

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ**

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



**VLIV CHLADÍCÍCH STĚN NA PODMÍNKY
TEPELNÉ POHODY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Tomáš Brouk

Vedoucí diplomové práce: Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

2017/2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Brouk

Jméno: Tomáš

Osobní číslo: 409719

Zadávací katedra: Katedra technických zařízení budov

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv chladících stěn na podmínky tepelné pohody

Název diplomové práce anglicky: The influence of radiant cooling walls to the conditions of thermal comfort

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši stávajícího poznání v dané oblasti. Proved'te experimentální posouzení vlivu chladící stěny na tepelnou pohodu na pracovišti. V laboratorních podmínkách připravte experiment simulující pracovní místo s chladící stěnou, prostřednictvím stereoteploměru proved'te posouzení několika variant uspořádání místa. Získaná data analyzujte a formulujte závěry.

Seznam doporučené literatury:

- ČSN EN ISO 7730 Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu.
- Le Dréau, J., Heiselberg, P. & Jensen, R.L. Build. Simul. (2015) 8: 39. <https://doi.org/10.1007/s12273-014-0190-7>
- Yingdong He, Nianping Li, Meiling He, De He, Using radiant cooling desk for maintaining comfort in hot environment, In Energy and Buildings, Volume 145, 2017, Pages 144-154, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.013>.

Jméno vedoucího diplomové práce: Daniel Adamovský

Datum zadání diplomové práce: 2.10.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

2.10.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podkladů.

Praha, 7. 1. 2018

podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Danieli Adamovskému, Ph.D. za odborné vedení, čas strávený při konzultacích a cenné připomínky při zpracování této diplomové práce.

OBSAH

Prohlášení	3
Poděkování	4
Obsah.....	5
Abstrakt	7
Klíčová slova	7
Abstract	7
Key words.....	7
Úvod.....	8
1 Teoretická část	9
1.1 Úvod.....	9
1.2 Nutnost chlazení	9
1.2.1 Systémy chlazení	9
1.3 Velkoplošné chlazení	10
1.4 Použití chladicích stěn	11
1.5 Výkon chladicích stěn.....	12
1.5.1 Experimentální metoda	12
1.6 Dimezování a návrh chladicích stěn	13
1.6.1 Kondenzace	13
1.7 Energetická náročnost	14
1.8 Tepelný komfort	14
1.8.1 Asymetrie radiační teploty	15
1.8.2 Nebezpečí vzniku průvanu	15
1.8.3 Rozložení teploty	15
1.8.4 Legislativa	15
1.9 Vhodné umístění a orientace chladicích stěn	19
1.10 Závěr.....	20
2 Experimentální část	21
2.1 Úvod.....	21
2.2 Měřicí kabina ČVUT	21
2.3 Metodika měření.....	21
2.3.1 Sestava čidel.....	22
2.4 Varianty měření	24

2.4.1	Varianta 1	25
2.4.2	Varianta 2	28
2.4.3	Varianta 3	30
2.4.4	Varianta 4	32
2.4.5	Výchozí hodnoty	35
2.5	Data měření	36
2.6	Posouzení	38
2.6.1	Výpočet	38
2.6.2	Limitní hodnoty	38
2.6.3	Výsledky	39
2.7	Vyhodnocení	41
2.7.1	Vyhodnocení místního tepelného diskomfortu	41
2.7.2	Grafické znázornění	44
2.7.3	Poznamky pro vylepšení experimentu	47
2.8	Závěr	48
	Použité zdroje	49

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou velkoplošného stěnového chlazení. Teoretická část je věnována současnému poznání v oblasti stěnového chlazení. Věnuje se výhodnosti použití chladících stěn, jejich návrhu a vhodné orientaci s ohledem na tepelný komfort osob v interiéru. V druhé části je popisováno experimentální posouzení tepelného komfortu. V měřicí kabině s regulovatelnou povrchovou teplotou stěn je simulován letní provoz v malé kanceláři s chladící stěnou. Za pomoci kulového stereotermometru, anemometru a čidel teploty vzduchu je zjišťováno riziko vzniku místního tepelného diskomfortu sedících osob. Naměřené hodnoty jsou zpracovány a vyhodnoceny dle ČSN EN ISO 7730 a NV 361/2007.

KLÍČOVÁ SLOVA

stěnové sálavé chlazení, tepelný komfort, chlazení kanceláře, experiment, asymetrie osálení, průvan, stereotermometr, kondenzace

ABSTRACT

The presented thesis is dealing with the issue of large area radiant cooling walls. The theoretical part of this thesis refers to the knowledge in the area of radiant cooling. It deals with the convenience of use of radiant cooling walls, their draft and the appropriate orientation with regard to the thermal comfort of persons in interior. In the second part, the experimental assessment of thermal comfort is described. In the measuring cabin with adjustable surface temperature of the walls there is simulated summer working in a small office with radiant cooling wall. The risk of local thermal discomfort occurrence of sitting persons is investigated by using globe stereothermometer, anemometer and air temperature sensors. The measured values are processed and evaluated according to Czech Technical Standards ČSN EN ISO 7730 and Czech Government Regulation NV 631/2007.

KEY WORDS

radiant cooling walls, thermal comfort, office cooling, experiment, radiant temperature asymmetry, risk of down-draught, stereothermometer, condensation

ÚVOD

Tepelný komfort osob má zásadní vliv na produktivitu práce, proto je důležité, aby se zaměstnanec při práci cítil dobře. Vyhovujícího komfortu je možné dosáhnout jediné tehdy, pokud jsou teplota, vlhkost a rychlost proudění vzduchu v určitém přijatelném rozmezí. Proto je udržení ustálených vyhovujících tepelných podmínek důležité. Pokud bude zaměstnancům při vykonávání práce příliš horko, budou se cítit unavení. Naopak v chladnějších prostředích je snižována jejich pozornost. [1] Důležitým parametrem je také lidská mysl. Je prokázáno, že individuální očekávání mají vliv na míru akceptování tepelného komfortu, zejména v pracovních podmínkách se zvýšenou teplotou. Aby zaměstnanci podávali co nejvyšší pracovní výkony, především osoby vykonávající práci náročnou na soustředění, je třeba jim zajistit vhodné pracovní podmínky.

U kancelářských prostorů, ve kterých osoby vykonávají práci především vsedě při nízké fyzické aktivitě, je riziko vzniku nevyhovujících pracovních podmínek nejvyšší, a zároveň je nejtěžší tyto parametry vnitřního prostředí udržovat po celé ploše kanceláře.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou velkoplošného stěnového sálavého chlazení, jeho vhodnosti použití, problematikou instalace a omezení výkonu s ohledem na vytvoření kvalitního vnitřního prostředí. Druhá část diplomové práce je pak věnována experimentálnímu posouzení tepelného komfortu osob sedících v kanceláři s upravovanou teplotou chladícími stěnami. V laboratorních podmínkách jsou za pomoci měřicí kabiny s volitelnou povrchovou teplotou stěn, podlahy a stropu vytvořeny 4 základní varianty provozu kanceláře. Pomocí soustavy čidel je testován vliv rozložení chladících stěn na vnitřní komfort sedících osob.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 ÚVOD

Předmětem teoretické části diplomové práce je zpracování rešerše stávajícího poznání v oblasti stěnového chlazení. Definuje jednotlivé typy velkoplošného sálavého chlazení a jejich porovnání s vzduchotechnickými klimatizačními systémy, včetně posouzení vhodnosti použití v různých klimatických podmínkách a provozech. Definuje základní návrh velkoplošných sálavých systému, zahrnující problematiku kondenzace vzdušné vlhkosti na chlazených plochách. V závěru první teoretické části zmiňuji o problematice orientace a polohy stěnového chlazení v závislosti na jejich výkonu a účinnosti, s ohledem na vytvoření kvalitního vnitřního prostředí.

1.2 NUTNOST CHLAZENÍ

Chlazení je v současné době jednou z největších energetických zátěží budov. V souvislosti s hrozbou globálního oteplování a diskuzí o udržitelném rozvoji jsou tyto myšlenky v rozporu s rostoucími nároky na tepelnou pohodu v moderních kancelářských budovách a stále se zvyšující tepelné zátěže od elektronických zařízení.

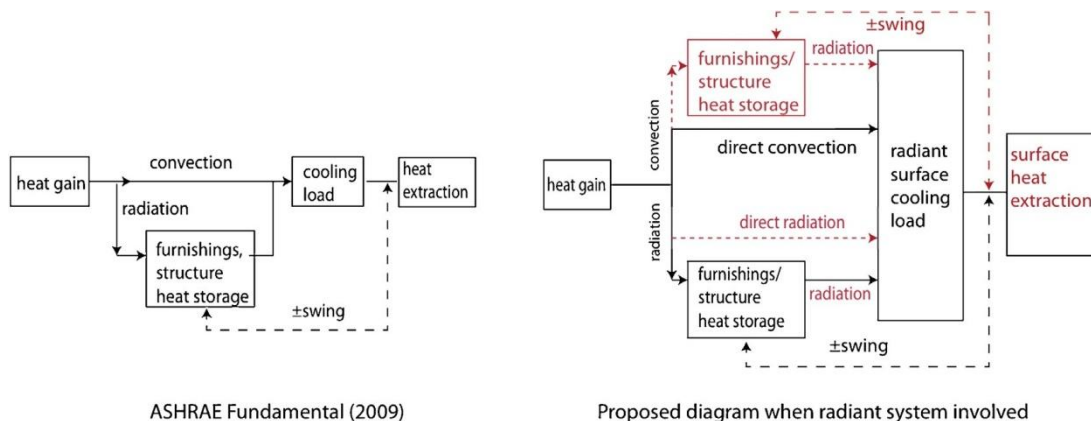
V našich klimatických podmínkách je zvykem hovořit především o snižování spotřeby energie na vytápění, avšak u většiny nově vystavěných budov, ale i u řady rekonstrukcí již převládá spotřeba energie na chlazení. Z těchto důvodů je třeba hledat úspory energie jinde a podporovat alternativní způsoby chlazení. Ihned v primární fázi vytváření koncepce budovy je potřeba vést v patrnosti možnosti využití pasivního chlazení a zvážit možné stavební úpravy, které potřebu chladícího výkonu mohou výrazně snížit, až úplně eliminovat jejich potřebu instalace. Nejjednodušeji tak lze docílit stíněním oken, nebo dostatečným nočním větráním budovy s využitím akumulace tepla konstrukce budovy.

Pokud i přes koncepční opatření pasivní chlazení nestačí, například u administrativních budov s vysokým procentem prosklení a výraznou tepelnou zátěží od zařízení, je nutno aplikovat aktivní chlazení. [2]

1.2.1 SYSTÉMY CHLAZENÍ

V dnešní době existují dva základní systémy chlazení budov. Obecně je můžeme rozdělit na systémy sálavé a vzduchotechnické klimatizační systémy.

U vzduchotechnických klimatizačních systémů je hlavním nositelem odváděné energie z prostoru vzduch, u kterého je využíváno jeho měrné tepelné kapacity k přenosu energie. Na rozdíl od vzduchových systémů, kde je tepelná zátěž čistě konvektivní, pro sálavé systémy se přenos tepla skládá jak z konvektivní, tak ze sálavé složky. Vzduchotechnické klimatizační systémy jsou navrženy tak, aby byly jediným systémem pro odvod latentního i citelného tepla z místnosti. Sálavé systémy jsou schopné pracovat pouze v hybridním systému, se zajištěním dostatečné výměny vzduchu, z důvodu odvádění pouze citelného tepla.



ASHRAE Fundamental (2009)

Proposed diagram when radiant system involved

Obrázek 1 – Schéma chladicího zařízení [2]

Schéma generování tepelné zátěže u vzduchotechnických klimatizačních systémů modifikované pro sálavé chlazení.

Tento modifikovaný diagram, znázorňuje rozdílné chladicí zátěže (cooling load) pro dva systémy ve dvou případech. (1) Sálavé chladicí plochy jednak přímo odvádějí část radiačních zisků a redukují tak ohřívání hmoty budovy a akumulaci energie. (2) Pouze konvektivní část tepelné zátěže se stane okamžitou tepelnou zátěží, která přispívá na zvyšování teploty v interiéru, částečně se akumuluje v hmotě budovy a zařízení a následně je odstraněna sálavým chladným povrchem. [2]

1.3 VELKOPLOŠNÉ CHLAZENÍ

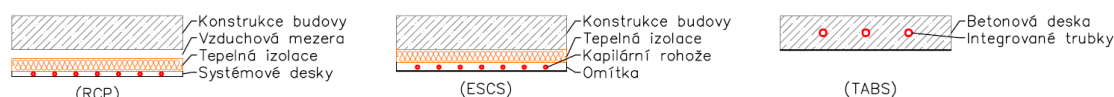
Systémy velkoplošného sálavého chlazení/vytápění jsou obecně definované jako systémy, ve kterých přenos sálavého tepla pokrývá více než 50% výměny tepla. Ve srovnání se vzduchotechnickými klimatizačními systémy, které jsou principiálně založeny pouze na konvekci, sálavé systémy zajišťují výměnu tepla kombinací sáláním a konvekcí.

Způsoby instalace sálavého chlazení jsou použitelné pro každou instalační variantu. Je však nutné věnovat pozornost vedle estetických aspektů také na rozdíl ve výkonech chladících ploch. V podstatě se můžou dle způsobu instalace rozdělit do dvou skupin.

1. Suchý způsob instalace – systémové desky
2. Mokrý způsob instalace – podmínkové kapiláry

Další možnosti úpravy vnitřního prostředí sálavým způsobem může být tzv. aktivace betonového jádra. Její regulace je však velice obtížná vzhledem k velké akumulaci tepla a není téměř možné jí využít jako samostatný prvek pro úpravu vnitřního klimatu. [3]

Skladba a uspořádání jednotlivých vrstev plošného chlazení, je na Obrázku 2. [2]



Obrázek 2 - Plošné chlazení

RCP – Systémové desky

ESCS – Podomítkové kapiláry

TABS – Aktivace betonového jádra

Každá z uvedených variant může mít množství modifikací, co se týče druhu použitého stavebního materiálu. Tím se vytváří velká mnohotvárnost. Nicméně výše uvedené tři možné varianty instalací mohou být použity jako podklad pro odhad předpokládaného výkonu chladicí plochy.

Zároveň je nutné uvažovat použitelnou plochu. V případě stěn je potřeba zohlednit plochu obsazenou nábytkem, prostor pro vedení přívodního a odvodního potrubí a ostatních instalací.

1.4 POUŽITÍ CHLADICÍCH STĚN

Chladicí systémy se sálavým chlazením mají výhodu oproti systémům s klasickou klimatizací. Využívají velké plochy v konstrukci budovy, což jim dává vysokou chladicí kapacitu. Tyto systémy jsou proto vhodné pro prostory s vyšší obsazeností, jako jsou učebny, kanceláře a zasedací místnosti. Kapacita chlazení je omezena teplotou rosného bodu, horizontálními rozdíly vzduchu, asymetrií osálení nebo přijatelnou teplotou chlazených povrchů. [4]

Chladicí systém se sálavou složkou výrazně ovlivňuje operativní teplotu v místnosti, vlivem sálavé složky. V místnosti tak může být vyšší hodnota teploty vzduchu než by tak tomu bylo u vzduchových systémů při poskytování ekvivalentního tepelného komfortu. [4]

Tyto systémy jsou schopné poskytnout při vhodném umístění ideální vertikální gradient teploty vzduchu a zmírnit tak průvan tvořený chladným proudem přiváděného vzduchu, často problematický element v případě vzduchotechnických klimatizačních systémů. Závěry experimentálních studií uvádějí, že v případě úpravy vzduchu sálavým chladícím stropem o výkonu menším než 100W/m^2 nemůže mít za následek nebezpečí vzniku průvanu. Problematika u těchto systémů spočívá spíše v pocitu stojatého vzduchu. [3]

Velkou nevýhodou sálavých chladicích systémů je pomalá reakce na řídicí systém. Je tak většinou způsobeno aktivací velkého objemu ve stavební hmotě. Reakční doba je výrazně delší, než je tomu u vzduchotechnických klimatizačních systémů. Tento problém může zejména nastat v případě náhlého zvýšení tepelných zisků v místnosti a následného přehřátí interiéru. Nejlepší reakci ze všech sálavých systémů mají systémové desky (RCP), které díky své vzduchově izolační dutině nebo tepelné izolaci, jsou do jisté míry schopny eliminovat tepelnou setrvačnost obvodových konstrukcí.

Na druhou stranu, aktivace velkého množství tepelné energie do hmoty konstrukcí dokáže posunout špičkovou chladicí zátěž mimo provozní dobu. S dobrým řídicím systémem lze pak využívat zejména nočního předchlazení konstrukce v době nízkých nákladů za energie, nebo vhodného využití obnovitelných zdrojů energie. [4] [6]

Pokud je místnost vybavena sálavým systémem, lze na ventilačním systému dosáhnout velkých úspor. Ventilační systém může být navržen pouze pro nezbytný vzduchový průtok podle požadavků na zdraví a pohodlí uvedených v příslušných normách. [4]

1.5 VÝKON CHLADICÍCH STĚN

Chladicí stěny odebírají z prostoru pouze citelné teplo a hrozí zde riziko kondenzace. Proto tyto systémy nejsou samostatně vhodné pro interiéry s vysokou vzdušnou vlhkostí. Z tohoto důvodu je nutné zajistit minimální výměnu vzduchu v místnosti pro odvod vlhkosti. Ideálně řízeným nuceným větráním, aby nedocházelo k výraznému zvyšování vlhkosti v místnosti a tím i teploty rosného bodu.

