



# Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

## Fakulta aplikované informatiky

Disertační práce

### **Využití tepelně akumulčních materiálů typu PCM ve specifických aplikacích oboru techniky prostředí**

**Utilization of thermal storage materials PCMs in specific  
applications of environmental engineering**

Autor:	<b>Ing. Martin Koláček</b>
Studijní program:	Inženýrská informatika
Studijní obor:	Automatické řízení a informatika
Školitel:	prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
Konzultant:	Ing. Martin Zálešák, CSc.
Oponenti:	prof. Ing. Jiří Hirš, CSc. Ing. Petr Kučera, CSc. prof. Ing. František Drkal, CSc.

Zlín, září 2018

## **Poděkování**

Rád bych chtěl poděkovat svému konzultantovi Ing. Martinu Zálešákovi, CSc., za odborné vedení mé disertační práce během celého mého studia, za jeho cenné rady, připomínky a především zkušenosti, které jsem využil při řešení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat svému kolegovi Ing. Stanislavu Sehnálkovi, za pomoc při měřeních, úpravě laboratoře a při využití simulačních nástrojů.

## **Anotace**

Disertační práce představuje experimentální výzkum tepelně akumulčních materiálů. Tento výzkum se zabývá aplikací těchto materiálů a také problematikou dynamiky přenosu tepla z materiálů do okolního prostředí. Tepelně akumulční materiály Phase Change Materials (PCMs), umožňují svou schopností akumulovat velké množství energie. Pojednávávaná práce je zaměřena na využití tepelné akumulace ve formě tepla i chladu. Současným trendem je eliminace energetické náročnosti budov, předpokládá se efektivně navrhnout stavební objekt tak, aby dokázal snižovat výkyvy venkovního prostředí a zajistil optimální mikroklimatické podmínky uvnitř objektu s minimální potřebou energie. Tepelně akumulční materiály jsou významnou možností teplotní stabilizace vnitřního mikroklimatu budov. Doktorské studium je zaměřeno na výzkum chování PCMs a zefektivnění cyklického vybíjení a nabíjení akumulované energie. Identifikace a výsledná úprava bude následně sloužit pro návrh zařízení využívajícího PCMs.

## **Klíčová slova**

Akumulace energie, materiály s fázovou změnou PCM, tepelná stabilita, součinitel přestupu tepla, časová konstanta, efektivita akumulčního procesu

## **Annotation**

The dissertation thesis is an experimental research of heat storage materials. This research deals with the application of these materials as well as the dynamics of heat transfer from materials to the environment. Thermal energy storage materials Phase Change Materials (PCMs) are able to store a large amount of energy. This work is focused on utilization of heat accumulation in the form of heat and cold. Currently, there is a trend towards the elimination of the energy performance of buildings. It is expected to effectively design the building so as to reduce the fluctuations of the outdoor environment. The aim is to ensure the optimal microclimatic conditions within the building with minimal energy need. Thermal energy storage materials represent one of the important possibilities of thermal stabilization of the indoor microclimate of buildings. Doctoral study is focused on the research of the PCMs properties and streamlining cyclical discharge and charging of stored energy. Identification and final adjustment will use to design a device using PCMs.

## **Key words**

Energy accumulation, Phase Change materials (PCMs), thermal stability, heat transfer coefficient, time constant, efficiency of the accumulation process

# OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	7
ÚVOD .....	8
1. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU .....	9
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	11
3. POPIS KOMPLEXNÍHO VÝZKUMU A VÝVOJE PCMs.....	12
3.1 Stanovení požadovaných vlastností PCM .....	12
3.1.1 Využití termálních panelů obsahující PCMs .....	12
3.1.2 Využití panelů PCMs .....	13
3.1.3 Použité měřicí přístroje .....	13
3.2 Aplikace PCMs.....	16
3.3 Metody tepelné akumulace.....	17
3.4 Citelné teplo.....	17
3.5 Latentní teplo .....	18
3.6 Sdílení tepla .....	19
3.7 Tepelně akumulční materiály .....	22
3.8 Rozdělení tepelně akumulčních materiálů (PCMs).....	23
3.8.1 Organické látky .....	23
3.8.2 Anorganické látky .....	23
3.8.3 Eutektika.....	23
3.8.4 Specifické vlastnosti PCMs .....	24
3.8.5 Matematický popis numerického modelu PCM .....	25
3.9 Popis využitých tepelně akumulčních materiálů PCMs .....	27
3.9.1 DuPont Energain .....	27
3.9.2 Hexahydrát chloridu vápenatého .....	28
3.10 Aplikace PCMs v oblasti techniky prostředí.....	30
4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM PCMs.....	32
4.1 Experimentální měření transparentního prvku využívající PCMs .....	33
4.1.1 Proces krystalizace .....	36

4.1.2	Teplotní cykly.....	39
4.2	Akumulace energie v PCMs ve formě chladu .....	40
4.3	Přenos tepla z tepelně akumulčních materiálů do okolního prostředí ..	43
4.3.1	Experimentální využití nucené konvekce k zvýšení přestupu tepla z PCM do okolí.....	45
4.3.2	Chlazení termálního panelu .....	48
4.3.3	Chlazení tepelně akumulční desky Dupont Energain.....	49
4.3.4	Obrácený proces chladnutí PCM.....	52
4.4	Diferenční termická analýza PCM.....	53
4.5	Funkční vzorek chladicího stropu.....	55
4.5.1	Metodika měření chladicích prvků a úprava laboratoře .....	57
4.6	Měření chladicího výkonu chladicího stropu .....	61
4.6.1	Počáteční a okrajové podmínky měření .....	61
4.6.2	Výsledky měření chladicího výkonu chladicího stropu .....	62
4.7	Přerušovaný provoz chlazení chladicích stropů .....	66
4.8	Absorpce tepelné zátěže pomocí chladicích stropů s PCMs .....	70
5.	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI.....	73
6.	ZÁVĚR.....	74
7.	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA.....	76
	POUŽITÁ LETERATURA A ZDROJE .....	78
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA .....	84
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	87
	SEZNAM TABULEK .....	90
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	91

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

<u>Symbol</u>	<u>jednotka</u>	<u>význam</u>
$Q$	J	Teplo
$m$	kg	Hmotnost
$c_p$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Měrná tepelná kapacita
$\theta$	$^{\circ}\text{C}$	Teplota
$h$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	Entalpie
$h_c$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	Součinitel přestupu tepla
$\lambda$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
$\rho$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota
$A$	$\text{m}^2$	Plocha
$V$	$\text{m}^3$	Objem
$L_C$	m	Charakteristický rozměr
$P$	W	Výkon
$\tau$	s	Časová konstanta
$t$	s	Čas
$g$	W	Výkon vnitřního zdroje
$U$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	Součinitel prostupu tepla
$l_{pl}$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	Skupenské teplo fázové změny

## ÚVOD

Současným trendem v oblasti techniky prostředí je snižování energetické náročnosti budov. Tyto požadavky neustále nutí výrobce a projektanty vyrábět prvky techniky prostředí a především samotné stavby tak, aby byly pokryty vysoké požadavky nízkoenergetických staveb. Celosvětový trend rostoucích cen energií a také legislativní požadavky Evropské unie vedou uživatele domů k snižování samotné potřeby energie na provoz budov a využití obnovitelných zdrojů energie. Soustavně rostou lehké konstrukční stavby administrativní budovy i rodinné domy s moderními prvky architektury využívající prosklené části fasád.

Pasivní stavby jsou tvořeny jak masivními zděnými systémy, tak i konstrukcemi na bázi lehkého skeletu tedy moderní dřevostavby. Lehké konstrukce mají plošnou hmotnost nižší než  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , jak uvádí [7]. Obecně materiály s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi, na úkor objemové hmotnosti, nedisponují tepelně akumulací schopností, jakou mají masivní prvky například beton a cihly.

