



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VENTILOVANÉ OCHRANNÉ ODĚVY PRO ZDRAVOTNÍKY V KONTAMINOVANÝCH PROSTŘEDÍCH

VENTILATED PROTECTIVE CLOTHING FOR HEALTHCARE STAFF IN CONTAMINATED ENVIRONMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Kristýna Štenclová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	Ing. Kristýna Štenclová
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Technika prostředí
Vedoucí práce:	Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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:

Ventilované ochranné oděvy pro zdravotníky v kontaminovaných prostředích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V prostředích, která jsou nebezpečná pro lidské zdraví a život z pohledu působení nebezpečných chemických látek či biologicky patogenních mikroorganismů a virů je nezbytné oddělení člověka od prostředí pomocí izolačních ochranných oděvů. Tyto oděvy však znemožňují přirozený odvod tepla z lidského těla do okolí a hrozí tak nebezpečí přehřátí lidského organismu. Jednou z metod, jak umožnit přenos tepla pocením je nucená ventilace prostoru pod oděvem okolním filtrovaným vzduchem. Otázkou však je kolik vzduchu a na jaká místa je možné přivádět, aby bylo zabezpečeno adekvátní odpařování potu, ale nedocházelo k nežádoucímu lokálnímu přechlazování lidského těla.

Cíle diplomové práce:

Úkolem bude provést experimentální měření rozvodů vzduchu pod ochranný oděv a určení odváděného tepla odpařování z povrchu tepelného manekýna Newtona. Zadání je vytvořeno v návaznosti na projekt vývoje speciálního ochranného oděvu pro zdravotníky (ochrana před COVID19) a osoby pracující v nebezpečných prostředích (chemické látky, čisté prostory tad.).

Seznam doporučené literatury:

HAVENITH, George a Dusan FIALA. Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress. *Comprehensive Physiology*. 2016, roč. 6, č. 1, s. 255–302. ISSN 20404603. DOI: 10.1002/cphy.c140051

GERRETT, Nicola, Yacine OUZZAHRA a George HAVENITH. Distribution of skin thermal sensitivity. In: *Agache's Measuring the Skin: Non-invasive Investigations, Physiology, Normal Constants: Second Edition*. Springer International Publishing Switzerland, 2017, s. 1285–1301. ISBN 9783319323831. DOI: 10.1007/978-3-319-32383-1_72

LUO, Maohui et al. High-density thermal sensitivity maps of the human body. Building and Environment. 2020, roč. 167. ISSN 03601323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106435

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na experimentální ověření chladičho účinku na člověka ventilací okolního vzduchu pod ochranný oděv. První část práce obsahuje rešerši zabývající se pojmy spojenými s tepelným komfortem a způsoby přenosu tepla. V této části jsou představeny dostupné možnosti chlazení člověka pohybujícího se v prostředí o vysoké teplotě. Druhá část je zaměřena na definování hypotéz a popis experimentů, které byly pro tuto práci provedeny. Poslední částí práce jsou samotné výsledky experimentů a jejich porovnání s daty z experimentů z odborné literatury.

Klíčová slova

Tepelný komfort, chlazení, tepelný manekýn, ochranný oděv

ABSTRACT

Focus of the masters thesis is experimental verification of cooling effect of ambient air stream directed under a protective clothing of a human. The first part is a review of literature encompassing concepts related to thermal comfort and heat transfer. Possibilities of cooling a human who is moving in high ambient temperature environment are introduced in this part. The second part is focused on hypotheses devised and experiments performed. The last part is focused on results of the experiments and their comparison with an experiment described in literature.

Key words

Thermal comfort, cooling, thermal manikin, protective clothes

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTENCLOVÁ, Kristýna. *Ventilované ochranné oděvy pro zdravotníky v kontaminovaných prostředích* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140677>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fišer.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Ventilované ochranné oděvy pro zdravotníky v kontaminovaných prostředích** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Ing. Kristýna Štenclová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Bc. Janu Fišerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Děkuji také Ing. Ondřeji Pechovi, Ph.D. a Ing. Janu Pokornému, Ph.D. za cenné rady, konstrukční návrhy a čas strávený při realizaci experimentů v klimatické komoře.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Teoretická část.....	12
1.1 Tepelná pohoda.....	12
1.2 Tepelná bilance.....	12
1.4 Způsoby přenosu tepla.....	15
1.5 Ochranné oděvy a způsoby chlazení.....	18
2 Experimentální část.....	25
2.1 Definování pracovních hypotéz.....	25
2.1.1 Hypotéza 1 – Odvádění tepla evaporací pomocí ventilace okolního vzduchu pod oděv.....	25
2.1.2 Hypotéza 2 – Regulace přenosu tepla na základě distribuce větracího vzduchu.....	26
2.2 Teoretické výpočty před experimenty.....	26
2.3 Měřicí přístroje a pomůcky.....	28
2.4 Podmínky a příprava měření.....	32
2.5 Přípravné testy.....	33
2.6 Experiment 1 – ověření ochlazovacího účinku.....	36
2.6.1 25 °C, 50 % RH.....	37
2.6.2 30 °C, 50 % RH.....	40
2.7 Experiment 2 – vliv konstrukce vzduchovodů a distribuce vzduchu.....	43
2.7.1 Plně osazený overal.....	46
2.7.2 Pouze distributor.....	51
2.7.3 Vzduchovody do nohou.....	54
2.8 Shrnutí.....	57
3 Porovnání výsledků experimentů s daty z odborné literatury.....	60
3.1 Data z odborné literatury – experiment s dobrovolníky.....	60
3.2 Výsledky hypotézy 1.....	63
3.3 Výsledky hypotézy 2.....	69
ZÁVĚR.....	73
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	75
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78

ÚVOD

Člověk je v důsledku svého vývoje přizpůsoben prostředí, ve kterém se vyvinul. Díky termoregulaci je schopen reagovat na změny prostředí v širokém rozsahu teplot a dalších parametrů, které ovlivňují přenos tepla z těla a tepelnou bilanci mezi tělem a okolím. Pokud je člověk vystaven prostředí s vysokou teplotou, tělo začne v rámci zachování stálé tělesné teploty odvádět teplo z těla v podobě potu, který je z povrchu těla odpařován.

V mnoha profesích jsou využívány ochranné oděvy, které člověka izolují od okolí a chrání jej tak před různými chemickými, biologickými a patologickými škodlivinami. Tím je ovšem člověk připraven o přirozenou schopnost termoregulace. Jelikož není možné odpařováním potu odvést přebytečné teplo, začne vlhkost pod oděvem kondenzovat a ulpívat na oděvu. To vede ke značné zátěži organismu. Důsledkem může být přehřátí organismu doprovázené zdravotními obtížemi jako např. omdlávání, závratě apod.

V současné době se svět potýká s nemocí COVID-19 a ochranný oděv je tak významně využíván ve zdravotnictví. Kromě ochranných oděvů musí pracovníci ve zdravotnictví nosit také ochranné rukavice, případně brýle nebo štít a respirátor, respektive roušku. Tyto pomůcky ztěžují dýchání, a protože se zdravotníci při práci v oděvu pohybují, je práce svalů nutných k dýchání fyzicky náročnější a více vyčerpávající. Pokud jsou navíc vystaveni horkému letnímu dni, mohou být po fyzické i psychické stránce nošením ochranných pomůcek značně omezeni, ať už se jedná o schopnost udržení pozornosti, přehřívání těla či jiné potíže s tím spojené. Nabízí se tedy otázka, jak zdravotníkům a jiným pracovníkům z hlediska tepelného diskomfortu ulevit a podpořit přirozené mechanismy ochlazování lidského těla i v těchto ochranných oděvech. Této problematice je věnována diplomová práce, která se zabývá možností použití ventilovaných ochranných oděvů s cílem omezení tepelného stresu pracovníků.

1 Teoretická část

1.1 Tepelná pohoda

Tepelná pohoda (tepelný komfort) je definována jako stav mysli vyjadřující uspokojení s tepelným prostředím. Tepelný stav prostředí je tedy subjektivně hodnocen na základě pocitů, které u člověka vyvolává. [1]

Tepelná pohoda je dána parametry prostředí a parametry člověka. Mezi faktory prostředí ovlivňující tepelný komfort jsou řazeny [2]:

- Teplota vzduchu
- Rychlost proudění vzduchu
- Střední radiační teplota
- Relativní vlhkost

Faktory na straně člověka jsou dány:

- Množstvím produkovaného tepla (aktivitou)
- Tepelným odporem oděvu
- Individuálními dispozicemi a aklimatizací

Teplota vzduchu je parametr ovlivňující přenos tepla z lidského těla do okolí konvekcí a dýcháním. Za střední radiační teplotu je považována společná teplota všech okolních ploch, při které by bylo celkové množství tepla přenášené radiací mezi povrchem těla a okolními plochami stejné jako skutečný stav. Rychlostí proudění vzduchu je ovlivněn přenos tepla konvekcí a vypařováním potu z pokožky. [2], [3]

1.2 Tepelná bilance

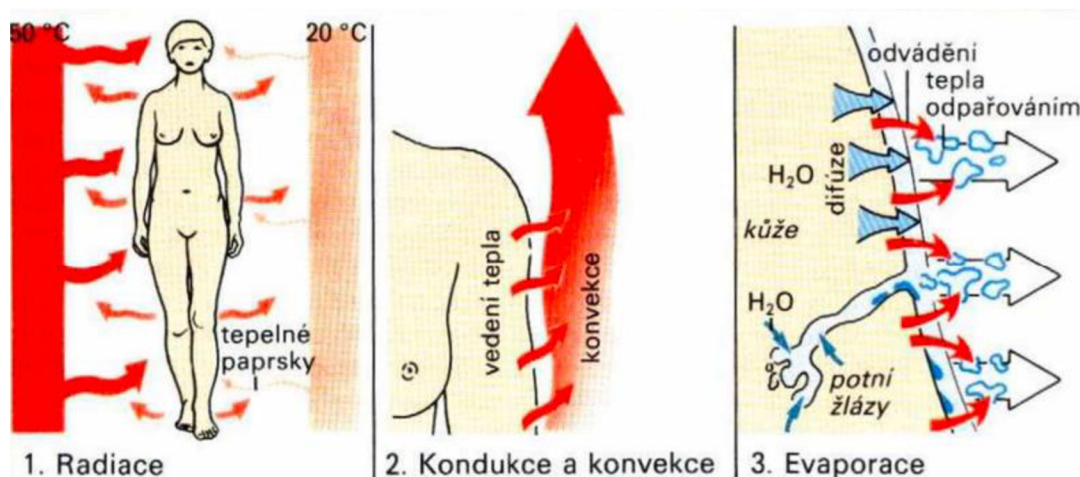
Aby bylo dosaženo tepelné pohody, musí být splněna rovnice tepelné rovnováhy člověka. [1], [4] Tu lze vyjádřit rovnicí, kdy teplo produkované je rovno teple odváděnému do okolí konvekcí, sáláním a vypařováním [5]:

$$\dot{Q}_m(1 - \eta) = \dot{Q}_{ved} + \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d \quad [W] \quad (1.1)$$

\dot{Q}_m [W] metabolické teplo (metabolický tepelný tok), kde [1]:

$$\dot{Q}_m = \dot{q}_m \cdot S \quad (1.2)$$

S [m²] plocha povrchu těla
 η [-] mechanická účinnost lidského těla
 $\dot{Q}_{ved}, \dot{Q}_k, \dot{Q}_r, \dot{Q}_v, \dot{Q}_d$ [W] tepelný tok přenášený do okolí z lidského těla vedením, konvekcí, radiací, vypařováním a dýcháním



Obrázek 1.1 Mechanismy sdílení tepla z lidského těla do okolí [6]

Jedním z faktorů ovlivňujícím požadovanou optimální teplotu ze strany člověka je produkce metabolického tepla. Ta je vyšší s intenzitou činnosti člověka. Tepelný výkon člověka je dán hodnotou metabolismu závisující na aktivitě, věku, postavě a fyzické kondici jedince apod. [7]

Metabolismus

Teplo je lidským tělem neustále produkováno. Tuto metabolickou tepelnou produkci lze rozlišit na:

Bazální metabolismus

V případě tohoto metabolismu je teplo produkováno na základě biologických procesů v lidském těle. To platí i v případě, kdy člověkem není vykonávána žádná aktivita (např. během spánku apod.). Teplo je produkováno zejména trávením potravy. Jednotkou met je vyjádřena rychlost metabolismu (metabolická hodnota), kdy 1 met je roven $58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ povrchu těla. 0,8 met je hodnota odpovídající bazálnímu metabolickému výdeji člověka v klidovém stavu. [7], [8], [9]

Svalový metabolismus

Energie je v těle uvolňována během konání práce. Většina této energie je odevzdána do okolí v podobě tepla, což je nezbytná podmínka k zajištění rovnováhy mezi teplem produkováným a teplem přenášeným do okolí. Část energie je spotřebována na fyzickou činnost. Termoregulace je započata v případě, kdy není veškeré nadbytečné teplo odvedeno do okolí. [7], [8]

Vnitřní teplota těla je přibližně rovna 37 °C . V závislosti na okolním prostředí je teplota kůže cca $31 - 34 \text{ °C}$. Teplo je z vnitřních tkání neustále přenášeno vedením na povrch kůže, odkud je odváděno prostřednictvím sálání, proudění, vedení a vypařování. [8]

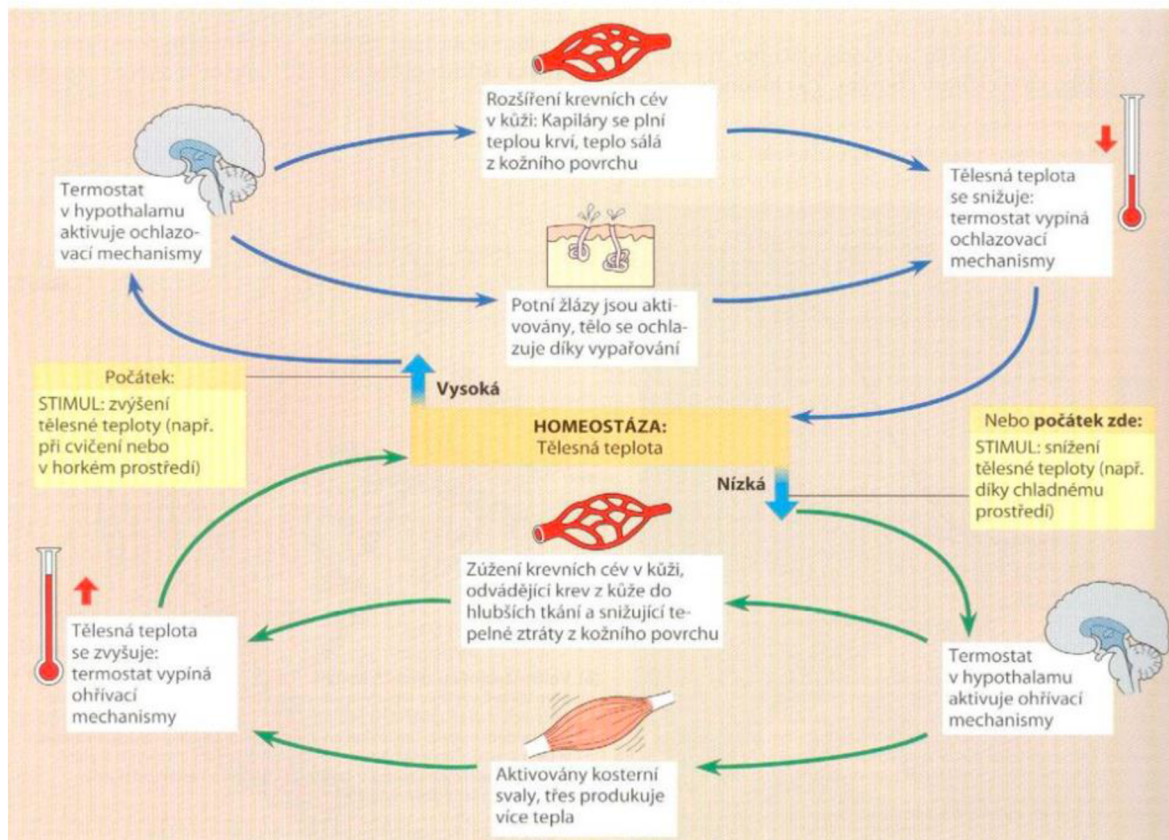
Do určité nejvyšší teploty okolí je při dané aktivitě poměrně malá část produkovaného tepla odváděna vypařováním. Větší část tepla je odváděna konvekcí a sáláním a je dosaženo tzv. suchého ochlazování těla (bez nadměrného pocení). V případě, že je překročena určitá hranice teploty okolí nebo je dosaženo větší produkce tepla (větší fyzická námaha), je zvyšováno vylučování potu a nadbytečné teplo je odváděno vypařováním – tzv. mokřým ochlazováním těla. [5]

Termoregulace

Tepelné pohody může člověk dosáhnout pomocí tří termoregulačních stupňů. První termoregulační stupeň je znám jako vazomotorický. Během této termoregulace je aktivně měněn průměr cév pokožky (zejména na periférii končetin, uší, nosu). Vazodilataci je nazýván stav při hrozícím přehřátí, kdy jsou cévy rozšířeny. Důsledkem je změna průtoku krve pokožkou a z toho plynoucí změna teploty pokožky. Následkem je nárůst teploty pokožky. Opačným případem je vazokonstrikce. Jedná se o stav při hrozícím podchlazení těla. Cévy jsou zúženy, čímž je zapříčiněn pokles teploty pokožky.

Druhý termoregulační stupeň je charakteristický tvorbou potu při tepelném přetížení a jeho odpařováním. V případě, že tento druh termoregulace není dostatečný pro zabezpečení tepelné rovnováhy, je doprovázen výraznou změnou teploty těla. Může dojít k přehřátí nebo podchlazení organismu a k ohrožení na životě. Podchlazení je doprovázeno třesem v důsledku zvýšení svalového napětí.

Vědomou termoregulací je nazýván třetí termoregulační stupeň. Vědomá termoregulace zabezpečuje tepelnou pohodu záměrnou činností – např. změnou oděvu, tělesné činnosti, teploty prostředí apod. [10]



Obrázek 1.2 Reakce organismu na změnu tělesné teploty [11]

1.4 Způsoby přenosu tepla

Mezi lidským tělem a okolím dochází ke sdílení tepla kondukcí, konvekcí, radiací, dýcháním a vypařováním.

Přenos tepla kondukcí

Přenosem tepla kondukcí, čili vedením, je energie přenášena od více energetických k méně energetickým částicím. U tuhých látek jsou těmito částicemi atomy, v případě kapalin a plynů molekuly. [12]

Přenos tepla vedením je definován Fourierovým zákonem [12]:

$$\dot{q}_V = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (1.3)$$

\dot{q}_V	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok vedením
\dot{Q}	[W]	celkový tepelný tok přenášený plochou S
S	[m ²]	plocha
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost
$\frac{dT}{dx}$	[K·m ⁻¹]	gradient teploty ve směru šíření osy x

Jednorozměrný tvar Fourierova zákona lze zapsat jako [12]:

$$\dot{q}_V = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\delta} = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{\delta} \quad (1.4)$$

respektive:

$$\dot{Q} = \lambda S \cdot \frac{\Delta T}{\delta} = \frac{\Delta T}{\frac{\delta}{\lambda S}} \quad (1.5)$$

kde:

$$\frac{\delta}{\lambda} = R_\lambda \quad (1.6)$$

T_1	[°C]	teplota povrchu o vyšší teplotě
T_2	[°C]	teplota povrchu o nižší teplotě
δ	[m]	tloušťka vrstvy materiálu
R_λ	[m ² ·K·W ⁻¹]	měrný tepelný odpor proti vedení tepla

Přenosu tepla vedením je dosaženo zejména prostřednictvím kontaktu chodidel a dlaní s povrchem. Dále může dojít k přenosu kontaktem těla např. se židlí při sezení, s postelí při ležení atd. U oblečeného člověka je teplo přenášeno kontaktem oděvu s pokožkou. [12], [13]

Přenos tepla konvekcí

Tento přenos tepla je složen ze dvou mechanismů [12]:

- Kondukce – náhodný pohyb molekul (difúze)
- Advekce – kolektivní pohyb velkého množství molekul ve velkých objemech

K přenosu tepla konvekcí dochází mezi proudící tekutinou o teplotě T_∞ a obtékaným povrchem o teplotě T_w . Konvekce může být nucená nebo přirozená. O přirozenou konvekci se jedná, pokud je pohyb tekutiny dán gradientem hustot v důsledku změny teploty při ohřevu nebo chlazení. Nucená konvekce je způsobena působením vnějších sil, např. ventilátorem. [12], [13]

Přenos tepla konvekcí je definován Newtonovým ochlazovacím zákonem [12]:

$$\dot{q}_k = \alpha \cdot (T_w - T_\infty) \quad (1.7)$$

\dot{q}_k	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok prouděním
α	[W·m ⁻² ·K]	součinitel přestupu tepla
T_w	[K]	teplota obtékaného povrchu
T_∞	[K]	teplota proudící tekutiny v dostatečné vzdálenosti od povrchu

Tuto rovnici lze zapsat ve tvaru [12]:

$$\dot{q}_k = \frac{(T_w - T_\infty)}{\frac{1}{\alpha}} \quad (1.8)$$

kde:

$$\frac{1}{\alpha} = R_\alpha \quad (1.9)$$

R_α	[m ² ·K·W ⁻¹]	měrný tepelný odpor proti přenosu tepla konvekcí
------------	--------------------------------------	--

Teplu může být konvekcí odvedeno např. z povrchu pokožky do vzduchu proudícího kolem lidského těla, kdy je teplota pokožky vyšší než teplota proudícího vzduchu. [12], [13]

Přenos tepla radiací

Přenos tepla radiací je zprostředkován elektromagnetickým zářením o různých vlnových délkách. Tento proces může probíhat i ve vakuu. Vyzářená energie dopadající na povrch může být částečně povrchem pohlcena (absorbována), odražena (reflektována) nebo může povrchem projít (transmitovat). Součet těchto tří procesů musí být roven nule. [12], [13]

Maximální tok, který může být z povrchu emitován, je charakterizován Stefan-Boltzmannovým zákonem [12]:

$$\dot{q}_r = E_o = \sigma T_w^4 \quad (1.10)$$

\dot{q}_r	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok radiací
T_w	[K]	teplota povrchu
E_o	[W·m ⁻²]	zářivost černého tělesa (ideálního zářiče)
σ	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Pro reálný povrch platí [12]:

$$E = \varepsilon \sigma T_w^4 \quad (1.11)$$

ε [-] emisivita materiálu $0 \leq \varepsilon \leq 1$

Přenos tepla dýcháním

Přenos tepla dýcháním je zprostředkován prouděním vzduchu dýchacími cestami. Je způsoben výměnou tepla mezi přiváděným a odváděným vzduchem v dýchací soustavě. [13]

Přenos tepla vypařováním

Z fyzikálního hlediska je proces vypařování (evaporace) popsán jako konvektivní přenos tepla při souběžné fázové přeměně kapaliny na plyn. K vypařování dochází, pokud je teplota okolí vyšší než teplota těla. Vypařování je prostředkem pro vyrovnání teplotních rozdílů mezi tělem a okolím. [13]

Vlhký vzduch je směs suchého vzduchu a vodní páry. Měrná hmotnost x je definována jako hmotnost vodní páry (příp. vody v kapalném nebo tuhém stavu) obsažená ve vlhkém vzduchu, přičemž jeho suchá část váží 1 kg. Jedná se tedy o množství vlhkosti připadající na 1 kg suchého vzduchu, tedy $(1 + x)$ kg vlhkého vzduchu. [12]

Suchý vzduch je objemově složen ze 78,09 % N₂, 20,95 % O₂, 0,93 % Ar, 0,0412 % CO₂ a stopového množství Ne, He, Kr, H₂, Xe, O₃ atd. Vlhký vzduch může být nenasycený vlhkostí, nasycený vlhkostí a přesycený vlhkostí. Ve vlhkém vzduchu nenasyceném vlhkostí je obsažena voda ve formě přehřáté páry. Vzduch nasycený vlhkostí obsahuje maximální možné množství vlhkosti ve formě páry – voda je tedy obsažena ve formě tzv. syté páry. Ve vzduchu přesyceném vlhkostí je zastoupeno větší množství vlhkosti. Je označován také jako mlhový vzduch. Mlhový vzduch odpovídá stavu nasyčeného vzduchu, přičemž nadbytečná vlhkost je vysrážena ve formě mlhy. [12], [13]

Entalpii vlhkého vzduchu h lze vypočítat ze vztahu [12]:

$$h = h_v + x \cdot h_p = \bar{c}_{pv} \cdot t + x \cdot (\bar{c}_{pp} \cdot t + l_{(23)0}) \quad [kJ \cdot kg_{s.v.}^{-1}] \quad (1.12)$$

h_v	[kJ·kg ⁻¹]	měrná entalpie suchého vzduchu
x	[kg·kg _{s.v.} ⁻¹]	měrná vlhkost vzduchu
h_p	[kJ·kg ⁻¹]	měrná entalpie vodní páry
\bar{c}_{pv}	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu při konst. tlaku
\bar{c}_{pp}	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	střední měrná tepelná kapacita vodní páry při konst. tlaku
t	[°C]	teplota
$l_{(23)0}$	[kJ·kg ⁻¹]	měrné výparné teplo vody při teplotě trojného bodu (0 °C)

Měrná tepelná kapacita při stálém tlaku pro [12]:

- suchý vzduch → $\bar{c}_{pv} = 1,01 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pro teploty (-30 – 100)°C
- vodní páru → $\bar{c}_{pp} = 1,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ do teploty 100 °C a tlaku 10 kPa

Měrné výparné teplo vody při teplotě 0 °C → $l_{(23)0} = 2500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ [12]

Po dosazení do rovnice (1.12) lze entalpii vlhkého vzduchu určit ze vztahu [12]:

$$h = 1,01 \cdot t + x \cdot (1,84 \cdot t + 2500) \quad (1.13)$$

Měrnou vlhkost lze určit z rovnice [12]:

$$x = \frac{m_p}{m_v} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_p''}{p - \varphi \cdot p_p''} \quad (1.14)$$

m_p	[kg]	hmotnost přehřáté vodní páry
m_v	[kg]	hmotnost suchého vzduchu
φ	[-]	relativní vlhkost
p	[Pa]	celkový tlak
p_p''	[Pa]	parciální tlak syté vodní páry

Parciální tlak syté páry lze spočítat z rovnice [12]:

$$p_p'' = e^{\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6+t}\right)} \quad (1.15)$$

1.5 Ochranné oděvy a způsoby chlazení

Aby bylo v případě nasazeného ochranného oděvu při vysokých okolních teplotách zamezeno přehřívání organismu a dalším zdravotním následkům, byly vyvinuty chladicí systémy zabudované v oděvech umožňující vytvářet prostředí vhodné pro pracovní rozsahy termoregulace člověka. Nejčastěji užívaným oděvem ke chlazení je vesta, bunda či celotělový oblek. Chlazení lze ale aplikovat také např. do rukavic, kšiltovky aj.