1.5.1 EXPERIMENTÁLNÍ METODA

Výpočet výkonu chladicích stěn se provádí v ČR dle ČSN EN 1264-2+A1. Pomocí této normy je vypočítán tepelný výkon jako pro podlahové vytápění/chlazení za podmínek uvedených v normě. Experimentální metoda se simuluje na čtverci o rozměrech 1x1m s minimálně třemi roztečemi potrubí, nad kterými je umístěna chladicí, popř. topná deska. Ta simuluje místnosti nad hodnocenou podlahou. Odpor při přestupu tepla na povrchu $1/\alpha$ je nahrazen teplonosnou vrstvou o předepsané hodnotě. [5]

Měření se provádí po dosažení ustálených podmínek a teplota chladicích desek je udržována na teplotě 20°C. Za těchto podmínek je nastavena průměrná teplota otopné kapaliny tak, aby bylo dosaženo maximální teploty povrchu podlahy 29°C. Pokud je teplotní rozdíl mezi průměrnou teplotou povrchu podlahy a teplotou v místnosti udržen, je tento teplotní rozdíl použit v základní charakteristické křivce a udává jmenovitý tepelný výkon q_N . Z těchto hodnot se sestaví rovnice pro charakteristickou křivku a vypočítá se směrnice charakteristické křivky K_H . Dalšími simulacemi a výpočty se stanoví K_H pro jakýkoliv odpor krytiny. [5]

Pro výpočet výkonu stěnového chlazení, nebo jiného povrchu než podlahy je nutné transformovat výsledky dle ČSN EN 1264-5. Tato norma obsahuje výpočtovou metodu umožňující převod výsledků pro ostatní povrchy interiéru. Změna odporu při přestupu tepla ovlivňuje teplotní pole v soustavě stejným způsobem, jako změna tepelného odporu povrchové krytiny. Veškeré výpočty jsou založeny na předpokladu konstantních okrajových podmínek, kdy nedochází k dosažení rosného bodu. [6]

Alternativní možností je použití výpočtu dle DIN 4715. Princip výpočtu je prakticky stejný. V závislosti na skladbě posuzované konstrukce se stanoví *jmenovitý měrný chladicí výkon* značený q_N .

1.6 DIMEZOVÁNÍ A NÁVRH CHLADÍCÍCH STĚN

Při projektování velkoplošných sálavých systémů je nezbytné mít na paměti, že tyto systémy fungují na odlišném principu, než je u dnes běžně používaných vzduchotechnických klimatizačních systémů. V těchto metodách je chladicí výkon dimenzován jako množství energie, která musí být z prostoru odvedena pro zajištění konstantní teploty vzduchu a vlhkosti. Pro projektanta chladících stěn není až tak rozhodující teplota vzduchu, ale primárně operativní teplota. Určení hodnoty operativní teploty je možné buď výpočtem nebo měřením, což je ve fázi projektu nepřijatelné. Právě k výpočetním metodám jsou vzhledem k nutným informacím o střední radiační teplotě, teplotě vzduchu a rychlosti proudění vyvinuty výpočetní programy. Proto je při projekčních pracích nutné ověřit návrhový stav a zkontrolovat zajištění přípustné operativní teploty ve všech polohách předpokládaného pobytu osob.

K stanovení výkonu chladících stěn je vhodné využít návrhových tabulek a softwaru výrobců. Běžnými systémy lze dosahovat chladicího výkonu až 80W/m^2 .

Samotné chladicí stěny však nejsou schopny zajistit v reálné budově s produkcí vlhkosti odvod vázaného tepla. Přirozeným větráním není možné zajistit konstantní podmínky. Je nutné tyto systémy bezpodmínečně doplnit vzduchotechnickým systémem s monitorováním vlhkosti a pochopitelně i koncentrace ostatních škodlivin.

Vhodně umístěným odtahem vzduchu z místnosti, ideálně těsně pod stropem nad hlavními zdroji vlhkosti v interiéru, lze zajistit požadovanou výměnu vzduchu. Vlivem stratifikace teploty vzduchu, v případě instalace chladících stěn nebo podlahy, případná instalace odtahu vzduchu v horní části odvede převážně teplý vlhký vzduch. Přívod vzduchu se pak doporučuje ideálně velkoplošnými vyústkami, které výrazně nenaruší již zmíněnou stratifikaci tepla. Zajímavým konceptem pak může být i využití osobního větrání.

1.6.1 KONDENZACE

Přestože systémy sálavého chlazení jsou pohodlné, šetří energii a náklady na větrání, jejich aplikace jsou omezeny kondenzací a tím i konečnou chladicí kapacitou. Kondenzace nastává v případě, když je povrchová teplota panelů nižší než teplota rosného bodu vzduchu v těsné blízkosti panelu. Může se tak stát při zvýšení výkonu chladících povrchů, nebo náhlém přírůstku vlhkosti v interiéru. Kondenzace na površích je nejen nežádoucí z důvodu materiálového složení, ale přímo ovlivňuje i účinnost chlazení (mokrý a suchý chladič). Aby nedocházelo ke kondenzaci na površích, měla by být povrchová teplota regulována na vyšší teplotu než je teplota rosného bodu vzduchu v přímém kontaktu s chladícím povrchem. Toto pravidlo silně omezuje chladicí výkon. [7]

Z těchto důvodů se může zdát použití sálavých systémů v určitých podmínkách velice obtížné. V tropických oblastech s vysokou vzdušnou vlhkostí jsou proto sálavé systémy samostatně nepoužitelné. Je nutné je doplnit klimatizačními jednotkami, které jsou schopné odvlhčovat přiváděný vzduch do místnosti. Nicméně je nutné řízení sofistikovaným systémem s kontrolou chlazené vody v sálavých panelech a vlhkostních parametrů přiváděného vzduchu [8]

Zkušenosti z praxe a experimentálních studií vedou k závěru nutnosti řešit tuto problematiku. Řešení problému kondenzace se dá zpravidla vyřešit dvěma způsoby.

Některé studie navrhly myšlenku na hlídání vlhkosti a úpravu výkonu chladících povrchů. Těmito opatřeními nezvýšíme chladicí výkon, ale pouze potlačíme problematiku. Další odborné studie se zaměřily na zlepšení struktury panelů tak, aby se zabránilo kondenzaci na povrchu. Pro tyto systémy je klíčové, aby docházelo ke kondenzaci čisté. Nelze využít v prostorech, kde jsou ve vzduchu obsaženy i jiné škodliviny vázané právě na vlhkost. [7]

Rozhodujícím faktorem kondenzace je pak také prostorová poloha a orientace povrchu. Vlivem rozdílné hustoty vlhkého a suchého vzduchu je rychlost kondenzace na sálavém stropu 3,5 krát vyšší než u sálavé podlahy a o 25 % vyšší než u sálavých stěn. [9]

Výsledky z experimentů a numerických metod výpočtu uvádějí, že už 6 minut po spuštění systému chlazení u nesprávně regulované soustavy může docházet ke kondenzaci na chladném povrchu. Je tedy nutný sofistikovaný řídicí systém s minimální prodlevou a uvažováním s tepelnou setrvačností stěn. Na sálavém panelu, který je umístěn nad zdrojem vlhkosti, dochází ke kondenzaci nejdříve. Proto se čidlo monitorování teploty rosného bodu vzduchu doporučuje umístit mezi sálavý panel a předpokládaný nejvýznamnější zdroj vlhkosti. [7]

1.7 ENERGETICKÁ NÁROČNOST

Velkoplošné sálavé chladicí systémy se řadí mezi systémy s nízkou energetickou náročností. Jejich použití v praxi ukázalo dobrý potenciál pro využití těchto systémů v teplém klimatu. Úspora primární energie v experimentálních studiích dosahuje 10 % - 15 % pro podnebí jižní Evropy. [10] U místností bez přímých solárních zisků pak může úspora dosahovat až 35 %. [2] Hlavním potenciálem úspor energie je vyšší pracovní teplota chladicí vody než u jiných systémů. Jako zdroje chladu k takovému vysokoteplotnímu chlazení je pak vhodné využít obnovitelných zdrojů energie. [12]

Další potenciál úspory spočívá v eliminaci vysokých tlakových ztrát ve vzduchotechnickém systému vlivem výrazného snížení průtoku větracího vzduchu. Snížení průtoku vzduchu přinese jednak nižší spotřebu energie na provoz ventilátorů, dále pak snižuje riziko zkratu mezi přívodem a odvodem vzduchotechnických klimatizačních systémů s možným využitím stratifikace vzduchu. [10]

1.8 TEPELNÝ KOMFORT

Tepelnou pohodu, neboli tepelný komfort, lze definovat „*jako stav mysli vyjadřující uspokojení s tepleným prostředím*“. [11]

Sálavý přenos tepla mezi člověkem a okolím v porovnání s konvekčním přenosem tepla se jeví výhodným jak z hlediska vytvoření tepelné pohody, tak z hlediska spotřeby energie. Hodnotícím kritériem pro pohodu v prostoru je operativní teplota t_o , která respektuje teplotu vzduchu t_a , střední radiační teplotu t_r a rychlost proudění vzduchu w_a . Pro nízké rychlosti proudění ($w \leq 0,2$ m/s) lze operativní teplotu nahradit výslednou teplotou t_g měřenou kulovým teploměrem.

Z výše uvedeného vyplývá, že na tepelnou pohodu má výrazný vliv povrchová teplota okolních ploch. Při zachování úrovně tepelného komfortu lze tedy v prostoru se

sálavým chlazením udržovat vyšší teplotu vzduchu, než je tomu u klimatizačních systémů s čistě konvekčním přenosem tepla. [12]

Pro stanovení tepelného komfortu v místnosti klimatizované stěnovým chlazením, je kromě požadavku na samotnou teplotu vzduchu, předpokládána největší problematika v asymetrii radiační teploty, nebezpečí vzniku průvanu v oblasti kotníků v blízkosti stěn a rozložení operativní teploty v místnosti. Naopak není očekáván místní tepelný diskomfort od chladné podlahy nebo teplého stropu. Rizikové faktory jsou popsány v následujících kapitolách.

1.8.1 ASYMETRIE RADIAČNÍ TEPLoty

Výměna tepla mezi člověkem a okolními stěnami by měla být rovnoměrná. Nerovnoměrnost osálení popisuje asymetrie radiační teploty Δt_{pr} , která je definována jako rozdíl mezi rovinnými radiačními teplotami t_{pr1} , t_{pr2} dvou protilehlých ploch malého rovinného prvku. Pro stěnové sálavé chlazení se uvádí, že Δt_{pr} by mělo být menší než 14K, aby nebyl překročen přípustný počet nespokojených osob z hlediska asymetrie radiační teploty. Vzhledem k tomu, že povrchová teplota chladících ploch je striktně omezena rizikem kondenzace, není nutné se v takových případech asymetrie radiační teploty výrazně obávat. Nejnáchylnější na tuto problematiku je stropní sálavé vytápění. [11]

1.8.2 NEBEZPEČÍ VZNIKU PRŮVANU

V klimatizovaných prostorech se stěnovým chlazením může při vyšším výkonu docházet k výraznému proudění chladného vzduchu u podlahy chladící stěny. Maximální dovolená rychlost proudění vzduchu v pásmu pobytu osob je 0,2m/s dle nařízení vlády 361/2007. [12] Je třeba vyhodnotit riziko průvanu, nebo zvážit dispoziční řešení a předpokládaný pohyb osob.

1.8.3 ROZLOŽENÍ TEPLoty

Dalším omezením je dosažení optimální rozložení teploty vzduchu v prostoru. Stěnové chlazení v kombinaci s nuceným větráním může výrazně změnit přirozené vertikální i horizontální teplotní profily v místnosti. Se zvyšováním chladícího výkonu chladících ploch může dojít k výrazné deformaci teplotních profilů. Je nutné respektovat požadavky dle nařízení vlády 361/2007. Pokud požadavek není splněn, je nutné snížit výkon chladící stěny nebo upravit dispoziční řešení prostoru.

1.8.4 LEGISLATIVA

Hodnocením tepelného komfortu se věnuje celá řada nařízení a norem. V následujících kapitolách se věnuji pouze vybraným, které se přímo týkají hodnocení tepelného komfortu pracujících osob, odpovídající práci v kanceláři.

1.8.4.1 NAŘÍZENÍ VLÁDY 361/2007

Toto nařízení upravuje požadavky a bezpečnost zdraví při práci, kromě jiného nařízení upravuje hodnoty nastavení mikroklimatických podmínek na pracovišti pro klimatizované prostory dle jednotlivých *tříd práce*.

Konkrétně upravuje požadavky na horizontální a vertikální nerovnoměrnost teplot, rychlost proudění vzduchu a relativní vlhkosti.

Dle jednotlivých *kategorií prostředí*, upravuje limitní hodnoty pro místní tepelný diskomfort způsobený průvanem, mimořádně vysokým vertikálním rozdílem teplot mezi hlavou a kotníky, příliš chladnou podlahou, nebo vysokou asymetrií radiční teploty.

1.8.4.2 ČSN EN 15251

Norma stanovuje parametry vnitřního prostředí, které mají vliv na energetickou náročnost budov, nástroj jak zavést vstupní parametry pro návrh vnitřního prostředí a udává vstupní parametry pro navrhování staveb, vytápění, chlazení, větrání a osvětlení.

Obsahuje příklady doporučených *kategorií* pro návrh strojně vytápěných a chlazených budov, dále pak příklady doporučených návrhových operativních teplot pro návrh budov a vytápěcích, větracích a klimatizačních zařízení.

1.8.4.3 ČSN EN ISO 7730

Norma představuje metody předpovídání celkového tepelného pocitu a stupně diskomfortu osob vystavených mírnému tepelnému prostředí. Umožňuje analytické stanovení a interpretaci tepelného komfortu pomocí ukazatelů PMV a PPD i stanovení kritérií místního tepelného komfortu určující environmentální podmínky považované za přijatelné pro celkový tepelný komfort. Tyto výpočty jsou důležitým prvkem v druhé fázi diplomové práce.

Stanovení PMV

Ukazatel PMV reprezentuje střední tepelný pocit na základě odevzdaných hlasů velké skupiny osob, které hodnotí svůj pocit pomocí sedmibodové stupnice tepelných pocitů, založené na tepelné rovnováze lidského těla. V mírném prostředí se termoregulační systém člověka automaticky pokusí modifikovat teplotu kůže a vylučováním potu udržovat tepelnou rovnováhu.

Tabulka 1 - Sedmibodová stupnice tepelných pocitů [11]

+3	Horko
+2	Teplo
+1	Mírné teplo
0	Neutrální
-1	Mírné chladno
-2	Chladno
-3	Zima

Hodnotu PMV lze numericky vyjádřit pomocí následujících rovnic. [11]

PMV

$$= [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 699(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) \\ -3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\}$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \{ 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c (t_{cl} - t_a) \}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl} & \text{pro } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 I_{cl} & \text{pro } I_{cl} \geq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases}$$

kde

M	metabolismus [W/m ²]
W	užitečný mechanický výkon [W/m ²]
I_{cl}	tepelný odpor oděvu [m ² ·K/W]
f_{cl}	povrchový faktor oděvu
t_a	teplota vzduchu [°C]
\bar{t}_r	střední radiační teplota [°C]
v_{ar}	relativní rychlost proudění vzduchu [m/s]
p_a	parciální tlak vodní páry [Pa]
h_c	součinitel přestupu tepla konvekcí [W/m ² ·K]
t_{cl}	teplota povrchu oděvu [°C]

Místní tepelný diskomfort

Pro celkové hodnocení komfortu slouží PMV. Pokud jsou ale pro nás žádoucí informace o ochlazování nebo oteplování jednotlivých částí těla, je nutno uvažovat s místním tepelným diskomfortem. Jsou jím ohroženy především osoby odpočívající, nebo pracující vsedě. Při vyšších úrovních aktivity jsou rizika diskomfortu nižší. [11]

Průvan

Průvan je nejběžnější příčina diskomfortu. Jsou na něj citliví především osoby pracující vsedě. Vzniká vlivem proudění chladného vzduchu. [11]

$$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} (0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3,14)$$

pro $\bar{v}_{a,l} < 0,05$ m/s pomocí $\bar{v}_{a,l} = 0,05$ m/s

pro DR > 100% pomocí DR = 100%

kde

$t_{a,l}$ místní teplota vzduchu 20°C až 26°C [°C]
 $\bar{v}_{a,l}$ místní střední rychlost proudění vzduchu [m/s]
 Tu místní intenzita turbulence [%]

Vertikální rozdíly teploty vzduchu

Diskomfort může vznikat i rozdíly teploty vzduchu mezi hlavou a kotníky. Určuje se podle následující rovnice [11]

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856 \cdot \Delta t_{a,v})}$$

kde

$\Delta t_{a,v}$ vertikální rozdíl teploty vzduchu mezi hlavou a kotníky [°C]

Teplé a chladné podlahy

Další možný vznik diskomfortu z důvodu nevyhovujícího tepelného pocitu může vzniknout i vlivem nevhodné teploty podlahy. Toto posouzení není závislé na teplotě vzduchu v interiéru [11]

$$PD = 100 - 94 \cdot \exp(-1,387 + 0,118 \cdot t_f - 0,0025 \cdot t_f^2)$$

kde

t_f teplota podlahy [°C]

Asymetrická radiace

Tato hodnota nás bude v tomto experimentu nejvíce zajímat. Reprezentuje diskomfort způsobený chladnými, nebo teplými stěnami. Výpočet uvažuje nejnevhodnější polohu a natočení člověka. [11]

a) způsobená chladnou stěnou

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 \cdot \Delta t_{pr})}$$

b) způsobená teplou stěnou

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(3,72 - 0,052 \cdot \Delta t_{pr})} - 3,5$$

kde

Δt_{pr} asymetrie radiační teploty [°C]

1.9 VHODNÉ UMÍSTĚNÍ A ORIENTACE CHLADÍCÍCH STĚN

Pro správnou funkčnost a vhodné podmínky pro pobyt v interiéru s upravovanou teplotou velkoplošnými sálavými systémy je nezbytné vhodně zvolit jejich orientaci.