Důležitým faktem se tak stává vytvoření tepelné stability těchto specifických konstrukcí. Transparentní prvky obálky budov - okna a jiné prosvětlené konstrukce se navrhuje dle normativních požadavků s ohledem na požadavky hygienické. Předimenzování, velikost a nevhodná orientace konstrukčních prvků způsobuje v letním období přehřívání těchto objektů. Následně dochází k využívání clon nebo přímo k použití strojnímu chlazení, které je v případě rodinných domů velmi finančně náročné a zvyšuje provozně investiční náklady. Právě využití chladicích zařízení zatěžuje energetickou náročnost budovy a to i vzhledem k hygienickým požadavkům vnitřního mikroklimatu budovy. Proto se v dnešní době chlazení stává stěžejním problémem většiny objektů.

Jedním z možných způsobů jak zajistit teplotní stabilitu uvnitř budov je využít schopnosti tepelné akumulace budovy. Tuto schopnost lze zvýšit aplikací tepelně akumulčních materiálů PCMs. Použití a možnost využití těchto materiálů je zkoumána již celou řadu let, o čem svědčí řada publikačních výstupů v mnoha světových databázích [26],[33],[42].

Využití a uplatnění akumulace energie pomocí tepelně akumulčních materiálů představuje jednu z oblastí předpokládaného výzkumu. Specifická infrastruktura laboratoře techniky prostředí na Fakultě aplikované informatiky ve Zlíně



umožňuje výzkum a testování těchto materiálu v návaznosti na aplikovatelnost do specifického zařízení.

## 1. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

Akumulace energie, a to jak ve formě tepla nebo chladu, hraje významnou roli v mnoha oblastech techniky prostředí. Příkladem je sluneční záření a vysoká teplota v letních měsících, které způsobují přehřívání objektů. Zde je důležitá právě schopnost akumulace tepelné energie uvnitř konstrukce. Schopnost konstrukce ukládat přebytečnou energii může vést k výraznému snížení potřeby chlazení. Tohoto procesu lze také využít i během zimního období, kde lze využít akumulovanou energii na snížení potřeby energie na vytápění.

Tepelně akumulací materiály PCMs využívají látkovou přeměnu, tedy procesu tání a tuhnutí. Během těchto procesů akumulací materiály vydají nebo pohltí velké množství energie tzv. latentní teplo. Existuje mnoho druhů tepelně akumulací materiálů, které se dělí dle chemického složení na organické, anorganické a také eutektika. Fyzikální principy a vlastnosti těchto druhů s možnostmi jejich aplikace jsou popsány v [11],[29],[34],[52].

V současné době existuje mnoho typů PCMs, které se nejčastěji uplatňují v oblasti techniky prostředí a to i v samotné aplikaci do konstrukce budov. Tyto aplikace představují pasivní využití PCMs. Nejpoužívanějšími materiály jsou PCMs na bázi parafínu a díky své vysoké schopnosti akumulace latentního tepla, také hydráty soli. Trendem posledních let se stalo použití PCMs aplikovatelných do transparentních prvků budov, jak popisují [21],[32],[47].

Aktivní aplikace popisují některé studie, které se zabývaly specifickou aplikací PCMs s podlahovým vytápěním [4], nebo také montáží v chladicích stropech [48], většina se však zabývala samotnou účinností PCMs na teplotní stabilizaci uvnitř objektů lehké konstrukce během vysokých letních teplot [16]. Problematika dynamiky přenosu tepla z PCMs do okolního prostředí a možnosti jejího zlepšení však nebyla dostatečně ověřena a to jak v režimu ohřevu tak i chlazení.

Jednotlivé typy PCMs mají určité specifické vlastnosti a ne všechny se dají aplikovat v rámci výše uvedené problematiky. Tepelně akumulací panely na bázi parafínu mají velmi nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti, ta z částí brání procesu akumulace i samotného procesu vybíjení akumulované energie. Jednou ze specifických vlastností je samotný matriční (krycí) materiál. Obvykle se u PCMs používají jako matriční materiály plasty, jako je například vysoko hustotní

polyetylén HPE. Tyto materiály však mají také velmi nízkou tepelnou vodivost, která tak limituje možnosti jejich aplikace. Předmětem výzkumu jsou komerčně vyráběné produkty Dupont<sup>TM</sup> Energain®, které jsou založeny na bázi parafinů. Tyto materiály jsou zalaminovány do hliníkové fólie, která zajišťuje vyšší tepelnou vodivost matričního materiálu daného PCM.

Další skupinou PCMs jsou hydráty soli, které vykazují jinou specifickou vlastnost, kterou je vysoká hodnota podchlazení. Tento jev se nazývá supercooling effect. Jev způsobuje, že teplota akumulčního materiálu klesá pod teplotu tání a přesto nedochází ke krystalizaci. Materiály tak nemohou tuhnout a akumulují pouze citelné teplo. Další vlastností hydrátů soli je změna a snížení tepelně akumulční kapacity při cyklickém používání. To je také podmíněno nesourodostí tání, kdy během cyklu tání není menší množství molekul vody schopno roztavit všechny pevné části, a ty díky své vysoké hustotě klesají na dno. Dochází tak ke snížení množství látek, které mění skupenství a tedy i ke snížení tepelně akumulčních vlastností těchto materiálů. K snížení degradace tepelně akumulčních vlastností a také omezení nesourodého tání se využívají specifické nukleační činidla, která se implementují do těchto materiálů. Další možností je také aplikace v menším objemu (kapsle) nebo využití míchání samotné směsi. Nejvíce problematickou vlastností je u většiny PCMs již zmiňované přechlazování, v případě hydrátů soli se může jednat o přechlazení až o 10 °C. Výjimkou jsou PCMs na bázi parafinu, kde efekt přechlazení je minimální, jak uvádí [30].

Některé studie [29] popisují aplikaci PCMs ve vzduchotechnických prvcích s využitím ohřevu či chlazení proudu vzduchu. Využití nuceného proudu vzduchu společně s povrchovou úpravou konvektivních vlastností povrchu PCM, představuje významnou oblast, ve které je především cílem využít cyklů vybíjení a nabíjení akumulované energie. Tato práce se zaměřuje právě na tuto možnost úpravy a aplikace materiálu PCM.

Využití počítačové simulace pro PCMs je velmi obtížné a to především provedením simulace samotného procesu fázové změny. Lze však zjednodušeně počítat s hodnotami měrné tepelné kapacity jako průměrnou hodnotu akumulované energie vztaženou na stanovený teplotní rozsah změny a kilogram.

## 2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je využití specifických tepelně akumulčních materiálů typu PCM v pasivní i aktivní aplikaci. Cíle práce představují jak teoretický rozbor současného stavu a využití tepelně akumulčních materiálů, tak především experimentální výzkum PCMs. V rámci vyhodnocení je důležité provést měření těchto materiálů s následnou úpravou jejich povrchových konvektivních parametrů. Úprava povrchových vlastností daného materiálu souvisí se samotnou dynamikou přenosu tepla z povrchu těchto materiálů a také s využitím nuceného proudění, které by umožnilo zvýšit přestup tepla z materiálu do okolního prostředí. Proces dynamiky přenosu tepla materiálu PCM je ověřen jak v pasivní tak i aktivní aplikaci a to jak v režimu chlazení, tak i v režimu ohřevu. Jednotlivé body práce jsou cíleně zaměřeny na vytvoření specifického zařízení, které by efektivně využívalo aktivní aplikace PCM.

Jednotlivé body představující cíle disertační práce:

1. Definice základních tepelně technických parametrů PCMs formulující problematiku přenosu tepla z materiálu do okolního prostředí.
2. Úprava stávajícího zařízení využívajícího PCM s cílem zefektivnit tepelně akumulční proces.
3. Využití nucené konvekce pro zvýšení přenosu tepla z povrchu PCM.
4. Ověření tepelně technických vlastností PCM v aktivní aplikaci ohřevu i chlazení.
5. Návrh a realizace zařízení využívající aktivní aplikaci PCM.