Teplu lze z povrchu těla odvádět vedením, konvekcí nebo vypařováním. Toho lze docílit u těchto chladicích systémů:

- Chlazení odpařováním vody
- Chlazení proudem vzduchu
- Chlazení proudem vody
- Chlazení táním vodního ledu
- Chlazení táním látky se specifickým bodem tání (PCM materiály)

a) Chlazení odpařováním vody

Tyto oděvy pracují na principu odpařování vody z materiálu. Nejčastěji užívaným oděvem je vesta. Vesta je namočená ve vodě, následně stlačena pro odstranění přebytečné vody. Poté ji lze aplikovat na tělo. Chladicí účinek vydrží v řádu několika hodin. Poté lze vestu opět namočit a použít. Vesta je vyrobena z vysoce absorpčních vláken, aby byl chladicí účinek zajištěn co nejdéle. Doba ochlazování může dosahovat až cca 8 hodin. Vesty mohou využít pracovníci čelící teplotě i nad 40 °C. S vyšší teplotou okolí doba chladicího účinku klesá. [14]

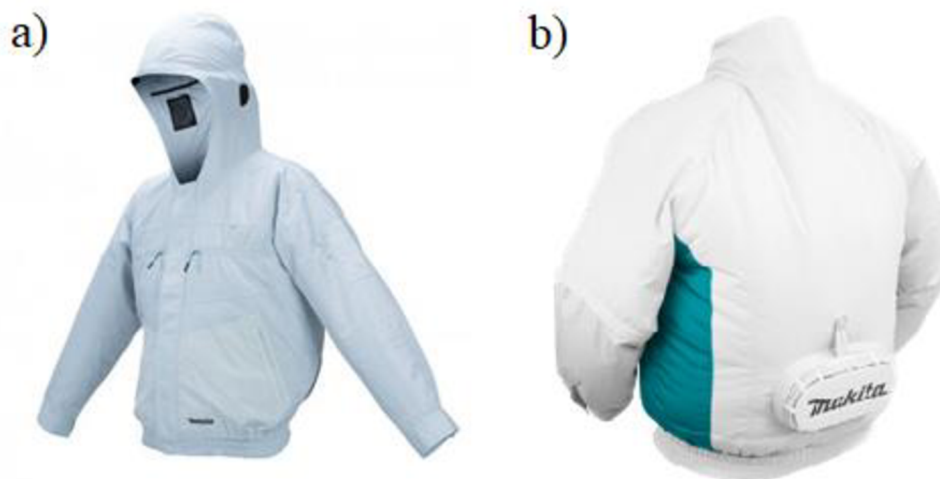


Obrázek 1.3 Odpařovací vesta [14]

b) Chlazení proudem vzduchu

U tohoto typu chlazení je pod oděv přiváděn nuceně proud vzduchu, který konvekcí a odpařováním odvádí teplo z povrchu těla pod oděvem. Proudem vzduchu je odváděn odpařovaný pot. Diplomová práce je zaměřena na tento způsob chlazení.

Ochranný oblek je vybaven integrovanými ventilátory, kterými je umožněno nepřetržité větrání po dobu několika desítek hodin. Funkčnost je zajištěna díky akumulátoru, který je zapotřebí dobít. [15]



Obrázek 1.4 Oblek s ventilátory - a) pohled zepředu [15], b) pohled zezadu [16]

c) Chlazení táním vodního ledu

K přenosu tepla v případě chlazení táním ledu dochází vedením. Vesta je vybavena vnitřními kapsami s vložkami s ledem, kterým je odebíráno teplo z lidského těla. K ochlazení je zapotřebí pouze zmrazená voda. Led se rozpouští a dochází tak k postupnému poklesu jeho chladicího účinku. Největšího chladicího účinku je tedy dosaženo na začátku chlazení. Chlazení může probíhat po dobu cca 2,5 hodin. Pokud již nedochází k ochlazení, lze kapsy s vodou vložit do mrazáku, dokud opět nedojde ke zmrznutí vody. Je tedy při používání oděvu využívajícího tuto technologii zapotřebí počítat s časovou prodlevou potřebnou pro vytvoření ledu. [17]



Obrázek 1.5 Vesta chlazená ledem [18]

d) Chlazení táním látky se specifickým bodem tání (PCM materiály)

U tohoto systému chlazení jsou využity materiály s fázovým přechodem označované jako PCM materiály (Phase Change Materials). V těchto látkách je obsaženo velké množství energie, která je uvolněna při fázovém přechodu. Vlastností PCM materiálů je téměř konstantní teplota tání a tuhnutí. Bod tání/tuhnutí lze ovlivnit skladbou materiálů. Během fázové změny téměř nedochází ke změně teploty. K její výraznější změně dochází až po změně fáze. K chlazení lze tedy během tavení PCM materiálu využít latentní teplo pomocí absorpce tepla. [19]



Obrázek 1.6 Vesta s PCM - zvnějšku

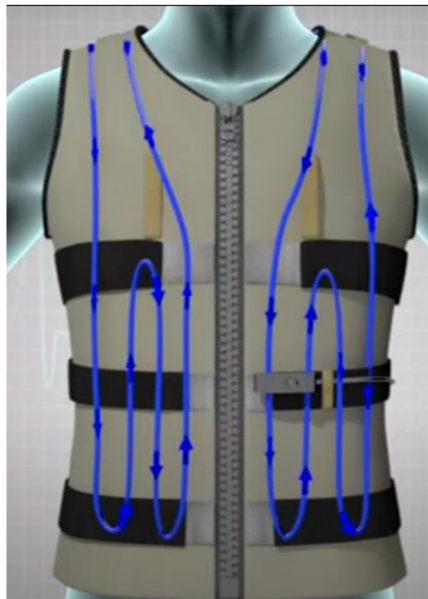


Obrázek 1.7 Vesta s PCM - zevnitř

Vložky s PCM materiálem jsou vkládány do kapes vesty. Nejčastěji používanými PCM materiály jsou vysokomolekulární parafíny (vosky) a Glauberova sůl s vodou. Materiálem je odebíráno množství tepla v závislosti na zahřívání/ochlazení lidského těla. PCM oděvy lze použít opakovaně. Je zapotřebí materiál znovu rekrystalizovat. Toho lze docílit vložením PCM do ledové vody, mrazáku, ledničky nebo pouze skladováním v místě o určité teplotě – např. nižší než 3 °C – dokud není dosaženo pevného stavu. [17]

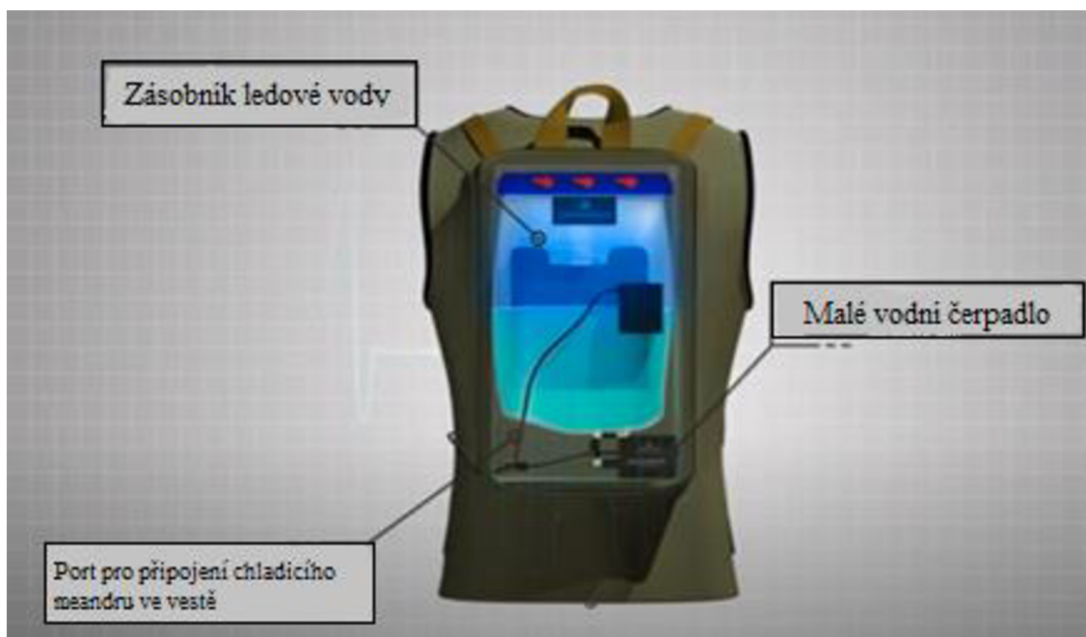
e) Chlazení proudem vody

Chlazení je v tomto případě zprostředkováno zejména kontaktem chladicího média s pokožkou. Jedná se tedy o chlazení vedením. Do oděvu je zabudován systém hadiček, kterými je rozváděna chladicí voda. Jelikož je součinitel přestupu tepla vody vyšší než v případě vzduchu, je voda schopna odvést více tepla než vzduch. Odváděné teplo je závislé na velikosti kontaktní plochy, okolní teplotě a množství zmrazené vody nutné k výměně tepla. [17]



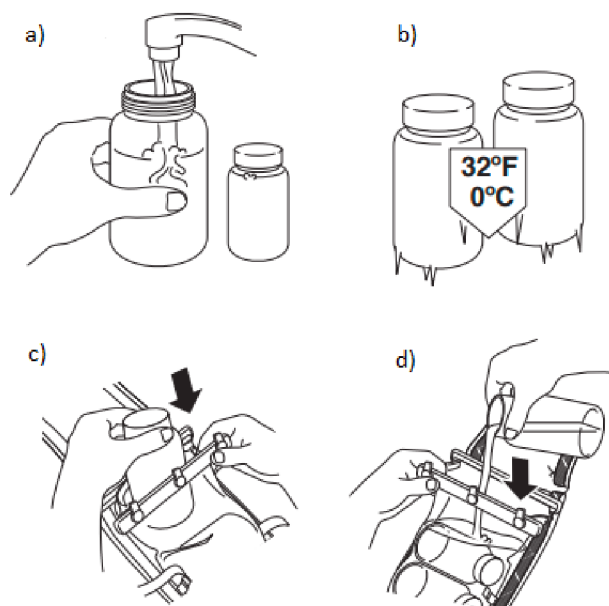
Obrázek 1.8 Vesta chlazená proudem vody [20]

Pro uvedení vody do pohybu je zapotřebí pohon, tedy malé čerpadlo. To je funkční díky malé baterii, kterou je zapotřebí čas od času dobít.



Obrázek 1.9 Vesta chlazená prouděním vody - zásobník vody [20]

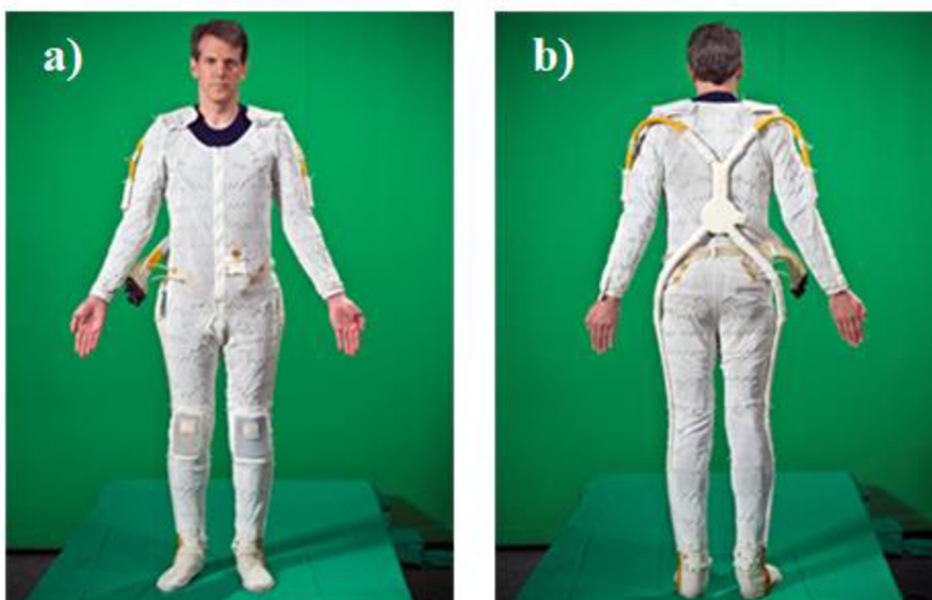
K výměně tepla lze využít např. led. Voda je napuštěna do nádob, ty jsou po zmrazení vloženy do vaku s vodou umístěného na zádech. Proudící voda odevzdává teplo naabsorbované z lidského těla ledu, který se postupně rozpouští.



Obrázek 1.10 Chlazení proudem vody s využitím ledu [21]

Speciální případ - Chlazení pod skafandrem

Člověk je ve vesmíru vystaven velmi nízkým i extrémně vysokým teplotám. Je chráněn pomocí skafandru, který je vytvořen pro extrémní okolní podmínky. Skafandr je složen z vrstev různých materiálů, díky kterým je člověk od okolí dokonale izolován. Navzdory extrémně nízkým teplotám okolí musí tedy čelit zejména sebou vyprodukovanému teplu, které nelze odvést pomocí odpařování potu. [22]



Obrázek 1.11 Chladicí systém pod skafandrem [23] – a) pohled zepředu, b) pohled zezadu

V oděvu pod skafandrem je využíváno chlazení prouděním vody. To může být zkombinováno s ventilací částmi oděvu. Oblek je vyroben ze strečového materiálu. Ve všech částech

oděvu je zabudováno 91,5 m natěsno umístěných trubiček. Voda je vedena trubičkami poblíž lidské pokožky. Teplo je odebíráno vodou cirkulující kolem celého těla. Pot je v některých částech oděvu z těla astronauta odváděn větracími průduchy a recyklován ve vodou chlazeném systému. K zápěstím a kotníkům je přiváděn kyslík, aby podpořil cirkulaci pod oděvem. [23]

Shrnutí

Na trhu je k dostání značné množství oděvů využívajících různé metody chlazení. Na volbu nejvhodnějšího chladicího oděvu lze pohlížet z různých úhlů – ať už se jedná o technické, fyzikální, praktické či ekonomické parametry. V tabulce 1 jsou orientačně shrnuty základní parametry jednotlivých výše zmíněných chladicích oděvů.

Tabulka 1 Orientační parametry jednotlivých druhů chlazení

Způsob chlazení	Doba použití [h]	Váha [g]	Složitost systému	Opakovatelnost použití	Nutnost el. energie	Cena [Kč]
Odpařovací vesta	2 – 8	390 – 440	•	✓	×	1200 – 1600
Proud vzduchu	12 – 33	1000 – 1500	•••	✓	✓	2400 – 3000 + cena akumulátoru
Proud vody	3 – 8	1000 + objem vody (1,5 – 3 l)	•••	✓	✓	3300 – 6000
Led	1,5 – 2,5 ¹	1600	••	✓	×	2900 – 3800
PCM	1 – 4,5 ²	2200 – 3000	••	✓	×	4400 – 5000

Z praktického hlediska je stěžejním parametrem doba, po kterou lze oděv používat. Hodnoty uvedené v tabulce 1 jsou orientační, jelikož doba chlazení je závislá zejména na okolní teplotě, ve které se jedinec nachází. Čím bude teplota okolí vyšší, tím kratší dobu bude člověk ochlazován. Zároveň je ve většině případů největšího chladicího účinku dosaženo na začátku chlazení, jelikož nejčastěji používaným médiem je voda. Je zapotřebí také zohlednit nejen dobu možného používání oděvu, ale i čas, který je nutný k obnovení chlazení. V případě oděvů využívajících odpařování se jedná o relativně krátký čas, kdy musí být z těla sundána, poté ponořena do vody, vyždímána a znovu nasazena na tělo. Pokud se jedná o chlazení s využitím ledu či PCM materiálu, musí být přihlédnuto k nutnosti regenerace materiálu. Roztavený led i PCM materiál musí být vložen do chladného prostředí, aby mohlo dojít k rekrystalizaci materiálu. Je tedy vhodné počítat s časovou prodlevou mezi jednotlivými použitímí nebo mít v zásobě další vložky s materiálem již připravené k použití. Jedním z parametrů, které by nebylo vhodné opomenout, je i váha oděvu. Pokud je člověk oděn

¹ Nutné zohlednit čas potřebný k opětovnému ztuhnutí

² Nutné zohlednit čas potřebný k opětovnému ztuhnutí

do ochranného oděvu využívaného v kontaminovaném prostředí, je organismus značně zatížen samotnou problematikou termoregulace. Větší váha oděvu by k celkové zátěži organismu přispěla, jelikož by člověk musel vynaložit větší fyzickou sílu na přemáhání sil, kterými oblek na tělo působí.

U odpařovacích oděvů je využito nejjednoduššího principu ochlazování. Zároveň patří mezi váhově nejllehčí a cenově nejdostupnější. Jsou tedy vhodné pro uživatele, kteří se chtějí například pouze ochladit v horkých letních dnech. Pro lidi vyskytující se v prostředí s vysokými teplotami, jako např. hasiči, jsou odpařovací oděvy zátěží navíc, jelikož k vyschnutí oděvu dojde velmi brzy. A tito lidé ve většině případů nemají mnoho příležitostí a času k opakovanému vyslékání, navlhčení a oblékání oděvu.

Nejvhodnějšími způsoby chlazení se zdají být oděvy chlazené proudem vody a vzduchu. Patří však mezi nejsložitější systémy. Zároveň jsou tyto oděvy i nejtěžší a nejdražší, a to zejména kvůli potřebě elektrických zařízení, kterými jsou tyto systémy poháněny. Nabízí ale oproti ostatním oděvům důležitou výhodu. Tou je doba použití a rovnoměrnost chlazení. Často je také možnost tyto druhy chlazení regulovat. Člověk si tedy je schopen sám zvolit intenzitu chlazení tak, aby to vyhovovalo jeho subjektivním potřebám. Dalším aspektem, kterým je důležité se zabývat, je možnost distribuce vzduchu k různým částem těla. U chlazení proudem vody by bylo značně komplikované vymyslet, jakým způsobem by bylo možné vodu nasměrovat na požadované části těla. Z tohoto důvodu bylo pro diplomovou práci zvoleno právě chlazení ventilací vzduchu, přičemž je brán zřetel právě na samotnou funkčnost principu chlazením proudem vzduchu a možnost distribuce vzduchu po těle.

2 Experimentální část

Tato diplomová práce se zabývá problematikou člověka oblečeného do ochranného oděvu, kterým je izolován od okolí. Tím je připraven o přirozenou schopnost termoregulace odpařováním potu. Smyslem experimentu je zajištění termoregulace odvodem tepla odpařováním, když je pod ochranný oděv přiváděn filtrovaný vzduch o stejných parametrech, jaké má okolní vzduch.

2.1 Definování pracovních hypotéz

V této podkapitole jsou definovány hypotézy, na jejichž základě byly zpracovány příslušné experimenty zabývající se distribucí okolního vzduchu pod ochranný oděv.

2.1.1 Hypotéza 1 – Odvádění tepla evaporací pomocí ventilace okolního vzduchu pod oděv

Pokud je člověk oblečený do ochranného oděvu přítomen v prostoru o vyšší teplotě (teplota cca 25 – 35 °C), a pod oděv je přiváděn vzduch o parametrech okolního prostředí (teplota, relativní vlhkost), je dosaženo přenosu tepla evaporací (odpařováním) a konvekcí z povrchu lidského těla. Předmětem hypotézy 1 je tedy předpoklad, že při stejných podmínkách prostředí lze přiváděním okolního vzduchu pod oděv dosáhnout stejné intenzity odvodu tepla, jako by tomu bylo v případě absence ochranného oděvu.

Pro ověření této hypotézy je zapotřebí vytvořit experiment, na kterém by bylo ověřeno/vyvráceno, zda je vzduch přiváděný pod ochranný oděv schopen odvést odpovídající množství tepla z povrchu těla člověka a ochladit tak člověka ve stejné míře, jako by tomu bylo, pokud by na sobě jedinec žádný ochranný oděv neměl. Na tento experiment je zaměřena kapitola 2.6.



Obrázek 2.1 Tepelný manekýn v průběhu ověřování hypotézy 1

2.1.2 Hypotéza 2 – Regulace přenosu tepla na základě distribuce větracího vzduchu

Tato hypotéza vyplývá z předpokladu, že lze dosáhnout rovnovážného stavu přenosu tepla – chlazení těla – s metabolickým teplem produkovaným v dané části těla, jestliže je vhodně zvolena konstrukce rozvodů a řízení distribuce větracího vzduchu do jednotlivých částí těla, a to tak, aby nedocházelo k jejich přechlazování či přehřívání. Předmětem této hypotézy je tedy předpoklad, že lze dosáhnout dostatečného odvodu tepla z konkrétních částí těla v případě zvolení vhodného rozvodu přiváděného filtrovaného vzduchu o parametrech okolí pod ochranný oděv.

Pro ověření této hypotézy je zapotřebí vytvořit experiment, na kterém by bylo možné porovnat rozdíly v distribuci vzduchu do různých částí těla. Na základě této hypotézy byl zpracován experiment, kdy byl okolní vzduch pod ochranným oděvem distribuován po těle manekýna třemi různými způsoby. Tímto experimentem se zabývá podkapitola 2.7.

2.2 Teoretické výpočty před experimenty

Před přípravou experimentů byl nejprve zpracován výpočet tepelných toků, na kterých je dokázáno, že má cenu zabývat se otázkou chlazení pod oděvem. Předmětem těchto výpočtů je otázka, zda je ventilační vzduch prostřednictvím konvekce a evaporace schopen odvést množství tepla, které je člověkem produkováno.

Nejdříve bylo zapotřebí přepočítat metabolickou zátěž člověka na požadované jednotky (watt). K tomu byla využita rovnice:

$$\dot{Q}_{\dot{c}} = Q_{met} \cdot S_{t\dot{e}lo} \cdot P \quad (1.16)$$

$\dot{Q}_{\dot{c}}$	[W]	metabolická zátěž
Q_{met}	[met]	metabolická zátěž
$S_{t\dot{e}lo}$	[m ²]	povrch lidského těla → průměrná hodnota $S_{t\dot{e}lo} = 1,8 \text{ m}^2$
P	[W·m ²]	energetický výdej → pro klidný stav (sezení) $P = 58,2 \text{ W·m}^2$

$$\dot{Q}_{\dot{c}} = 2,1 \cdot 1,8 \cdot 58,1 = 220 \text{ W} \quad (1.17)$$

Poté bylo důležité zjistit parametry vzduchu přiváděného k ventilaci a odváděného z oděvu pro různé podmínky (teplotu, vlhkost). K tomu byly využity následující rovnice (1.13), (1.14), (1.15) zmíněné v kapitole 1.4:

→ Parciální tlak syté páry

$$p_p'' = e^{\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6+t}\right)}$$

→ Měrná vlhkost

$$x = 0,622 \cdot \frac{\frac{\varphi}{100} \cdot p_p''}{p - \frac{\varphi}{100} \cdot p_p''}$$

→ Entalpie

$$h = 1,01t + x(2500 + 1,84t)$$

Vzorový výpočet pro parametry vzduchu odváděného z oděvu pro teplotu 30 °C a vlhkost 70 %:

$$p_{p1}'' = e^{\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6+30}\right)} \doteq 4244 \text{ Pa} \quad (1.18)$$

$$x_1 = 0,622 \cdot \frac{\frac{70}{100} \cdot 4244}{98000 - \frac{70}{100} \cdot 4244} \doteq 0,0194 \text{ kg} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1} \quad (1.19)$$

$$h_1 = 1,01 \cdot 30 + 0,0194 \cdot (2500 + 1,84 \cdot 30) \doteq 80 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1} \quad (1.20)$$

Vzorový výpočet okolního vzduchu určeného pro ventilaci pro teplotu okolí 25 °C a relativní vlhkost 50 %:

$$p_{p2}'' = e^{\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6+25}\right)} \doteq 3169 \text{ Pa} \quad (1.21)$$

$$x_2 = 0,622 \cdot \frac{\frac{50}{100} \cdot 3169}{98000 - \frac{50}{100} \cdot 3169} \doteq 0,0102 \text{ kg} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1} \quad (1.22)$$

$$h_2 = 1,01 \cdot 25 + 0,0102 \cdot (2500 + 1,84 \cdot 25) \doteq 51,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}_{s.v.}^{-1} \quad (1.23)$$

Díky vypočítaným entalpiím bylo možné zjistit, jaký průtok vzduchu je schopen odvést takové množství tepla, které je člověkem produkováno. K tomu byla využita rovnice (1.24). Odváděný výkon větráním oděvu byl počítán pro vzduch o hustotě 1,15 kg·m⁻³.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{V} \cdot \rho \cdot (h_1 - h_2) \quad (1.24)$$

\dot{Q}	[W]	odváděný výkon větráním oděvu
\dot{m}	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní tok
h_1	[kJ·kg _{s.v.} ⁻¹]	entalpie vzduchu pod oděvem
h_2	[kJ·kg _{s.v.} ⁻¹]	entalpie okolního vzduchu
\dot{V}	[l·min ⁻¹]	objemový průtok vzduchu

Pokud by byl zvolen průtok 200 l·min⁻¹:

$$\dot{Q} = \frac{200}{1000 \cdot 60} \cdot 1,15 \cdot (80 - 51,3) \cdot 1000 \doteq 110 \text{ W} \quad (1.25)$$

Z výsledku vyplývá, že:

$$\dot{Q} < \dot{Q}_{\dot{c}}$$

Lze usoudit, že při takto zvoleném průtoku není možné odvést množství tepla vyprodukované člověkem (220 W). Člověk by tudíž nebyl dostatečně ochlazován.