Pro velkoplošné sálavé chlazení se primárně nabízí sálavé chladicí stropy, které jsou schopné zajistit rovnoměrný teplotní obraz. Někdy je ale jejich instalace nevhodná, nebo až vyloučená nejrozmanitějšími specifikami místností.

V případě sálavých stěn je důležité vhodně zvolit jejich umístění. Přílišná kumulace veškerého výkonu na jednu stěnu může mít negativní vliv na tepelně vlhkostní komfort a silně dynamické rozložení operativní teploty po prostoru místnosti. Hlavními možnými problémy způsobující diskomfort osob pak může být asymetrie osálení, nebezpečí vzniku průvanu, a při výrazné stratifikaci tepla pak i horizontální rozdíly teploty vzduchu.

Vhodné rozložení chladících stěn v kancelářích bylo posuzováno experimentálně celkem v pěti případech. Dvě chladicí stěny proti sobě v horní části místnosti, dvě chladicí stěny proti sobě v dolní části místnosti, pruh chladících stěn po obvodu ve spodní části místnosti, horní části místnosti a uprostřed. Ve všech těchto případech jsou chladicí stěny vzájemně proti sobě a neměl by primárně vznikat diskomfort od asymetrie radiační teploty.

Závěry ze studie uvádějí, že všechny takové instalace jsou přijatelné v posouzení PMV, ale jejich poloha má výrazný vliv na rozložení teploty uvnitř budovy. Kapiláry se sálavými panely uložené v horní části místnosti měly větší tepelný výkon než ostatní případy. Teplota vzduchu v modelové kanceláři byla v těchto případech až o 1°C nižší než u ostatních posuzovaných variant. Dalším zjištěním je nižší rozdíl teploty vzduchu mezi hlavou a kotníky u variant s výše položeným stěnovým chlazením. Vzhledem k symetrickému uspořádání chladících stěn u všech variant, parametry PMV, odrážející tepelný komfort asymetrie osálení, podle předpokladů nevykázaly rizikové hodnoty. Jako výhodnější se opět projevila varianta s výše umístěnými chladícími stěnami. [13]

1.10 ZÁVĚR

V první části diplomové práce byla věnována pozornost současné problematice stěnového velkoplošného chlazení. Zabývá se porovnáním vzduchotechnických klimatizačních systémů a systémů stěnového chlazení včetně vhodností použití chladících stěn v různých druzích provozu. Byla představena metoda zjišťování tepelného výkonu dle ČSN EN 1264, dimenzování a návrh velkoplošných chladících ploch s ohledem na tepelný komfort a omezením vznikem kondenzace na chladných površích. Dále je vysvětlen princip nižší energetické náročnosti velkoplošného chlazení oproti běžným vzduchotechnickým klimatizačním systémům. Tato část také obsahuje stanovení a posouzení tepelného komfortu včetně výpočetních metod.

Detailněji je v práci probráno riziko pravděpodobnosti vzniku kondenzátu, výkonu chladící stěny a kvalitnímu vnitřnímu tepelnému komfortu dle polohy chladící plochy. Závěrem lze uvést, že ke kondenzaci dochází nejpravděpodobněji v horních částech chladících stěn, zároveň je toto umístění schopno zajistit nejvyšší předaný chladící výkon stěn do místnosti.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 ÚVOD

Druhá část diplomové práce se zabývá experimentálním posouzením komfortního vnitřního prostředí v letním období, udržovaného pomocí stěnového chlazení. Cílem experimentu je ověření všech požadavků na vnitřní prostředí při maximálním výkonu chladících stěn. Měření probíhalo v demonstrační výukové laboratoři technických zařízení budov na fakultě stavební ČVUT. Konkrétně v měřicí kabině s regulovatelnými teplotami jednotlivých povrchů. Hlavním zaměřením experimentu je pak posouzení vlivu rozdílné polohy chladících stěn na výsledný komfort v místnosti.

2.2 MĚŘICÍ KABINA ČVUT

Jedním z vybavení výukové laboratoře je měřicí kabina s regulovatelnými teplotami jednotlivých povrchů díky zabudovaným kapilárním rohožím. (systém ESCS) Konkrétně se jedná o kapilární rohože výrobce G-therm kryté tenkou stěrkovou omítkou s olejovým nátěrem odolávající případné kondenzaci vodní páry na chladném povrchu. Každá plocha je tvořena samostatným okruhem s regulací napojeným na okruh vytápění a chlazení. V kabině je dále možnost upravovat parametry přiváděného vzduchu vzduchotechnickou jednotku.

Rozměry kabiny: šířka 3m, délka 3,5m, výška 2,9m

celkový objem 30,5m³

Zdroj chladu: Tepelné čerpadlo vzduch/voda - Viessmann Vitocal 300

Zdroj tepla: Závěsný elektrický kotel – Protherm 12kW

VZT jednotka: Duplex 1500 TC CHW upravená pro použití v laboratorních podmínkách

2.3 METODIKA MĚŘENÍ

Úkolem je v laboratorní komoře co nejvěrněji, v rámci možností měřicí kabiny, nasimulovat podmínky při letním provozu v kanceláři. Předpokládá se, že myšlená místnost bude nejvíce tepelně zatížena v letních měsících, kdy má sluneční záření největší intenzitu. Slunce se pohybuje vysoko nad obzorem, do místnosti proniká sluneční záření prosklenou plochou a dopadá v případě prázdné místnosti na podlahu místnosti. V reálné kanceláři se však vyskytuje množství zařízení a nábytku, do kterého se sluneční záření pohlcuje, čímž dochází k nerovnoměrnému rozložení tepelné zátěže. Sluneční záření bude v našich podmínkách simulováno stěnovým vytápěním na straně okna, doplněné o podlahové vytápění, případně o doplňkové vnitřní zdroje tepla. Vzhledem k možné rozdílné dispozici místnosti měření probíhalo v několika variantách, odvíjejících se od polohy stěny s oknem, polohy stěnového chlazení a předpokládané pracovní pozice zaměstnanců.

Měření bylo prováděno za pomoci následujících měřících zařízení.

čidlo rychlosti vzduchu:	AHLBORN Thermoanemometer FV A605-TA10 rozsah 0,01 až 1,00 m/s přesnost 0,001 m/s
kulový stereoteploměr:	SIPOCH Všesměrný kulový stereoteploměr JOKL-JIRÁK průměr 150 mm
kulový teploměr:	AHLBORN Kulový teploměr FPA805GTS rozsah -50 až +200 °C průměr 150 mm
čidla teploty vzduchu:	teplotní čidlo Pt100 FPA4415 rozsah do 200°C
čidla povrchové teploty:	AHLBORN Teplotní čidlo dotykové FNA611 rozsah -10 až +90 °C přesnost 0,01 °C AHLBORN Teplotní termočláňkové čidlo dotykové FT96832 rozsah -100 až +200 °C přesnost 0,1 °C
měřicí ústředna:	ALHBORN Měřicí ústředna ALMEMO 5690-2M 39 univerzálních vstupů

2.3.1 SESTAVA ČIDEL

Předpokládáme modelovou situaci posouzení kvality vnitřního prostředí zaměstnance provádějícího svojí práci vsedě. Pro stanovení a výpočet jednotlivých složek komfortu je nutné znát následující údaje.

NV 361/2007

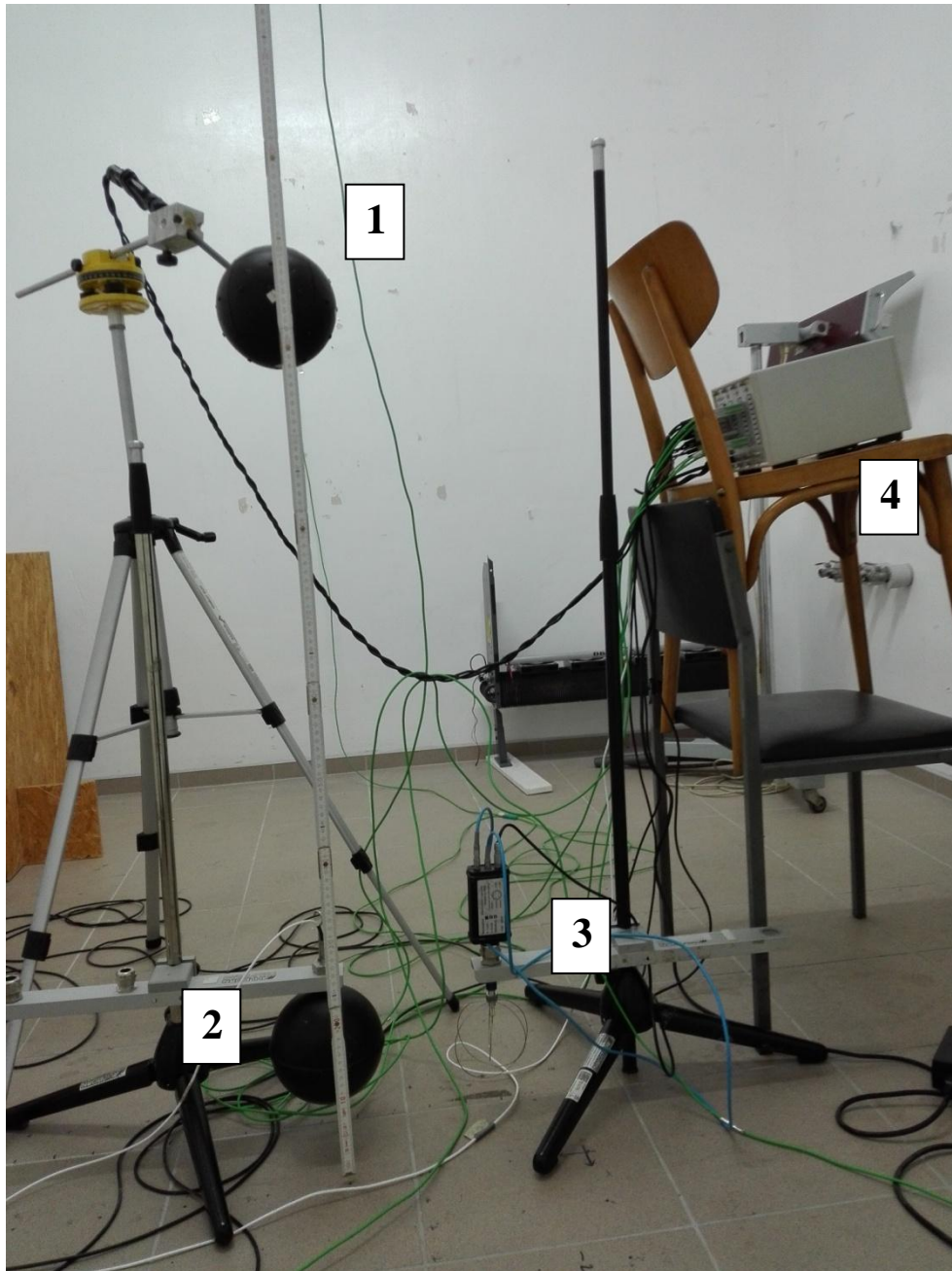
operativní teplota t_o , rychlost proudění vzduchu v_a , teplota kulového teploměru v úrovni hlavy $t_{g1,1}$, teplota kulového teploměru v úrovni kotníků $t_{g0,1}$, stereoteplota v úrovni hlavy $t_{st1,1}$,

ČSN EN ISO 7730

teplota kulového teploměru v úrovni kotníku $t_{g0,1}$, teplota kulového teploměru v úrovni hlavy $t_{g1,1}$, rychlost proudění vzduchu v úrovni kotníků $v_{a0,1}$, rychlost proudění vzduchu v úrovni hlavy $v_{a1,1}$, stereoteplota v úrovni hlavy $t_{st1,1}$, teplota vzduchu v úrovni kotníků $t_{a0,1}$, teplota vzduchu v úrovni hlavy $t_{a1,1}$.

Pro stanovení jednotlivých hodnot při experimentální metodě byla vytvořena základní sestava čidel. Jejich poloha a orientace se bude měnit s předpokládanou polohou pracovní pozice.

Pro kontrolu a lepší regulaci systému byly vnitřní povrchy, stěny podlaha a strop, osazeny dotykovými čidly pro snímání teploty povrchu.



Obrázek 3 - sestava čidel

- | | |
|--------------------|------|
| 1. stereoteploměř | 1,1m |
| 2. kulový teploměr | 0,1m |
| 3. anemometr | 0,1m |
| 4. měřící ústředna | |



Obrázek 4 - Natočení stereoteploměru

Přesná poloha stereoteploměru byla nastavena tak, aby ideálně vždy jedna ploška odrážela tepelný výkon jedné plochy místnosti. Stěny, strop a podlahu.

Konkrétně

ploška 1	zadní stěna
ploška 2	strop
ploška 3	pravá stěna
ploška 4	podlaha
ploška 5	levá stěna
ploška 6	dveře

2.4 VARIANTY MĚŘENÍ

V první fázi experimentu byla provedena série testovacích měření. Jejich účelem bylo ověření původního konceptu vytváření vnitřního prostředí, testování přesnosti a spolehlivosti regulace chlazení a vytápění, testování přesnosti měřících čidel apod..

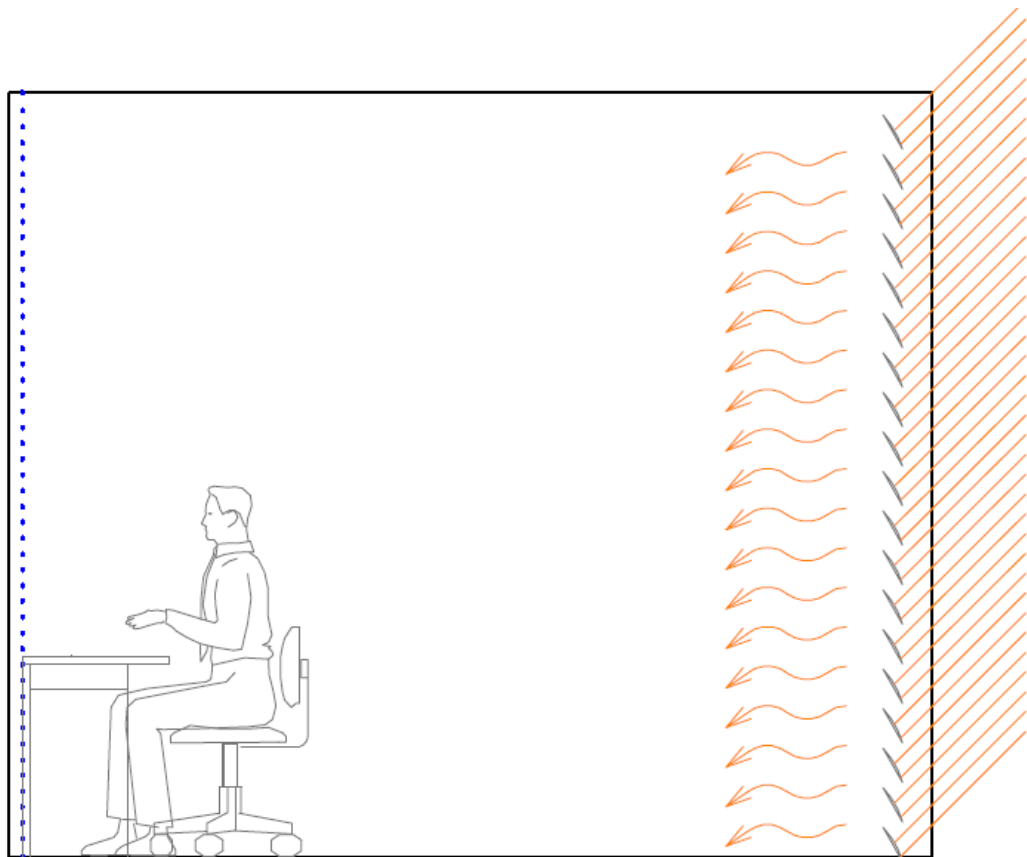
Po několika měřících dnech bylo provedeno pár změn. Hlavním zásahem do původní koncepce bylo vyloučení používání doplňkových zdrojů tepla z důvodu jejich obtížné regulace a manipulace. Jednalo se o klasické extrémně nevhodné žárovky o výkonu 100W stíněné papírovou krabicí. Tyto zdroje tepla negativně ovlivňovaly měření stereoteploměru. Bylo nutné je umístit přímo ve směru ohřívání stěny, což pozbývalo smysl jejich instalace.