### **3. POPIS KOMPLEXNÍHO VÝZKUMU A VÝVOJE PCMs**

Disertační práce popisuje využití tepelně akumulčních materiálů v různých aplikacích oboru techniky prostředí. Nedílnou součástí výzkumu a aplikace těchto specifických materiálu je využití náležitého laboratorního vybavení, které je nutné nejen pro stanovení požadovaných parametrů, ale také pro umožnění aktivního využití těchto materiálů. Bylo využito několika metod a zařízení, na kterých bylo prováděno experimentální měření a modifikace PCM. Dle těchto metod a měření byly získány požadované výsledky, které následně sloužily pro vytvoření zařízení s aktivní aplikací tepelně akumulčního materiálu.

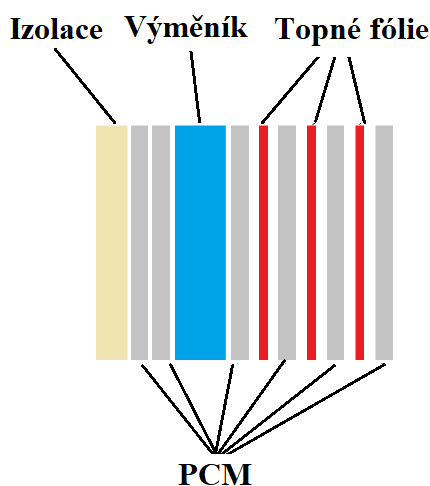
#### **3.1 Stanovení požadovaných vlastností PCM**

Předmětem výzkumné činnosti bylo stanovení specifických tepelně technických vlastností v oblasti dynamiky přenosu tepla z PCM do okolního prostředí. Stěžejními parametry byly: součinitel přestupu tepla a časová konstanta materiálu. Dle zmíněných parametrů bylo porovnáno chování tohoto materiálu v aktivní aplikaci a to v oblasti ohřevu a chlazení. Srovnání využití následně potvrdilo vhodnost aktivní aplikace PCM v zařízení techniky prostředí v režimu chlazení.

##### **3.1.1 Využití termálních panelů obsahující PCMs**

V první části disertační práce bylo využito zařízení termálních panelů v laboratoři oboru integrovaných systému budov D307 na Fakultě aplikované informatiky ve Zlíně. Termální panely obsahují tepelně akumulční panely PCMs Dupont Energain. Na daném zařízení bylo experimentálním měřením testováno chování těchto materiálů a to jak v režimu ohřevu tak i chlazení. Tato měření navazují na výsledky, které již byly publikovány v mé diplomové práci. Disertační práce navazuje a rozšiřuje stávající možnosti a využití tohoto systému využívajícího PCM. Bylo využito několika možností zvýšení součinitele přestupu tepla a to také pomocí nuceného proudění. Účelem bylo zajistit obnovu akumulčního média a umožnit tak funkci pasivního chlazení během každého dne.

Soustava termálních panelů sloužila rovněž k testování teplotní stability uvnitř laboratoře. Předmětem měření bylo chlazení termálních panelů a tedy jejich vliv nejen na stabilizaci teploty vzduchu v místnosti ale také na možnost aktivního chlazení místnosti. K chlazení panelů bylo využito trubkového výměníku uvnitř panelů.



*Obr. 1 Struktura termálního panelu*

### 3.1.2 Využití panelů PCMs

PCMs mají teplotně závislé vlastnosti, součinitel tepelné vodivosti a především měrnou tepelnou kapacitu. Ta se výrazně mění v průběhu fázové změny, tedy stavu, kdy je tento materiál ve stavu tání a tuhnutí. Proto bylo využito možnosti laboratoře k provedení diferenční termické analýzy dále jen DTA, která analyzuje změny vlastností daného prvku při tepelném zatížení. Tato metoda byla provedena v klimatické skříni, které umožňuje provádět rychlost ohřevu materiálu v požadovaném rozsahu. Výsledky této analýzy společně s výsledky měření při využití chladu v PCM nastínily vhodnou aktivní aplikaci PCM v chladicím režimu.

Další metoda měření byla aplikována přímo na tepelně akumulaci desky PCMs. Tyto desky byly testovány procesem chladnutí a to jak přirozenou tak i nucenou konvekcí. Měření probíhalo v kalorimetrické kompenzované komoře, kde byly udržovány stabilní teplotní podmínky po dobu celého měření.

### 3.1.3 Použité měřicí přístroje

Během experimentálního měření tepelně akumulaci materiálů bylo využito několika měřicích přístrojů a laboratorního vybavení, včetně kalorimetrické kompenzované komory. Stěžejní pro měření tepelně technických parametrů a to především k měření teploty, bylo využito termočlánků NiCr-Ni typu K. Tato čidla byla využita také pro měření povrchové teploty PCMs. V případě měření povrchové teploty, byly tyto termočlánky kryty reflexní hliníkovou fólií, která

zajišťovala stínění od okolních těles a slunečního záření. Mezi snímačem a fólií byla vytvořena provětrávaná 2 cm dutina. Dalšími použitými snímači byly snímače hustoty tepelného, které snímaly hustotu tepelného toku vstupující a vystupující z PCMs.

Použitá čidla a snímače pro fyzikální veličiny [1].

- Kulový teploměr FPA805GTS
  - Měděná koule průměru 150mm s centrálně umístěným Pt100 čidlem
  - Měřicí rozsah: -50 až +200 °C
- Snímač tepelného toku FQA018C
  - Rozměr: 120x120x1,5 mm
  - Odolnost do 80°C
- Digitální čidlo relativní vlhkosti a teploty FHAD462
  - Měřicí rozsah: 0 až 100 %  $\pm 0,1$  %, -20 až +60 °C  $\pm 0,01$  °C
- Thermoanemometrické čidlo FVAD35TH5
  - Měřicí rozsah: 0 až 50 °C, 0,2 až 20 m.s<sup>-1</sup>
- Anemometrické čidlo FVAD15S240
  - Vrtulková mikro měřicí sonda 15mm
  - Měřicí rozsah: 0,7 až 40 m.s<sup>-1</sup>  $\pm 3$  % z měřené hodnoty
- Termočláňkové dráty typ K-T 190-0

Zároveň bylo využito termokamery pro ověření teplotní homogenity na povrchu PCM a to během všech zkoušek. Použita byla termokamera Fluke Ti45. Typ detektoru je nechlazený mikrobolometr s oxidem vanadu o rozlišení 160x120 px [17].

- Rozlišení bolometru: 160x120 px
- Teplotní citlivost (NETD):  $\leq 0,08$  °C (80 mK při 30 °C)
- Kalibrovaný teplotní rozsah: -20 až +600°C ve 3 rozsazích
- Přesnost:  $\pm 2$  °C nebo 2 % (platí vyšší hodnota)
- Korekce emisivity: 0,1 až 1,0 (přírůstky po 0,01)



*Obr. 2 Termokamera Fluke Ti45 [17]*



*Obr. 3 Datalogger Ahlborn ALMEMO 2690-8A a datalogger ALMEMO 8690-9A [1]*

Pro snímání výstupních hodnot jednotlivých čidel byly využity datalogy a to kombinovaný univerzální měřicí přístroj ALMEMO 2690-8A a také ALMEMO 8690-9A. V mnoha případech byly využívány oba přístroje zároveň a to z důvodů použití velkého počtu čidel.

Klimatické skříně Discovery My „flower“ DM340 jsou zařízení speciálně navrženy pro aplikace, ve kterých je požadována rychlá teplotní změna. Tyto skříně jsou vhodné pro klimatické zkoušky při ustálených stavech v různých vlhkostních podmínkách. Teplotní rozsah je  $-40$  až  $+180$  °C, vlhkostní rozsah 10-98 %, rychlostní změna  $4,5$  K·min<sup>-1</sup>. Vnitřní objem je 337 l [12].