Pokud by byl zvolen průtok přiváděného vzduchu $400 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, pak by odváděné teplo odpovídalo:

$$\dot{Q} = \frac{400}{1000 \cdot 60} \cdot 1,15 \cdot (80 - 51,3) \cdot 1000 \doteq 221 \text{ W} \quad (1.26)$$

Z tohoto výsledku vyplývá, že vzduch o průtoku $400 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ by byl schopen odvést požadované množství tepla. Pokud by byl zvolen např. průtok $600 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, výsledné teplo by odpovídalo 331 W, což by značilo výraznější chladicí účinek.

Tímto způsobem bylo možné zjistit výsledné hodnoty výkonu odváděného díky větrání pro různé podmínky okolního vzduchu a vzduchu pod oděvem, pro různý průtok přiváděného vzduchu a různou metabolickou zátěž. Z teoretických výpočtů vyplynulo, že člověka je možné dostatečně chladit. Na základě výpočtů výkonu odváděného díky větrání bylo možné přejít k experimentálnímu ověření získaných teoretických poznatků.

2.3 Měřicí přístroje a pomůcky

V této kapitole jsou uvedena a popsána dostupná měřicí zařízení, která byla použita při měření pro tuto diplomovou práci. Patří mezi ně klimatická komora, tepelný manekýn Newton, multifunkční měřicí přístroj TESTO 435, termokamera FLIR i7 a ventilátorová jednotka.

Klimatická komora

Klimatická komora je určena ke zkoušení automobilů či kabin dopravních prostředků, k simulaci stanovených klimatických podmínek pro testování odolnosti výrobků atd. Slouží také ke zkoušení životnosti u automobilů a jejich dílů, fotovoltaických panelů, solárních kolektorů, chladicích boxů, tepelných čerpadel atd. V komoře lze provádět testy funkčnosti klimatizace, vytápění, chladicích boxů, komfortu, porovnávat dvě zařízení pro stejné klimatické podmínky, provést testy efektivity fotovoltaických kolektorů apod. Zkoušky jsou prováděny dle norem ČSN ISO 10263, DIN 75220, IEC 68, US-SFTP, MIL-STD 810 [24].



Obrázek 2.2 Klimatická komora [24]

Parametry klimatické komory [25]

Rozměry		Výměna vzduchu	
Šířka	5 m	Provoz	$300 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
Délka	8,5 m	Vyvětrání	$3000 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
Výška	3,8 m		

Termodynamické parametry

Teplotní rozsah	se solární simulací	-10 do +50 °C
	bez solární simulace	-40 do +85 °C
Vlhkostní rozsah	se solární simulací	30 – 60 % RH
	bez solární simulace	30 – 95 % RH
Rychlost teplotní změny		$\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
Stabilita udržování vlhkosti		$\pm 5 \text{ } \% \text{ RH}$
Rosný bod		5 – 49 °C
Solární simulace		$10 \text{ kW}/10000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Tepelný manekýn

Tepelný manekýn je figurína odpovídající průměrné lidské postavě. Jedná se o poměrně flexibilní zařízení, jelikož díky pohyblivým částem (např. ramena, kolena, lokty) lze dosáhnout různých poloh končetin. Tepelný manekýn je využíván k hodnocení tepelného komfortu člověka ve venkovním i vnitřním prostředí, např. v kabině dopravního prostředku. Díky němu lze vyhodnocovat i tepelně izolační vlastnosti různého druhu oblečení a vybavení pro sportovní a pracovní aktivity, např. rukavice, ochranný oděv apod.

Newton je složen ze 34 vyhříváných zón (hrudník, hlava, břicho, stehna, ruce atd.). Na těchto částech jsou měřeny tepelné ztráty konvekcí, radiací a kondukcí. Z výsledků naměřených na jednotlivých zónách lze určit tepelnou ztrátu celého těla.

Na tepelném manekýnovi lze simulovat i dýchání pomocí nastavitelného dýchacího zařízení s filtry. Prostřednictvím filtrů lze analyzovat složení vdechovaných prachových částic.

Dále je manekýn vybaven např. dvěma čidly teploty vzduchu, čidlem pro měření relativní vlhkosti a čidlem pro měření rychlosti vzduchu. Na manekýnovi lze provádět měření při okolní teplotě o hodnotě od mínus 20 do 50 °C [26].



Obrázek 2.3 Tepelný manekýn Newton [27]

Multifunkční měřicí přístroj TESTO 435

Přístroj je vybaven různými sondami, kterými lze měřit veličiny, např. koncentraci CO₂, relativní vlhkost a teplotu okolního vzduchu, hodnotu absolutního tlaku, stupeň turbulence, intenzitu osvětlení, teplotu povrchu, rychlost proudění a objemový průtok. Klasické sondy mají kabel, ale lze využít i bezdrátové spojení sond s přístrojem do vzdálenosti 20 m. [28]



Obrázek 2.4 Přístroj TESTO 435 [28]

Tabulka 2 Technická data TESTO 435 [28]

Typ snímače	Měřicí rozsah
NTC (multifunkční sonda okolní vzduch, vlhkost)	-40 – 10 °C
Typ K (NiCr-Ni)	-200 – 1370 °C
Kapacitní vlhkosní senzor testo	0 – 100 % RV
Vrtulka	0,25 – 60 m·s ⁻¹
Žhavený drátek	0 – 20 m·s ⁻¹
CO ₂ (sonda IAQ)	0 – 10000 ppm CO ₂
Snímač absolutního tlaku	0 – 2000 hPa
Interní snímač diferenčního tlaku	0 – 25 hPa
Snímač intenzity osvětlení	0 – 100000 Lux

Pro účely měření této práce byl využit zabudovaný diferenční manometr o rozsahu měření od 0 do 25 hPa, termická sonda pro měření proudění s integrovaným měřením teploty a vlhkosti a sonda se žhaveným drátkem pro měření proudění [28].



Obrázek 2.5 Multifunkční sonda pro měření proudění, teploty a vlhkosti [28]

V následující tabulce jsou uvedeny parametry této multifunkční sondy.

Tabulka 3 Parametry multifunkční sondy [28]

Veličina	Měřicí rozsah	Přesnost
Teplota	(-20 – +70) °C	± 0,3 °C
Relativní vlhkost	(0 – 100) %	± 2 % (+2 – +98) %
Rychlost proudění	(0 – 20) m·s ⁻¹	± (0,03 m·s ⁻¹ + 4 % z nam. h.)

Sonda se žhaveným drátkem je určena k měření rychlosti proudění v rozsahu od 0 do $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ s přesností $\pm (0,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} + 5 \% \text{ z nam. h.})$ [28].



Obrázek 2.6 Sonda se žhaveným drátkem [28]

Termokamera FLIR i7

Tato termokamera slouží ke snímání teploty z okolních povrchů. Přístroj je určen k měření v prostředí o operativní teplotě od $0 \text{ }^\circ\text{C}$ do $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a do 95 % relativní vlhkosti [29].



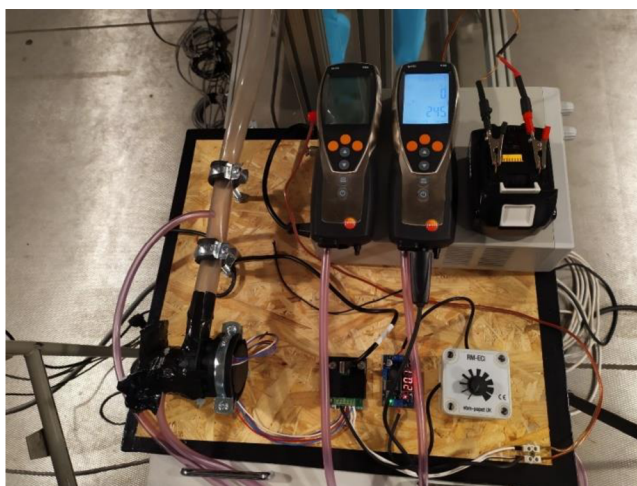
Tabulka 4 Základní parametry termokamery
FLIR i7 [29]

Veličina	Rozsah
Měřená teplota	$(-20 - 250) \text{ }^\circ\text{C}$
Přesnost měření teploty	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplotní citlivost	$0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
Zorné pole	$29^\circ \times 29^\circ$
Zaostřovací vzdálenost	$0,6 \text{ m}$

Obrázek 2.7 Termokamera FLIR i7 [29]

Ventilátorová jednotka

Touto jednotkou je možné přivádět ventilovaný vzduch pod ochranný oděv. Hlavním prvkem jednotky je radiální ventilátor RVE45-3/54/2P (napájení 24 V), který byl v průběhu měření opatřen filtrem FFP2. Maximální průtok vzduchu, který je schopen ventilátor zajistit, je $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Max. statický tlak odpovídá 4500 Pa. Na sání a na výtlaku je připojen přístroj TESTO 435 pro měření rychlosti a průtoku. Byla zapojena regulace otáček ventilátoru. [30]



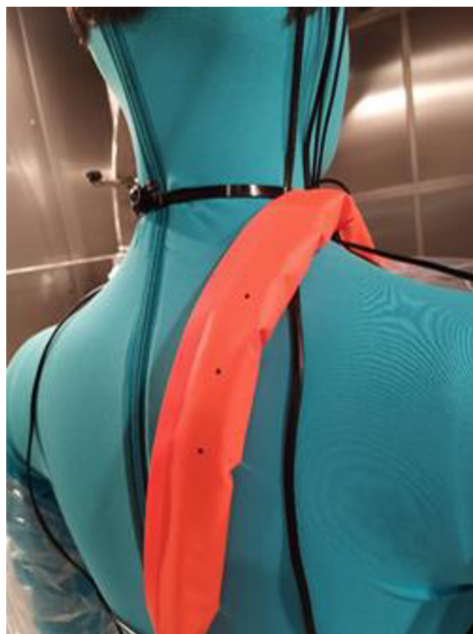
Obrázek 2.8 Ventilátorová jednotka

2.4 Podmínky a příprava měření

Cílem experimentů bylo dosažení přenosu tepla z povrchu těla okolním filtrovaným vzduchem pomocí řízené ventilace prostoru pod oděvem. Účelem bylo také zjistit, zda je způsob chlazení ventilací pod ochranný oděv efektivní, kolik vlhkosti je možné z povrchu těla manekýna odpařit, jakého chladicího výkonu je dosahováno a jaký vliv má distribuce vzduchu na konkrétní část těla. Během měření byla sledována teplota na těle manekýna, průběžné prosychání ochranného oděvu apod. V průběhu měření byly také pořizovány snímky z termokamery.

Měření probíhalo v klimatické komoře, kde bylo možné zajistit požadované podmínky okolí. V rámci experimentů pro tuto práci byly okolní podmínky nastaveny na relativní vlhkost vzduchu 50 % a na teplotu 25 °C nebo 30 °C. K měření byl využit tepelný manekýn Newton, který byl nastaven na konstantní tepelný tok o hodnotě 2,1 met, čili $122 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Tento tepelný tok odpovídá mírné aktivitě člověka, tedy lehké práci ve stoje. Manekýn byl oděn do celotělového modrého vlhčícího overalu. Aby bylo možné docílit simulace pocení člověka, byl overal nejprve navlhčen. Poté byl Newton oděn do ochranného oděvu pro zdravotníky. Ochranný oděv byl utěsněn na zápěstích, kotnících a na temeni hlavy pomocí lepicí pásky. U zápěstí a kotníků byly zavedeny ventilky pro odvádění vzduchu z pododěvového prostoru. Parametry vzduchu ventilovaného pod ochranný oděv odpovídaly parametrům okolí.

Okolní vzduch byl pomocí ventilátorové jednotky přiváděn do distributoru vzduchu. Distributor byl složen ze šesti přírub, ke kterým bylo možné připojit vzduchovody, které byly vedeny do konkrétních částí těla. Vzduchovody byly perforované. Vzduch byl distribuován po těle manekýna pomocí těchto vzduchovodů, jejichž konce byly slepeny. Vzduchovody byly během měření pomocí lepicí pásky přilepeny k vnitřní straně ochranného oděvu.



Obrázek 2.9 Detail perforovaného vzduchovodu



Obrázek 2.10 Slepěné konce vzduchovodů

2.5 Přípravné testy

Aby byly výsledky co nejkvalitivnější, předcházely samotným experimentům testy, jejichž cílem bylo ověření funkčnosti zařízení. Pro tyto testy byl použit stejný systém distribuce vzduchu jako pro první experiment. Vzduchovody byly pod ochranným oděvem zavedeny do pravé nohavice, pravého rukávu, na hrudník a na záda. Zbývající příruby byly zalepeny páskou.

Test funkčnosti ventilačního systému

V rámci prvního testu byla testována funkčnost ventilace vzduchu pod ochranný oděv. Před zahájením testu byly nejprve připraveny podmínky okolí. Vzduch v klimatické komoře byl nastaven na teplotu $(25 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost $(50 \pm 3,0) \%$. Tepelný manekýn byl nastartován a nastaven na konstantní tepelný tok $122 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Manekýn byl oblečen do vlhčícího overalu, na jeho povrch byly napevno umístěny senzory pro snímání teploty a vlhkosti vzduchu pod ochranným oděvem. Poté byl overal navlhčen pomocí rozprašovače. Množství použité vody bylo přibližně odhadnuto zvážením rozprašovače před vlhčením a po něm. Ze zvážené hmotnosti bylo zjištěno, že na overal bylo nanášeno cca 776 g vlhkosti. Nakonec byl manekýn oděn do ochranného oděvu, který byl na rukávech a nohavicích utěsněn lepicí páskou. Takto připravený manekýn byl ponechán dalších 10 minut kvůli prohřátí a stabilizaci. Následně byla zahájena ventilace okolního vzduchu pod oděv. Oděv byl ventilací přiváděného vzduchu nafouknut. Ventilační jednotka byla nastavena na plný výkon. Během měření bylo na jednotce zobrazeno napětí 23,9 V a proud o hodnotě 1,5 A. Výkon jednotky tedy odpovídal:

$$P = U \cdot I = 23,9 \cdot 1,5 \doteq 35,9 \text{ W} \quad (1.27)$$

Ventilace probíhala po dobu jedné hodiny. Během tohoto testu byl vzduch z oděvu odváděn pouze netěsnostmi – např. kolem obličeje, zápěstí apod.



Obrázek 2.11 Oděv nafouknutý ventilací

Měření průtoku ve ventilcích

Pokud by bylo pod ochranným oděvem dosaženo velkého přetlaku a oděv by byl přiváděným vzduchem příliš nafouknut, člověk by nebyl schopen volného pohybu. Navíc by pouze netěsnostmi nebylo možné zajistit dostatečný odvod vyprodukovaného tepla. Do oděvu byly tedy zabudovány výdechové ventily. Ty byly umístěny u obou zápěstí a kotníků. Před samotným experimentem bylo ale nejprve zapotřebí ověřit funkčnost výdechových ventilků a zjistit průtok odcházejícího vzduchu.



Obrázek 2.12 Výdechový ventil u pravého rukávu



Obrázek 2.13 Výdechový ventil u pravé nohavice

Klimatická komora byla nastavena na stejné podmínky jako u předchozího testu, tedy na teplotu $(25 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu $(50 \pm 3,0) \%$. Tepelný tok byl nastaven na hodnotu $122 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (2,1 met). Na manekýna byl oblečen overall, ten byl navlhčen a byly na něj umístěny senzory. Poté byl na manekýna oblečen ochranný oděv, který byl utěsněn na temeni hlavy, kolem zápěstí a kotníků. Aby bylo možné zjistit průtok ve ventilcích, bylo k ventilkům přiloženo měřicí potrubí z papíru. Do potrubí byl vytvořen otvor pro zavádění rychlostní sondy se žhaveným drátkem pro změření průtoku.



Obrázek 2.14 Měření průtoku na pravém rukávu



Obrázek 2.15 Naměřený průtok a tlaková diference na pravém rukávu

Průtok ventilky u kotníku a zápěstí byl měřen pomocí přístroje TESTO. Měření bylo provedeno v definovaném průřezu o průměru 37 mm. Přiváděný vzduch pod oděv byl nastaven na maximální průtok ($400 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$). Přístrojem TESTO 435 je rychlost proudění vzduchu měřena v $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Rychlost byla přepočítána na průtok v jednotkách $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ podle rovnice:

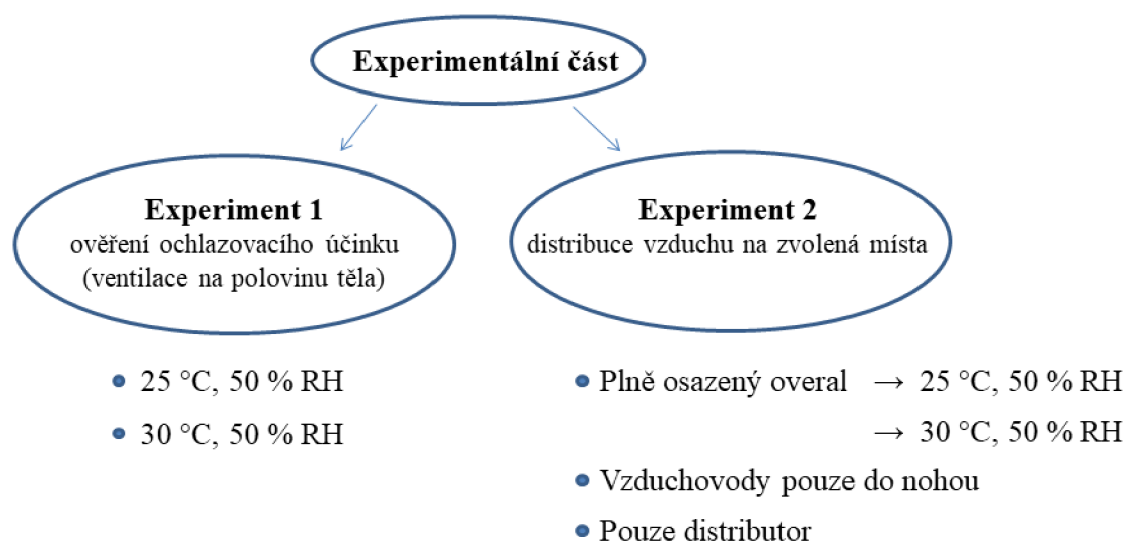
$$\dot{Q} = S \cdot w_a = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot w_a \cdot 1000 \cdot 60 \quad (1.28)$$

Výsledný objemový průtok u pravého zápěstí tedy odpovídal:

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot 0,037^2}{4} \cdot 0,93 \cdot 1000 \cdot 60 = 60,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} \quad (1.29)$$

Ve ventilku u pravého rukávu byl naměřen průtok o hodnotě $60 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Tlaková ztráta na ventilátoru udávající celkový průtok odpovídala 629 Pa. V případě ventilku u pravé nohavice byl naměřen výsledný průtok $106,4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a tlaková ztráta na ventilátoru 632 Pa.

Další kapitoly jsou věnovány samotným experimentům. Pro lepší přehlednost zpracovaných experimentů byl vytvořen následující obrázek:



Obrázek 2.16 Rozdělení experimentů

2.6 Experiment 1 – ověření ochlazovacího účinku

Účelem tohoto experimentu bylo ověřit předpoklad, že ventilací vzduchu pod oděv je člověk schopen se ochlazovat evaporací vlhkosti. Pod ochranný oděv byly vzduchovody zavedeny pouze do jedné poloviny těla manekýna. Vzduch byl přiváděn do pravé ruky a nohy, na hrudník a na záda. Zbylé dva otvory distributoru byly zalepeny páskou. K tomuto rozvedení vzduchovodů bylo přikročeno z důvodu možnosti porovnání parametrů pod ventilovaným a neventilovaným oděvem v jednom testu, přičemž byly zároveň obě části oděvu navzájem ovlivňovány.



Obrázek 2.17 Umístění vzduchovodů do pravé části těla manekýna



Obrázek 2.18 Umístění vzduchovodů do pravé části těla manekýna pod ochranným oděvem

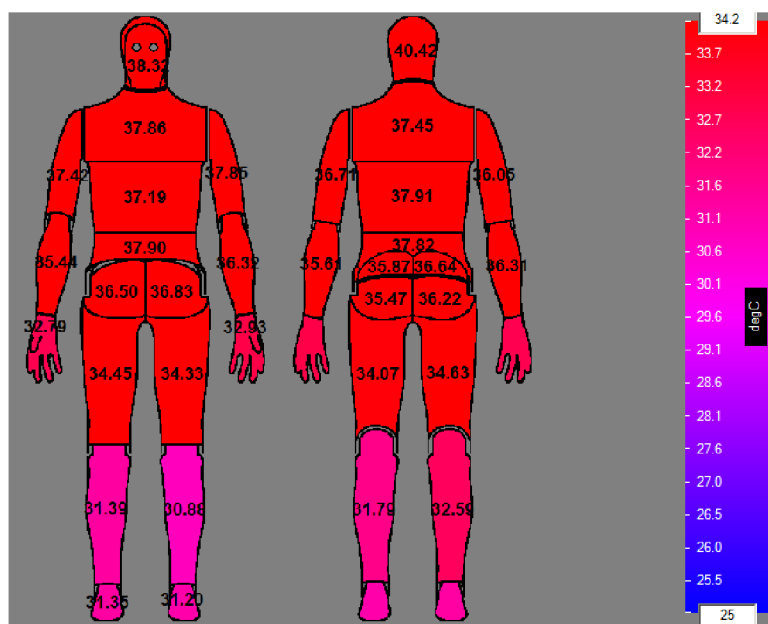
V rámci tohoto experimentu měl být změřen chladičí účinek větracího systému při podmínkách okolí o relativní vlhkosti 50 % při teplotě 25 °C a 30 °C. Měření při obou variantách teplot probíhalo totožně.

Nejprve byla připravena klimatická komora na požadované podmínky okolí. U tepelného manekýna byl pro měření využit regulační mód na konstantní tepelný tok (CHF). Tepelný tok byl nastaven na hodnotu $122 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, tedy 2,1 met. Před zahájením měření byl manekýn oděn do suchého overalu, poté na něj byly připevněny sondy pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu pod oděvem. Overall byl po jeho oblečení na manekýna vlhčen rozprašovačem. Sondy byly kvůli ochraně před vlhkostí zakryty balónky. Nanesená vlhkost na overalu byla přibližně zjištěna z rozdílu váhy rozprašovače před a po vlhčení. Poté byl manekýn oblečen do ochranného oděvu. V tomto stavu byl manekýn kvůli stabilizaci ponechán po dobu 10 minut. Následně byla spuštěna ventilace vzduchu pod oděv. Měření probíhalo po dobu jedné hodiny.

2.6.1 25 °C, 50 % RH

Jako první byl experiment měřen při nižší teplotě okolí. Měření proběhlo dne 29. 9. 2021. Podmínky v komoře byly nastaveny na 25 °C a 50 % RH. Tepelný manekýn byl nastaven na konstantní tepelný tok $122 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Na overall bylo rozprašovačem naneseno cca 801 g vody. Po stabilizaci podmínek v komoře a navlhčení overalu byl manekýn oblečen do ochranného oděvu. Po dalších 10 minutách byla spuštěna ventilace. Po hodině byl experiment ukončen.

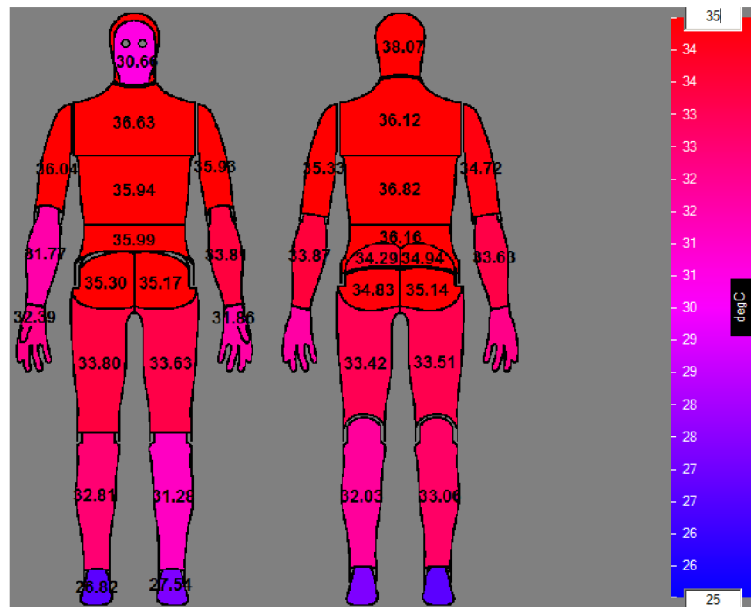
Na následujícím obrázku je zobrazena teplota jednotlivých částí těla manekýna před nanesením vlhkosti.