Dále byla zjištěna závada na čidle rychlosti proudění vzduchu, které hlásilo naprosto scestné i záporné hodnoty rychlosti vzduchu. Čidlo bylo vyměněno za funkční a experiment pokračoval za dále nezměněných podmínek. Stejně tak ploška 2 stereoteploměru občas hlásila záporné hodnoty teplot a bylo nutné změnit zapojení v měřící ústředně.

Po zhodnocení výsledků z testovacího měření byly vytvořeny čtyři základní varianty měření, které reprezentují nejrizikovější uspořádání vzhledem k tepelně vlhkostnímu komfortu pracujících osob.

2.4.1 VARIANTA 1

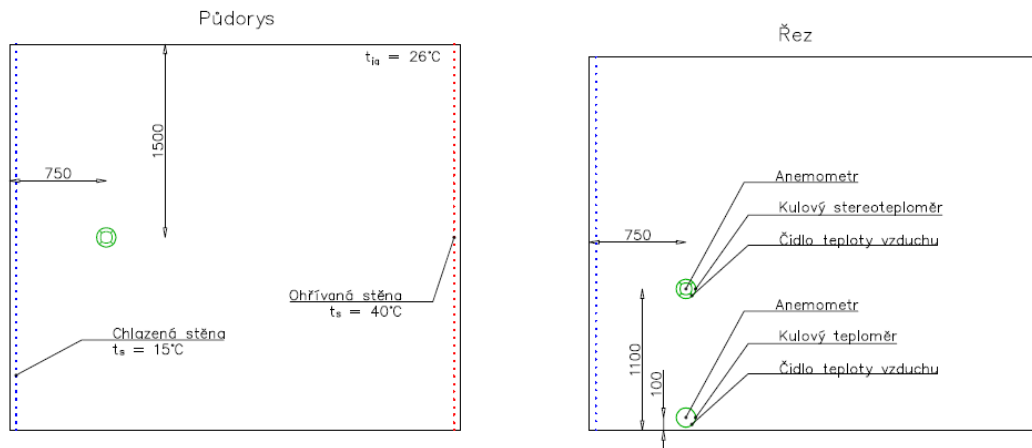
První varianta je modelový příklad místnosti klimatizované stěnovým chlazením, kdy je chlazená stěna protilehlá oknu. V tomto uspořádání jsou veškeré tepelné zisky reprezentovány pouze vyhřívanou stěnou. Pro představu můžeme uvažovat např. místnost s vnitřními žaluziemi, které jsou nastaveny tak, že žádné přímé sluneční záření nedopadá na podlahu, ale veškeré je pohlceno právě žaluziemi v blízkosti okna.



Obrázek 5 - Varianta 1

Chladicí stěna byla nastavena na maximální výkon, omezený rizikem kondenzace vodní páry v komoře. Povrchová teplota 15 °C. Ohřívaná stěna byla nastavena na povrchovou teplotu 40 °C, aby byl tepelný tok vyrovnán a v místnosti bylo docíleno průměrné teploty vzduchu v úrovni hlavy $t_{ai,1} = 26$ °C. Orientační hodnoty tepelného výkonu a nastavení povrchové teploty byly stanoveny dle návrhové tabulky výrobce kapilárních rohoží G-therm. Pro povrchovou teplotu 15 °C odpovídá 89,4 W/m², v celkové ploše pak celkový chladicí výkon vychází na 780W.

Varianta 1a

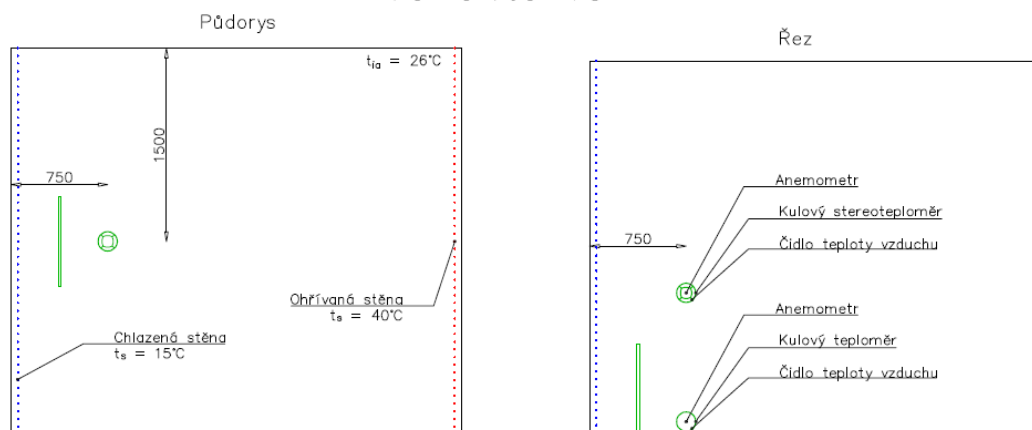


Obrázek 6 - Varianta 1a

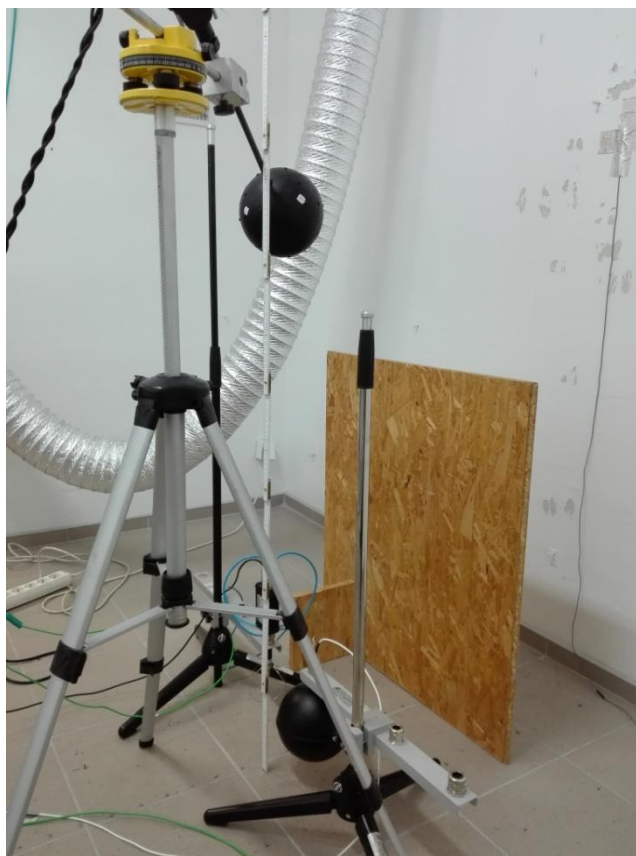
Obecně lze odhadovat, že vlivem chladného povrchu chladící stěny bude ochlazovaný vzduch klesat a vytvářet proud studeného vzduchu, který bude postupovat dále po podlaze směrem k ohřívané stěně. Z důvodu eliminace takového proudění byla v další variantě uvažována překážka, která by měla lokálně zmírnit rychlost proudění vzduchu. Bylo vhodné tuto možnost otestovat, do jaké míry je překážka použitelná, a zda případně za přepážkou nedojde k výraznějšímu turbulentnímu proudění a celkovému zhoršení komfortu.

K účelu zabránění zvýšené rychlosti proudění chladného vzduchu u podlahy bylo využito pro laboratorní podmínky clony zhotovené z OSB desky. Ta měla za účel zmírnit rychlost proudění vzduchu ve spodní části, eliminovat tak riziko výskytu průvanu a ohrožení komfortu předpokládaných osob. Deska dosahovala do úrovně 800mm.

Varianta 1b



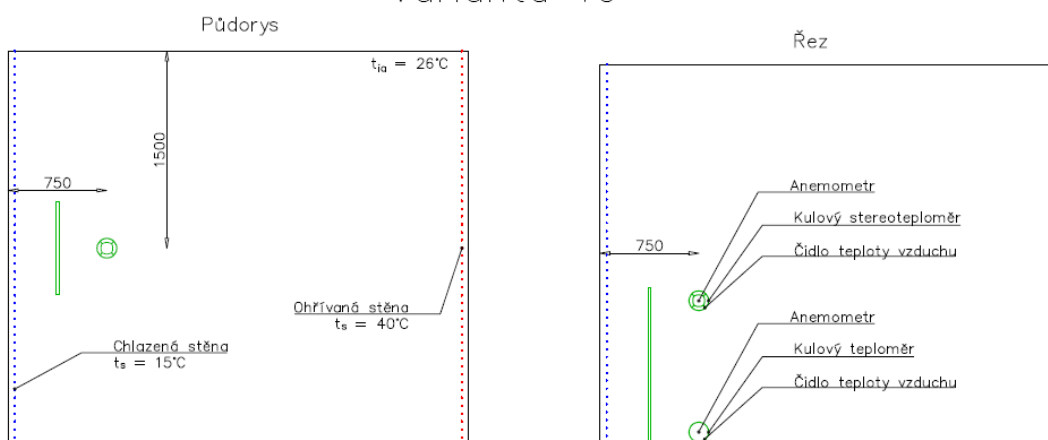
Obrázek 7 - Varianta 1b



Obrázek 8 - Nízká zábrana

V další fázi testování byla zábrana zvýšena na 1200 mm, aby bylo částečně odstíněno chladné sálání na stereotploměr v úrovni hlavy sedící osoby. Účelem takového uspořádání byla snaha o zmírnění možného omezení komfortu asymetrií osálení chladnou stěnou.

Varianta 1c



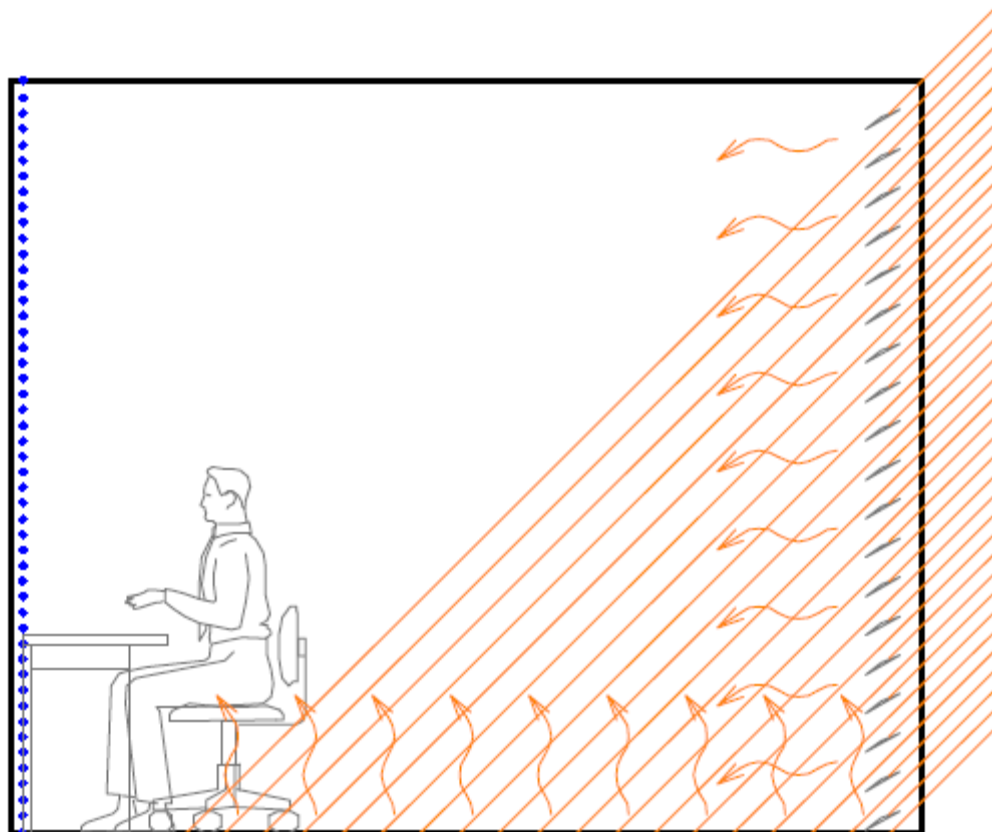
Obrázek 9 - Varianta 1c



Obrázek 10 - Vysoká zábrana

2.4.2 VARIANTA 2

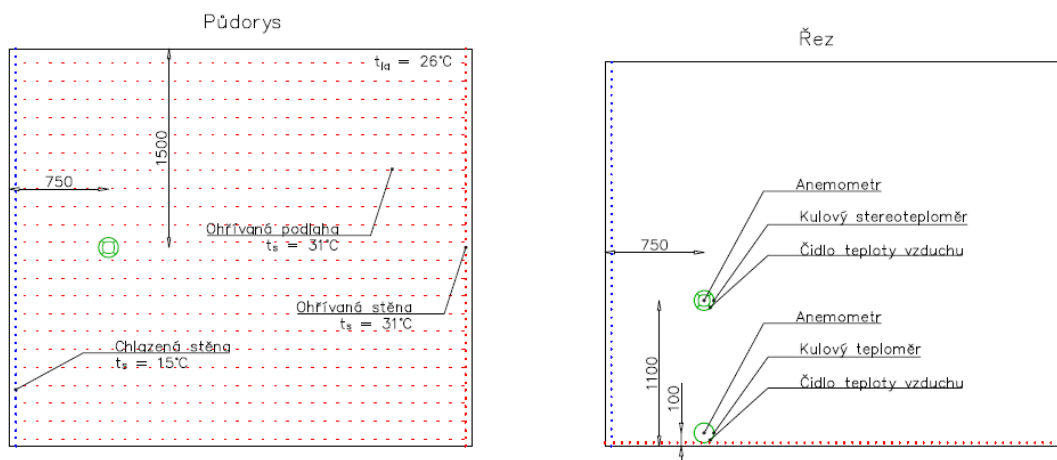
Druhá varianta uvažuje možnost, kdy část přímého slunečního záření dopadá na podlahovou plochu, a část záření se pohltí v konstrukci okna, případně na vnitřních žaluziích. Dopadající sluneční záření na podlahovou plochu může reprezentovat i případné plošné tepelné zisky od zařízení v interiéru kanceláře.



Obrázek 11 – Varianta 2

U této varianty se dá očekávat výraznější proudění v oblasti kotníků sedící osoby, kde se bude chladný klesající vzduch mísit se vzduchem ohřátým z podlahové plochy. V laboratorních podmínkách byla situace v měřicí kabině oproti předchozí variantě mírně pozměněna. Výkon chladící stěny zůstal na původní hodnotě povrchové teploty 15 °C . ($89,4\text{ W/m}^2$) Topný výkon protější stěny byl rozdělen rovnoměrně na stěnu a podlahu na povrchovou teplotu 31 °C .

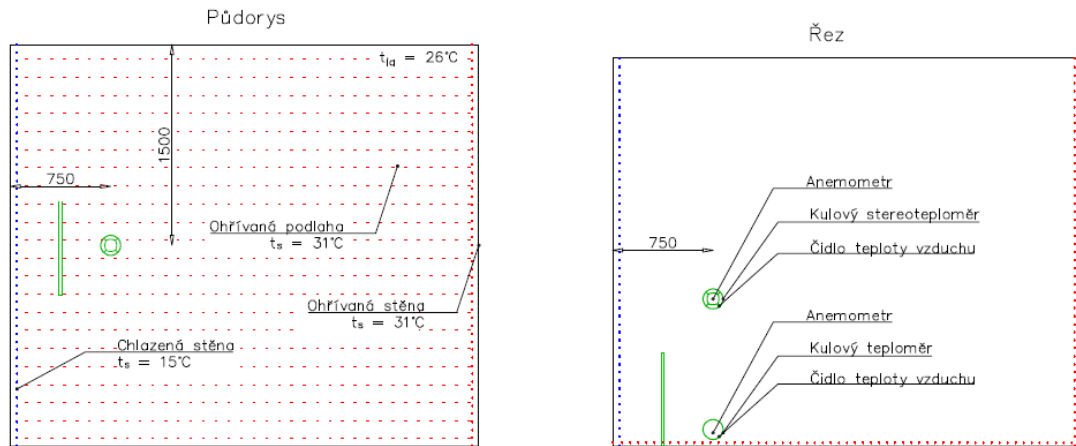
Varianta 2a



Obrázek 12 - Varianta 2a

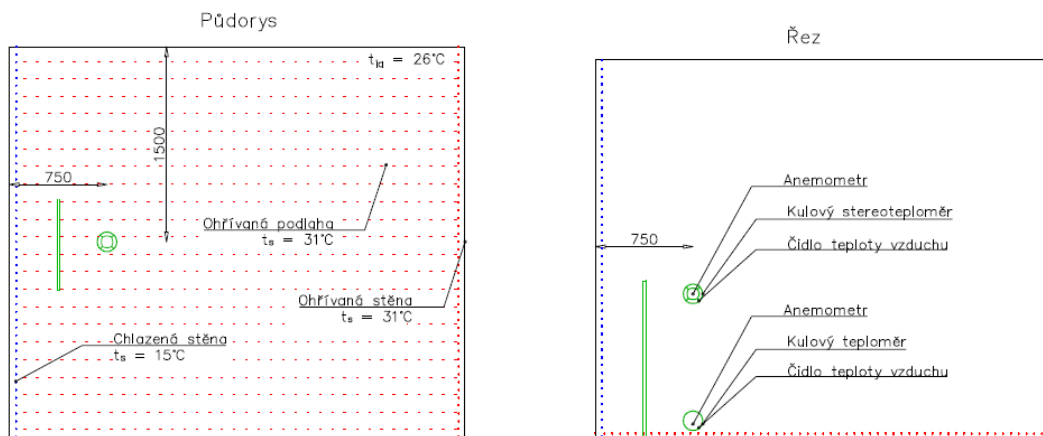
V dalších fázích druhé varianty bylo ověřováno chování při instalaci nízké a vysoké zábrany.