*Obr. 4 Klimaskřín Discovery DM340 [12]*

Kompenzovaná kalorimetrická komora představuje specializované pracoviště laboratoře techniky prostředí, které slouží jak k měření a testování technických parametrů, tak i k výzkumu a vývoji prvků a zařízení techniky prostředí (tepelné, vzduchotechnické a chladicí zařízení). Komora je primárně využívána pro zkoušení energetických a akustických parametrů, chladicích jednotek, tepelných čerpadel a chladicích stropů a trámců. Tato komora je tvořena dvěma od sebe oddělenými prostory Indoor, Outdoor. Zařízení komory umožňuje pracovat s teplotním rozsahem  $-30$  až  $+60$  °C a 5 až 99 % relativní vlhkosti.



*Obr. 5 Kalorimetrická kompenzovaná komora - pohled z vnější strany*

### **3.2 Aplikace PCMs**

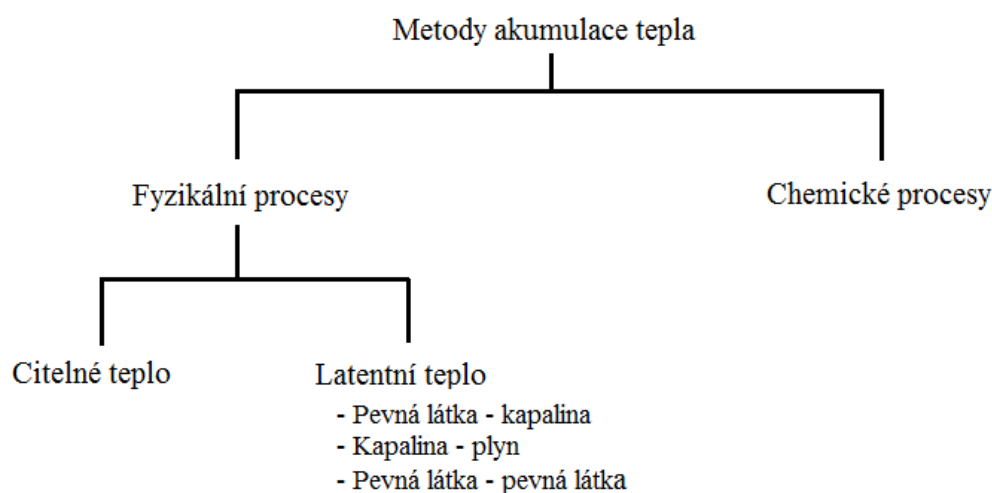
Aktivní aplikace PCMs byla navržena dle získaných poznatků o tepelně technických vlastnostech PCMs a také problematiky přenosu tepla z povrchu tohoto materiálu do okolí. Výsledkem je aplikace tohoto materiálu do chladicího stropu. Vytvoření funkčního vzorku chladicího stropu s PCMs však představovalo také navrhnout metodiku měření a především provést konstrukční úpravu laboratoře, ve které by bylo možné tyto vzorky měřit dle dané metodiky. Prvotním krokem bylo vytvořit metodiku měření dle normativních požadavků. Tato metodika byla vytvořena pro možnosti naší laboratoře a vychází z požadavků přílišných norem. Následujícím krokem bylo upravit laboratoř tak, aby umožňovala měřit chladicí výkon těchto prvků. Úprava laboratoře byla koncipována dle požadavků [8],[9],[10] a zároveň byla provedena, tak aby umožnila měřit chladicí výkon nejen chladicích stropů ale také chladicích trámců.



# TEORETICKÁ ČÁST

Schopnost tepelné akumulace určitého materiálu umožňuje danou formu energie teplo nebo chlad absorbovat a později tuto energii využít. Rozdělení jednotlivých metod tepelné akumulace popisuje obrázek Obr. 6.

## 3.3 Metody tepelné akumulace



Obr. 6 Metody akumulace tepla [34]

Z Obr. 6 je patrné, že teplo lze akumulovat pomocí fyzikálních procesů základními metodami a to citelným teplem, latentním teplem, kombinací obou těchto metod nebo pomocí termochemických procesů. Pro tepelně akumulací materiály představuje významnou část právě latentní teplo, tedy schopnost materiálu absorbovat energii se změnou skupenství dané látky a to bez změny její teploty [34],[44].

## 3.4 Citelné teplo

Princip akumulace citelného tepla, je založen na využití tepelné kapacity daného materiálu a jeho teplotní změny, které nastává v procesu nabíjení a vybíjení. Během tohoto procesu nedochází k fázovým změnám, lze tedy uvažovat s úplnou obnovou procesu nabíjením v daném materiálu. Množství akumulovaného tepla během dané teplotní změny je dáno tepelnou kapacitou. Množství citelného tepla pak lze určit dle rovnice (3.1).

$$Q = m \cdot \int_{\theta_i}^{\theta_f} c_p \cdot \Delta\theta \quad (3.1)$$

Kde	$Q$	je množství akumulovaného tepla [J]
	$m$	hmotnost akumulčního média [kg]
	$c_p$	průměrná hodnota měrné tepelné kapacity v rozsahu $\theta_i, \theta_f$ [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
	$\theta_i$	počáteční teplota [K]
	$\theta_f$	konečná teplota [K]

Z rovnice (3.1) je patrné, že velikost celkové akumulované energie je závislá na velikosti měrné tepelné kapacity a hmotnosti daného materiálu. V oblasti techniky prostředí je nejvyužívanějším akumulčním médiem voda, s poměrně velkou hodnotou měrné tepelné kapacity.

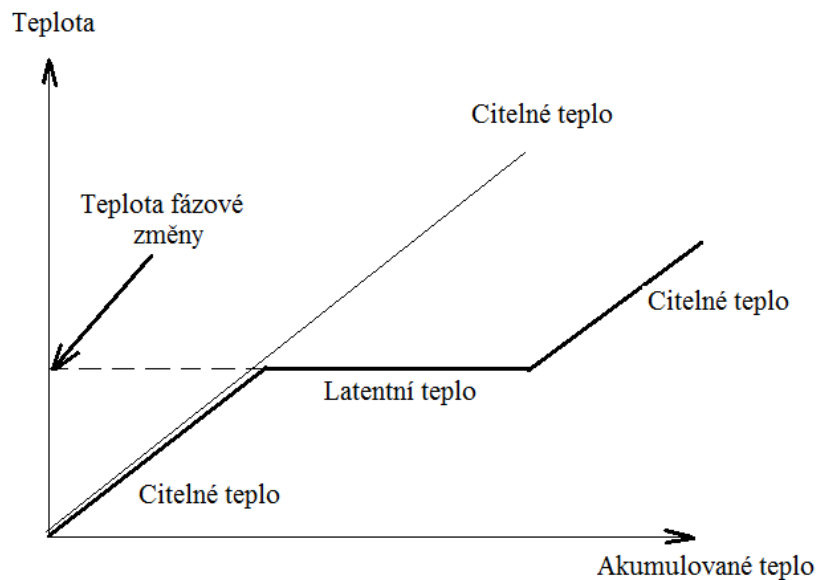
### 3.5 Latentní teplo

U materiálů s fázovou změnou struktury dochází k využití tzv. latentního tepla. Změna stavu materiálu z pevné části do kapalné způsobena táním nebo tuhnutím umožní akumulovat určité množství tepla nebo chladu. Proces tání je charakteristický malou změnou objemu obvykle do 10 %. Je-li takovýto materiál zapouzdřen, nedochází obvykle k velké změně tlaku a následně proces tání a tuhnutí probíhá za stálé teploty. Teplota při, které dochází k fázové změně v materiálu, se nazývá teplota fázové přeměny. Latentní teplo je množství akumulovaného tepla, které je vypočteno ze změny entalpie.

$$\Delta Q = \Delta h = m \cdot \Delta h \quad (3.2)$$

Kde  $\Delta h$  je entalpie fázové změny [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

V případě materiálů, kde dochází k fázové změně z pevné na kapalnou látku, je množství latentního tepla nazýváno latentní teplot PCM, entalpie tání nebo entalpie splnutí. Materiály využívající změnu fázového přechodu z pevné na pevnou látku mají obvykle stejné charakteristické vlastnosti jako látky z přechodu pevné na kapalnou ovšem nevyužívají v tomto fázovém přechodu tak velkého množství latentního tepla.