Obrázek 2.19 Teplota těla neoblečeného manekýna

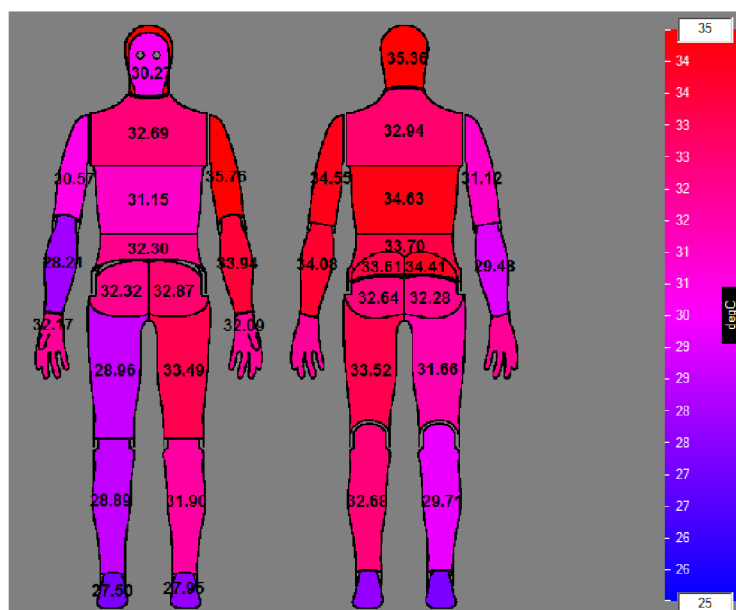
Než byl tepelný manekýn oblečen do navlhčeného overalu, pohybovala se teplota na jeho povrchu v rozmezí cca 30 – 40,5 °C (obrázek 2.19). Nejteplejší částí byla hlava, paže, hrudník i břicho a záda. Nejchladnějších teplot dosahovaly nohy, a to hlavně jejich spodní části. Jednalo se zejména o lýtka a holeně.

Na následujícím obrázku je zobrazen manekýn po nanesení vlhkosti na overall a 10minutové stabilizaci. Lze vidět, že došlo k ochlazení většiny částí těla manekýna přibližně o 0,5 až 3 °C. Teplota holení a lýtek naopak mírně vzrostla.



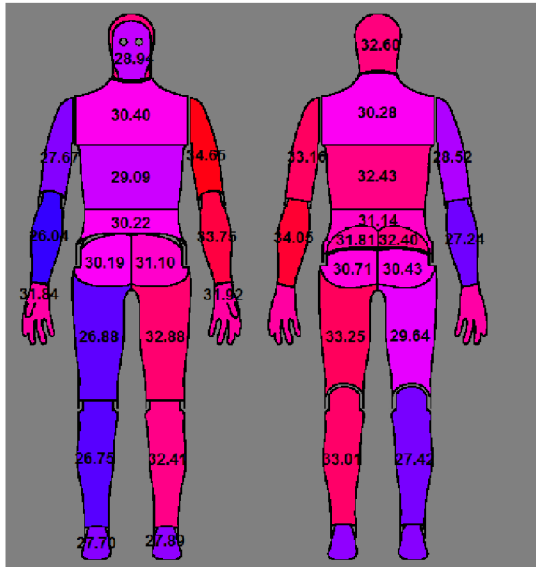
Obrázek 2.20 Teplota těla manekýna po nanesení vlhkosti a stabilizaci

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny teploty na povrchu manekýna pět minut po spuštění ventilace. V tuto chvíli již byly znatelné rozdíly mezi neochlazovanou a ventilovanou částí těla. Teplota pravé části těla, která byla ochlazována, klesla o několik stupňů. Zejména na hrudníku, na noze a na předloktí. Na těchto místech rozdíl činil cca 3 až 5 °C. Levá část těla byla ale ventilací na pravé části také ovlivněna, teplota na levé části těla se tedy také mírně snížila.



Obrázek 2.21 Teplota těla manekýna 5 minut po spuštění ventilace

Na obrázku 2.22 je zobrazen tepelný manekýn 15 minut po spuštění ventilace. Lze vidět, že došlo k dalšímu poklesu teploty, v tomto případě již ne tak výraznému. Z obrázku je patrné, že na pravou polovinu těla měla ventilace výrazný vliv a bylo díky ní možné odvést z těla značné množství tepla. Vliv přiváděného vzduchu pod oděv lze postřehnout i na obrázku 2.23, kde je zachycena přední část manekýna po 15 minutách měření. Absence vzduchovodu na levé části těla měla za následek kondenzaci vlhkosti a její následné ulpívání na vnitřní straně ochranného oděvu. Pravá část oděvu manekýna již nebyla orosená v důsledku ventilace a odvedení přebytečné vlhkosti odpařením.

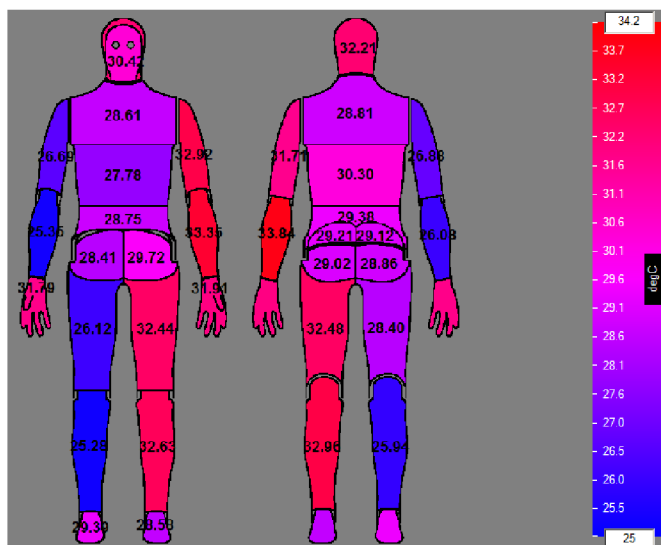


Obrázek 2.22 Tepelný manekýn 15 minut po spuštění ventilace



Obrázek 2.23 Snímek tepelného manekýna 15 minut po spuštění ventilace

Pět minut po začátku měření vykazovaly teploty nejvýraznější diferenci. Tělo manekýna bylo i nadále ochlazováno, ne však již tak výrazně jako na začátku. Na následujícím obrázku je zobrazen manekýn na konci měření.

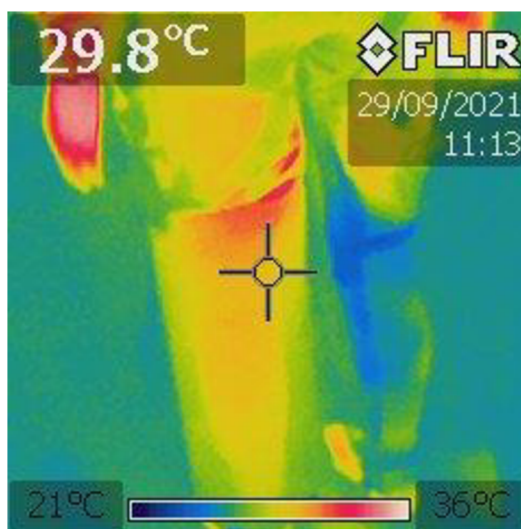


Obrázek 2.24 Tepelný manekýn na konci měření

Ochlazované části dosahovaly finální teploty pod 30 °C. Nejnižší teploty bylo dosaženo u pravého předloktí a nohy na přední straně stehna, na lýtku a holeni. Tyto části dosáhly teploty cca (25 ± 0,5) °C. Pro člověka by teploty těchto částí znamenaly jejich podchlazení a měl by potřebu se opět zahřát. Levá část těla manekýna také dosáhla nižších teplot oproti začátku měření. To bylo způsobeno cirkulací vzduchu pod oděvem na ochlazované části manekýna, jelikož tyto části od sebe nebyly odděleny. Končetiny na levé polovině těla dosahovaly teplot přibližně (32,8 ± 1) °C, zbývající části byly chladnější. Rozdíl teplot z konce měření mezi levou a pravou částí těla činil cca 5 – 7 °C, což lze vidět i na obrázku 2.26.



Obrázek 2.25 Tepelný manekýn na konci měření

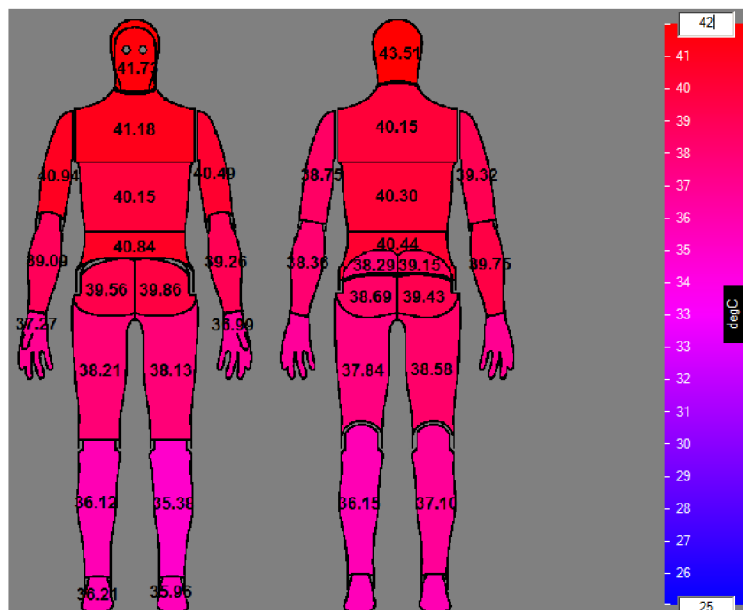


Obrázek 2.26 Snímek přední části stehna z termokamery na konci měření

2.6.2 30 °C, 50 % RH

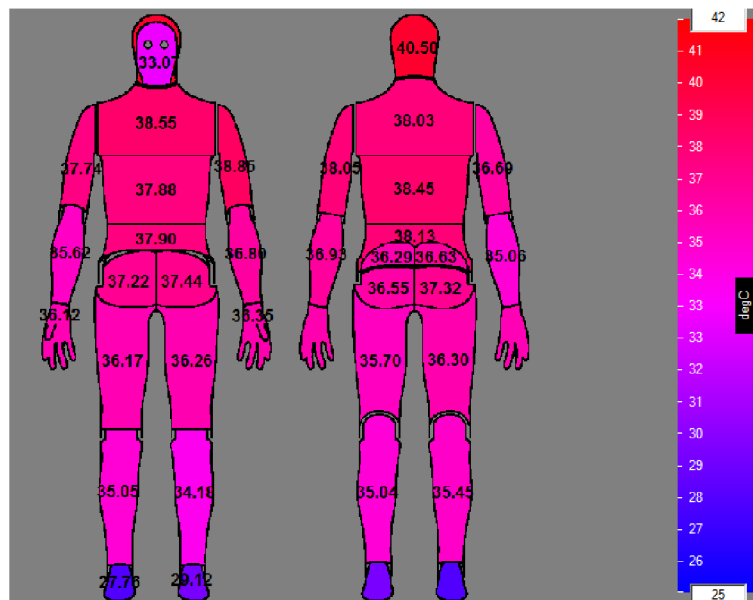
Tento experiment byl měřen 29. 9. 2021. V tomto případě byla komora nastavena na teplotu 30 °C, ostatní parametry zůstaly stejné. Po stabilizaci podmínek v komoře byl vlhčící overall opět navlhčen rozprašovačem. Na manekýna bylo naneseno 773 g vody. Poté byl na manekýna oblečen ochranný oděv. Po stabilizaci bylo zahájeno hodinové měření.

Před nanesením vlhkosti (obrázek 2.27) se teplota připraveného manekýna pohybovala v rozmezí cca 36 – 43,5 °C, což byla o 3 – 6 °C vyšší teplota než u experimentu při teplotě okolí 25 °C. Nejvyšší teplota byla zaznamenána na zadní straně hlavy. Mezi chladnější části patřila opět lýtka a holeně. Tyto části dosahovaly přibližně 36 °C.



Obrázek 2.27 Neoblečený manekýn

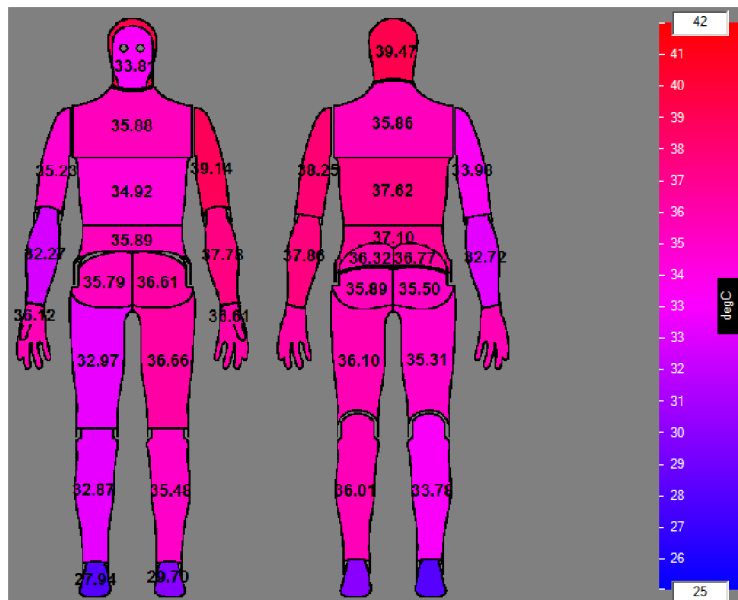
Na následujícím obrázku jsou ukázány teploty povrchu manekýna po navlhčení overalu a stabilizaci. Teploty oproti neoblečenému manekýnovi byly o cca 1 až 4 °C nižší. Ideální povrchová teplota je pro člověka cca 30 – 34 °C. Je tedy patrné, že by byl při daných podmínkách bez možnosti termoregulace vystaven přehřátí.



Obrázek 2.28 Manekýn po oblečení a stabilizaci

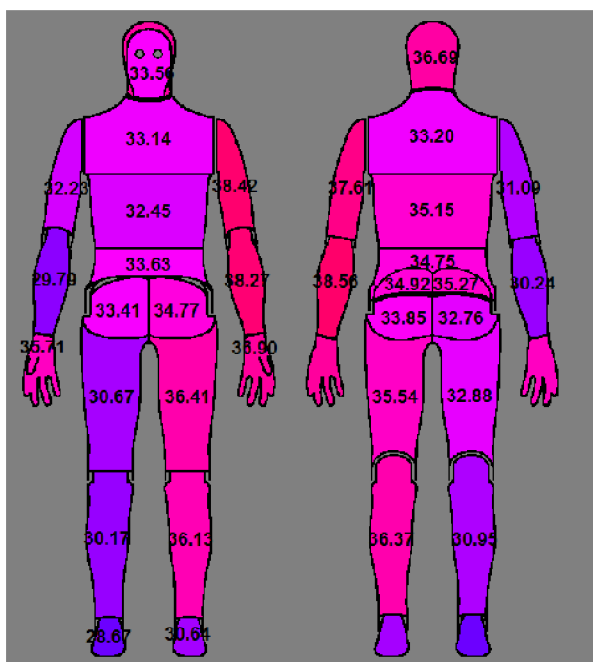
Na dalším obrázku jsou zobrazeny teploty manekýna pět minut po zahájení ventilace. Lze vidět, že teploty na pravé části manekýna byla již značně nižší. Rozdíl teplot oproti teplotám nechlazeného manekýna (obrázek 2.28) odpovídal cca 1 až 3 °C. Kromě pravé nohy a ruky byly ochlazeny i další části těla, kudy byly vzduchovody vedeny. Jednalo se tedy o hrudník, oblast břicha, záda a hýždě. V oblasti zad byl zaznamenán největší rozdíl

v lopatkové části, jelikož byl vzduchovod veden právě k lopatkám. U lopatek byla teplota nižší o cca 3 °C. U neventilovaných částí manekýna lze postřehnout, že došlo naopak k mírnému nárůstu teploty. Jednalo se však pouze o řády desetin stupně celsia.



Obrázek 2.29 Tepelný manekýn pět minut po spuštění

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny teploty manekýna 15 minut po spuštění ventilace pod oděv.



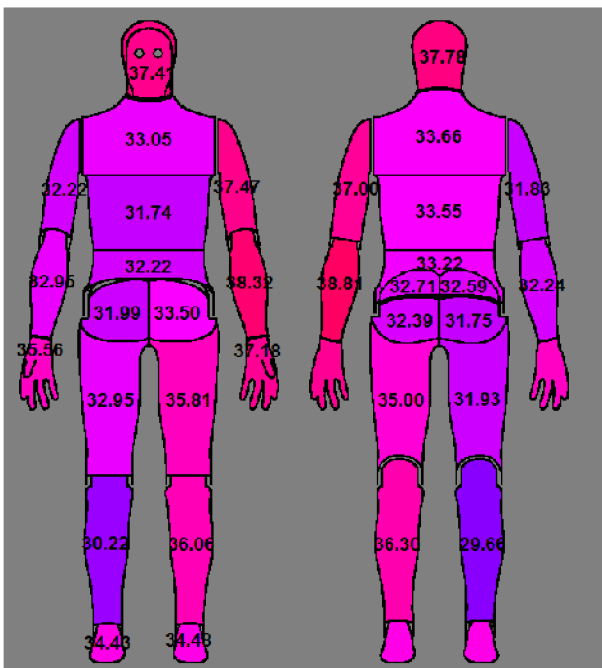
Obrázek 2.30 Tepelný manekýn 15 minut po spuštění ventilace



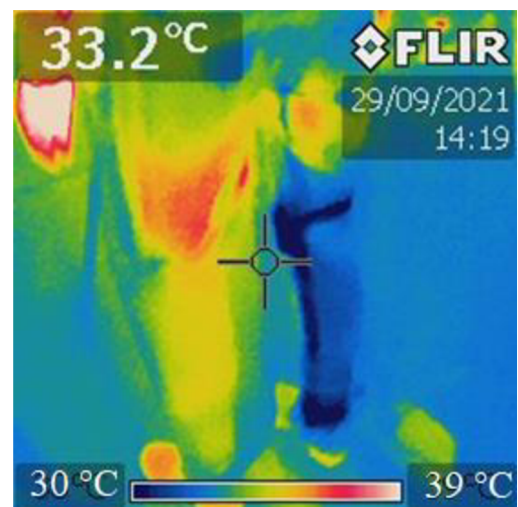
Obrázek 2.31 Manekýn z pravého profilu 15 minut po spuštění ventilace

Patnáct minut po zahájení měření poklesla teplota chlazených částí manekýna o další cca 2 – 3 °C. Teplota některých částí se dostala na hranici 30 °C, což nesedící člověk může vnímat jako optimální teplotu. Člověk nevykazující žádnou aktivitu, by již mohl tyto teploty vnímat jako chlad. Po čtvrt hodině měření byla nižší i teplota na temeni hlavy, která klesla z 39,5 °C na 36,7 °C. Teplota levé části těla byla vesměs udržována na podobných hodnotách jako předchozích deset minut měření. Z obrázku 2.31 lze vyvodit, že pravá strana manekýna byla již v tuto chvíli dostatečně ochlazena, jelikož byla vnitřní část ochranného oděvu zbavena zkondenzované vlhkosti. Ochranný oděv byl nafouknut z důvodu přetlaku pod oděvem o cca 30 Pa. Člověku je v oděvu stále umožněn pohyb, zároveň lze tímto přetlakem zabránit pronikání nečistot či bakterií pod oděv.

Dále již v průběhu měření nedocházelo k výrazným změnám teploty. Na konci měření bylo u pravého předloktí dosaženo o cca 3 °C vyšší teploty než po prvních patnácti minutách měření. Stejně tomu bylo i v případě přední části pravého stehna. K mírnému zvýšení teploty došlo i u lopatkové části zad. Z toho lze usoudit, že byla i pravá část manekýna ovlivňována přirozenou konvekcí z neochlazené části manekýna. Teplota hlavy na konci měření odpovídala cca 37,5 °C. U levé části manekýna došlo během měření také k mírnému snížení teploty vlivem nucené konvekce v pravé části oděvu. Na snímku z termokamery (obrázek 2.33) lze vidět rozdíl mezi ventilovanou a neventilovanou částí těla.



Obrázek 2.32 Tepelný manekýn na konci měření



Obrázek 2.33 Snímek lýtek z termokamery na konci měření

2.7 Experiment 2 – vliv konstrukce vzduchovodů a distribuce vzduchu

Předmětem druhého experimentu bylo ověření hypotézy 2 popsané v kapitole 2.1.2. Experiment byl zaměřen na efektivitu chlazení při třech variantách distribuce vzduchu po těle manekýna.

Postup celého experimentu probíhal obdobně jako u experimentu 1 s výjimkou způsobu vlhčení overallu. Jelikož bylo u experimentu 1 zjištěno, že zkondenzovaná voda byla zanášena

do elektroniky senzorů upevněných na manekýnovi, byla zvolena jiná metoda měření podmínek vlhkého vzduchu. Nebyly již měřeny parametry vzduchu pod ochranným oděvem, ale parametry vzduchu odcházejícího z oděvu. Parametry vzduchu byly tedy měřeny pouze ve výdechových ventilcích. Bylo tak možné kvalifikovaně odhadnout, kolik vlhkosti bylo z povrchu těla odpařeno. Z tohoto důvodu byl overall vlhčen samostatně mimo manekýna. Overall byl nejprve ponořen do vody, poté vyždímán a oblečen na manekýna. Množství nanesené vlhkosti bylo stanoveno rozdílem váhy suchého a vlhkého overallu. Vlhčící overall byl zvážen i po ukončení měření, aby bylo možné odhadnout množství odpařené vlhkosti.

Ostatní kroky experimentu zůstaly stejné. Nejprve bylo zapotřebí nastartovat a nastavit klimatickou komoru a tepelného manekýna na požadované podmínky. Klimatická komora byla tedy nastavena na relativní vlhkost vzduchu 50 % a teplotu 25 °C a 30 °C. Tepelný manekýn byl nastaven na konstantní tepelný tok o hodnotě 122 W·m⁻² (2,1 met). Po stabilizaci podmínek byl manekýn oblečen do navlhčeného overallu a následně do ochranného oděvu. Do výdechových ventilků byly přidány senzory pro sledování parametrů vzduchu. Poté byla spuštěna ventilace okolního vzduchu pod ochranný oděv. Měření probíhalo po dobu jedné hodiny.

Variety rozvádění vzduchu

Jak již bylo řečeno, experiment 2 byl zaměřen na distribuci vzduchu do různých částí těla manekýna. Bylo tak možné zjistit, zda je přiváděný vzduch schopen intenzivněji odvádět teplo z konkrétních částí těla. K tomu byly použity tři varianty distribuce vzduchu po těle manekýna.

Vzduch byl pomocí ventilační jednotky přiváděn do distributoru vzduchu, který byl složen ze šesti přírub. V prvním případě měření byl vzduch z distributoru veden do všech šesti vzduchovodů (obrázek 2.34). Dva z nich byly vedeny do horních končetin, dva do dolních končetin. Další byl veden na přední část těla a poslední kolem krku k horní části zad (k lopatkám).



Obrázek 2.34 Plně osazený overall



Obrázek 2.35 Plně osazený overall - vzduchovod vedený na záda

Druhou variantou distribuce vzduchu bylo jeho rozvádění samotným distributorem (obrázek 2.36). Vzduch tedy nebyl vzduchovody přiváděn do konkrétních částí těla, ale pouze k hrudnímu koši a jeho okolí.



Obrázek 2.36 Pouze distributor

V případě poslední varianty měření byly vzduchovody vedeny pouze do horní části nohou (obrázek 2.37). Ostatní rozvody distributoru vzduchu byly ucpány voštinou.



Obrázek 2.37 Pouze do nohou



Obrázek 2.38 Pouze do nohou – ucpané rozvody vzduchu voštinou

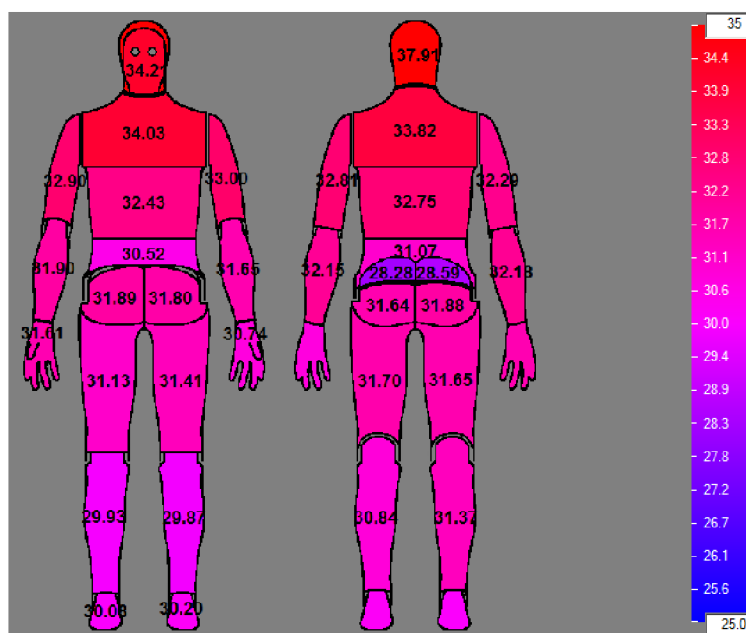
2.7.1 Plně osazený overall

U plně osazeného overallu bylo k distribuci vzduchu využito všech šesti vzduchovodů. Tento experiment byl měřen pro dva případy okolních podmínek – pro 25 °C při 50 % relativní vlhkosti a pro 30 °C při 50 % relativní vlhkosti. Experimenty byly při zmíněných podmínkách provedeny dne 2. 12. 2021 s využitím filtru FFP2.