Varianta 2b



Obrázek 13 - Varianta 2b

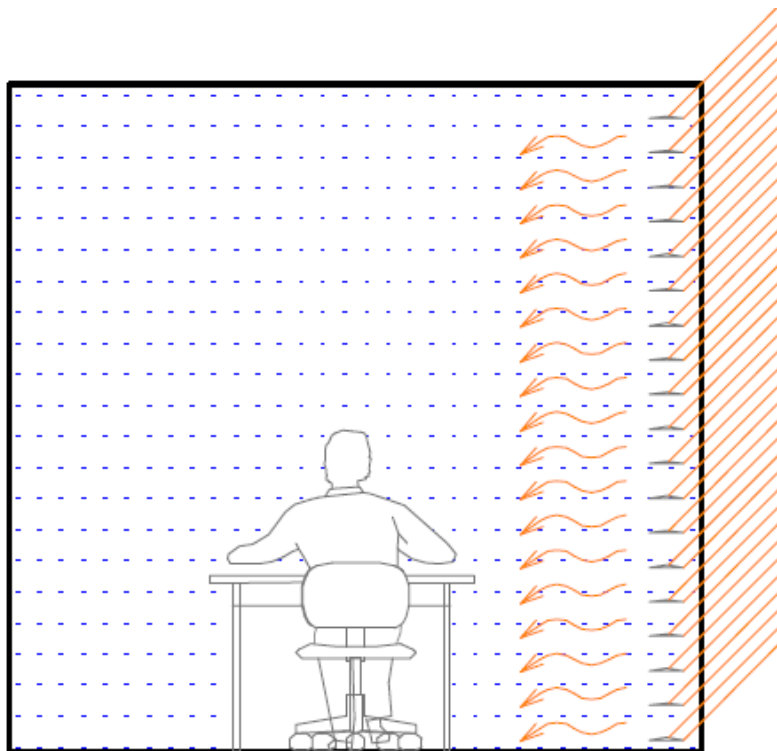
Varianta 2c



Obrázek 14 - Varianta 2c

2.4.3 VARIANTA 3

Další možným uspořádáním zařízení v místnosti je varianta 3, kdy je stěna se stěnovým chlazením kolmá na stěnu hlavních solárních zisků. V této variantě bude především testována závislost vzdálenosti sedících osob od chladicí stěny.

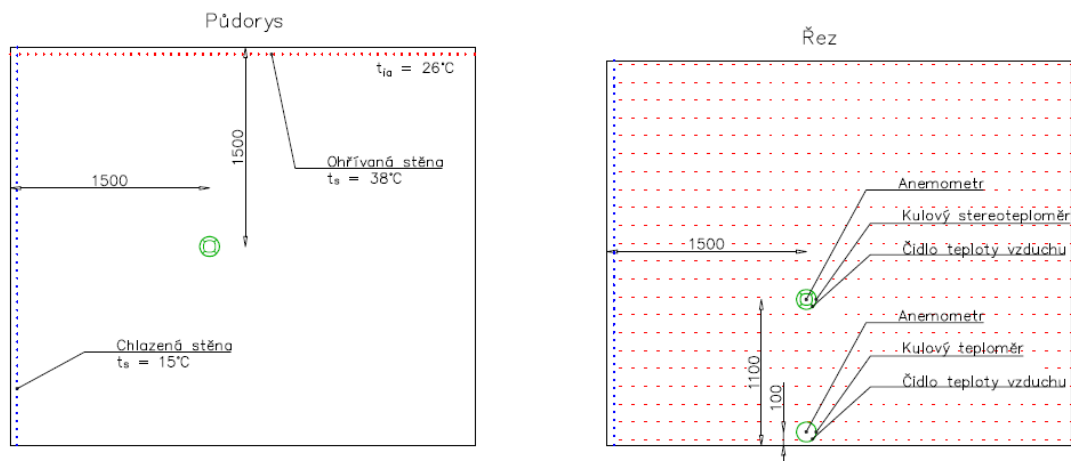


Obrázek 15 – Varianta 3

U této varianty budeme testovat především asymetrii osálení v závislosti na vzdálenosti od chladící a ohřivané stěny. Dalším zajímavým faktorem pak může být rychlost proudění vzduchu u kotníků. Vzhledem ke kolmosti stěn může vzniknout v rohu místnosti vlivem konvekce výraznější turbulentní proudění, které by mohlo způsobovat diskomfort pracujících osob. Zejména pak riziko vzniku průvanu. Pro otestování takového mikroklimatu byla v laboratorní komoře nastavena teplota levé chladící stěny na povrchovou teplotu 15 °C, zadní ohřivané stěny na 38 °C.

Při uspořádání 3a je pozice měřící soustavy umístěna tak, že simuluje pozici pracující osoby vsedě, ve stejné vzdálenosti 1,5 m od chladné i teplé stěny.

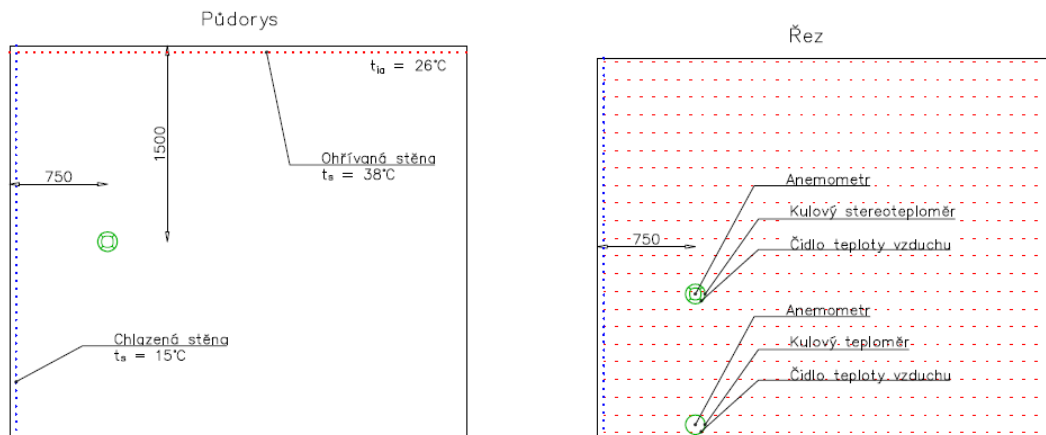
Varianta 3a



Obrázek 16 - Varianta 3a

V druhém uspořádání varianty 3 bylo posunuto pracovní místo k chladné stěně na poloviční vzdálenost 0,75 m

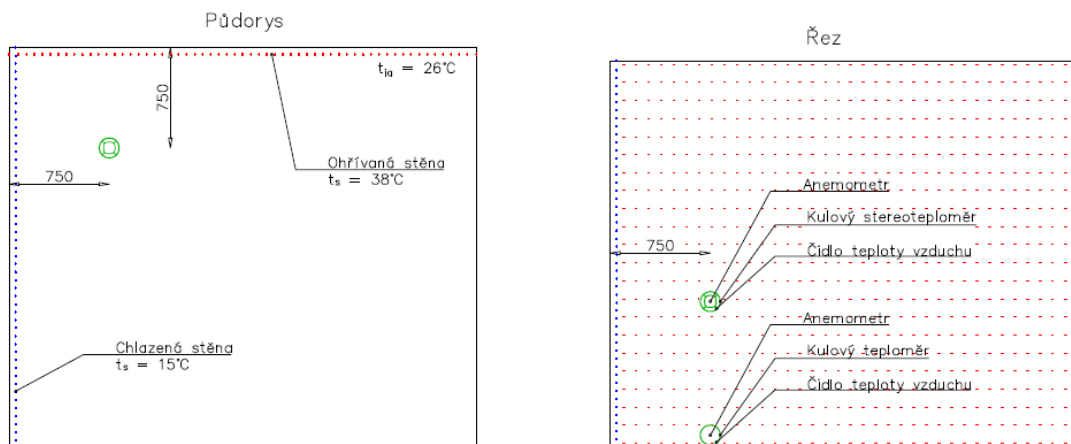
Varianta 3b



Obrázek 17 - Varianta 3b

V posledním uspořádání byla pak testována pracovní pozice v rohu.

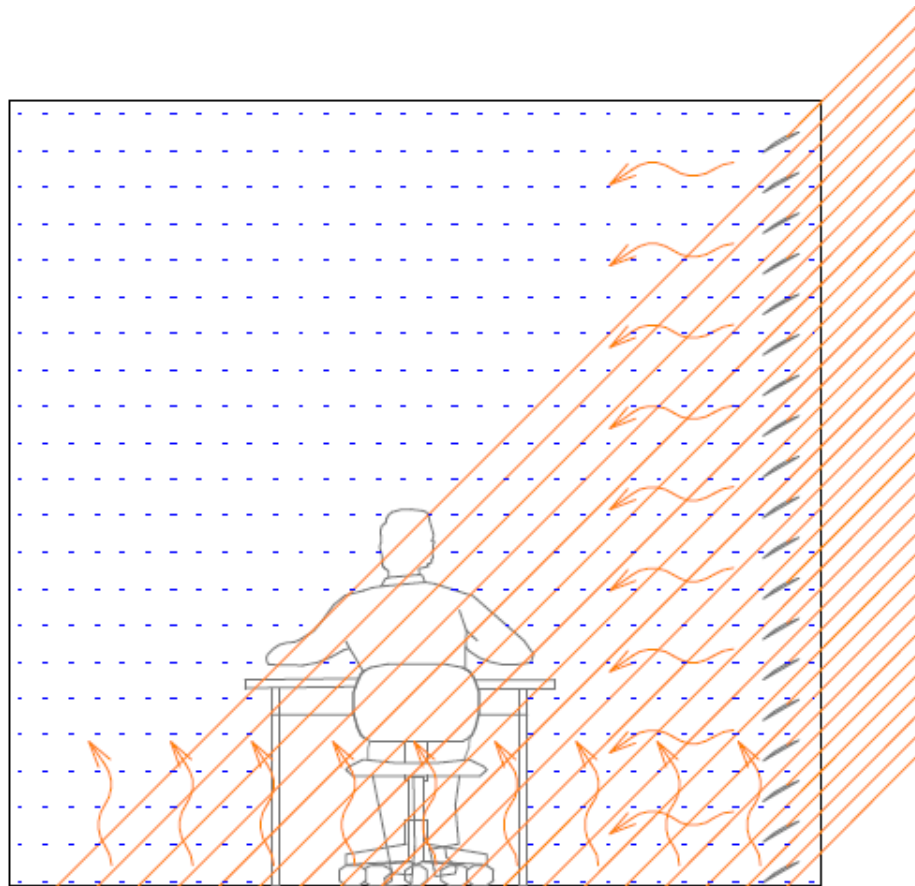
Varianta 3c



Obrázek 18 - Varianta 3c

2.4.4 VARIANTA 4

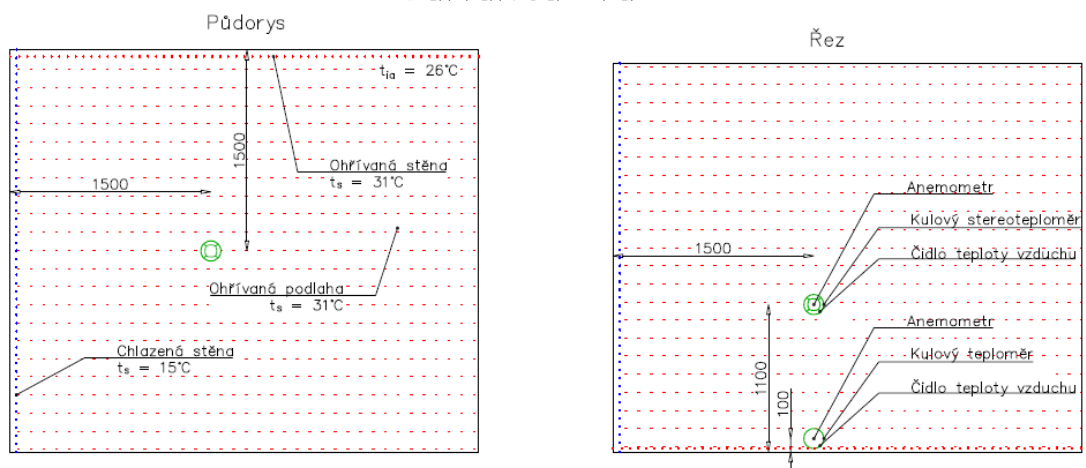
Poslední varianta měření vychází z varianty 3, kdy je podobně jako u varianty 2 uvažována část slunečního záření dopadající na podlahovou plochu.



Obrázek 19 – Varianta 4

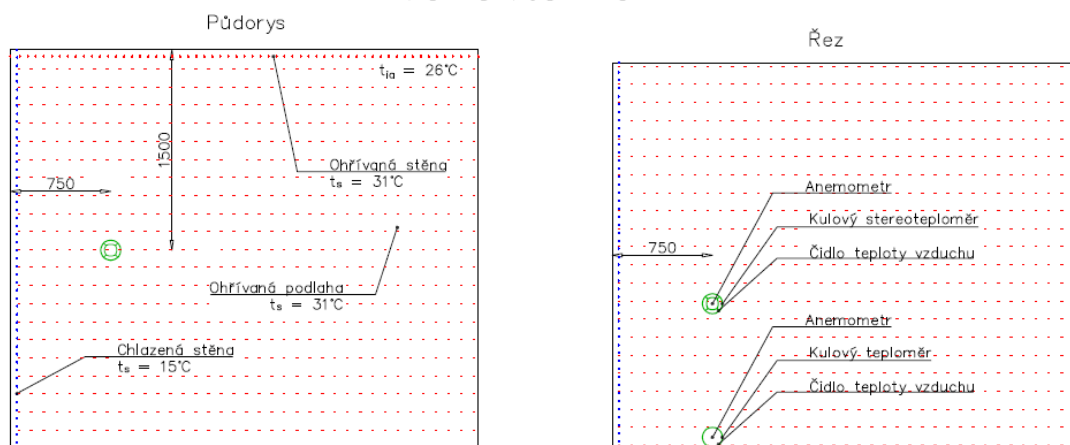
Zde bude opět testováno uspořádání v závislosti na vzdálenosti chladicí a ohříváné plochy, stejně jako u varianty 3. Teplota povrchu chladicí stěny bude nastavena opět na maximální výkon 15 °C. Ohříváná zadní stěna a podlaha na 31 °C.

Varianta 4a



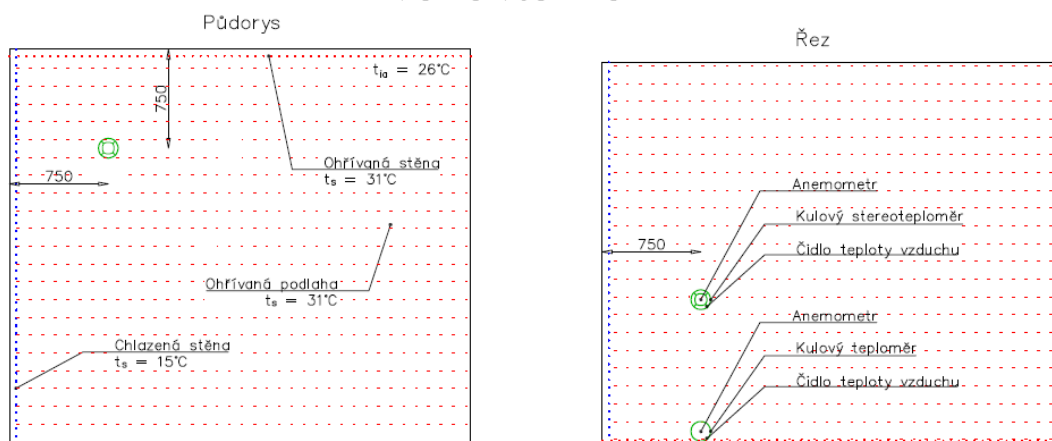
Obrázek 20 - Varianta 4a

Varianta 4b



Obrázek 21 - Varianta 4b

Varianta 4c



Obrázek 22 - Varianta 4c

2.4.5 VÝCHOZÍ HODNOTY

Pro přesné stanovení komfortu pracujících osob je nezbytné určit výchozí hodnoty. V experimentu předpokládáme letní návrhový stav kancelářské práce. Při výpočtech bylo uvažováno se vstupními údaji dle ČSN EN ISO 7730

2.4.5.1 METABOLISMUS

Základní hodnota metabolismu $M = 1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$, představuje metabolické teplo produkované člověkem při lehké práci vsedě. Během kancelářské práce se nepředpokládá zvýšený energetický výdej, a lze jen obtížně specifikovat parametry osob vykonávajících práci v modelové kanceláři. Ve výpočtech je vycházeno z tabulkových hodnot pro činnost *Sezení, odpočívání*, které odpovídají hodnotě právě 1 met.