Obr. 7 Akumulace latentního tepla pro fázovou změnu pevná-kapalina [34]

Většina případů aplikace PCMs v oboru techniky prostředí využívá zejména změnu skupenství z pevného do kapalného stavu. Tento způsob využití je dán minimální změnou objemu, který během tohoto procesu nastává. V případech změny skupenství pevná látka - plyn nebo i kapalina - plyn, by bylo velice obtížné zajistit zapouzdření tohoto materiálu. Přestože u těchto fázových změn dochází k využití velkého množství latentního tepla, nelze tyto média pro značné objemové změny aplikovat. U materiálů využívající fázovou změnu pevná látka – kapalina, je nutné zabránit úniku média během „kapalné“ fáze. Proto tyto materiály musí být zapouzdřeny do matričního obalu tak, aby nedocházelo k úniku média během fázového přechodu. Zároveň je vhodné tyto materiály navrhnout tak, aby byla možná jejich aplikace nejen v oboru techniky prostředí, ale také přímo ve stavebních prvcích budov [34].

### 3.6 Sdílení tepla

Sdílení tepla představuje děj, který popisuje předávání tepelné energie mezi soustavou a okolím, případně mezi dvěma soustavami. Sdílení tepla lze rozčlenit na sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním, jednotlivé děje popisuje [25],[39].

Sdílení tepla vedením vyjadřuje závislost mezi tepelnými toky a teplotními spády podle Fourierova a II. Termodynamického zákona. V případě stacionárního vedení tepla se teplota v určitém místě a čase nemění. Nestacionární vedení tepla je stav, kdy teplota v materiálu v daném místě mění s časem. V případě, že teplota tělesa nezávisí na souřadnicích, ale pouze na čase, lze řešit vedení tepla diferenciální rovnicí prvního řádu viz [25].

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \nabla^2 \theta + Q^{(g)} \quad (3.3)$$

Kde  $\rho$  je hustota [ $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]  
 $\lambda$  Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

V případě, že teplota tělesa nezávisí na souřadnicích ale pouze na čase, lze použít pro řešení vedení tepla diferenciální rovnici prvního řádu.

$$\frac{d\theta}{(\theta - \theta_f)} = - \frac{\alpha \cdot A}{\rho \cdot V \cdot c_p} dt \quad (3.4)$$

Kde  $A$  Plocha [ $\text{m}^2$ ]  
 $V$  Objem [ $\text{m}^3$ ]

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{\theta - \theta_\infty}{\theta_i - \theta_\infty} = e^{(-Bi \cdot Fo)} \quad (3.5)$$

Kde  $\theta$  Počáteční teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\theta_i$  Dosažená teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\theta_\infty$  Teplota v ustálení [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$$Bi = \frac{h \cdot L_c}{\lambda} \quad (3.6)$$

Kde  $L_c$  je charakteristický rozměr dán poměrem objemu a plochy tělesa [ $\text{m}$ ]  
 $h$  Součinitel přestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

Biotovo číslo vyjadřuje, zda se teplota uvnitř tělesa značně liší od povrchové teploty, platí jak pro ohřev, tak i chlazení, jedná se o bezrozměrný parametr, který charakterizuje bezrozměrný součinitel přestupu tepla. Výsledky Biotova čísla jsou uvedeny v mé diplomové práci [28].

Sdílení tepla prouděním lze označit jako přestup tepla mezi povrchem stěny daného materiálu a okolní tekutinou. Přenos tepla prouděním se rozděluje na proudění volné a nucené. V případě volného proudění (volné konvekce) dochází k tomuto jevu, když pohyb kapaliny případně plynu je dán rozdíly v hustotě látky, který je způsoben rozdílem jejich teploty. Pohyb proudění u nucené konvekce je dán rozdílem tlaků vytvořených „uměle“, například použitím čerpadla nebo

ventilátoru. Styk kapaliny nebo plynu s povrchem pevné stěny způsobuje přenos energie prouděním.

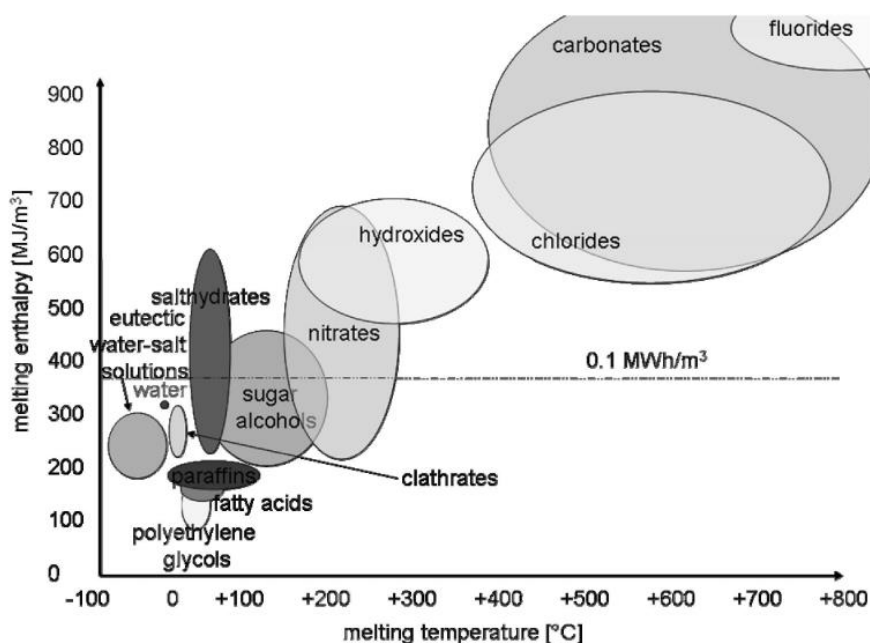
Volná konvekce je definována dle Nusseltova kritéria, které je dáno závislostí Grashofova a Prandtlova čísla viz [39].

Předmětem výzkumu byla také nucená konvekce. V tomto případě je součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí závislý na vlastnostech proudící kapaliny, drsnosti obtékaného povrchu a rovněž na typu proudění. Obecně je Nusseltovo kritérium závislé na Reynoldsově a Prandtlově kritériu viz [3],[22].

Sdílení tepla sáláním je popsáno jako radiační energie přenášená z povrchu tělesa, která závisí pouze na povrchové teplotě tělesa a jeho schopnosti vyzařovat (emisivita) [25],[39].