25 °C, 50 % RH

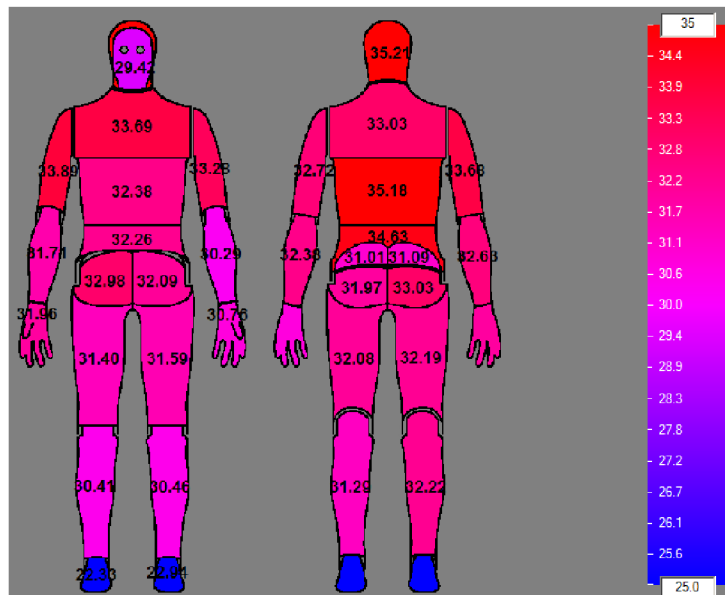
Podmínky v klimatické komoře byly nastaveny na 25 °C a 50 % relativní vlhkosti. Tepelný manekýn byl nastaven na konstantní tepelný tok o hodnotě 122 W·m⁻² (2,1 met). Ve chvíli, kdy byly podmínky v komoře stabilní, byl manekýn oblečen do navlhčeného overallu a následně do ochranného oděvu. Na overall bylo naneseno 690 g vody. Následně byly do výdechových ventilků přidány senzory pro sledování parametrů vzduchu. Poté byla spuštěna ventilace. Po hodině byl experiment ukončen. Během měření bylo odpařeno 471 g vlhkosti.

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny teploty neoblečeného manekýna. Teplota se pohybovala v rozmezí 30 – 34 °C s výjimkou temene hlavy o teplotě 38 °C a horní části hýždí o teplotě přes 28 °C. Lze postřehnout, že teplota je vyšší s výškou manekýna.



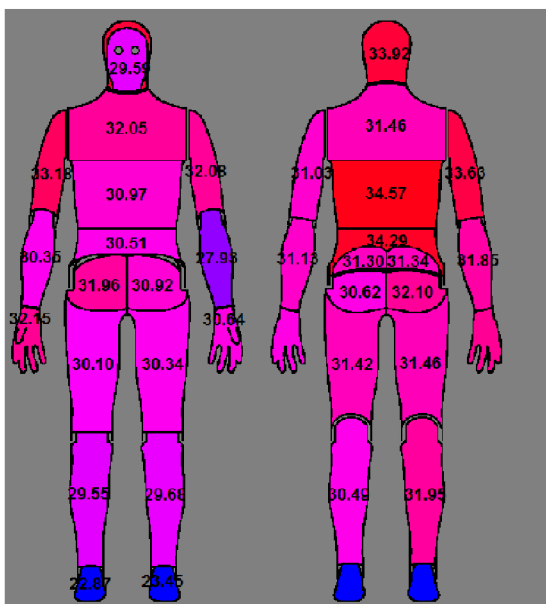
Obrázek 2.39 Neoblečený tepelný manekýn

Na dalším obrázku je zobrazen tepelný manekýn po desetiminutové stabilizaci. Hodnoty teplot se příliš nelišily od teplot neoblečeného manekýna. Teplota těla se pohybovala v rozmezí cca 30,4 – 35,2 °C. Nejteplejší částí těla byla záda v křížové i bederní oblasti a temeno hlavy. V těchto oblastech se teplota pohybovala kolem 35 °C.



Obrázek 2.40 Tepelný manekýn po stabilizaci

Pět minut po spuštění (obrázek 2.41) již byly teploty vesměs nižší. Rozdíl teplot se pohyboval od řádů desetin stupně celsia do cca 2 °C. V případě horní části hýždí došlo i k mírnému ohřátí. Výrazněji klesla teplota v případě levého předloktí (na 28 °C), což mohlo být způsobeno např. nerovnoměrným nasměrováním otvorů přivádějících vzduch podél vzduchovodu. Manekýn vykazoval rovnoměrně rozloženou teplotu napříč přední částí těla. Na zadní části byla teplota také rozložena poměrně rovnoměrně s výjimkou vyšší teploty (cca 34 °C) na zádech, temeni hlavy a pravé paže. Na obrázku 2.42 lze vidět, že ochranný oděv je na vnitřní straně stále orosen.

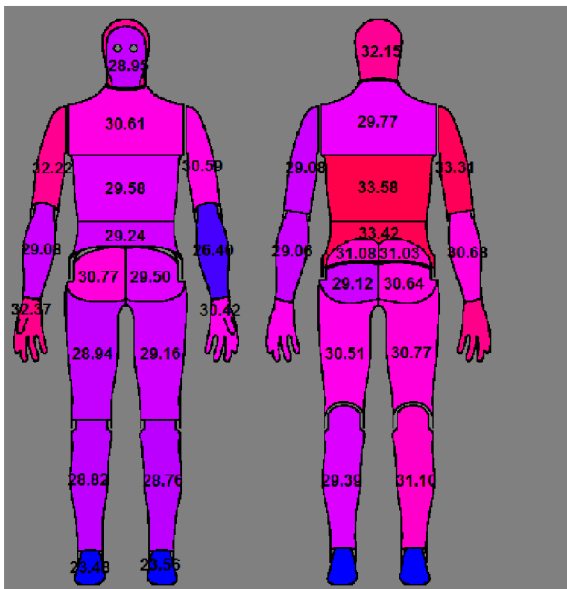


Obrázek 2.41 Tepelný manekýn 5 minut po spuštění



Obrázek 2.42 Tepelný manekýn 5 minut po spuštění – plně osazený overall

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny teploty tepelného manekýna po dalších 10 minutách měření (obrázek 2.43). Je patrné, že teploty na většině částí těla jsou na hranici tepelného komfortu většiny lidí. Nejvyšší teplota byla i 15 minut od spuštění ventilace zaznamenána na zádech, temeni hlavy a pravé paži. Některé části byly již ochlazený na teplotu pod 30 °C, což by sedícího člověka podněcovalo zvýšit teplotu okolí. Ale pro lidi pracující a pohybující se v ochranném oděvu mohou být tyto teploty optimální, obzvláště v okolí dolních končetin. Na obrázku 2.44 lze již postřehnout místa (zejména oblast břicha) bez zkonzenzované vlhkosti na ochranném oděvu.

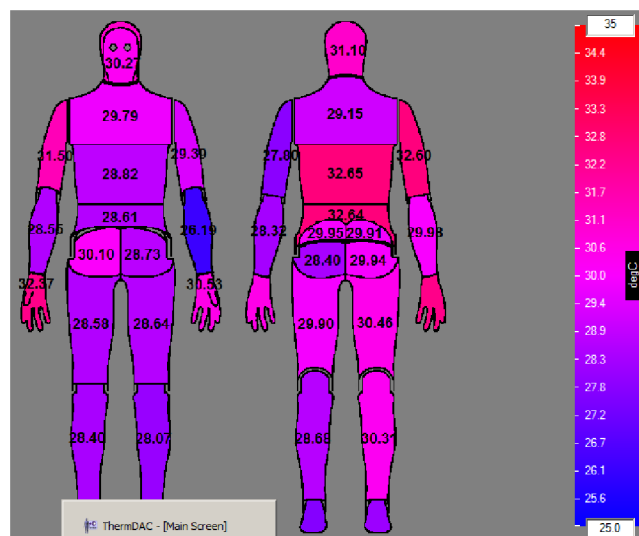


Obrázek 2.43 Tepelný manekýn 15 minut po spuštění



Obrázek 2.44 Tepelný manekýn 15 minut po spuštění – plně osazený overal

Teplota povrchu těla i po zbytek měření klesala, ale již ne tak výrazně. Na dalším obrázku je ukázán tepelný manekýn na konci měření.



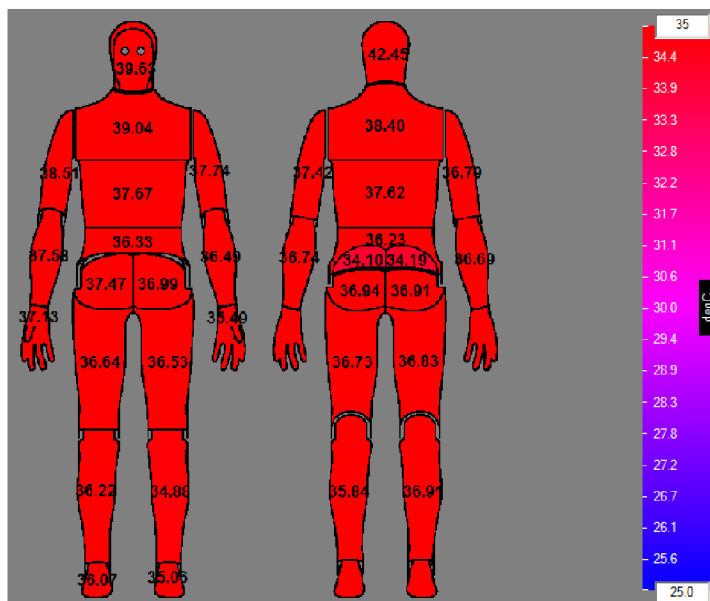
Obrázek 2.45 Tepelný manekýn na konci měření

Teploty na zádech a pravé paži se výrazně nezměnily a zůstaly nejteplejšími částmi. Chlazení se nejvíce projevilo na pravém předloktí, holeních a stehnech, hrudníku, levé části hýždí, na levé paži a předloktí. V těchto místech se teplota držela pod 30 °C. Obecně byla přední část manekýna chlazena intenzivněji a rovnoměrněji než zadní část. To mohlo být způsobeno zavedením vzduchovodů do předních částí končetin. Zadní části končetin byly ochlazovány pouze díky vlivu vzduchu přiváděného na přední části. Na zádech lze vidět chladnější část u lopatek, jelikož byl vzduchovod na zadní část veden pouze k této oblasti.

30 °C, 50 % RH

U tohoto experimentu byla teplota v komoře nastavena na 30 °C. Ostatní podmínky byly stejné jako v předchozím případě. Na overall bylo nanášeno 701 g vlhkosti. Po zvážení overallu po ukončení měření bylo zjištěno, že bylo během experimentu odvedeno 523 g vlhkosti.

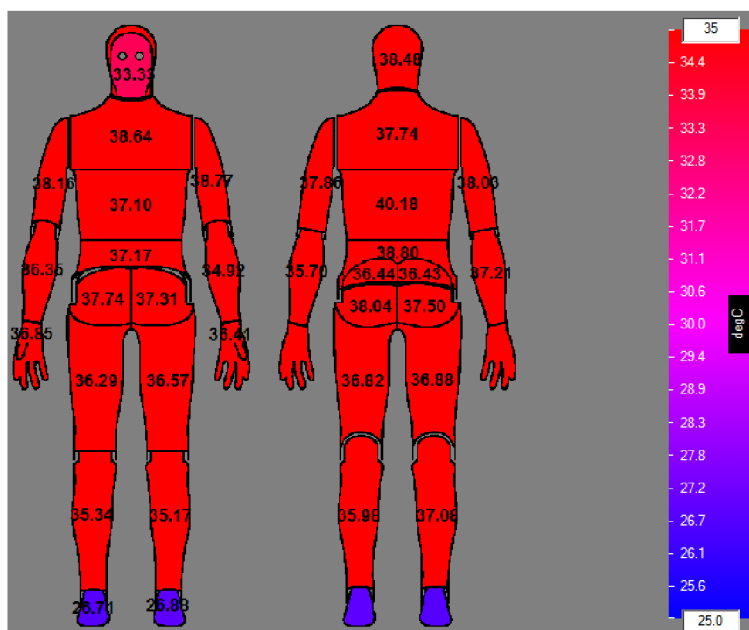
Teplotní rozdíly mezi měřením s podmínkami okolí 25 °C a 30 °C byly zřejmé ještě před oblečením manekýna do overallu (obrázek 2.46). Celé tělo dosahovalo povrchové teploty nad 34 °C, čímž byl demonstrován teplý letní den. Nejnižší teploty byly zaznamenány na horní části hýždí (cca 34,1 °C). Nejvyšší teplota o hodnotě 42,5 °C byla dosažena na temeni hlavy.



Obrázek 2.46 Neoblečený manekýn

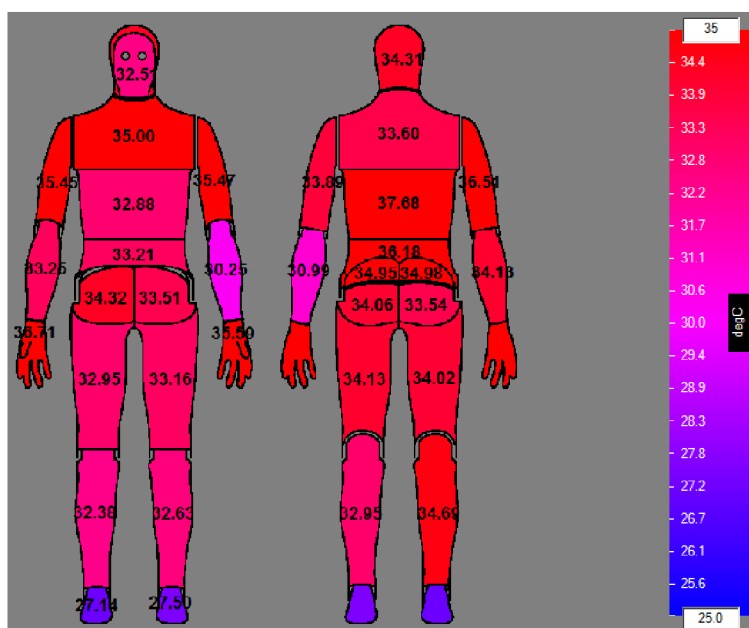
Po oblečení navlhčeného overallu zůstaly teploty těla manekýna velmi podobné jako v případě neoblečeného manekýna.

Poté, co byl manekýn oblečen do ochranného oděvu a deset minut ponechán kvůli stabilizaci, byly na několika místech zaznamenány malé změny teploty (obrázek 2.47). Na zadní části těla se jednalo spíše o zvýšení teploty, kde nejvyšší teploty bylo dosaženo na zádech (40,2 °C). Ale např. teplota na temeni hlavy byla nižší než před oblečením ochranného oděvu. Ostatní části těla vykazovaly podobnou teplotu jako v případě neoblečeného manekýna.



Obrázek 2.47 Oblečený tepelný manekýn po stabilizaci

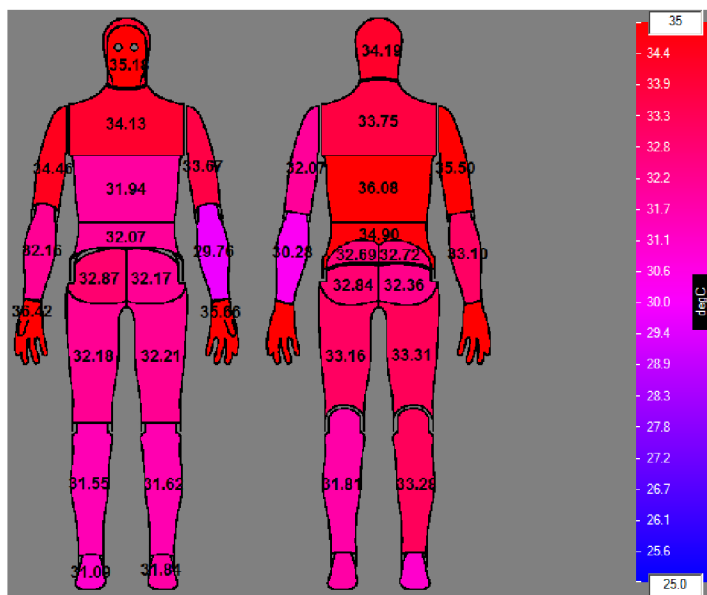
Výraznějších teplotních změn bylo dosaženo až 15 minut po spuštění měření, jak lze postřehnout na obrázku 2.48.



Obrázek 2.48 Tepelný manekýn 15 minut po spuštění

Z obrázku lze vyvodit, že difference teplot odpovídaly rozsahu cca 1 – 4 °C. K poklesu teploty na nejnižší hodnotu došlo u levé paže, na jejíž přední části byla naměřena teplota 30,3 °C a na zadní části 31 °C. Na temeni hlavy byla rovněž zaznamenána podstatně nižší teplota (34,3 °C). Horní končetiny byly ochlazeny o cca 2 – 3 °C. Teplota dolních končetin byla po 15 minutách měření nižší o cca 2,5 – 3,5 °C. Výrazný chladičí účinek byl zaznamenán i v oblasti hrudníku. Celkově byla tedy opět zaznamenána nižší teplota na přední části těla. Důvodem mohlo být rozmístění vzduchodů právě zejména na přední straně.

V průběhu zbývajících času měření byly změny teploty již nepatrné. Teplota klesla pouze v rádech desetin stupně celsia. Chladnější i nadále zůstala přední část těla. Nejvýrazněji byla ochlazená levá ruka na předloktí (přední i zadní část). Dalšími nejvíce ochlazenými částmi byl hrudník, nohy, hýždě, pravé předloktí a levá paže. Kromě zmíněného levého předloktí nebyl u žádné části těla zaznamenán pokles teploty pod 30 °C. Nejméně ochlazenými částmi zůstala záda a pravá paže. Na těchto místech bylo dosaženo výsledné teploty 35,5 – 36,1 °C.



Obrázek 2.49 Tepelný manekýn na konci měření

Dne 3. 12. 2021 byly provedeny další dva experimenty. Probíhaly za stejných podmínek. Byl použit plně osazený overal, podmínky okolí odpovídaly 25 °C a 30 °C při relativní vlhkosti 50 %. Tentokrát ale nebyly během měření použity filtry.

Při měření s použitím filtru tlaková ztráta na ventilátoru odpovídala cca 1400 Pa. V případě nefiltrovaného vzduchu byla zjištěna tlaková ztráta o cca 500 Pa menší. Bez použití filtru mohl systém jet na plný průtok. V případě, že byl filtr použit, vzrostla tlaková ztráta, a byl tedy přiváděn vzduch o nižším průtoku.

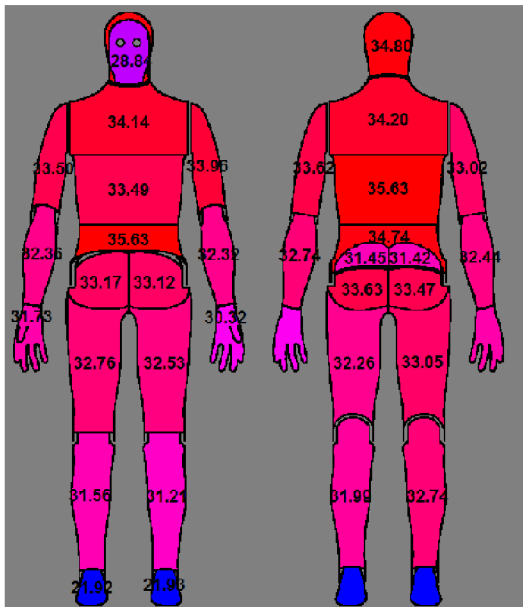
2.7.2 Pouze distributor

U tohoto měření nebyly použity vzduchovody, kterými by byl vzduch přiváděn do konkrétních částí těla. Byl zapojen pouze distributor na hrudníku. Veškerý filtrovaný okolní vzduch byl tedy přiváděn pouze do okolí hrudního koše (obrázek 2.36).

Test byl proveden dne 21. 12. 2021. Komora byla nastavena na 25 °C a relativní vlhkost 50 %. Manekýn byl nastaven na konstantní tepelný tok o hodnotě 122 W·m⁻². Po ustálení podmínek v laboratoři byl manekýn oblečen do navlhčeného overalu a ochranného oděvu. Po stabilizaci byla spuštěna ventilace. Po hodině byl experiment ukončen. Na overal bylo naneseno 733 g vody. Během experimentu bylo odpařeno 454 g vlhkosti.

Po oděni manekýna do vlhkého overalu, ochranného oděvu a stabilizaci dosahovala povrchová teplota manekýna hodnot 31,2 – 35,6 °C. Nejvyšší teplota byla naměřena na spodní

části břicha. Dalšími místy s vysokou teplotou byla záda, temeno hlavy a hrudník. Nejnižší hodnoty teploty byly zaznamenány u holení.

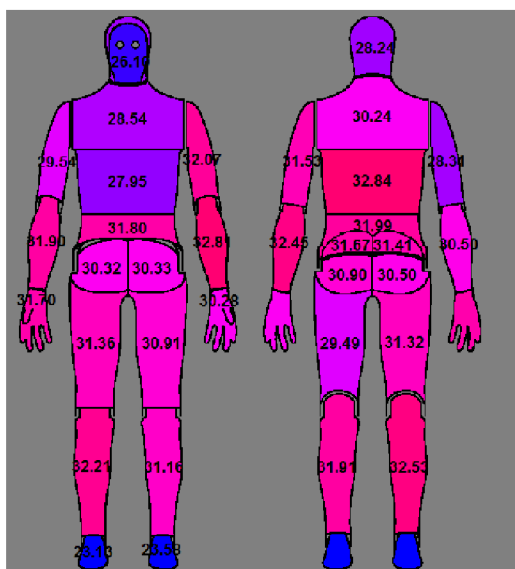


Obrázek 2.50 Tepelný manekýn po oděni a stabilizaci



Obrázek 2.51 Tepelný manekýn z pravého profilu po oděni a stabilizaci

Na následujících obrázcích je zobrazen manekýn a teploty jeho těla 10 minut po spuštění ventilace.



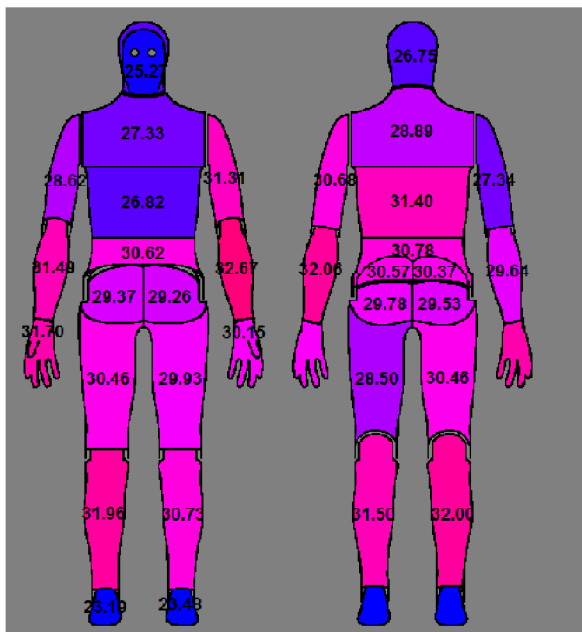
Obrázek 2.52 Tepelný manekýn 10 minut po spuštění



Obrázek 2.53 Snímek manekýna 10 minut po spuštění - horní část těla

Po 10 minutách od spuštění ventilace došlo k výraznému poklesu teploty v okolí hrudního koše a temene hlavy, kde rozdíl teploty oproti stabilizovanému neochlazenému stavu činil cca 5,5 °C a více. Teplota těchto částí těla dosáhla 28,5 °C a méně. Dalšími částmi těla, které vykazovaly značně chladnější teploty, byly pravá paže, oblast břicha, podbřišku, hýždí a zad. V případě těchto částí teplotní diference odpovídala asi 2 až 3 °C. Na obrázku 2.53 lze vidět, že použitím distributoru byla skutečně nejvíce ovlivněna oblast hrudníku a břicha. Tato místa byla již po 10 minutách zbavena zkondenzované vlhkosti na povrchu oděvu. Končetiny byly mimo dosah primárního nasměrování ventilace, proto byl oděv kolem těchto míst stále zarosen.

Dvacet minut po spuštění ventilace (obrázek 2.54) byl zjištěn další pokles teploty, ne však již tak výrazný. Teplota na výše zmíněných částech těla tentokrát klesla pouze o přibližně 1 °C. Z obrázku 2.55 je patrné, že vzduchem z distributoru byla velmi dobře ochlazována také záda, ze kterých bylo odváděno značné množství vlhkosti. Velké množství tepla bylo již odvedeno i z ramenou a horních částí paží. Ve zbývajících částech končetin zůstal oděv zarosen.

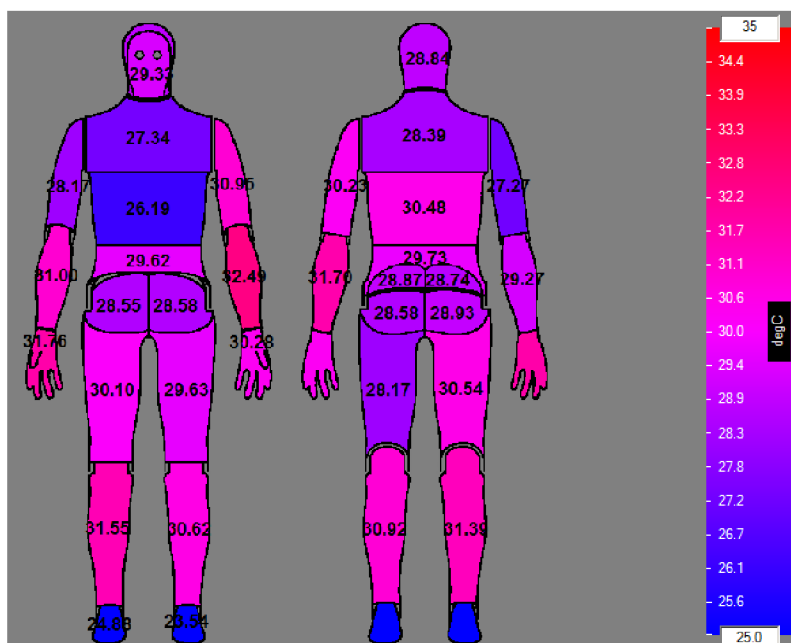


Obrázek 2.54 Tepelný manekýn 20 minut po spuštění ventilace



Obrázek 2.55 Tepelný manekýn 20 minut po spuštění ventilace - záda

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny výsledné teploty manekýna na konci měření.