2.4.5.2 OBLEČENÍ

V experimentálním posouzení vycházím z letního návrhového stavu, kdy předpokládám lehčí oblečení pro běžný pobyt v interiéru. Základní jednotkou tepelného odporu oděvu je 1clo které odpovídá $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$. Pro lepší představivost můžeme uvažovat takový tepelný odpor, jako má klasický formální pánský oblek.

Takový tepelný odpor oděvu ale běžně v letních měsících není nepředpokládán, stejně tak u osob v modelové kanceláři. Zároveň se může výrazně měnit oblečení mužů a žen, zejména pak ve vyšší společnosti. Lehké ženské letní šaty odpovídají hodnotě cca 0,2clo. Při výpočtech byla zvolena tabulková hodnota $0,5\text{clo} = 0,080 \text{ m}^2\text{K/W}$, která reprezentuje běžný oděv – *Spodky, košile s krátkými rukávy, lehké kalhoty, tenké ponožky, boty* [11].

2.5 DATA MĚŘENÍ

V měřicí kabině byly během celkem osmi měřících dnů prověřeny všechny varianty uvedené v předchozí kapitole. Před spuštěním zápisu hodnot z měřicí ústředny byla vždy kabina minimálně 90 minut spuštěna bez významných zásahů do regulace. Cílem bylo zajištění konstantního ustáleného stavu teploty stěn, teploty vzduchu a proudění vzduchu v komoře. Při každé změně uspořádání, nebo přesunu čidel bylo vždy zaznamenávání dat přerušeno na dobu nutnou k ustálení mikroklimatu v komoře a správné aklimatizaci čidel, minimálně vždy 20 minut. Hodnoty jednotlivých veličin byly odečítány každých 10 až 15 minut a zaznamenávány do tabulek. Pro každou variantu a uspořádání čidel byly vždy odečteny minimálně 4 hodnoty pro vytvoření reprezentativních hodnot.

Měřená veličina	Označení	Jednotky	Místo měření	pozice	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Hodnota
				1.11.2017	11:50	12:00	12:10	12:20	12:30	12:40	12:50
Teplota vzduchu	t _{air,1}	°C	hlava 1,1 m	09	25,80	25,70	25,60	25,70	26,00	25,90	25,80
	t _{air,2}	°C	kotníky 0,1 m	08	23,20	23,30	23,30	23,40	23,40	23,00	22,80
Rychlost proudění vzduchu	v _{air,1}	m/s	hlava 1,1 m	-	0,021	0,024	0,017	0,016	0,018		
	v _{air,2}	m/s	kotníky 0,1 m	07						0,141	0,132
Teplota kulového teploměru	t _{gl,1}	°C	hlava 1,1 m	-	25,26	25,19	25,07	25,21	25,39	25,40	25,33
	t _{gl,2}	°C	kotníky 0,1 m	08	23,95	23,96	23,86	23,88	24,02	24,14	24,08
Stereoteplota	t _{st1}	°C	hlava 1,1 m	01	27,04	26,83	26,66	26,90	27,15	27,03	26,97
	t _{st2}	°C	hlava 1,1 m	02	25,24	25,27	25,17	25,25	25,42	25,49	25,42
	t _{st3}	°C	hlava 1,1 m	03	26,30	26,24	26,12	26,26	26,44	26,45	26,39
	t _{st4}	°C	hlava 1,1 m	04	25,48	25,33	25,18	25,36	25,56	25,52	25,44
	t _{st5}	°C	hlava 1,1 m	05	23,57	23,50	23,39	23,51	23,68	23,71	23,63
	t _{st6}	°C	hlava 1,1 m	06	23,95	23,98	23,89	23,96	24,09	24,22	24,13
	t _{st7}	°C	pravý bok	41	14,71	14,68	14,66	14,80	14,89	14,80	14,76
	t _{st8}	°C	levý bok	41	14,71	14,68	14,66	14,80	14,89	14,80	14,76
Teplota povrchu	t ₁₁	°C	pravý bok	61	25,60	25,80	25,90	26,00	26,10	26,20	26,30
	t ₁₂	°C	zadní stěna	42	40,57	37,41	38,45	39,48	39,96	38,20	38,03
	t ₁₃	°C	dveře	-							
	t ₁₄	°C	podlaha	46	23,49	23,63	23,69	23,73	23,80	23,87	23,91
	t ₁₅	°C	strop	62	26,10	26,50	26,60	26,80	27,00	27,10	27,20
	t ₁₆	°C									

chlazení levou stěnou, vytápění čelní stěnou, čidla 0,75m od chladicí stěny, 1,5m od vytápěné stěny.

max ster.	°C	27,04	26,83	26,66	26,90	27,15	27,03	26,97
min ster.	°C	23,57	23,50	23,39	23,51	23,68	23,71	23,63
asymetrie	°C	3,47	3,33	3,27	3,39	3,47	3,32	3,34
rozdíl teplot stěn pravá levá	°C	10,89	11,12	11,24	11,20	11,21	11,40	11,54
rozdíl teplot podlaha strop	°C	2,61	2,87	2,91	3,07	3,20	3,23	3,29
rozdíl hlava kotníky vzduch	°C	2,60	2,40	2,30	2,30	2,60	2,90	3,00
rozdíl hlava kotníky kulový tep	°C	1,31	1,23	1,21	1,33	1,37	1,26	1,25

Tabulka 2 – Příklad záznamu naměřených dat

Po analýze záznamů z měření byla pro každou variantu a uspořádání vyhodnocena jedna hodnota každé veličiny, která reprezentovala dlouhodobý průměr v porovnání jednotlivých variant. Byly použity hodnoty průměru s vyloučením odlehlých hodnot, vzniklých aktuální přesností měření, nebo chybě na lidském faktoru.

Z těchto průměrných dat byla vytvořena tabulka výsledných naměřených dat

Měřená veličina	Označení	Jednotky	Místo měření	Varianta 1			Varianta 2			Varianta 3			Varianta 4		
				1a	1b	1c	2a	2b	2c	3a	3b	3c	4a	4b	4c
Teplota vzduchu	$t_{a1.1}$	°C	hlava 1,1 m	25,80	26,12	26,22	26,14	26,16	26,33	26,14	26,00	26,09	26,29	26,05	26,21
	$t_{a0.1}$	°C	kotlíky 0,1 m	24,23	25,12	25,08	24,90	26,79	26,61	23,36	23,10	23,33	25,09	25,08	24,69
Rychlost proudění vzduchu	$v_{a1.1}$	m/s	hlava 1,1 m	0,020	0,020	0,020	0,019	0,019	0,030	0,015	0,019	0,017	0,051	0,023	0,015
	$v_{a0.1}$	m/s	kotlíky 0,1 m	0,193	0,056	0,050	0,294	0,095	0,073	0,117	0,137	0,159	0,234	0,263	0,231
Teplota kulového teploměru	$t_{k1.1}$	°C	hlava 1,1 m	25,08	25,47	26,01	25,41	25,39	26,02	26,28	25,49	26,33	26,53	25,58	26,10
	$t_{k0.1}$	°C	kotlíky 0,1 m	24,31	25,46	25,37	25,62	26,91	26,98	24,69	24,13	24,79	26,25	25,45	25,81
Stereoteplota	t_{s1}	°C	zadní stěna	25,61	25,95	26,23	25,60	25,53	25,83	27,81	27,20	28,44	27,23	26,43	27,31
	t_{s2}	°C	strop	25,76	26,09	26,38	25,73	25,57	25,94	26,37	25,55	25,89	26,54	25,56	25,80
	t_{s3}	°C	pravá stěna	26,75	27,09	27,27	27,05	27,01	27,22	26,78	26,56	27,36	27,16	26,90	27,41
	t_{s4}	°C	podlaha	24,47	24,93	25,58	25,27	25,33	26,14	26,46	25,62	27,18	26,93	25,84	26,71
	t_{s5}	°C	levá stěna	23,35	23,70	24,81	23,57	23,54	24,74	25,08	23,76	24,55	25,22	23,71	24,20
	t_{s6}	°C	dveře	24,54	25,07	25,76	25,34	25,39	26,26	25,19	24,22	24,54	26,10	25,03	25,19
Teplota povrchu	t_{p1}	°C	levý bok	14,81	14,86	14,80	14,59	14,65	14,69	14,76	14,75	14,71	14,62	14,57	14,62
	t_{p2}	°C	pravý bok	40,62	39,08	39,12	31,61	31,28	30,84	26,66	26,40	26,81	26,59	26,68	26,86
	t_{p3}	°C	zadní stěna	26,50	27,12	27,30	26,53	26,68	26,76	38,42	38,76	38,01	31,44	32,26	32,17
	t_{p4}	°C	dveře	26,50	27,12	27,30	26,53	26,68	26,76	26,66	26,40	26,81	26,59	26,68	26,86
	t_{p5}	°C	podlaha	25,95	26,13	26,22	30,95	30,52	30,53	24,18	24,02	24,44	30,56	29,54	29,78
	t_{p6}	°C	strop	28,02	28,76	28,30	27,00	27,20	27,33	27,74	27,40	27,91	27,23	27,40	27,76

Tabulka 3 - Tabulka výsledných naměřených hodnot

2.6 POSOUZENÍ

2.6.1 VÝPOČET

Výpočty byly provedeny dle metodiky ČSN EN ISO 7730, pomocí vzorců uvedených v kapitole 1.8.4.3.

Byl proveden výpočet předpovědi středního tepelného pocitu (PMV) a složek místního tepelného diskomfortu. Konkrétně průvanu, vertikálních rozdílů teploty vzduchu, teplé a chladné podlahy a asymetrické radiace s ohledem na teplou stěnu, chladnou stěnu a teplý strop. Vzhledem k charakteru modelovaného prostředí byla problematika místního diskomfortu způsobeného chladným stropem z celkového posuzování vyřazena.

Výpočet byl prováděn s pomocí tabulkového softwaru MS Excel s jeho dalším využitím v tvorbě přehlednějšího grafického znázornění naměřených a vyhodnocených dat.

2.6.2 LIMITNÍ HODNOTY

Přípustné hodnoty středního tepelného pocitu, nebo složek místního tepelného diskomfortu jsou pro jednotlivé kategorie tepelného prostředí uvedeny v příloze A normy ČSN EN ISO 7730.

Kategorie	Tepelný stav těla jako celku		Místní diskomfort			
	PPD %	PMV	DR %	vertikálním rozdílem teploty vzduchu	PD % způsobený teplou nebo chladnou podlahou/floor	asymetrií radiace
A	< 6	- 0,2 < PMV < + 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	- 0,5 < PMV < + 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	- 0,7 < PMV < + 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Tabulka 4 - Kategorie tepelného prostředí [11]

Pro posouzení splnění požadavků dle NV 361/2007 je třeba vycházet z přílohy č.1, část A. Jsou zde stanoveny hodnoty pro přípustný horizontální rozdíl mezi stereoteplotou a teplotou kulového teploměru na úrovni hlavy, a přípustný horizontální rozdíl teploty kulového teploměru na úrovni hlavy a úrovni kotníků.

Posouzení je uvažováno pro práci třídy I a IIa vykonávanou na klimatizovaném pracovišti.

(tg)hlava	Přípustný horizontální rozdíl $\Delta(t_{st}-t_g)$ na úrovni hlavy [°C]			
	Vůči chladnému povrchu		Vůči teplému povrchu	
	Kategorie A, B	Kategorie C	Kategorie A, B	Kategorie C
	$\Delta(t_{st}-t_g)$ [°C]	$\Delta(t_{st}-t_g)$ [°C]	$\Delta(t_{st}-t_g)$ [°C]	$\Delta(t_{st}-t_g)$ [°C]
19	0,4	-0,9	6,8	8,1
20	0,1	-1,2	6,6	7,9
21	-0,3	-1,6	6,2	7,5
22	-0,9	-2,2	5,6	6,9
23	-1,6	-2,9	4,9	6,2
24	-2,5	-3,8	3,9	5,3
25	-3,6	-4,9	2,9	4,2
26	-4,6	-6,2	1,9	3,2
27	-6,1	-7,4	0,6	1,9

Tabulka 5 - Přípustný horizontální rozdíl $\Delta(t_{st}-t_g)$ na úrovni hlavy [12]

t_g na úrovni hlavy[°C]	$(t_g \text{ hlava} - t_g \text{ kotník})^*[\text{°C}]$	
	Kategorie A, B	Kategorie C
19	0,0	0,5
20	0,0	1,0
21	0,0	1,5
22	0,5	2,0
23	1,5	3,0
24	2,5	3,5
25	3,5	4,5
26	4,5	5,5
27	5,5	6,5

Tabulka 6 - Přípustný horizontální rozdíl mezi teplotou kulového teploměru (t_g) na úrovni hlavy a na úrovni kotníků [12]

2.6.3 VÝSLEDKY

Z výše uvedených kritérií a vzorců z kapitoly 1.8.4.3 byly vypočítány výsledné hodnoty.

Pro rychlé porovnání výsledků jsou hodnoty znázorněny graficky, podle splnění, nebo nesplnění přípustných hodnot dané kategorie A, B, nebo C, dle ČSN EN ISO 7730 a NV 361/2007

Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C	Nesplňuje
-------------	-------------	-------------	-----------

Tabulka 7 - Kategorie

ČSN EN ISO 7730	Varianta 1			Varianta 2			Varianta 3			Varianta 4		
	1a	1b	1c	2a	2b	2c	3a	3b	3c	4a	4b	4c
Místní tepelný diskomfort												
Průvan hlava 1,1m DR %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00
kotníky 0,1m DR %	17,6	1,4	0,2	28,5	4,8	3,0	9,7	12,4	14,9	20,6	24,0	21,2
Vertikální rozdíly teploty vzduchu PD %	1,19	0,74	0,83	0,90	0,54	0,40	3,31	3,63	3,24	0,87	0,72	1,15
Teplé a chladné podlahy PD %	6,98	7,17	7,28	17,58	16,32	16,35	5,76	5,72	5,85	16,43	13,65	14,26
Asymetrická radiace												
a) teplý strop Δt_{pr}	1,29	1,16	0,80	0,46	0,23	-0,19	-0,10	-0,07	-1,29	-0,39	-0,28	-0,91
PD %	1,31	1,17	0,79	0,46	0,24	-0,15	-0,07	-0,04	-1,04	-0,32	-0,23	-0,75
b) chladná stěna Δt_{gr}	3,40	3,39	2,46	3,48	3,46	2,48	2,73	3,44	3,90	2,01	3,18	3,21
PD %	0,43	0,43	0,31	0,45	0,44	0,32	0,34	0,44	0,51	0,27	0,40	0,41
d) teplá stěna Δt_{gr}	3,40	3,39	2,46	3,48	3,46	2,48	2,73	3,44	3,90	2,01	3,18	3,21
PD %	-0,69	-0,69	-0,82	-0,68	-0,68	-0,82	-0,78	-0,68	-0,62	-0,88	-0,72	-0,72
Předpověď středního tepelného komfortu t_{ci}	29,4	31,0	30,7	30,6	30,6	30,7	31,2	30,6	30,8	30,9	30,6	30,8
h_c	3,95	3,54	3,47	4,79	3,45	3,45	3,58	3,48	3,59	4,57	4,57	4,24
PMV	0,45	-0,17	0,25	-0,33	0,10	0,26	0,00	0,09	0,24	-0,01	-0,25	0,01
	B	A	B	B	A	B	A	A	B	A	B	A
NV 361/2007	Varianta 1			Varianta 2			Varianta 3			Varianta 4		
	1a	1b	1c	2a	2b	2c	3a	3b	3c	4a	4b	4c
Přípustné hodnoty nastavení mikroklimatických podmínek pro klimatizované pracoviště třídy I a IIa $t_{g,1}$	25,08	25,47	26,01	25,41	25,39	26,02	26,28	25,49	26,33	26,53	25,58	26,10
Přípustné rozdíly mezi stereoteplotou a výslednou teplotou kulového teploměru na úrovni hlavy												
t_g hlava	25	25	26	25	25	26	26	25	26	27	26	26
$\Delta(t_{st} - t_g)$ vůči chladnému	-1,73	-1,78	-1,20	-1,84	-1,85	-1,28	-1,20	-1,73	-1,78	-1,31	-1,87	-1,90
vůči teplému	1,67	1,62	1,26	1,64	1,61	1,20	1,53	1,72	2,11	0,70	1,32	1,31
Přípustný rozdíl mezi teplotou kulového teploměru na úrovni hlavy a na úrovni kotníků t_g hlava - t_g kotník	0,77	0,02	0,63	0,21	1,52	0,95	1,59	1,36	1,54	0,28	0,13	0,29

Tabulka 8 - Výsledné hodnoty posouzení dle ČSN EN ISO 7730 a NV 361/2007

2.7 VYHODNOCENÍ

Z tabulky Výsledných hodnot posouzení dle ČSN EN ISO 7730 a NV 361/2007 je patrné, že všechny varianty splnily počáteční předpoklad vyhovujícího celkového středního tepelného pocitu PMV. Všechny varianty splnily kategorii A a B, což lze považovat za přijatelné podmínky. Nejhůře dopadla Varianta 1a, (ochlazovaná levá stěna, ohřívána pravá stěna, bez zábrany) kdy hodnota PMV dosáhla 0,45 znázorňující tepelný pocit na rozmezí *neutrálně* a *mírné teplo*. Grafický přepočtení na PPD by odpovídal přibližně procentuálnímu podílu nespokojených 8%. Tuto hodnotu považuji za přípustnou pro další pokračování ve vyhodnocování experimentu s ohledem na místní tepelný diskomfort

2.7.1 VYHODNOCENÍ MÍSTNÍHO TEPELNÉHO DISKOMFORTU

Průvan

V úrovni hlavy vzhledem k výsledkům experimentálního měření nehrozí žádné riziko vzniku průvanu ani u jedné z uvažovaných variant. Na rozdíl od předpokládaného výskytu průvanu u kotníků. Ve variantách 1 a 2 je patrná výrazná změna při osazení zábrany. Vyšší zábrana už nemá na riziko vzniku průvanu tak závažný vliv. U varianty 3 je vidět závislost rizika vzniku průvanu na vzdálenosti od chladicí stěny. Pravděpodobně vlivem konvekčního proudění vzduchu dochází v rohu místnosti k nejvyššímu riziku vzniku průvanu. I tak ale hodnota splňuje požadavky kategorie B

V poslední variantě 4, kdy je do modelování slunečního záření a vnitřních tepelných zisků zapojeno i vytápění podlahy, došlo k zvýšenému nárůstu průvanu. Dochází zde k vyšším rychlostem vzduchu a i přes výrazně vyšší teploty vzduchu, než je u varianty 3, došlo k narušení komfortu, spadajícího až do kategorie C. Hodnoty DR se oproti variantě 3 zvýšily přibližně na dvojnásobek.