### 3.7 Tepelně akumulční materiály

Tepelně akumulční materiály PCMs jsou materiály, které jsou významné pro svoji schopnost absorbovat tepelnou energii. K absorbování tepla dochází při fázové změně daného materiálu, při kterém je využito latentní teplo změny skupenství. Volba a výběr správného typu materiálu závisí na daných teplotních podmínkách aplikace. V oboru techniky prostředí a samotných budov je tento teplotní rozsah 20-30 °C. Existují další požadavky, které představují technické či ekonomické zhodnocení. Teplota fázového přechodu je stav, kdy materiál bude schopen akumulovat, následně i uvolňovat tepelnou energii. Jedná se tedy o velmi důležitý parametr, bereme-li v úvahu nejvyšší denní teplotu vzduchu v místnosti v letním období v nevýrobních prostorech 27 °C, viz [7], je oblast teploty tání vhodná právě v okolí této hodnoty. Dalším parametrem je množství entalpie při fázové změně, tedy množství akumulované energie. Proces tání a tuhnutí může zvyšujícím se počtem cyklů zhoršovat vlastnosti PCM, proto je důležitá cyklická stabilita a reprodukovatelnost fázové přeměny. V oblasti techniky prostředí a aplikace PCMs do budov je nutné zajistit desetitisíce těchto cyklů bez výraznější změny vlastností daného materiálu (závisí na životním cyklu budovy). Na Obr. 8 jsou uvedeny teploty fázové přeměny některých materiálů PCMs.



Obr. 8 Rozdělení materiálu PCMs, teploty tání a množství akumulované energie jednotlivých druhů [34]

### **3.8 Rozdělení tepelně akumulčních materiálů (PCMs)**

Materiály, které mají být využity jako tepelně akumulční, by měly být schopny akumulovat velké množství latentního tepla a také by měly mít dobrou tepelnou vodivost. Teplota fázového přechodu by měla být v požadovaném teplotním rozsahu dané aplikace. Materiál by měl vykazovat sourodost tání, chemickou stálost a minimální přechlazení. Dalšími požadavky jsou, aby tyto materiály nebyly toxické a odolné vůči okolním vlivům (koroze, únik materiálu). Základní rozdělení PCMs dle chemického složení je na organické, anorganické látky a eutektika [30],[51].

#### **3.8.1 Organické látky**

Tyto materiály lze rozdělit na sloučeniny s parafíny a sloučeniny bez parafínů. Hlavní výhodou těchto materiálů je, že vykazují dlouhou cyklickou stálost a teplotní stabilitu bez fázové segregace a u krystalizace s minimálním nebo žádným přechlazením. Latentní teplo, které mohou tyto materiály absorbovat, se pohybuje v rozmezí  $170 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  až  $270 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  v teplotním rozsahu  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , jsou tak vhodné v širokém spektru oblasti budov a solárních zařízení. Sloučeniny neobsahující parafíny jsou mastné kyseliny, estery, alkoholy a glykoly. Tyto materiály obvykle disponují schopností akumulovat velké množství latentního tepla, mají velmi nízkou tepelnou vodivost, jsou hořlavé, toxické a nestálé při vyšších teplotách [30].

#### **3.8.2 Anorganické látky**

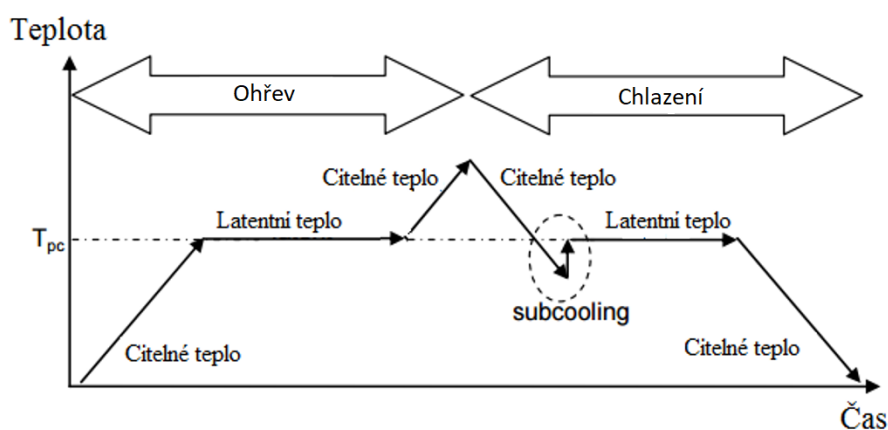
Anorganické látky využívající tepelně akumulční vlastnosti jsou především hydráty soli a kovy. Hlavní výhodou hydrátu soli je nízká cena, která je rozhodující v mnoha projektech a aplikacích. Kromě toho, tyto anorganické PCMs mohou akumulovat velké množství latentního tepla a jejich tepelná vodivost je až 2 x vyšší, než je to u organických PCMs. Hydráty soli však vykazují velký vliv přechlazení, nekongruentnost tání a také špatnou tepelnou stabilitu. Kovy jsou velmi obtížně uplatitelné PCMs a to kvůli vysoké objemové hmotnosti, například galium s teplotou tání  $29 \text{ }^\circ\text{C}$  má hustotu  $5900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

#### **3.8.3 Eutektika**

Eutektikum je směs dvou látek, jejichž krystaly vznikají souběžně v procesu tuhnutí. Vznik čistého eutektika je způsoben mísicím poměrem obou složek, při kterém je teplota tuhnutí směsi nejnižší. Výhodou eutektik je chemická stabilita a naopak nevýhodou je korozivní vlastnost. Objemová změna procesu tání a tuhnutí je kolem 5-10 % [34].

### 3.8.4 Specifické vlastnosti PCMs

Podchlazení neboli (Supercooling, Subcooling), tento stav nastane v PCMs, když je materiál podchlazen pod teplotu fázové přeměny a proces tuhnutí nenastane, viz Obr. 9. Akumulovanou energii mnohdy nelze využít, podmínky okolního vzduchu způsobí nefunkčnost celého systému PCM. Běžně se využívá nočních hodin, kdy teplota vzduchu v místnosti klesne, PCM se ochladí pod teplotu fázové změny a akumulovaná energie by se tak měla snadno uvolnit do okolního prostředí. K tomuto stavu však právě vlivem podchlazení mnohdy nedochází. Nejčastěji se tento jev vyskytuje u hydrátů soli, kde podchlazení, tedy posun teploty fázové přeměny, může být posunut až o několik stupňů celsia. Do hydrátů soli se proto dodávají nukleační činidla, které omezují vznik podchlazení. Hydráty soli se také doporučuje aplikovat tak, aby například bylo zajištěno mechanické míchání, zapouzdření do kapslí [18],[21], nebo přidání zahušťovadel, které zabrání sedimentaci solí na dno.



Obr. 9 Teplotní schéma během změny fáze pro ohřev a chlazení [34]

Usazování solí, tedy nekongruentnost (nesourodost) tání hydrátů solí, způsobují také podchlazení, ale především snižují množství látek, které mění skupenství a pohlcují nebo uvolňují latentní teplo. Látky hydrátu soli se skládají z dvou a více složek například je to kalcium, chlorid, sodík, hořčík atd.

Aplikace PCMs v oblasti techniky prostředí představuje požadavek cyklického využívání tepelně akumulací kapacity daného materiálu. Pokud však v materiálu nastává nekongruentnost tání, cyklické využití PCM vede k degradaci a k snižování schopnosti tepelné akumulace. Tyto materiály je proto nutné testovat pro dlouhodobou stabilitu akumulací vlastností a následně využít těchto poznatků k modifikaci samotného materiálu ve výrobě nebo v aplikaci a jejím zapouzdření.



Jako jeden z problémů u použití PCMs je zapouzdření, tedy samotná krycí a obalová část materiálu. PCMs založené na bázi parafínu, které byly předmětem výzkumu, jsou kryty hliníkovou fólií. Tato fólie má velmi nízkou hodnotu emisivity povrchu a také nízkou hodnotu tepelné vodivosti. Obě tyto vlastnosti zabraňují a zpomalují, jak procesu nabíjení tak i vybíjení. Ve výsledku dochází ke snížení efektivity principu tepelné akumulace.

Některé PCMs nepodléhají podchlazování ani nekongruentností tání avšak jejich schopnost zajistit proces tání a tuhnutí v krátkém čase je omezen nízkou tepelnou vodivostí daného materiálu a také tepelně technickými vlastnostmi krycího obalu. Obalový materiál má však také vliv na životnost akumulčního systému a také na možnost úniku PCMs. Na stabilitu tepelně akumulčního materiálu má zásadní vliv těsnost, stabilita obalového materiálu v kontaktu s PCM, kompatibilitnost při možném styku s PCM po jeho možném úniku [37].