Obrázek 2.56 Tepelný manekýn hodinu po spuštění

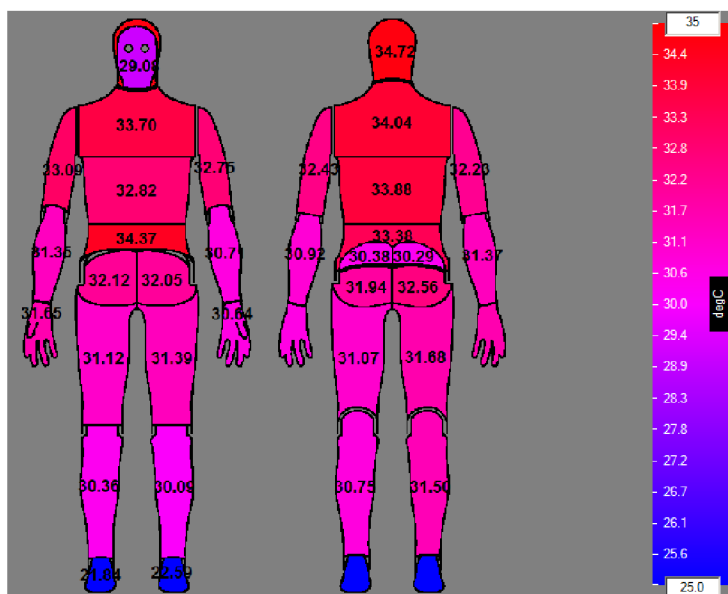
Lze postřehnout, že po zbývající čas měření nebyl rozdíl mezi teplotami tak zřetelný. Nejchladnější částí těla na konci měření byl hrudník, který byl ochlazen v horní části na 27,3 °C a ve spodní na 26,2 °C. V této části byl umístěn distributor, proto měl přiváděný vzduch největší vliv právě zde. Teplota v oblasti hlavy se ustálila na cca 29 °C. Mezi další výrazně ochlazené části patřilo levé stehno, pravá paže, břišní část a podbřišek a oblast hýždí. Teploty zmíněných částí byly nižší než 30 °C. Zbývající části – nohy a ruce – nebyly po celou dobu měření takto nasměrovanou ventilací vzduchu takřka ovlivněny.

2.7.3 Vzduchovody do nohou

Ventilovaný vzduch byl u tohoto experimentu distribuován vzduchovody pouze do horní části nohou, zbývající příruby distributoru byly ucpány voštinou. Tím byl sice přívod vzduchu utlumen, část jej však byla schopna materiálem projít. Proto byl i hrudník částečně ochlazen vzduchem procházejícím voštinou.

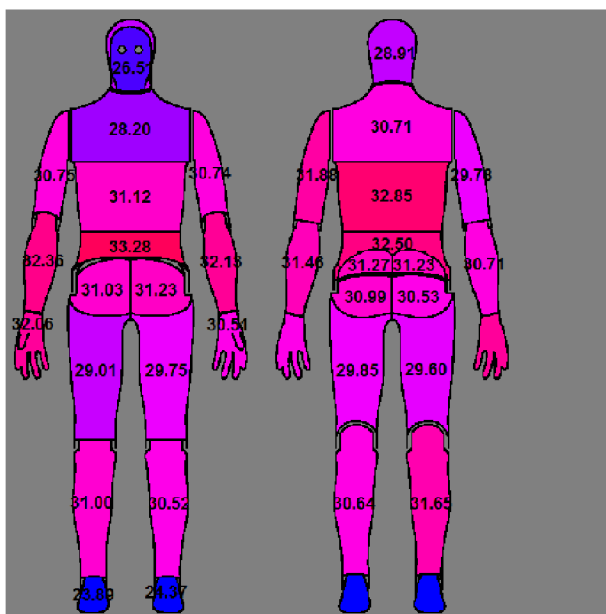
Tento experiment byl realizován 21. 12. 2021 v klimatické komoře, která byla nastavena na teplotu 25 °C a relativní vlhkost 50 %. Tepelný manekýn byl opět nastaven na konstantní tepelný tok $122 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Po stabilizaci podmínek v komoře byl navlhčený overal oblečen na manekýna. Na overal bylo nanášeno 702 g vody. Poté byl manekýn oblečen do ochranného oděvu. Manekýn byl takto ponechán 10 minut kvůli stabilizaci a následně byla spuštěna ventilace pod oděv. Měření bylo po hodině ukončeno. Během měření bylo z overalu odpařeno 442 g vlhkosti.

Na následujícím obrázku je ukázán manekýn po oděni do navlhčeného overalu i ochranného oděvu a desetiminutové stabilizaci. Povrchová teplota manekýna se pohybovala v rozmezí cca 30 – 34 °C. Nejvyšší teploty byly zaznamenány na temeni hlavy (34,7 °C), v oblasti hrudního koše, zad a paží. Nižší teploty byly postřehnuty na končetinách a v oblasti pánve a hýždí.



Obrázek 2.57 Tepelný manekýn po stabilizaci těsně před spuštěním ventilace

Po 10 minutách měření (obrázek 2.58) byly zaznamenány nižší teploty zejména na temeni hlavy (29 °C), na stehnech, pažích a horní části hrudníku. Z nižší teploty na temeni, pažích a hrudníku lze vyvodit, že část vzduchu byla schopna projít voštinou a částečně tak ochlazovat horní část těla. Na holeních lze postřehnout mírné zvýšení teploty. Vzduchovody byly zavedeny pouze do horní části nohou. Vyšší teplota mohla být způsobena v důsledku vzájemného ovlivňování mezi horními a spodními částmi nohou, tedy mezi nucenou a přirozenou konvekcí.

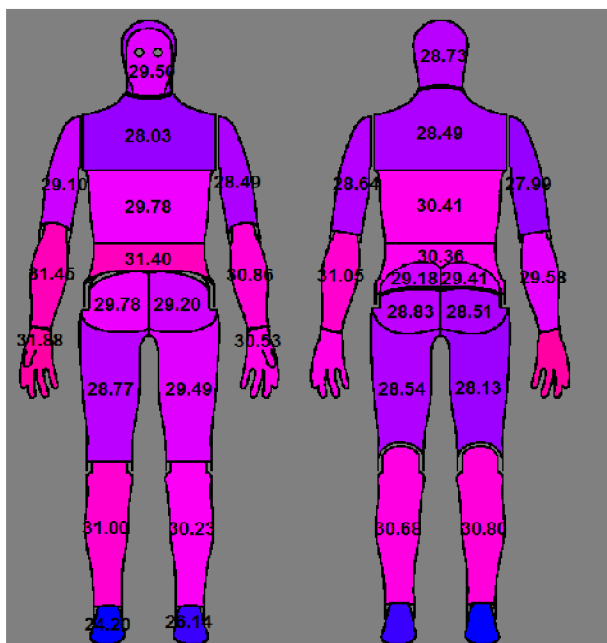


Obrázek 2.58 Tepelný manekýn 10 minut po spuštění ventilace



Obrázek 2.59 Tepelný manekýn 10 minut po spuštění ventilace – přední část

Na následujících obrázcích je zobrazen tepelný manekýn a jeho teploty na konci měření.



Obrázek 2.60 Tepelný manekýn na konci měření



Obrázek 2.61 Tepelný manekýn na konci měření – zepředu

Na konci měření byly největší teplotní rozdíly oproti nechlazenému manekýnovi zaznamenány v oblasti paží, temene hlavy, hrudníku, zad, na hýždích a stehnech. Diference v těchto oblastech oproti neventilovanému oděvu dosahovala až 6 °C. Většina těchto částí těla dosáhla finální teploty pod 30 °C, což by bylo pro neaktivního člověka pravděpodobně již nepříjemné. S výjimkou levého lýtka byla výsledná teplota spodní části nohou mírně vyšší než teplota původní, což bylo pravděpodobně důsledkem interakce mezi přirozenou a nucenou konvekcí, jak již bylo zmíněno výše.



Obrázek 2.62 Snímek hrudníku tepelného manekýna z termokamery na konci měření



Obrázek 2.63 Hrudník manekýna po sundání ochranného oděvu

Na snímku hrudníku manekýna z termokamery (obr. 2.62) a fotky horní části manekýna po sundání ochranného oděvu (obr. 2.63) lze konstatovat, že vzduch během měření skutečně procházel i rozvody ucpanými voštinou. Vzduch byl schopen odvést takové množství tepla z oblasti hrudníku, že právě v jeho okolí bylo (s výjimkou stehen) dosaženo nejnižších teplot.

Z obrázků s výslednými teplotami je patrné, že i tento systém distribuce vzduchu je schopen odvést značné množství tepla vyprodukovaného člověkem. Pro pohybujícího se člověka by byl chladicí účinek pravděpodobně dostatečný. Zřejmě by ale stále pociťoval teplo v oblasti holení a lýtek, jelikož tyto části jsou během pohybu nejvíce zatěžovány. Proto by asi bylo příhodné vzduchovody zavést níže, aby byly primárně ochlazovány spodní části nohou.

2.8 Shrnutí

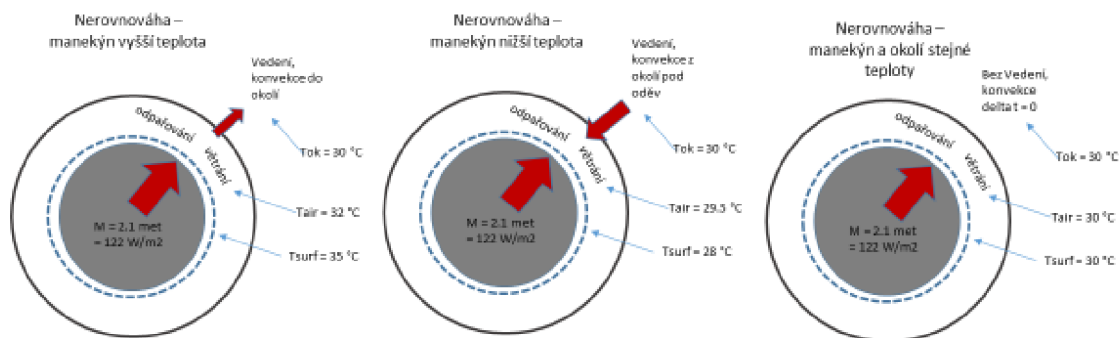
Experiment 1

V rámci experimentu 1 bylo zjištěno, že v případě teploty okolí 25 °C bylo po hodině měření na ventilované části těla manekýna dosaženo výsledné teploty o cca 1 °C vyšší oproti teplotě prostředí. V případě měření za vyšší teploty okolí byla výsledná teplota manekýna o cca 2 °C vyšší než teplota přiváděného vzduchu. Jelikož je pro člověka povrchová teplota běžná v rozsahu cca 30 – 34 °C, bylo by ochlazení při 25 °C velmi výrazné. Bylo by tedy zapotřebí posoudit, zda by bylo v případě nižší teploty okolí pro konkrétního člověka chlazení vhodné na základě jeho činnosti v ochranném oděvu.

Ve výsledku lze na základě experimentu 1 tedy říci, že ventilací okolního vzduchu pod oděv je možné zajistit dostatečný odvod tepla z povrchu těla a ochránit tak člověka před přehřátím organismu

V rámci experimentu 1 popsaného v kapitole 2.6.2 si lze na obrázku 2.32 povšimnout, že na pravém lýtku manekýna bylo dosaženo nižší teploty, než měl přiváděný vzduch. Nabízí se otázka, zda je možné dosáhnout pod oděvem nižší teploty, než je teplota okolí.

Jestliže dojde díky odpařování k poklesu teploty pod oděvem pod teplotu okolí, je teplota vzduchu pod oděvem vyrovnána (dohřáta) pomocí vedení tepla přes oděv a konvekci na vnitřní straně oděvu. Nižší teploty pod oděvem tedy lze dosáhnout, ale pouze v případě, pokud by došlo ke zvýšení tepelného odporu oděvu (vyšší izolace oděvu).



Obrázek 2.64 Teplota pod oděvem vs. teplota okolí

Pokud by ale bylo zamezeno přenosu tepla kondukcí a konvekcí přes oděv z okolí do proudícího vzduchu pod oděvem za vysoké teploty a nízké vzdušné vlhkosti, bylo by zapotřebí zavést větrání pod oděv.

Experiment 2

V případě použití systému plně osazeného overalu byl chladičí účinek poměrně rovnoměrný. Výjimkou byla zejména oblast zad, přestože byl jeden ze vzduchovodů veden přímo do této oblasti. Oproti jiným částem těla však záda zaujímají podstatně větší plochu, kterou není vzduchovod schopen dostatečně ochladit. Také hlava byla méně ochlazována. V případě vyšší teploty okolí byla výsledná teplota poměrně vysoká (cca 34,5 °C), což je pro hlavu již značná zátěž. Výsledky z měření při 25 °C vykazují, že by systém plně osazeného overalu při této teplotě mohl člověku pohybujícímu se v ochranném oděvu vyhovovat. Pokud by člověk vykonával pouze např. administrativní práci na židli, mohlo by být dostatečné i chlazení při 30 °C. Bylo by ale zapotřebí zvážit možnost přivádění vzduchu k hlavě a na záda.

U provedených experimentů je ale zapotřebí zohlednit, že manekýn není v průběhu měření schopen regulovat tělesnou teplotu stejně jako člověk – vyšším prokrvením potřebných částí těla, zapocením apod. Pracuje pouze s výchozí vlhkostí, která je poté odváděna.

V následující tabulce jsou shrnuty hodnoty nanesené a odpařené vlhkosti během měření jednotlivých systémů distribuce vzduchu z experimentu 2.

Tabulka 5 Množství vlhkosti na overalu během měření experimentu 2

	Teplota okolí	Množství nanesené vlhkosti [g]	Množství odpařené vlhkosti [g]	Množství odpařené vlhkosti [%]
Plně osazený overal	25 °C	690	471	68,3
	30 °C	701	523	74,6
Pouze distributor	25 °C	733	454	61,9
Vzduchovody do nohou	25 °C	702	442	63,0

Z výsledků je patrné, že z povrchu osoby vyskytující se v prostředí s vyšší teplotou je díky ventilaci možné odvést větší množství vlhkosti. Největší množství vlhkosti bylo odpařeno s použitím plně osazeného overalu. Vzduchovody byly zavedeny do různých částí těla, zatímco jiné systémy distribuce vzduchu byly zaměřeny především na střed těla. Z ostatních částí těla tak nemohlo být odvedeno takové množství tepla jako právě v případě plně osazeného overalu. Nejméně vlhkosti bylo odvedeno v případě rozvodu vzduchu pouze distributorem. Rozdíl oproti systému zavedení vzduchovodů pouze do nohou činí 1,1 %. Přestože byly zbývající rozvody distributoru ucpány voštinou, dokázal systém vzduchovodů zavedených do nohou odvést z okolí hrudníku podobné množství tepla jako v případě použití samotného distributoru. Rozdíl tkvěl zejména ve výraznějším ochlazení horní části nohou, kam byly vzduchovody zavedeny. V případě absence vzduchovodů byla více ochlazována oblast v okolí břicha, u kterého byly příruby distributoru v blízkém dosahu. V obou případech zůstaly teploty na spodní části nohou a rukou vyšší oproti zbývajícím částem těla. Při práci a pohybu jsou ovšem nejvíce zapojovány právě svaly na končetinách, bylo by proto vhodné zaměřit se právě na ochlazování těchto částí.

Na základě výsledků experimentu 2 lze konstatovat, že distribuce vzduchu do konkrétních oblastí pod oděvem má vliv na chlazení vybraných částí těla. Výsledky experimentu ukazují, že končetiny by bylo výhodnější ochlazovat pomocí vzduchovodů. Končetiny zaujmají menší plochu a nejsou vzduchem z distributoru téměř ovlivněny. Na větší plochy těla by naopak bylo efektivnější použití distributoru bez vzduchovodů, které nejsou z větších ploch schopny odvést dostatečné množství tepla. To platí i pro hlavu, která je v případě distribuce pomocí vzduchovodů mimo jejich dosah.

3 Porovnání výsledků experimentů s daty z odborné literatury

Tato kapitola se zabývá porovnáním experimentů uskutečněných v klimatické komoře s experimentem z článku z literatury [31], jež byl proveden na lidech. Blíže je tento experiment popsán v kapitole 3.1.

3.1 Data z odborné literatury – experiment s dobrovolníky

Tento experiment byl zaměřen na otázku tepelného komfortu lidí pracujících v různých teplotních podmínkách. Experimentu se účastnilo 12 lidí ve věku od 23 do 25 let. Polovina lidí byla tvořena muži, polovina ženami. Dobrovolníci byli oděni do chirurgického oděvu a jednorázového ochranného oděvu. Použity byly i ochranné rukavice, brýle a rouška.



Obrázek 3.1 Dobrovolník v chirurgickém oděvu [31]



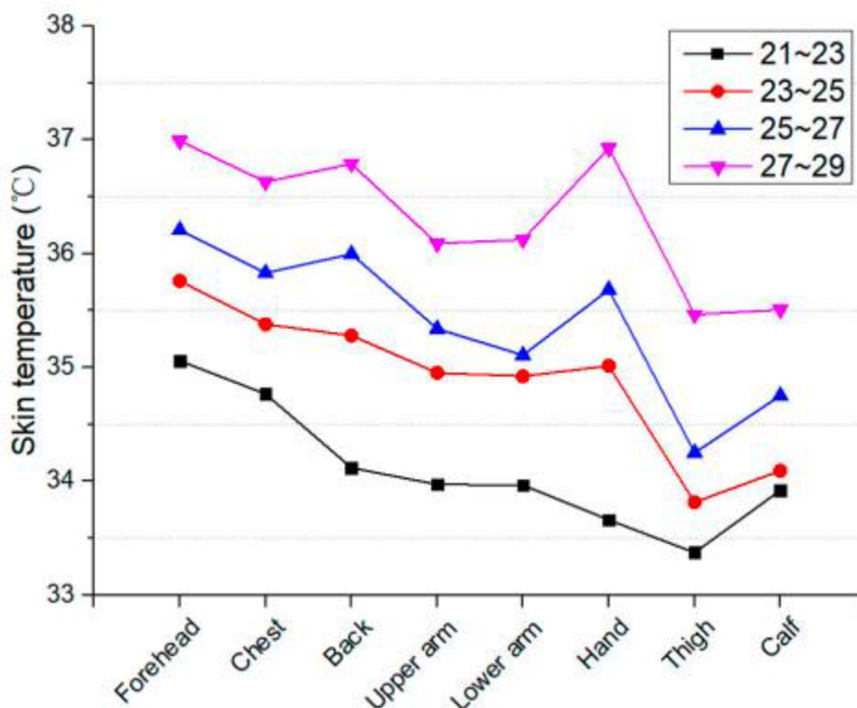
Obrázek 3.2 Dobrovolník v ochranném oděvu [31]

Takto oblečení byli dobrovolníci vystaveni čtyřem různým teplotním podmínkám okolí:

- 21 – 23 °C
- 23 – 25 °C
- 25 – 27 °C
- 27 – 29 °C

Celý proces testování probíhal po dobu jedné hodiny. Během testu účastníci buď stáli na místě, nebo se pohybovali pomalou chůzí.

Na obrázku 3.3 je uveden graf interpretující výsledná data z literatury [31]. V grafu je zobrazena průměrná teplota kůže osmi různých částí těla účastníků testu vystaveným uvedeným teplotním podmínkám okolí.



Obrázek 3.3 Průměrná teplota osmi částí těla účastníků testu během různých teplot okolí [31]

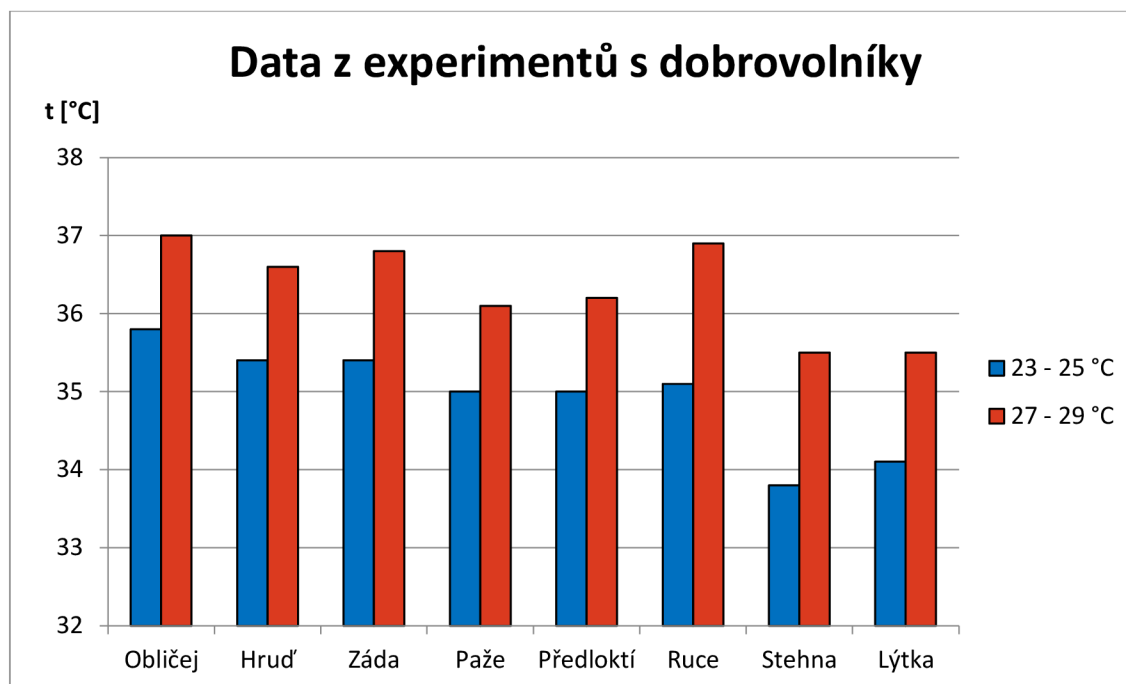
Jelikož bylo během experimentů s manekýnem zpracovaných pro tuto diplomovou práci pracováno s teplotami 25 °C a 30 °C, byly pro porovnání s experimentem z literatury vybrány teploty v rozsahu 23 – 25 °C a 27 – 29 °C.

V následující tabulce jsou uvedeny teploty těla určené na základě obrázku 3.3 u vybraných kategorií teploty okolí během experimentů s dobrovolníky.

Tabulka 6 Průměrná teplota kůže na jednotlivých částech těla dobrovolníků při zvolených teplotních podmínkách [31]

Teplotní podmínky	Průměrná teplota kůže [°C]							
	Obličej	Hrud'	Záda	Paže	Předloktí	Ruce	Stehna	Lýtka
23 – 25 °C	35,8	35,4	35,4	35	35	35,1	33,8	34,1
27 – 29 °C	37	36,6	36,8	36,1	36,2	36,9	35,5	35,5

Pro lepší názornost byly hodnoty těchto teplot vyneseny do následujícího sloupcového grafu.



Obrázek 3.4 Průměrné teploty jednotlivých částí těla dobrovolníků pro zvolené teplotní podmínky

Z grafu lze vyvodit, že teplota každé části těla člověka je spjata s tepelnou zátěží prostředí – pokud dojde k navýšení teploty okolí, tělo zareaguje zvýšením teploty všech částí těla. Lze zaznamenat, že teplota okolí blízká se 30 °C již značně zatěžuje člověka. Teplota kůže od cca 35 °C by již evokovala vysokou tělesnou teplotu. Teplota kůže od cca 35 °C a vyšší by již vedla k přehřátí organismu.

V následujících tabulkách jsou uvedeny teploty identických částí tepelného manekýna z obou experimentů. Jelikož je tepelný manekýn složen ze 34 vyhříváných zón, byly výsledné hodnoty teplot příslušných částí těla zprůměrovány. V tabulce 7 jsou uvedena data experimentů po 15 minutách měření.

Tabulka 7 Průměrná teplota jednotlivých částí těla tep. manekýna po 15 minutách měření

		Teplota okolí	Obličej	Hrud'	Záda	Paže	Předloktí	Ruce	Stehna	Lýtka
Experiment 1	Chlazená část	25 °C	28,9	29,9	31,6	28,1	26,6	35,5	28,3	27,1
	Nechlazená část	25 °C	28,9	29,9	31,6	34,0	34,0	35,5	33,1	32,7
	Chlazená část	30 °C	33,6	33,1	34,7	31,7	30,0	36,3	31,8	30,6
	Nechlazená část	30 °C	33,6	33,1	34,7	38,0	38,5	36,3	36,0	36,3
Experiment 2	Plně osazený	25 °C	29,0	29,8	31,8	31,3	28,8	31,4	29,9	29,5
	Plně osazený	30 °C	32,5	33,7	35,5	35,4	32,2	36,2	33,6	33,2
	Pouze distributor	25 °C	25,3	28,2	30,4	29,5	31,5	31,0	29,9	31,6
	Pouze do nohou	25 °C	25,8	30,5	31,0	30,0	31,3	31,3	29,1	30,9

Obličej a ruce byly mimo ochranný oděv. U experimentu 1 nebylo možné rozlišovat hrud' a záda manekýna na chlazenou a nechlazenou část. Proto průměrná teplota hrudníku a zad odpovídá stejné hodnotě pro chlazenou i nechlazenou část.