Pokud není sedící osoba v bezprostřední blízkosti chladné stěny, nehrozí zvýšené riziko vzniku průvanu. V případě zvýšené rychlosti vzduchu v oblasti kotníků lze jednoduše proud vzduchu přerušit, jak bylo simulováno zábranou. U varianty 4 předpokládám vznik průvanu nevhodným modelováním vnitřních tepelných zisků podlahovým vytápěním. Jako v předchozí situaci předpokládám v reálné kanceláři mírnější podmínky.

Vertikální rozdíly teploty vzduchu

U varianty 1, 2 a 4 jsou splněny požadavky pro kategorii A. Výjimku pak tvoří varianta 3, kde všechny její uspořádání spadají do kategorie B. Hodnota PD je 3x až 4x vyšší než u ostatních variant. Předpokládám, že je tak způsobeno vzájemnou kolmostí ohřívání a chlazení stěn. V takovém systému dochází k výraznému konvekčnímu proudění pouze lokálně v blízkosti stěn, a zbytek místnosti je bez měřitelného pohybu vzduchu. Tímto omezeným pohybem vzduchu pak dochází k výraznější stratifikaci teploty a vertikálním rozdílům teplot.

V reálné kanceláři toto riziko nepovažuji za důležité vzhledem k nutnému pohybu osob a činností vnitřního zařízení. Předpokládám, že stratifikace nebude v reálné kanceláři tak výrazná.

Teplé a chladné podlahy

Diskomfort způsobený teplými nebo chladnými podlahami, můžeme testovat pouze u variant 1 a 3, u kterých není k simulaci solárních zisků využito podlahového vytápění. U obou variant hodnoty spadají do kategorie A. V modelové kanceláři není předpokládán kontakt nechráněnou pokožkou s podlahou. I tak jsou ale požadavky splněny.

Asymetrická radiace

Posouzení asymetrické radiace je hlavní důvod provádění experimentu. Z výsledných hodnot je ale patrné, že všechny varianty a uspořádání splňují kategorii A. Je tak pravděpodobně způsobeno relativně vysokou teplotou chladících ploch, která je limitována kondenzací vodní páry a není schopná způsobovat nekomfortní prostředí.

Z výsledných hodnot PD varianty 1 a 2 je porovnatelný rozdíl asymetrické radiace u pracovní pozice s vysokou zábranou a s nízkou zábranou, popř. bez zábrany. U variant 3 a 4 stojí za povšimnutí závislost asymetrické radiace na vzdálenosti od chladící a ohřívané stěny. Nejlepší pracovní prostředí je uprostřed místnosti, nejhorší přímo v rohu mezi chladící a ohřívanou stěnou.

Nutno zmínit, že všechny pozice jsou pro Kategorii A vyhovující. V testu bylo dosaženo nejhorší hodnoty $PD = 0,51 \%$ u varianty 3c, při rozdílu radiace $\Delta t_{pr} = 3,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Limitní hodnota pro Kategorii A je 5%, což odpovídá rozdílu radiace Δt_{pr} kolem $10 \text{ }^\circ\text{C}$

Vyšších hodnot PD je dosahováno u posouzení na teplý strop $PD = 1,31 \%$, nebo posouzení na teplou stěnu $PD = 0,88 \%$. Všechny hodnoty PD jsou pod limitní hodnotou 5 % a splňují požadavky pro kategorii A

Detailněji lze závislost polohy sedící osoby na asymetrii radiace sledovat z grafu na obrázku 23, ve kterém jsou znázorněny naměřené stereoteploty pro jednotlivé plošky všech uvažovaných variant a uspořádání. Pro orientaci je doplněna osa znázorňující průměrnou stereoteplotu – teplotu kulového teploměru v úrovni hlavy.

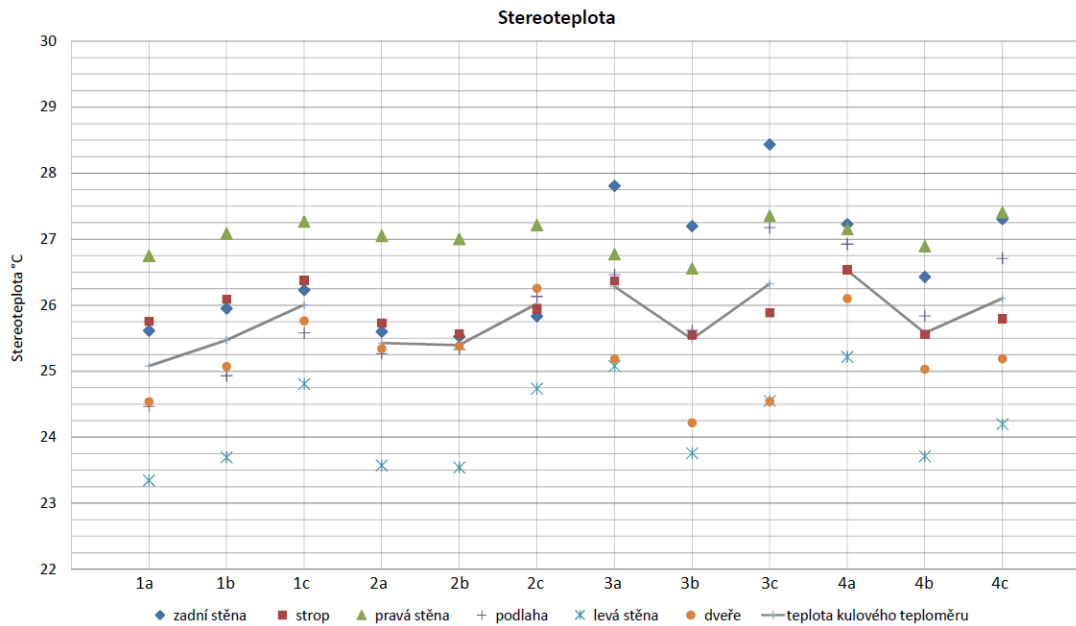
Kontrolu závislosti teploty povrchu na stereoteplotě je možné posoudit na obrázku 24 s grafem povrchových teplot. V grafu chybí teplota stěny s dveřmi. Tato stěna nebyla doplněna čidlem povrchové teploty, vzhledem k jejím odlišnostem od ostatních stěn.

Z grafu stereoteploty v případech Varianty 1 a 2 lze sledovat účinek zvýšené překážky na stereoteplotu od levé chladící stěny. U uspořádání 1c a 2c s vysokou zábranou je patrný přibližně poloviční rozdíl mezi teplotou kulového teploměru a stereoteplotou, než je tomu u uspořádání bez stínící zábrany. Dále pak stojí za povšimnutí snižující se efektivita chladících stěny při zvyšování zábrany. Teplota vzduchu mírně stoupá, povrchová teplota ohřívané stěny klesá, stereoteplota od ohřívané stěny stoupá, a s ní i teplota kulového teploměru.

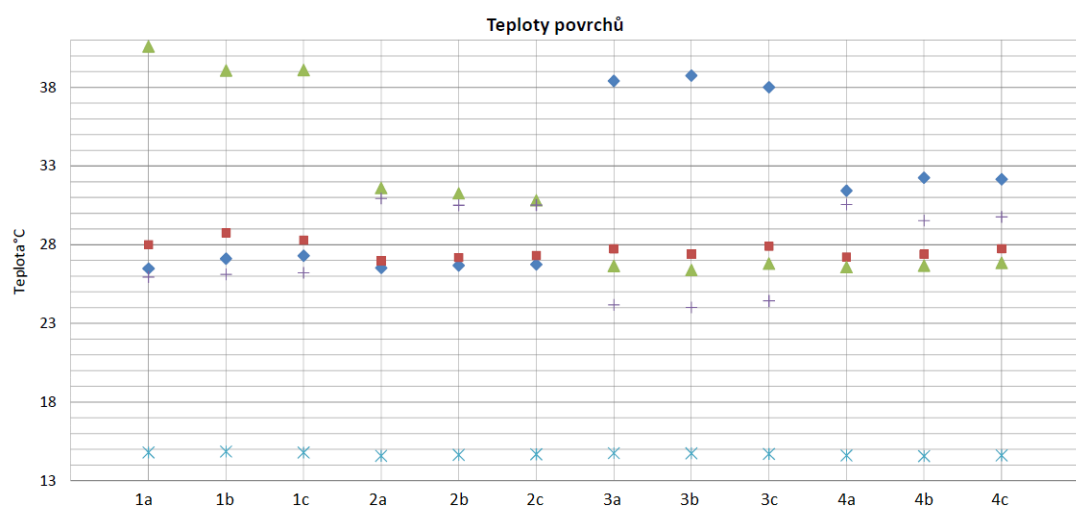
U variant 3 a 4 stojí za povšimnutí rozložení operativní teploty (teploty kulového teploměru v úrovni hlavy) v prostoru místnosti. Výsledná operativní teplota je závislá na velikosti prostorového úhlu od zdrojů sálavého tepla a chladu, a tím i vzdálenosti od chlazených a ohřívaných stěn. Nejvýraznějšího rozdílu stereoteplot je dosaženo vždy v rohu místnosti mezi ohřívanou a ochlazovanou stěnou, kdy je prostorový úhel dopadající sálavé složky největší. Nejideálnější pracovní pozice, co se týče rozdílů

stereoteplot dle naměřených údajů, vychází uprostřed místnosti. Pravděpodobně ale tomu tak bude v nejbližším rohu od chladicí a ohřívání stěny. Z této pozice jsou nejvýraznější sálavé složky pod nejmenším úhlem z podobných směrů

Ve variantě 3 je patrný vliv velikosti stěn na měření stereoteploměru. Ohřívání zadní stěna je o 17 % větší než stěna pravá. V experimentech u varianty 1 a varianty 3 dosahuje zadní stěna nepatrně nižších teplot. Ve výsledku je ale díky její větší ploše výraznější tepelný výkon, který se projeví na stereoteploměru vlivem většího prostorového úhlu.



Obrázek 23 – Stereoteplota



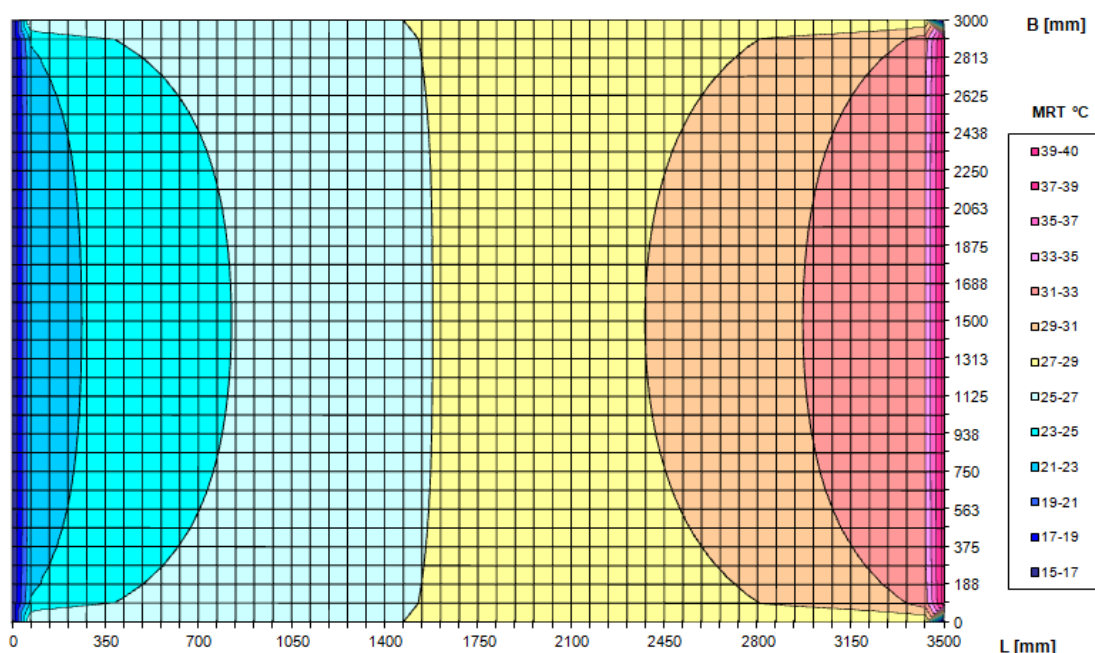
Obrázek 24 - Teploty povrchů

2.7.2 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ

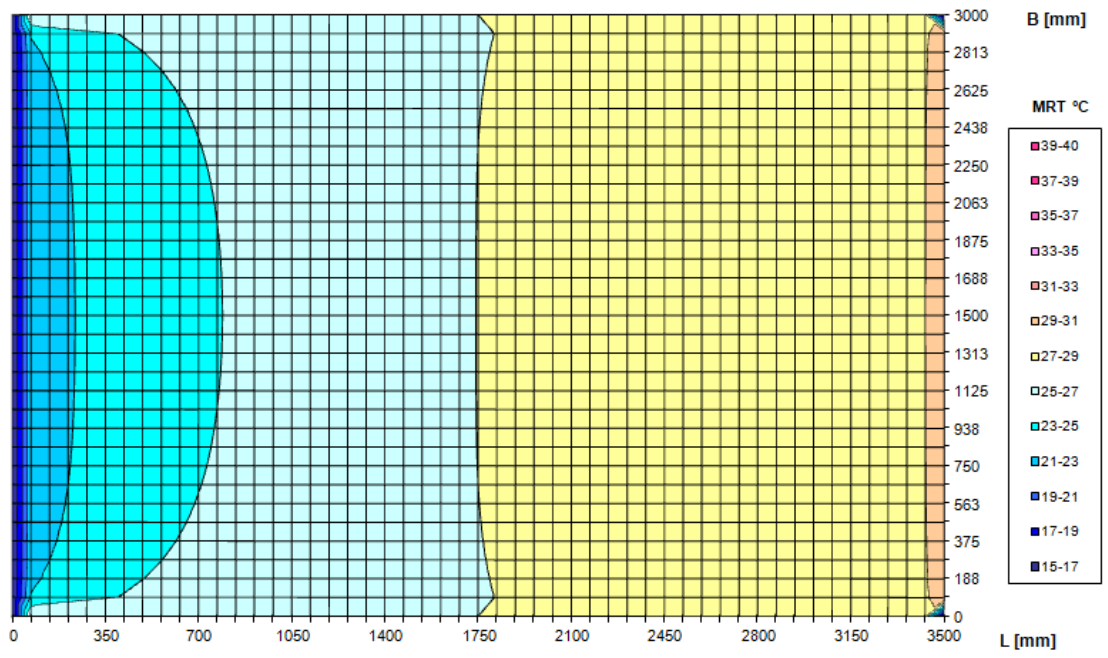
Pro orientační představu o rozložení střední radiální teploty v místnosti, bylo využito softwaru MRT Analysis, jehož autorem je Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D. z fakulty strojní ČVUT v Praze.

Rozložení operativní teploty v ploše bylo řešeno ve výšce 1,1m nad podlahou, které odpovídá poloha hlavy sedící osoby. Do zadání výpočtového softwaru byly použity hodnoty o teplotě všech povrchů a teplota vzduchu měřená ve výšce 1,1m. Tyto data byly vytvořeny zprůměrováním hodnot z tabulky 3 – *Tabulka průměrných naměřených hodnot*. Grafický výstup z programu pro jednotlivé varianty je na následujících obrázcích.