### 3.8.5 Matematický popis numerického modelu PCM

Přenos tepla v materiálech PCMs je velice komplikovaný proces obzvláště během fázového přechodu změny fáze v procesu tání nebo tuhnutí. PCM může být ve třech různých stavech a to v pevné fázi, kapalné a tzv. mushy zóně (koexistence obou fází). Obalová konstrukce PCM má rozdílné tepelně technické vlastnosti než samotný PCMs. Vedení tepla v materiálech s proměnlivými tepelně technickými vlastnostmi popisuje diferenciální rovnice vedení tepla: [24]

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(\theta) \cdot h(\theta) = \nabla[\lambda(\theta)\nabla\theta(\vec{r}, t)] + g(\vec{r}, t) \quad (3.7)$$

Kde  $g$  je výkon vnitřního zdroje ve [W]

Jsou-li splněny podmínky

$$\frac{\partial}{\partial t} \approx 0; \quad \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial \theta} \frac{\delta \theta}{\delta t} = c_{eff}(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.8)$$

Rovnice vedení tepla poté je:

$$\rho(\theta) \cdot c_{eff}(\theta) \cdot \frac{\theta(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla[\lambda(\theta)\nabla\theta(\vec{r}, t)] + g(\vec{r}, t) \quad (3.9)$$

Kde  $c_{eff}$  je efektivní měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita, která zahrnuje měrné latentní teplo ve sledovaném teplotním rozsahu, se označuje jako efektivní měrná tepelná kapacita. Proto okamžitá hodnota měrné efektivní kapacity výrazně stoupá a klesá s teplotou během fázového přechodu daného PCM. Hodnotu měrné efektivní kapacity lze určit pomocí diferenční skenovací kalorimetrie (DSC).

$$c_{eff} = \begin{cases} c_{ps} & \dots \dots \dots \theta < \theta_m - \Delta\theta_m \\ \frac{c_{ps} + c_{pl}}{2} + \frac{l_{pl}}{2 \cdot \Delta\theta} & \dots \dots \dots \theta_m - \Delta\theta_m \leq \theta \leq \theta_m + \Delta\theta_m \\ c_{pl} & \dots \dots \dots \theta > \theta_m + \Delta\theta_m \end{cases} \quad (3.10)$$

Kde	$c_{eff}$	efektivní měrná tepelná kapacita	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ,
	$c_{ps}$	průměrná tepelná kapacita v pevném stavu	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ,
	$c_{pl}$	průměrná tepelná kapacita kapaliny	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ ,
	$l_{pl}$	skupenské teplo fázové změny pevná látka-kapalina	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$ ,
	$\theta_m$	teplota fázové změny pevná látka-kapalina	$[\text{K}]$ ,
	$\theta$	teplota akumulárního média	$[\text{K}]$ ,
	$\Delta\theta_m$	teplotní semi-interval fázové změny	$[\text{K}]$ .

### 3.9 Popis využitých tepelně akumulčních materiálů PCMs

Hlavním předmětem výzkumné činnosti byly panely PCMs DuPont Energain na bázi parafinového vosku. Dalším použitým materiálem se stal hydrát soli chloridu vápenatého, kde byla zkoumána jeho aplikace v transparentním konstrukčním prvku.

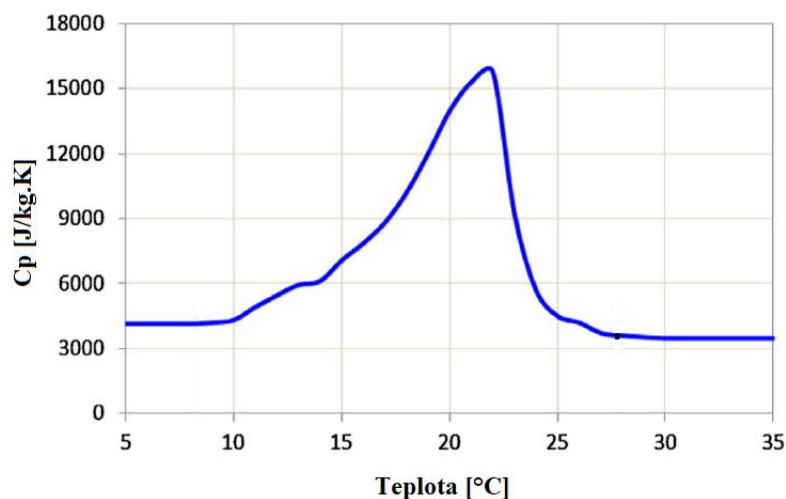
#### 3.9.1 DuPont Energain

Předmětem výzkumu je tepelně akumulční panel PCM DuPont Energain. Tento panel je tvořen krycím hliníkovým obalem uvnitř, kterého je uloženo tepelně akumulční jádro založeno na bázi parafínu. Směs je tvořena z 60 % parafinovým voskem a 40 % je směsný polymer etylenu. Využívá se molekulárního zapouzdření, kdy technologie využívá vysokou koncentraci polymerní sloučeniny PCM. Spojení jednotlivých molekul vosku vytváří homogenní směs, proto během fázové změny nedochází k přechodu v kapalnou fázi. Tyto panely se vyrábí v rozměrech 1000 x 1198 x 5,26 mm. Teplota tání tohoto materiálu se pohybuje v rozmezí 21 – 22 °C. Během procesu změny fáze dochází ke značné změně efektivní měrné tepelné kapacity PCMs a také ke změně tepelné vodivosti [14],[27].

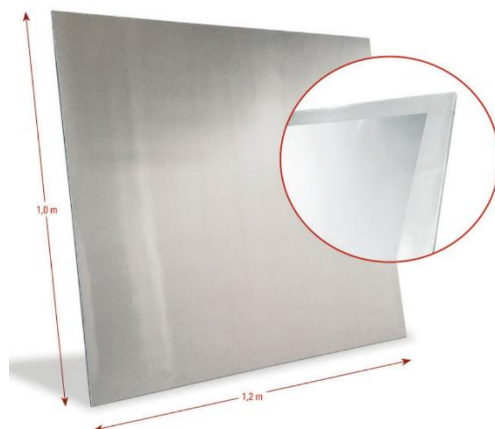
Tab. 1 Technické vlastnosti Dupont Energain [14]

Vlastnost	Hodnota
Bod tání	21,7°C
Efektivní měrná tepelná kapacita	70 kJ·kg <sup>-1</sup>
Celková měrná tepelná kapacita v rozsahu 14-30°C	170 kJ·kg <sup>-1</sup>
Tepelná vodivost (pevná fáze)	0,18 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Tepelná vodivost (tekutá fáze)	0,14 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>

Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě akumulčního materiálu Dupont Energain je zobrazena na Obr. 10. Měrná tepelná kapacita je určena diferenční skenovací metodou v teplotní rozsahu 5-35 °C dle výsledků [15].