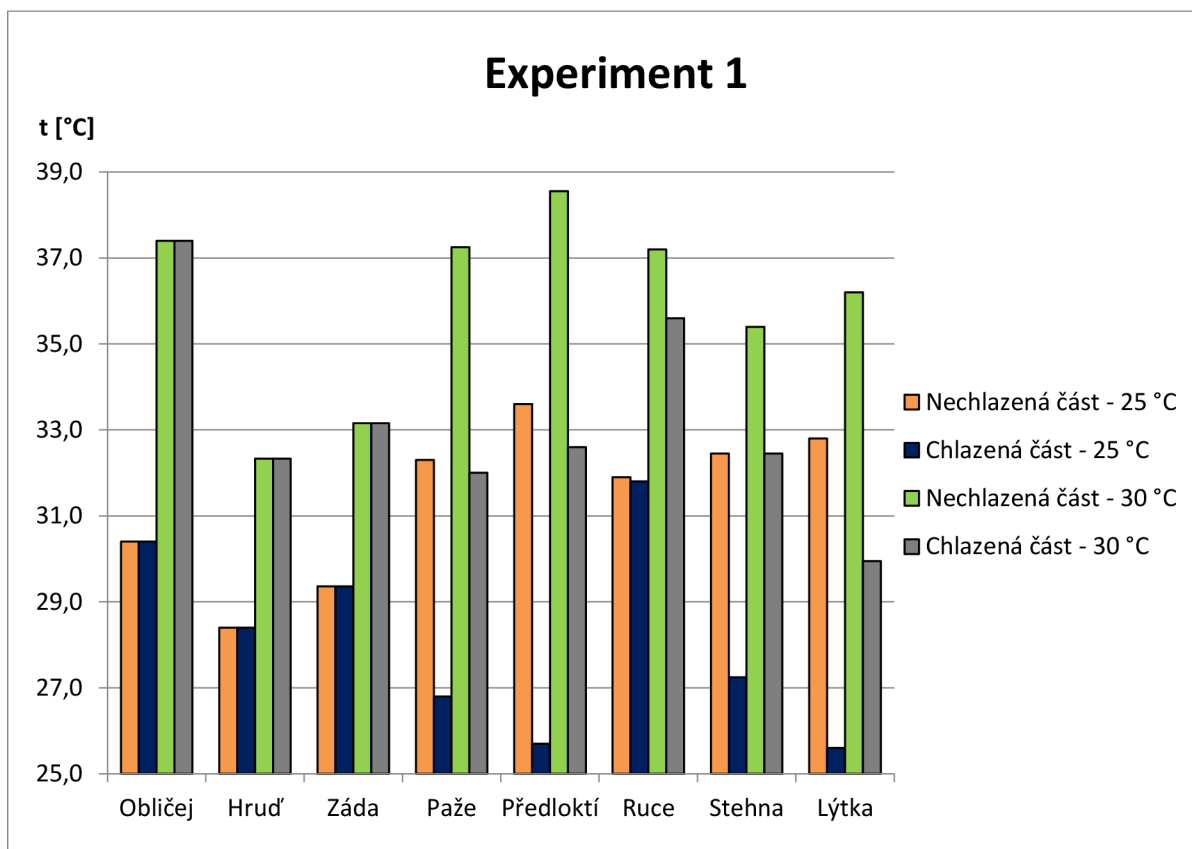
V tabulce 8 jsou uvedena výsledná data průměrných teplot manekýna na konci měření.

Tabulka 8 Průměrná teplota jednotlivých částí těla tepelného manekýna na konci měření

		Teplota okolí	Obličej	Hrud'	Záda	Paže	Předloktí	Ruce	Stehna	Lýtka
Experiment 1	Chlazená část	25 °C	30,4	28,4	29,4	26,8	25,7	31,8	27,25	25,6
	Nechlazená část	25 °C	30,4	28,4	29,4	32,3	33,6	31,9	32,5	32,8
	Chlazená část	30 °C	37,4	32,3	33,2	32	32,6	35,6	32,45	29,95
	Nechlazená část	30 °C	37,4	32,3	33,2	37,3	38,6	37,2	35,4	36,2
Experiment 2	Plně osazený	25 °C	30,3	29,1	30,9	30,3	28,3	31,5	29,4	28,9
	Plně osazený	30 °C	35,2	32,7	34,0	34,0	31,4	36,1	32,7	32,1
	Pouze distributor	25 °C	29,3	27,7	29,2	29,2	31,1	31,1	29,6	31,1
	Vzduchovody do nohou	25 °C	29,6	29,7	29,6	28,6	30,8	31,2	28,7	30,7

3.2 Výsledky hypotézy 1

Na následujícím grafu jsou zobrazeny výsledky experimentu 1. Jsou zde uvedeny výsledné hodnoty teplot chlazené i nechlazené části manekýna při 25 °C i 30 °C na konci měření.



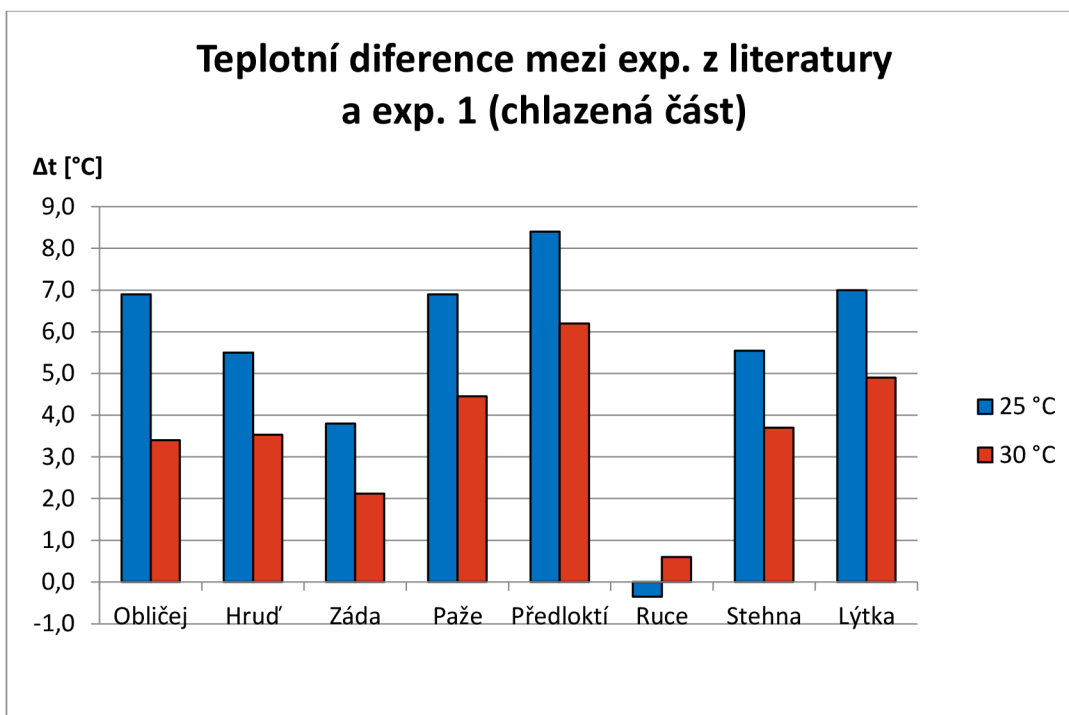
Obrázek 3.5 Výsledné teploty experimentu 1 při 25 °C a 30 °C – chlazená i nechlazená část manekýna

Jak již bylo řečeno, obličej a ruce nebyly od okolí izolovány ochranným oděvem. Žáda a hrudník nebyly děleny na chlazenou a nechlazenou část. Z grafu vyplývá, že nejvíce zatížené okolní teplotou byly končetiny – zejména předloktí, paže a lýtka. U částí těla, ke kterým nebyl přiváděn okolní vzduch, bylo dosaženo teploty 32,3 – 33,6 °C v případě okolní teploty 25 °C. U nižší teploty okolí byly tedy výsledné teploty povrchu těla v případě neochlazované části přijatelné s ohledem na běžnou teplotu těla. Manekýn ale není schopen pohybu, do výsledků tudíž není zahrnuta případná aktivita člověka a s tím spojená produkce tepla. Také je ale zapotřebí vzít v potaz, že i nechlazená část manekýna mohla být ventilací vzduchu na chlazenou část ovlivněna. Teploty chlazených částí manekýna klesly pod 30 °C. Největší diference mezi chlazenou a nechlazenou částí těla na konci měření při okolní teplotě 25 °C byla zjištěna u předloktí (7,9 °C) a lýtek (7,2 °C). Na člověka nevykazujícího aktivitu by byl chladičí účinek příliš intenzivní a pravděpodobně by potřeboval ventilaci během měření vypnout. Na pohybujícího se člověka by ale takové chlazení mohlo působit příjemně i s ohledem na největší potřebu chlazení dolních i horních končetin, které jsou pohybem nejvíce zatěžovány.

Při teplotě okolí 30 °C neochlazované části těla dosahovaly teploty 36,2 – 38,6 °C. V případě okolní teploty 30 °C byl mezi chlazenou a nechlazenou částí těla nejvyšší rozdíl teplot také zaznamenán u lýtek (6,2 °C) a předloktí (6 °C). V případě vyšší okolní teploty zůstaly teploty částí těla manekýna poměrně vysoké, držely se ale v oblasti běžné teploty kůže. Z toho vyplývá, že pro neaktivního člověka by toto chlazení mohlo být dostatečné. V případě pohybujícího se člověka by ale bylo zapotřebí odvod tepla zvýšit, jelikož je pohybem produkováno větší množství tepla.

Celkově lze na základě těchto výsledků říci, že vzduch o teplotě okolí přiváděný pod ochranný oděv má dobrý chladičí potenciál a lze jím člověka (zejména při nižší okolní teplotě) uchránit před přehřátím.

Na následujícím grafu jsou zobrazeny teplotní diference jednotlivých částí těla mezi experimentálním měřením s lidmi a chlazenou částí těla manekýna z prvního provedeného experimentu. Jsou zde uvedeny hodnoty z experimentu s tepelným manekýnem po 15 minutách měření, jelikož po této době bylo dosaženo nejvyššího chladičího účinku. V grafu jsou ukázány diference pro obě varianty teploty okolí – tedy 25 °C a 30 °C.

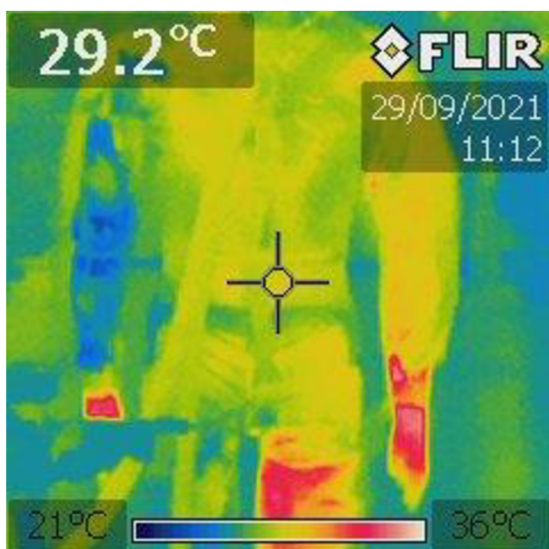


Obrázek 3.6 Teplotní difference mezi experimentem s lidmi a chlazenou částí manekýna po prvních 15 minutách měření experimentu při teplotě okolí 25 °C a 30 °C

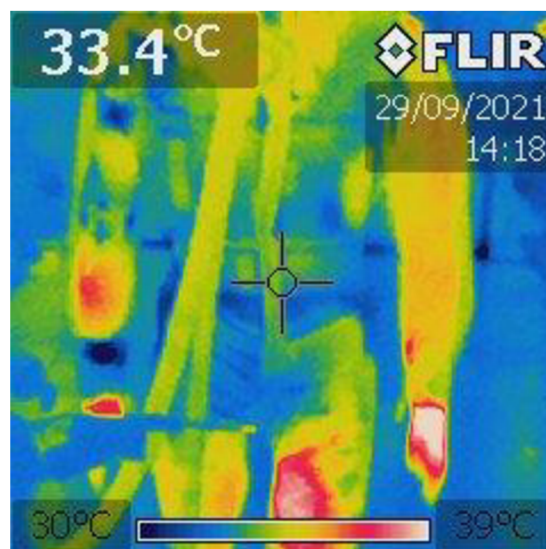
Lze zaznamenat, že větší potenciál chlazení byl projeven v případě nižších teplotních podmínek okolí. Největšího chladicího účinku bylo dosaženo v případě předloktí, kdy byla při okolní teplotě 25 °C dosažena difference přes 8 °C oproti experimentu s dobrovolníky. Teplota na předloktí dobrovolníků po hodině strávené v ochranném oděvu dosáhla teploty cca 35 °C. V případě teploty okolí 30 °C bylo dosaženo difference přes 6 °C. Teplota předloktí dobrovolníků při 30 °C odpovídala 36,2 °C. V obou případech okolní teploty tedy bylo dosaženo výrazného ochlazení z původní poměrně vysoké teploty předloktí dobrovolníků.

Dalšími výrazně chlazenými částmi těla byly paže a lýtka. V případě okolí o teplotě 25 °C dosahoval teplotní rozdíl u těchto částí těla až 7 °C. Jelikož teplota lýtek dobrovolníků odpovídala 34,1 °C a teplota paží 35 °C, chlazení těchto částí by bylo příliš intenzivní. V případě vyšší teploty okolí byly difference paží a lýtek cca 4,5 – 5 °C. Teplota těchto částí těla dobrovolníků v případě paží odpovídala 36,1 °C a v případě lýtek 35,5 °C. Díky chlazení ventilací by tedy tyto části těla dosáhly ideální teploty.

Jak již bylo zmíněno, obličej a ruce nebyly schovány pod ochranným oděvem. Z výsledků difference těchto částí lze vyvodit, že kolem zápěstí byl ochranný oděv lépe utěsněn. Netěsnostmi kolem obličeje patrně unikalo větší množství chladicího vzduchu. Záda a hrudník zaujímají větší plochu těla než periferie, na které mohly být lépe nasměrovány vzduchovody. Z tohoto důvodu mohly být teplotní difference u oblastí zaujímající větší plochu nižší než v případě periferií. Na následujících snímcích z termokamery lze vidět přední část těla manekýna pro teplotu okolí 25 °C i 30 °C.

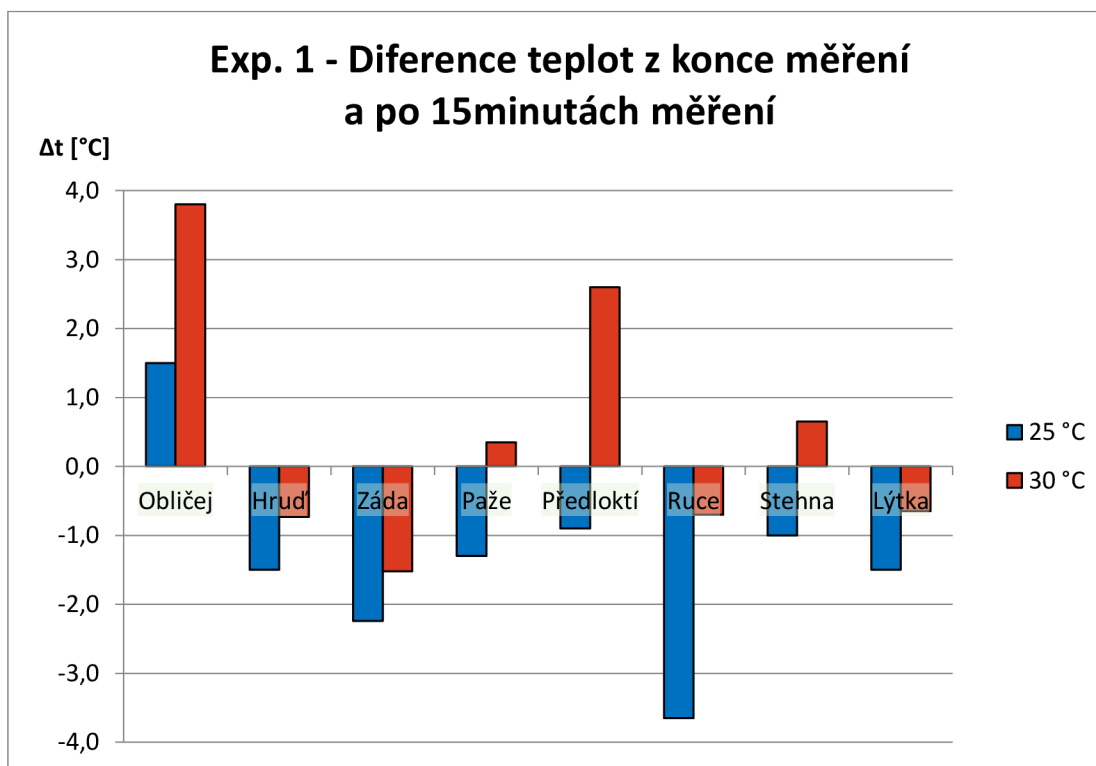


Obrázek 3.7 Přední část těla manekýna na konci měření při 25 °C



Obrázek 3.8 Přední část těla manekýna na konci měření při 30 °C

Jelikož předchozí graf (obrázek 3.6) je zaměřen na teploty manekýna po 15 minutách měření, byl vytvořen graf interpretující teplotní difference chlazené části manekýna z konce měření a z měření po 15 minutách. Jedná se o stejný experiment, tedy se zavedením vzduchovodů do jedné části těla pro oba případy teplotních podmínek okolí.



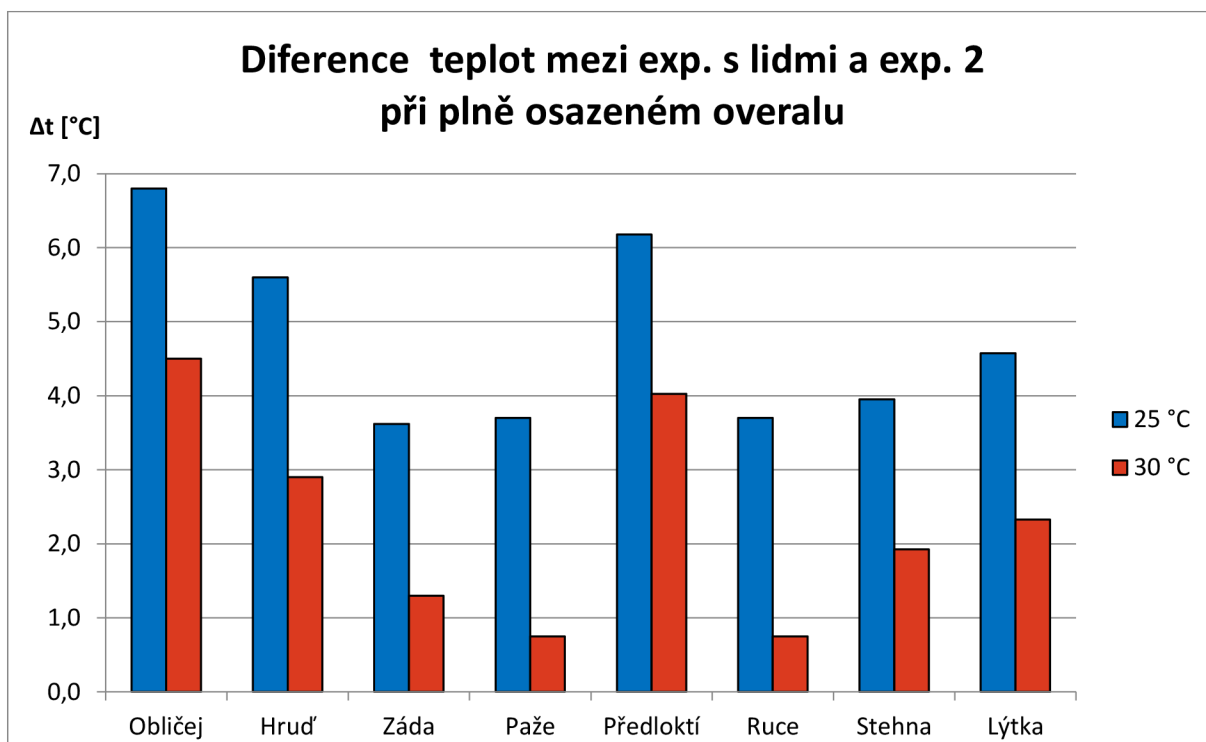
Obrázek 3.9 Experiment 1 - Diference teplot manekýna z konce měření a měření po 15 minutách

Vesměs záporné hodnoty dokazují, že i po zbytek experimentu docházelo k ochlazení manekýna. Je ale patrné, že největší potenciál má chlazení ze začátku měření. Po zbývající čas klesla teplota těla manekýna pouze o cca 0,7 až 1,5 °C s výjimkou zad, která byla při 25 °C ochlazená o více než 2 °C. V případě okolí o 30 °C bylo u paží, předloktí a stehen dosaženo dokonce vyšší teploty než v první části měření. Nejvýrazněji stoupla teplota předloktí. Vyšších teplot oproti prvním 15 minutám měření mohlo být dosaženo v důsledku vzájemného ovlivňování se mezi ochlazovanou a neochlazovanou částí.

Obličej a ruce (dlaně a hřbety rukou) nebyly schovány pod ochranným oděvem. Obličej byl ale oblečen do vlhkého overalu. Nebyl tedy izolován od okolí a overal na obličej tak mohl být sušen vzduchem unikajícím netěsnostmi a zároveň okolním vzduchem. Jeho teplota byla tedy postupně vyrovnávána. Ruce byly taktéž vystaveny přímo okolí i vzduchu unikajícímu netěsnostmi kolem zápěstí. Na rozdíl od obličeje ovšem nebyly na začátku měření zchlazeny oblečením do vlhkého overalu. Patrně z tohoto důvodu byly i nadále ochlazovány.

Dále již bylo pracováno s hodnotami teplot manekýna z konce měření.

Na následujícím obrázku jsou ukázány rozdíly teplot mezi experimentem s dobrovolníky a experimentem 2 na konci měření, kdy byl tepelný manekýn oblečen do plně osazeného overalu při okolních podmínkách 25 °C i 30 °C.



Obrázek 3.10 Diference teplot mezi experimentem s dobrovolníky a experimentem 2 na konci měření při použití plně osazeného overalu pro teplotu okolí 25 °C i 30 °C

Opět lze postřehnout výraznější chladicí účinek v případě nižší teploty okolí. Nejlépe ochlazovanými částmi těla manekýna byla předloktí a hrudní část. V případě nastavení okolí na 25 °C bylo ochlazení oproti testu s dobrovolníky o ± 6 °C, u kterých byla v případě předloktí dosažena teplota 35 °C a v případě hrudníku 35,4 °C. Plně osazený overal je tedy scho-

pen tyto části dostatečně ochladit. Na obrázku 3.11 lze vidět usušená místa na horní části těla manekýna po ukončení měření. V případě teplejšího prostředí byla diference oproti teplotě okolí 25 °C nižší o cca 2 °C.



Obrázek 3.11 Tepelný manekýn po sundání ochranného oděvu po ukončení měření při 25 °C

Na základě tohoto obrázku lze potvrdit, že hrudník a předloktí byly oproti ostatním částem lépe ochlazovány, jelikož na těchto místech došlo k proschnutí overalu. Předloktí zaujímá ze všech ochlazovaných částí nejmenší plochu, proto mohlo být oproti ostatním částem těla intenzivněji a rychleji ochlazováno. Vzhledem k tomu, že byl distributor, z něhož byly vedeny vzduchovody, umístěn na hrudníku, mohly být teplotní diference výrazné právě v okolí hrudníku. Hrudník byl kromě samotného vzduchovodu vedeného přímo na hrudník a břicho částečně ochlazován i ostatními vzduchovody vedenými po těle manekýna.

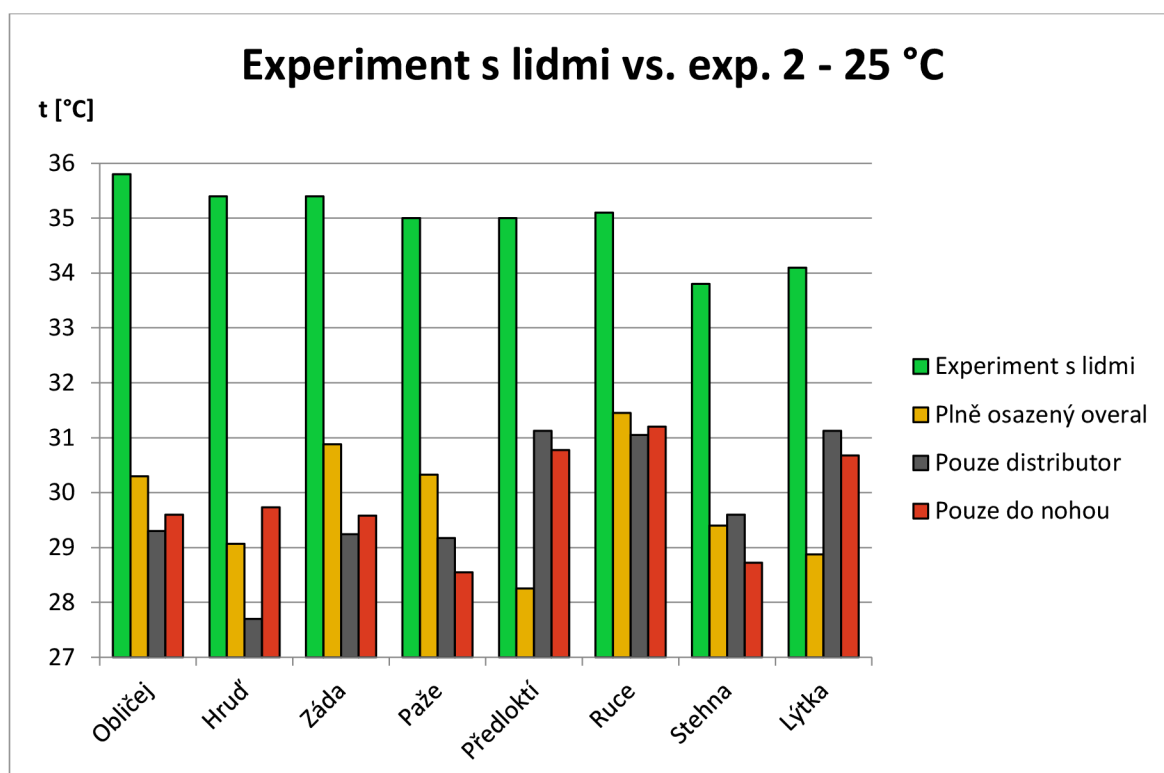
Lýtka byla při 25 °C z teploty dobrovolníků o hodnotě 34,1 °C ochlazena o cca 4,5 °C. Při 30 °C odpovídala diference 2,3 °C oproti teplotě lýtek z literatury o 35,5 °C. Příčina mohla být podobná jako u předloktí, jelikož lýtka zaujímají oproti jiným částem těla také relativně malou plochu. Tudíž není zapotřebí většího množství vzduchu k jejich ochlazení.