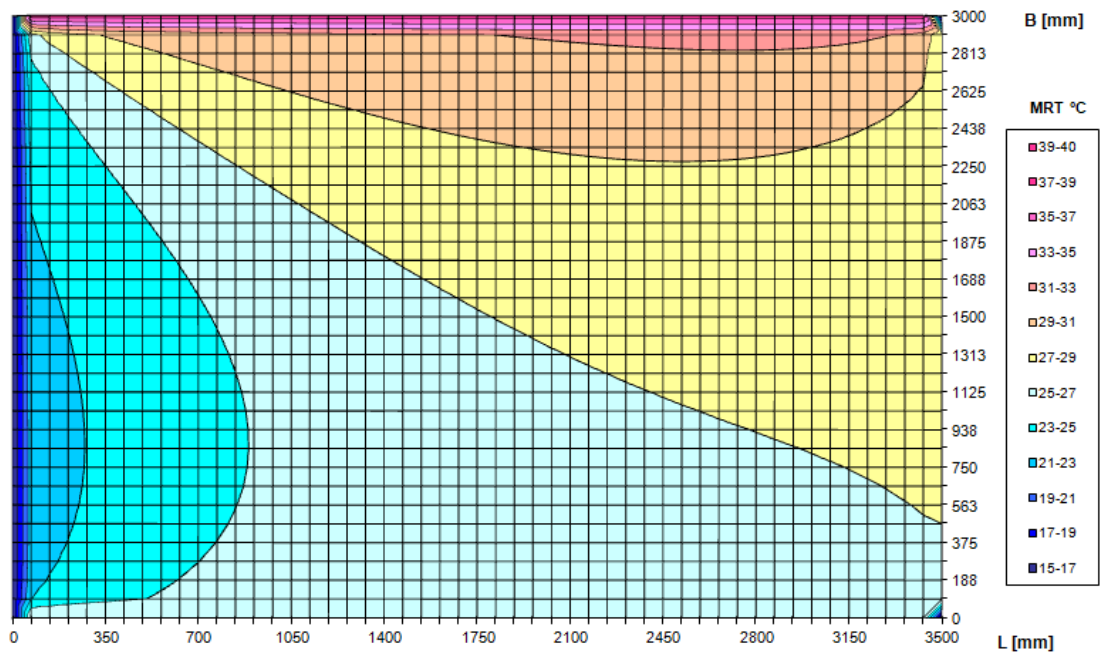
U variant 1b, 1c, 2b a 2c, u kterých je v modelové kanceláři počítáno se zábranou bude průběh teplot narušený, následující zobrazení je pro tyto varianty zavádějící.



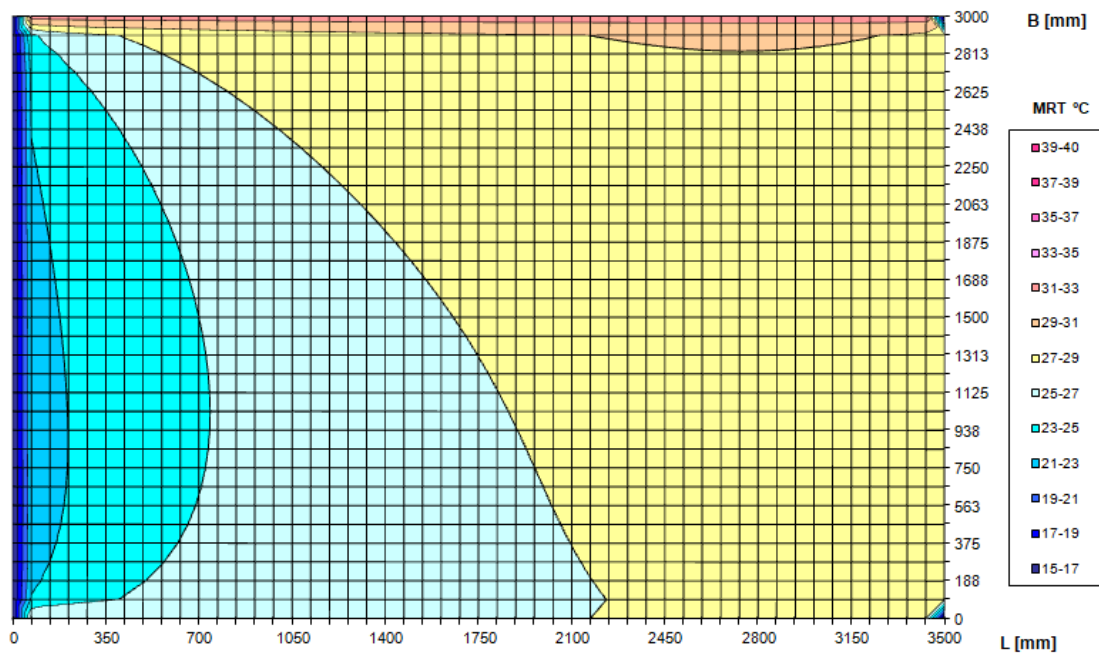
Obrázek 25 - Střední radiální teplota_Varianta 1



Obrázek 26 - Střední radiační teplota_Varianta 2



Obrázek 27 - Střední radiační teplota_Varianta 3



Obrázek 28 - Střední radiační teplota_Varianta 4

Výše uvedené obrázky grafického znázornění rozložení střední radiační teploty, odpovídají hodnotám z naměřených dat, uvedených v tabulce 9 - *Tabulka výsledných naměřených hodnot*. Lze tedy předpokládat, že simulace výpočtovým softwarem do určité míry odpovídá reálným hodnotám. Nejvýhodnější pracovní pozice v kanceláři by v tomto znázornění odpovídala světle modré barvě (25-27 °C).

2.7.3 POZNAKY PRO VYLEPŠENÍ EXPERIMENTU

Koncept podlahového vytápění sloužící k simulaci solárních zisků se neprojevil jako výhodný systém a v celkovém posouzení výsledků je nutné ke způsobu simulace přihlížet. Solární záření by v reálné kanceláři nedopadalo na celou plochu, ale např. pod stolem by bylo stíněno. Vzhledem k omezeným možnostem regulace podlahového vytápění v ploše v měřicí kabině, by bylo vhodné na „stíněná místa“ položit desky tepelné izolace, např. EPS, a omezit tak tepelné zisky v konkrétním testovaném místě. Pravděpodobně by tak bylo docíleno nižších rychlostí proudění vzduchu a nižší teploty vzduchu v úrovni kotníků u varianty 2 a 4. Další možností by pak bylo dokonalejší modelování vnitřních tepelných zisků pomocí samostatných zdrojů tepla, jako v původních testovacích měřeních, bylo by však nutné detailněji zapracovat na jejich konstrukci a možnosti kontrolovatelně regulovat jejich tepelný výkon.

Vzhledem k tomu, že experiment měl za úkol otestovat asymetrii osálení chladnými stěnami, by bylo vhodné experimentálně zjistit limitní přijatelnou teplotu povrchu. Bez ohledu na kondenzaci vlhkosti na površích, snižovat teplotu povrchu na únosnou úroveň pro komfortní vnitřní prostředí. Pro tyto účely by ale v laboratoři nebyl chladicí výkon pro zajištění dodávky chladicí vody o dostatečně nízké teplotě.

Experiment by bylo vhodnější provádět v čtvercové místnosti. Rozdílné velikosti teplých ploch u varianty 1 a 3 mohou vést k zavádějícím výsledkům o vhodném rozložení sálavých stěn.

U variant 3 a 4 proměřit i pozici v opačném rohu od variant 3c a 4c a posoudit tak experimentálně především rozložení operativní teploty po celé ploše myšlené kanceláře.

Zajímavým testem vypočtených hodnot by bylo umístění osob do klimatizované místnosti a na základě dotazníku porovnat PPD s vypočteným PMV

2.8 ZÁVĚR

Druhá experimentální část diplomové práce byla věnována posouzením vlivu polohy chladících stěn na finální tepelný komfort pracujících osob. Je popsán celkový průběh experimentu od prvotního konceptu až k finálním výsledkům a následnému posouzení.

Měření probíhalo v měřicí kabině s regulovatelnou teplotou stěn podlahy a stropu, díky zabudovaným kapilárním rohožím. Do kabiny byla umístěna soustava čidel včetně kulového stereoteploměru snímající tepelnou pohodu předpokládané osoby provádějící lehkou práci vsedě. Byla monitorována stereoteplota v úrovni hlavy, teplota vzduchu, rychlost proudění vzduchu a teplota kulového teploměru v úrovni hlavy a kotníků. Zároveň byla snímána povrchová teplota povrchů pro lepší kontrolu nad prováděním experimentu.

Po první fázi testovacích měření byly stanoveny celkem 4 varianty simulace letního stavu v kanceláři klimatizované stěnovým chlazením. Každá ze čtyř variant s třemi možnými uspořádáními zařízení a polohou sedící osoby. Byly stanoveny výchozí hodnoty pro metabolismus pracujících osob a jejich tepelný odpor oděvu. Součástí testovaných variant bylo i použití zástěny sloužící k odstínění předpokládaného sálání od chladných stěn.

Veškerá data z měření byla zpracována a vyhodnoceny reprezentativní hodnoty pro každou variantu a uspořádání. Tyto hodnoty pak byly podrobeny posouzení dle platné legislativy ČSN EN ISO 7730 a NV 361/2007. Vyhodnocené data pak byly prezentovány ve formě tabulky výsledných hodnot.

Místní diskomfort asymetrie osálení nepřekročil v žádné variantě požadavky pro splnění kategorie A. Všechny varianty i uspořádání pozice sedící osoby v kanceláři jsou tedy z hlediska asymetrie osálení přijatelné. I tak je ale patrný výrazný vliv zábrany na zlepšení komfortu pracujících osob. Instalace vysoké zábrany snížila rozdíl teploty kulového teploměru a stereoteploty přibližně na poloviční hodnotu.

Výraznější problematiku způsobil diskomfort zapříčiněný průvanem v oblasti kotníků při umístění měřicí sestavy v blízkosti chladící stěny. V těchto případech se ale osvědčila jako ochrana instalovaná zábrana, která lokálně odstíní vznik průvanu. Zvýšení rizika vzniku průvanu je pak patrné u variant s vzájemnou kolmostí chlazené a ohříváné stěny. Je opět patrná závislost na vzdálenosti od stěn s upravovanou teplotou povrchu.

Jediná varianta s problematikou větších vertikálních rozdílů teploty vzduchu byla varianta 3. Vlivem vzájemné kolmosti ohříváné a chlazené stěny nedochází k takovému proudění vzduchu jako u ostatních variant. Dochází pak k výraznější stratifikaci tepla a vertikálním rozdílům teploty vzduchu. Toto zvýšení je patrné i z posouzení dle NV 361/2007 o rozdílech teploty kulového teploměru v úrovni hlavy a kotníků.

Optimální pracovní pozici lze tedy obecně pro všechny varianty stanovit ve vzdálenosti od 750 mm do 1750 mm od chladící stěny. Pro přesnější polohu dle jednotlivých variant a uspořádání se lze řídit grafickým znázorněním střední radiační teploty v kapitole 2.7.2. V pozicích bližších než 1000mm je vhodné doplnit zábranu, která v úrovni kotníků přeruší tok chladného vzduchu a zmírní riziko vzniku průvanu.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] Teplotní komfort při práci v kanceláři. Bozpprofi [online]. Praha: Dashöfer Holding, Ltd. a Verlag Dashöfer, ©1997-2018, 18. 5. 2013 [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: https://www.bozpprofi.cz/33/teplotni-komfort-pri-praci-v-kancelari-uniqueidgOkE4NvrWuOKaQDKuox_Z2Rfx5RrOCVqI8IFxXkt6lc/
- [2] LAIN, Miloš. Nízkoenergetické chlazení budov. *TZB-info* [online]. 12. 11. 2003 [cit. 2018-12]. ISSN ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1702-nizkoenergeticke-chlazen-i-budov>
- [3] FENG, Jingjuan, Stefano SCHIAVON a Fred BAUMAN. Cooling load differences between radiant and air systems. *Energy and Buildings*[online]. Elsevier, 2013, (65), 310 - 321 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813003472?via%3Dihub>
- [4] RHEE, Kyu-Nam, Bjarne W. OLESEN a Kwang Woo KIM. Ten questions about radiant heating and cooling systems. *Buildings and Enviroment* [online]. Elsevier, 2017, 2017(112), 367-381 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316304541>
- [5] MIKESKA, Tomas a Svend SVENDSEN. Dynamic behavior of radiant cooling system based on capillary tubes in walls made of high performance concrete. *Energy and buildings* [online]. Elsevier, 2015 (108), 92-100 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815302346>
- [6] ZMRHAL, Vladimír. *Sálavé chladicí systémy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04318-9.
- [7] ČSN EN 1264-2+A1. *Zabudované vodní velkoplošné otopné a chladicí soustavy - Část 2: Podlahové vytápění: Průkazné postupy pro stanovení tepelného výkonu výpočtovými a experimentálními metodami*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [8] ČSN EN 1264-5. *Zabudované vodní velkoplošné otopné a chladicí soustavy - Část 5: Otopné a chladicí soustavy zabudované v podlahách, stropích a stěnách - Stanovení tepelného výkonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [9] WUFENG, Jin, Jia LIZHI, Wang QIAN a Yu ZHIHAO. Study on Condensation Features of Radiant Cooling Ceiling. In: *Procedia Engineering: Volume 121 2015* [online]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2015, s. 1682-1688 [cit. 2017-11-06]. ISBN 1877-7058. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815029458>

- [10] NUTPRASERT, Nipaporn a Pipat CHAIWIWATWORAKUL. Radiant Cooling with Dehumidified Air Ventilation for Thermal Comfort in Buildings in Tropical Climate. *Energy Procedia* [online]. 2014, 2014 (52), 250-259 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214009382>
- [11] TANG, Haida, Xiao-Hua LIU a Yi JIANG. Theoretical and experimental study of condensation rates on radiant cooling surfaces in humid air. *Building and Environment* [online]. 2016, 2016 (97), 1-10 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231530202X>
- [12] LE DRÉAU, Jérôme, Per HEISELBERG a Rasmus Lund JENSEN. A full-scale experimental set-up for assessing the energy performance of radiant wall and active chilled beam for cooling buildings. *Building Simulation: An International Journal* [online]. 2015, 2015 (8), 39-50 [cit. 2017-12-04]. ISSN 1996-3599. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12273-014-0190-7>
- [13] ČSN EN ISO 7730. *Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. 2006. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [14] Nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, p. o., 2007, ročník 2007, částka 111, číslo 361. Dostupné také z: <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu>
- [15] YUJIA, Yang, Wang YU, Yuan XIAOLEI, Zhu YUTONG a Zhang DANDAN. Simulation study on the thermal environment in an office with radiant cooling and displacement ventilation system. In: *Procedia Engineering: Volume 205 2017* [online]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2017, s. 3146-3153 [cit. 2017-11-06]. ISBN 1877-7058. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817346982>

OBRÁZKY

Obrázek 1 – Schéma chladicího zařízení [2]	10
Obrázek 2 - Plošné chlazení	11
Obrázek 3 - sestava čidel.....	23
Obrázek 4 - Natočení stereoteploměru.....	24
Obrázek 5 - Varianta 1	25
Obrázek 6 - Varianta 1a.....	26
Obrázek 7 - Varianta 1b	26
Obrázek 8 - Nízká zábrana	27
Obrázek 9 - Varianta 1c.....	27
Obrázek 10 - Vysoká zábrana.....	28
Obrázek 11 – Varianta 2.....	29
Obrázek 12 - Varianta 2a.....	29
Obrázek 13 - Varianta 2b	30
Obrázek 14 - Varianta 2c.....	30
Obrázek 15 – Varianta 3.....	31
Obrázek 16 - Varianta 3a.....	31
Obrázek 17 - Varianta 3b	32
Obrázek 18 - Varianta 3c.....	32
Obrázek 19 – Varianta 4.....	33
Obrázek 20 - Varianta 4a.....	33
Obrázek 21 - Varianta 4b	34
Obrázek 22 - Varianta 4c.....	34
Obrázek 23 – Stereoteplota	43
Obrázek 24 - Teploty povrchů	43
Obrázek 25 - Střední radiační teplota_Varianta 1.....	44
Obrázek 26 - Střední radiační teplota_Varianta 2.....	45
Obrázek 27 - Střední radiační teplota_Varianta 3.....	45
Obrázek 28 - Střední radiační teplota_Varianta 4.....	46

TABULKY

Tabulka 1 - Sedmibodová stupnice tepelných pocitů [11]	16
Tabulka 2 – Příklad záznamu naměřených dat	36
Tabulka 3 - Tabulka výsledných naměřených hodnot	37
Tabulka 4 - Kategorie tepelného prostředí [11].....	38
Tabulka 5 - Přípustný horizontální rozdíl $\Delta(t_{st} - t_g)$ na úrovni hlavy [12]	39
Tabulka 6 - Přípustný horizontální rozdíl mezi teplotou kulového teploměru (t_g) na úrovni hlavy a na úrovni kotníků [12].....	39
Tabulka 7 - Kategorie.....	39
Tabulka 8 - Výsledné hodnoty posouzení dle ČSN EN ISO 7730 a NV 361/2007	40