W/m ²]
\dot{q}	Měrný tepelný tok (hustota tepelného toku)	[W/m ²]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W/mK]
h	Součinitel přestupu tepla	[W/m ² K]
T_s	Teplota povrchu obtékaného tělesa	[°C]
T_a	Teplota okolního vzduchu	[°C]

u_a	Rychlost vnější části proudu neovlivněné povrchem	[°C]
R_α	Konvektivní tepelný odpor mezní vrstvy	[m ² K/W]
ε	Emisivita	[-]
r	Reflexivita	[-]
μ	Transmisivita	[-]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W/m ² K ⁴]
T	Teplota	[K]
F	Úhlové faktory	[-]
$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2}$	Radiační tepelný tok z tělesa 1 do tělesa 2 (okolí)	[W]
A	Plocha	[m ²]
δ	Tloušťka stěny	[m]
A	Plocha	[m ²]
R_λ	Tepelný odpor materiálu vůči vedení tepla	[m ² K/W]
R_k	Kombinovaný konvektivní a radiační tepelný odpor	[m ² K/W]
R_{cl}	Tepelný odpor oděvu	[m ² K/W]
R_v	Tepelný odpor vzduchové vrstvy oděvu	[m ² K/W]
I_{cl}	Clo (jednotka tepelného odporu oděvu)	[clo]
t_{eq}	Ekvivalentní teplota	[°C]
\dot{q}_{real}	Měrný tepelný tok mezi povrchem manekýna a skutečným prostředím	[W/m ²]
h_{cal}	Součinitel přestupu tepla z manekýna pro kalibraci oděvů	[W/m ² K]
v_a	Rychlost proudění okolního vzduchu	[m/s]
\dot{q}_0	Celkový měrný tepelný tok z povrchu manekýna	[W/m ²]
\dot{q}_k	Měrný tepelný tok konvekcí z povrchu manekýna	[W/m ²]
\dot{q}_r	Měrný tepelný tok radiací z povrchu manekýna	[W/m ²]
h_k	Součinitel přestupu tepla konvekcí	[W/m ² K]
h_r	Součinitel přestupu tepla radiací	[W/m ² K]
h_{cal}	Celkový součinitel přestupu tepla pro kalibraci daného oděvu	[W/m ² K]

h_{celk}	Celkový kombinovaný součinitel přestupu tepla	[W/m ² K]
h_r	Součinitel přestupu tepla radiací	[W/m ² K]
$q_{conv,ext}$	Měrný tepelný tok konvekcí na externí straně okrajové podmínky	[W/m ²]
q_{cond}	Měrný tepelný tok kondukcí na interní straně okrajové podmínky	[W/m ²]
q_{conv}	Měrný tepelný tok konvekcí na interní straně okrajové podmínky	[W/m ²]
h_{∞}	Součinitel přestupu tepla konvekcí na externí straně okrajové podmínky	[W/m ² K]
T_{∞}	Teplota okolí na vnější straně okrajové podmínky	[°C]
$T_{surf,ext}$	Teplota povrchu na vnější straně výpočetní domény	[°C]
T_{surf}	Teplota povrchu okrajové podmínky	[°C]
h_c	Součinitel přestupu tepla počítaný simulačně	[W/m ² K]
T_c	Teplota okolí počítaná simulačně	[°C]
Δ	Absolutní odchylka	[-]
δ	Relativní odchylka	[-]
A	Přesné číslo	[-]
a	Přibližné číslo	[-]
$u_A(x)$	Nejistota typu A pro měřenou veličinu x	[-]
k_{uA}	Bezpečnostní faktor	[-]
n	Počet měření	[-]
x_i	I-tá naměřená veličina	[-]
\bar{x}	Aritmetický průměr dané veličiny	[-]
$u_B(x)$	Nejistota typu B pro měřenou veličinu x	[-]
$u_C(x)$	Nejistota typu C pro měřenou veličinu x	[-]
U	Výsledná nejistota měření	[-]
u_{Ahr}	nejistota typu A pro součinitel přestupu tepla radiací	[-]
u_{Ahcelk}	nejistota typu A pro celkový kombinovaný součinitel přestupu tepla	[-]
u_{Ahk}	nejistota typu A pro součinitel přestupu tepla konvekcí	[-]