Poměrně rovnoměrně byla ochlazena záda, stehna a paže. Ochlazení těchto částí při 25 °C odpovídalo 3,6 – 4 °C. Při 30 °C byly tyto části ochlazeny ve větším rozsahu (0,8 – 1,9 °C), přičemž nejvíce byla ochlazena stehna. U obličeje a rukou bylo dosaženo ochlazení pravděpodobně v důsledku úniku chladicího vzduchu netěsnostmi. Manekýn navíc není schopen přirozeně vyrovnávat balanc teplot na různých částech těla např. díky vyššímu prokrvení.

Z výsledků lze tedy vyvodit, že přiváděný okolní vzduch je schopen odvést nucenou konvekcí a evaporací teplo z povrchu těla a je tedy opodstatněné zabývat se otázkou ventilace vzduchu pod ochranný oděv. Z výsledků je však zároveň patrné, že při vyšší teplotě okolí, které je člověk vystaven, je dosaženo nižšího chladicího účinku.

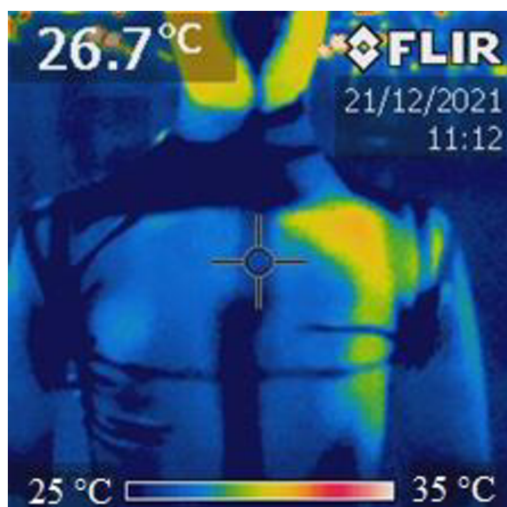
3.3 Výsledky hypotézy 2

Experiment 2 byl zaměřen na otázku ochlazování člověka nasměrováním ventilovaného vzduchu na konkrétní části těla. V této kapitole jsou porovnávány teploty jednotlivých částí těla manekýna z experimentu 2 s teplotami částí těla dobrovolníků z literatury [31]. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny hodnoty teplot experimentu s dobrovolníky a výsledné hodnoty z konce experimentu provedeného v klimatické komoře. Byly testovány všechny varianty zavedení vzduchovodů uvedených v kapitole 2.7. Byl tedy použit overall plně osazený vzduchovody, samotný distributor vzduchu a případ, kdy byly vzduchovody zavedeny pouze do nohou. V grafu jsou uvedeny výsledky pro teplotu okolí 25 °C.



Obrázek 3.12 Porovnání experimentu s dobrovolníky a experimentu 2 na konci měření při 25 °C

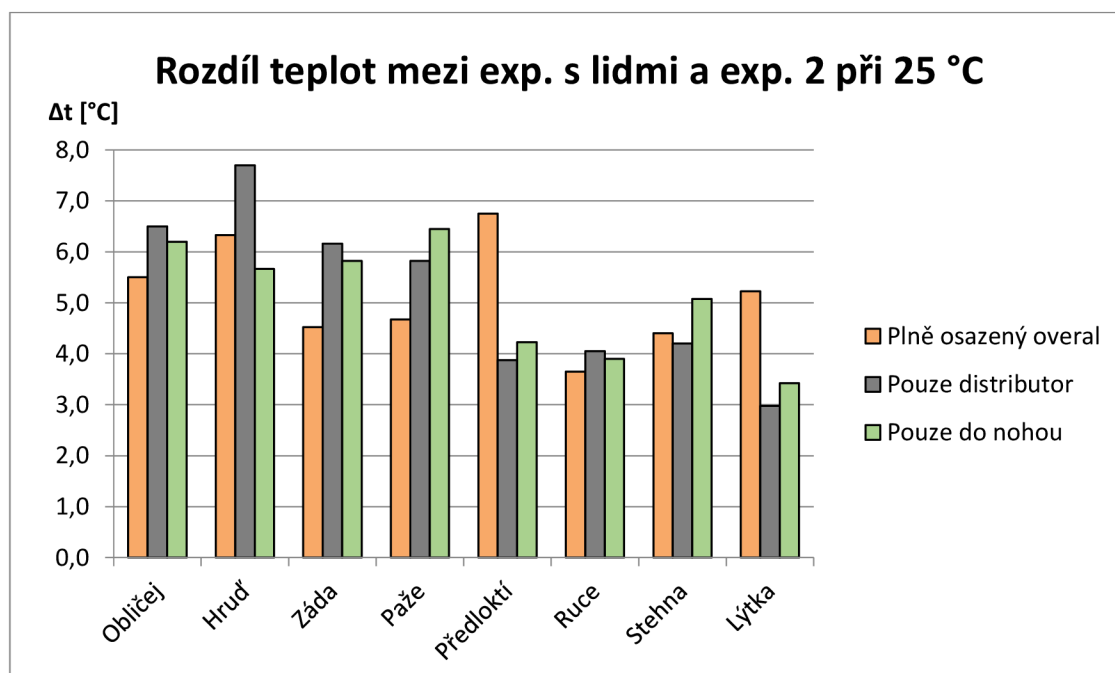
Z obrázku je zřejmé, že všemi použitými systémy rozvádění vzduchu po těle byly splněny požadavky na chlazení těla. V případě hrudníku bylo největšího účinku chlazení dosaženo rozváděním vzduchu distributorem. Dosažené teploty na hrudníku jsou zobrazeny na snímku z termokamery (obrázek 3.13).



Obrázek 3.13 Hrudník tepelného manekýna po konci měření (systém rozvodu vzduchu pouze distributorem)

Distributor byl umístěn na hrudníku, byl tudíž přiváděn vzduch do všech šesti přírub určených pro vzduchovody, proto byl manekýn primárně chlazen právě v této oblasti. Ochlazení na cca 27 °C je ale již příliš intenzivní. Člověk by pravděpodobně pociťoval chlad a hrozily by mu zdravotní následky z podchlazení. Hrudník byl také velmi dobře chlazen s použitím všech vzduchovodů vedených po těle manekýna. To mohlo být opět způsobeno umístěním distributoru vzduchu na hrudníku. Odtud bylo vedeno všech šest vzduchovodů, kterými byl vzduch přiváděn po celé jejich délce, tudíž i v oblasti hrudníku.

Pro lepší znázornění chladicího potenciálu byl vytvořen graf teplotních diferencí na základě obrázku 3.12. Jsou zde zobrazeny rozdíly teplot mezi experimentem s dobrovolníky a jednotlivými rozvody vzduchu po těle z experimentu 2 při 25 °C.



Obrázek 3.14 Teplotní difference mezi experimentem s dobrovolníky a experimentem 2 při 25 °C

Z tohoto grafu je zřejmé, že periferní části – předloktí a lýtka - byly nejlépe ochlazovány v případě použití plně osazeného overalu. Důvodem bylo, že jedině v případě tohoto systému rozvodu vzduchu byly vzduchovody k těmto místům vedeny. Největšího chladicího účinku u stehen bylo dosaženo v případě zavedení vzduchovodů pouze do nohou. Obdobný chladicí účinek by byl v případě distribuce vzduchu do nohou očekáván i u lýtek. Jelikož ale byly vzduchovody u tohoto systému vedeny pouze do horní části stehen (obrázek 3.15), takového chladicího účinku u lýtek dosaženo nebylo. Z toho lze vyvodit, že je důležité, k jaké části těla jsou vzduchovody vedeny.



Obrázek 3.15 Vzduchovody pouze do nohou - nohy zepředu na konci měření

Obličej nebyl schován pod ochranným oděvem, tudíž byl vystaven vnějšímu prostředí. Přesto jeho teplota také výrazně klesla. Kolem obličeje byl ochranný oděv stažen gumičkou a přilepen. Přesto byl ochlazován v důsledku úniku vzduchu netěsnostmi. Nejvíce byl ochlazen v případě použití distributoru a zavedení vzduchovodů do nohou. Během měření teploty obličeje manekýna je do výsledné hodnoty zahrnut i krk. Ke krku měl nejlepší přístup distributor. Proto, pokud byl vzduch přiváděn samotným distributoru, mohlo nejvíce vzduchu k oblasti krku a obličeje unikat právě v tomto případě. Jelikož byly v případě distribuce vzduchu do nohou zbývající příruby distributoru ucpány (ne však úplně zalepeny) voštinou, mohl být vzduch částečně propouštěn i těmito otvory. Díky tomu mohl být krk ochlazován větším množstvím vzduchu, který mohl unikat i netěsnostmi kolem obličeje.

Záda byla nejlépe ochlazována distributorem, o něco méně rozvodem vzduchu do nohou. A to i přes skutečnost, že na záda nebyl ani v jednom případě veden vzduchovod jako u plně osazeného overalu. Manekýn byl v horní části těla intenzivněji ochlazován právě distributorem. Přestože byl distributor umístěn na přední straně těla, chlazení bylo natolik výrazné, že vzduch přiváděný distributorem dokázal ochlazovat i zadní část. To bylo způsobeno pravděpodobně intenzivnější konvekcí oproti vzduchu přiváděného vzduchovodem. Jak je z grafu zřejmé, vzduchovodem jsou nejlépe ochlazovány periferní části těla o menší ploše. Jelikož záda zaujímají poměrně velkou plochu (např. oproti předloktí), nedokáže jediný vzduchovod dosáhnout na zádech takového chladicího účinku jako další způsoby rozvádění vzduchu.

Přestože byly podél předních stran paží vedeny vzduchovody, mohly ze stejného důvodu být i paže ochlazovány méně u plně osazeného overalu než ve zbývajících dvou případech. Distributor byl umístěn přibližně v úrovni ramen, byly tedy i paže významně ovlivněny a chlazeny proudem vzduchu z distributoru. Na obrázcích 3.16 a 3.17 lze porovnat zadní část tepelného manekýna na konci měření pro případ plně osazeného overalu a použití pouze distributoru. Na pravém obrázku se na ochranném oděvu nacházejí ve zmíněných částech manekýna (záda, paže) méně orosená místa. Záda i paže tedy skutečně vykazují, že byly lépe ochlazovány v případě rozvodu vzduchu distributorem.



Obrázek 3.16 Plně osazený overal na konci měření - pohled zezadu



Obrázek 3.17 Pouze distributor na konci měření - pohled zezadu

Na základě porovnání experimentu s dobrovolníky popsanému v článku [31] s testy zahrnutými v experimentu 2 bylo možné potvrdit i druhou hypotézu. U experimentu 2 byly absolvovány testy pro tři různé systémy distribuce vzduchu po těle. Výsledné hodnoty z jednotlivých částí těla pro různé varianty distribuce vzduchu se liší. Je tedy důležité zabývat se i otázkou konkrétní konstrukce a řízení přívodu vzduchu do jednotlivých částí těla.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zjistit a ověřit, zda je možné zajistit člověku pracujícímu v ochranném oděvu dostatečnou termoregulaci, aby nedocházelo k přetížení organismu v důsledku přehřátí.

V první části práce byla zpracována teorie týkající se tepelného komfortu a způsobů přenosu tepla. V závěru této části byl sepsán i přehled různých typů chlazení člověka, které je možno používat.

Další část práce je zaměřena na experimenty. Nejprve byly definovány hypotézy, na jejichž základě byly vytvořeny experimenty s tepelným manekýnem. Na těchto experimentech byly hypotézy ověřovány.

Před samotnými experimenty byl nejprve zpracován teoretický výpočet, na jehož základě mohl být ověřen předpoklad, že je možné přivádět dostatečné množství vzduchu, které by vyrovnalo tepelný výkon produkovaný lidským tělem. Výpočet byl proveden pro různé podmínky okolí i různé podmínky pod oděvem. Výpočet byl zpracován tak, aby bylo možné měnit i nastavení metabolické zátěže, tedy aktivitu člověka. Na základě těchto výpočtů byl vyvozen závěr, že teoreticky lze přivádět vzduch o takovém množství, aby měl na člověka dostatečný chladicí účinek.

Na základě tohoto výpočtu byl vypracován experiment zabývající se první hypotézou. Jejím předmětem byl předpoklad, že je možné ventilací okolního vzduchu pod ochranný oděv ochlazovat tělo člověka a podpořit tak přirozenou schopnost se ochlazovat, o kterou je v důsledku nošení ochranného oděvu připraven. Na tomto experimentu byl demonstrován funkční proces chlazení pod oděvem. Experimentem se zabývá kapitola 2.6. Pro experiment byl použit tepelný manekýn, který byl vystaven podmínkám okolí o nižší teplotě 25 °C a o vyšší teplotě 30 °C, vždy o relativní vlhkosti vzduchu 50 %. Na tomto experimentu bylo potvrzeno, že ventilace vzduchu pod oděv má významný vliv na ochlazení těla izolovaného od okolí ochranným oděvem.

Dále byla rozvinuta myšlenka ohledně distribuce vzduchu do různých částí těla. Byla definována druhá pracovní hypotéza. Předmětem druhé hypotézy byl předpoklad, že vhodnou konstrukcí systému distribuce vzduchu a zaměřením přiváděného vzduchu na konkrétní části těla je možné u těchto částí dosáhnout potřebného chlazení. To bylo během experimentů demonstrováno na tepelném manekýnovi. Pod ochranný oděv byl okolní filtrovaný vzduch přiváděn třemi způsoby. Nejprve bylo pod ochranným oděvem vedeno šest vzduchovodů do konkrétních částí těla. V dalším případě byly použity pouze dva vzduchovody do nohou, ostatní otvory distributoru vzduchu byly ucpány voštinou. Poslední variantou bylo použití pouze distributoru vzduchu. Výsledky z těchto experimentů jsou popsány v kapitole 2.7. Z výsledků těchto experimentů vyplynulo, že použití vzduchovodů by bylo vhodné zejména při preferenci chlazení končetin, které zaujímají menší plochu těla. Distributor vzduchu by byl naopak vhodnější pro oblasti na těle zaujímající větší plochu – např. břicho, hrudník, záda. Distributor byl zároveň shledán jako vhodnější varianta pro případ potřeby chlazení hlavy a okolí.

V poslední části práce byly výsledky experimentů porovnány s daty experimentu z odborného článku, který podstoupili dobrovolníci. Experiment je popsán v kapitole 3.1. Výsledky experimentů uskutečněných v klimatické komoře byly společně s experimentem na dobrovolnících zpracovány do grafů a navzájem porovnány. Z výsledků vyplývá skutečnost, že lze u lidí pracujících v ochranném oděvu dosáhnout výrazného chladicího účinku díky přiváděnému okolnímu vzduchu pod ochranný oděv. Zároveň byla potvrzena i druhá hypotéza, tedy že distribuce vzduchu na různá místa po těle má vliv na ochlazení vybraných částí těla.

Lze konstatovat, že hypotézy byly ověřeny a bylo tak prokázáno, že je možné prouděním okolního vzduchu ventilovaného pod oděv dostatečně ochladit tělo člověka, bylo by dále příhodné zaměřit se na konkrétní možnosti provedení systému chlazení.

Předmětem vývoje systému by mohla být např. možnost regulace, aby člověk nebyl odkázán pouze na plný výkon nebo vypnutý stav. Jelikož bylo zjištěno, že i různé varianty rozvodů vzduchu po částech těla mají vliv na chladicí potenciál, bylo by zapotřebí zamyslet se nad nejvhodnějším řešením distribuce vzduchu, respektive do jakých částí těla vzduch rozvádět. Pokud by bylo používáno zařízení v podobě distributoru jako v případě experimentu v klimatické komoře, stála by za úvahu možnost regulace nasměrování proudu vzduchu dle subjektivní potřeby mechanickým přepínáním distributoru. Člověk by mohl např. při stání preferovat ochlazování nohou, při sezení by bylo vhodné zaměřit se spíše na rovnoměrné ochlazování, při pohybu přivádět vzduch především k horním i dolní končetině apod. Otázkou by samozřejmě byla i otázka komfortu nošení. Systém chlazení by neměl být příliš těžký a neměl by člověka omezovat v pohybu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JANOTKOVÁ, Eva. Pohoda prostředí a tepelná pohoda. *Energetický ústav* [online]. Brno, c2022 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Mauder/files/Presentace-IVK-Pohoda_prostredi-Tepelna_pohoda.pdf
- [2] CHARVÁT, Pavel. *Technika prostředí (1)* [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-02.-20]. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/196067/mod_resource/content/2/01_Thermal_comfort_OPVK_2021.pdf
- [3] ZMRHAL, Vladimír. Stanovení střední radiční metody (I). *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, c2001-2022, 20. 2. 2006 [cit. 2022-03-22]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3072-stanoveni-stredni-radiacni-teploty-i>
- [4] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí: 1. část* [online]. Brno, 2014 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/userfiles/Mauder/files/Technika-prostredi-1-cast.pdf>
- [5] CIHELKA, Jaromír a Jaroslav BRADNA. *Vytápění a větrání*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1969. Řada energetické literatury.
- [6] SILBERNAGL, Stefan a Agamemnon DESPOPOULOS. *Atlas fyziologie člověka*. 2. čes. vyd. podle 3. něm., přeprac. a rozš. Praha: Grada, 1993. ISBN 80-85623-79-X.
- [7] CENTNEROVÁ, Lada. Hodnota metabolismu. *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, c2001-2022, 7. 6. 2001 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/569-hodnota-metabolismu>
- [8] CENTNEROVÁ, Lada. Tepelná pohoda a nepohoda. *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, c2001-2022, 13. 12. 2000 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda>
- [9] Měření úrovně pohody prostředí na pracovišti. *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, c2001-2022 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/158-mereni-urovne-pohody-prostredi-na-pracovisti>
- [10] VAVERKA, Jiří. *Energetické hodnocení budov a tepelná pohoda vnitřního prostředí*. Brno: [s.n.], 1992.
- [11] CAMPBELL, Neil A. a Jane B. REECE. *Biologie*. Brno: Computer Press, c2006. ISBN 8025111784.
- [12] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.

- [13] GAWLASOVÁ, Žaneta. *Vliv vlhkosti materiálu na tepelné vlastnosti rukavic* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2019 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/175501/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jan Fišer.
- [14] Vesta COOLING II. (chladicí, odpařovací), šedá. *Pracovní pomůcky TOTAL PROTECT* [online]. Pardubice: TOTAL PROTECT, c2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.totalprotect.cz/vesta-cooling-ii-chladici-odparovaci-seda>
- [15] Aku bunda XL s ventilátory Makita solo. *MAKITA-ESHOP.cz* [online]. Most: Makita-eshop.cz, c2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.makita-eshop.cz/bundy-makita/aku-bunda-xl-s-ventilatory-makita-solo>
- [16] Makita USA - Product Details - DFJ201ZS. *Makita U.S.A* [online]. La Mirada: Makita U.S.A., c2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.makitatools.com/products/details/DFJ201ZS>
- [17] Chladicí vesty - Prostředek na zlepšení tepelného komfortu uživatele OOP. *HAZMAT PROTECT* [online]. Milín: Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, 2016, 2016 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://hazmat-protect.sujchbo.cz/wp-content/uploads/2017/01/Hazmat-2016-Slabotinsky-Cooling-vests-in-Czech.pdf>
- [18] FlexiFreeze Personal Cooling Kit. *FlexiFreeze* [online]. Mequon: FlexiFreeze.com, c2022 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://flexifreeze.com/collections/personal-cooling/products/flexifreeze-personal-cooling-kit>
- [19] ONDŘEJOVÁ, Kateřina. *Materiály s fázovým přechodem* [online]. Zlín, 2018 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42781/ond%C5%99ejov%C3%A1_2018_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Alena Kalendová.
- [20] Ice Water Circulating Cooling Vest Black Detachable Bladder. *Personal Cooling* [online]. Battery Heated Clothing.com, c2022 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.batteryheatedclothing.com/cooling-vests/ice-water-circulating-cooling-vest-black-detachable-bladder/>
- [21] *Personal_Cooling_System_user_manual.pdf*. *Battery Heated Clothing* [online]. Battery Heated Clothing.com, c2022 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: http://batteryheatedclothing.com/product_images/cooling/Personal_Cooling_System_user_manual.pdf
- [22] Cool Spacesuits. *National Aeronautics and Space Administration* [online]. Washington, DC [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/pdf/544886main_LS5_Cool-Space-Suits_C1.pdf

- [23] Learn About Spacesuits. *National Aeronautics and Space Administration* [online]. Washington, DC: NASA Administrator, 13. 11. 2008 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/audience/foreducators/spacesuits/home/clickable_suit_nf.html
- [24] ŠTĚTINA, Josef. Klimatická komora. *Energetické fórum* [online]. Brno: FSI VUT v Brně, c2011 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/laboratore/klimaticka-komora>
- [25] Klimatická komora. *NETME Centre* [online]. Brno [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/laboratories-and-facilities/>
- [26] Přístrojové vybavení. *Energetický ústav* [online]. Brno: Energetický ústav, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, c2022 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/o-nas-laboratore-ottp-pristrojove-vybaveni>
- [27] Tepelný manekýn Newton, Energetické fórum. *Energetické fórum* [online]. Brno: FSI VUT v Brně, c2011 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/tepelnny-mankyn-newton>
- [28] Testo 435. *Měřicí a optické přístroje* [online]. Elty, c2001-2022 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.merici-opticke-pristroje.cz/storage/contentresources/testo-435-1-pro-klimatizace-375-167.pdf>
- [29] Technical Data FLIR i7. In: *Distrelec* [online]. Vídeň: Distrelec, c2022 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/n_/51/i7_60101-0301_en_51.pdf
- [30] Product Data Sheet 8315100100. In: *Elektronické součástky a komponenty | SOS electronic eshop* [online]. SOS electronic, c1991-2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://cdn.sos.sk/productdata/e7/b5/444eb811/rve45-3-54-2p-8315100100.pdf>
- [31] ZHAO, Yingying, Jiying LIU, Moon Keun KIM, Shiyu ZHOU a Yanqiu DU. Experimental Investigation on Thermal Comfort of COVID-19 Nucleic Acid Sampling Staff in Hot and Humid Environment: A Pilot Study of University Students. *Applied Sciences* [online]. 2021, **11**(23) [cit. 2022-05-16]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: [doi:10.3390/app112311492](https://doi.org/10.3390/app112311492)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
α	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
\bar{c}_{pp}	Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu při konst. tlaku	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
\bar{c}_{pv}	Měrná tepelná kapacita vodní páry při konst. tlaku	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
δ	Tloušťka vrstvy	m
ε	Emisivita materiálu	–
η	Mechanická účinnost lidského těla	–
E_0	Zářivost černého tělesa	$W \cdot m^{-2}$
φ	Relativní vlhkost vzduchu	–
h	Entalpie vlhkého vzduchu	$kJ \cdot kg^{-1}$
h_p	Měrná entalpie vodní páry	$kJ \cdot kg^{-1}$
h_v	Měrná entalpie suchého vzduchu	$kJ \cdot kg^{-1}$
I	Elektrický proud	A
λ	Tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$l_{(23)0}$	Měrné výparné teplo vody při teplotě 0 °C	$kJ \cdot kg^{-1}$
\dot{m}	Hmotnostní tok	$kg \cdot s^{-1}$
m_p	Hmotnost přehřáté vodní páry	kg
m_v	Hmotnost suchého vzduchu	kg
p	Celkový tlak	Pa
p_p''	Parciální tlak syté vodní páry	Pa
$\dot{q}_k, \dot{q}_r, \dot{q}_v$	Měrný tepelný tok prouděním, radiací, vedením	$W \cdot m^{-2}$
\dot{q}_m	Měrný metabolický tepelný tok	$W \cdot m^{-2}$
\dot{Q}	Celkový tepelný tok přenášený plochou S	W
$\dot{Q}_d, \dot{Q}_k, \dot{Q}_r, \dot{Q}_v, \dot{Q}_{ved}$	Tepelný tok přenášený dýcháním, konvekcí, radiací, vypařováním, vedením	W
\dot{Q}_m	Metabolický tepelný tok	W
R_α	Měrný tepelný odpor proti přenosu tepla konvekcí	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
R_λ	Měrný tepelný odpor proti vedení tepla	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
S	Plocha	m^2
T_w	Teplota obtékaného povrchu	K
T_∞	Teplota proudící tekutiny	K

\dot{V}	Objemový průtok	$l \cdot \text{min}^{-1}$
x	Měrná vlhkost vzduchu	$\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{s.v.}}^{-1}$