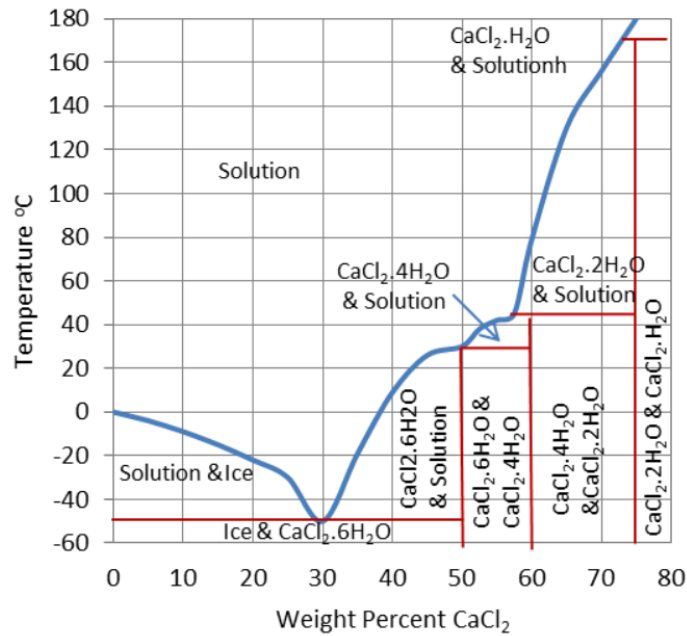
Obr. 10 Průběh měrné tepelné kapacity PCM Dupont Energain [15]



Obr. 11 Deska PCM Dupont Energain [27]

### 3.9.2 Hexahydrát chloridu vápenatého

Hexahydrát chloridu vápenatého  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  je získáván oddělením solného roztoku těženého z podzemních ložisek. Výhodou tohoto materiálu je dostupnost, nízké pořizovací náklady a schopnost akumulace velkého množství latentního tepla. Dle binárního fázového diagramu chloridu vápenatého lze upravovat tepelnou charakteristiku pevné a kapalné fáze a to vlivem změny koncentrace chloridu vápenatého. V případě hexahydrátu je koncentrace chloridu vápenatého 50 hmotnostních procentech a teplota tání je cca 29 °C [41],[46].



Obr. 12 Fázový diagram chloridu vápenatého [46]

Tab. 2 Technické vlastnosti hexahydrátu chloridu vápenatého [46]

Vlastnost	Hodnota
Bod tání	29,6
Latentní teplo fázové přeměny	190 kJ·kg <sup>-1</sup>
Specifické teplo (tekutina)	2,1 kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Specifické teplo (pevná)	1,42 kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Tepelná vodivost (tekutina)	0,54 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Tepelná vodivost (pevná)	1,08 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Hustota (tekutina)	1562 kg·m <sup>-3</sup>
Hustota (pevná)	1800 kg·m <sup>-3</sup>
Objem soli	50,66 %
Objem vody	49,34 %

### 3.10 Aplikace PCMs v oblasti techniky prostředí

Využití PCMs představuje v dnešní době širokou škálu možností a to v různých oblastech techniky prostředí [29]. Důležitým aspektem aplikace je forma aplikace daného materiálu ve stavebních prvcích a zařízeních. Fázová změna, která může způsobovat u některých typů PCMs změnu pevného stavu na kapalné, tak mnohdy eliminuje možnost aplikovat tyto materiály do stavebních prvků.

Základními metodami zapouzdření PCMs materiálů je makro, mikro a molekulární zapouzdření. Metoda makro zapouzdření byla využívána už v počátcích vývoje těchto materiálů. Jednalo se například o zapouzdření velkého množství hydrátů soli v tekuté formě, které bylo umístěno v plastových obalech. Problematická však byla manipulace s těmito formami, kde bylo nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k narušení pouzdra.

Technologie mikro zapouzdření využívá PCM formou příměsí do stavebních prvků, jako jsou sádkokartóny [1], tvárnice, cihly [35],[43] a nebo i formou nátěru [52]. Forma dané příměsí může být formou mikrokapslí, ty mohou být rozptýleny, jak v pevných látkách formou prášku, tak i v kapalině. Molekulární zapouzdření umožňuje velmi vysokou koncentraci polymerní sloučeniny PCM materiálu.

Systémy sloužící ke skladování tepelné energie jsou označovány Thermal Energy Storage (TES). V závislosti na použité technologii, takový systém umožňuje přebytečnou tepelnou energii skladovat a následně ji použít. Volba pro vhodnou aplikaci se odvíjí od několika zásadních parametrů, a to: doba uskladnění, cena, teplota, množství nashromážděné energie a tepelné ztráty celého systému. Mnoho studií potvrdilo schopnost PCM eliminovat špičkové zatížení budov [11],[13],[24],[38],[53],[54]. Aplikace PCMs v izolaci [49] může snížit potřebu chlazení až o 40 % generovanou tepelnou zátěží skrz pevné konstrukce budovy během vysokých letních teplot. Nicméně zlepšení tepelné setrvačnosti budovy pomocí TES PCMs závisí na několika parametrech.

- Klimatické podmínky
- Orientace budovy
- Typ konstrukce budovy
- Vlastnosti použitého PCMs

Aplikace PCMs v konstrukci stěn byly předmětem výzkumu [31], kde bylo prokázáno navýšení tepelně setrvačnosti konstrukce. Jiná studie PCMs testovala reálnou aplikaci na obvodové zdivo [5], zde výsledky potvrdily nižší špičky

teploty vzduchu. Celá řada vědeckých pracovníků navrhovala tyto aplikace PCMs s cílem zlepšení energetické a tepelné účinnosti budovy.

Dalšími možnostmi využití PCMs v budovách je aplikace v chladicích zařízeních. Tuto problematiku popisuje studie [36], kde je popsáno pasivní i aktivní využití PCMs. Studie byly založeny na numerické simulaci a také experimentálním měření. Obecně integrování PCMs do obálky budov, má pozitivní vliv na tepelnou a energetickou náročnost. Chladný venkovní vzduch a to v přirozené nebo i v nucené formě [36],[40], slouží pro obnovu akumulárního media. Přesto existuje mnoho specifík, a to: přenos tepla z PCM do okolního prostředí, množství potřebného akumulárního materiálů a také jeho tepelné technické vlastnosti, které je nutno ještě upravit a vylepšit tak, aby byl zajištěn efektivní provoz takového systému v případě rozdílné aplikace a rozdílných provozních klimatických podmínek.

Využití proudění vzduchu a ohřevu či chlazení PCMs bylo využito také ve studii [45]. Kde bylo využito ukládání tepelné energie pomocí solárního ohřevu ventilačního vzduchu. Využit byl vzduchový solární kolektor, kde teplý vzduch z kolektoru následně ohříval tepelně akumulární desky PCMs.

Předmětem výzkumu PCMs se v posledních letech staly také transparentní prvky, ve kterých jsou tyto materiály využívány [21],[32],[42],[47]. Takto uložené materiály fázové změny představují zásobníky latentního tepla, které jsou vystaveny přímému slunečnímu záření. Dochází k absorbování části tepla před tím, než prostoupí do místnosti. Během absorpce dochází k fázové změně PCM a některé materiály následně mohou propouštět část světelného záření. Propustnost slunečního záření je odlišná pro pevný i kapalný stav PCM. Správná aplikace PCMs v transparentních prvcích může snížit tepelné ztráty a zároveň zajistit tepelnou pohodu.

## PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části jsou popsány metody experimentálního výzkumu včetně výsledků daných měření.

### 4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM PCMs

Laboratoř integrovaných systémů budov na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně byla využita pro experimentální měření PCMs. Stávající zařízení disponuje využitím různých zdrojů energie a to přes solární kolektory, peltierovy články tak i tepelné čerpadlo. Tyto zdroje mohou být využity pro akumulaci energie a to ve formě tepla i chladu. Hydraulická soustava je připojena na soustavu dvou termálních panelů, které obsahují 12 panelů obsahující vysokou koncentraci polymerní sloučeniny PCM na bázi parafínu.

Výzkumná činnost zahrnuje také využití PCMs v laboratoři, kde je předmětem výzkumu využití efektivního zdroje, vliv tepelné akumulace na teplotní stabilizaci uvnitř místnosti a také úprava povrchových vlastností akumulčních panelů. Součástí těchto povrchových úprav je využití nuceného proudění za pomoci difuzního prvku. Jednou z možností zefektivnění procesu vybíjení akumulované energie v PCMs je právě využití proudění vzduchu podél povrchu PCMs, kde dochází k zvýšení součinitele přestupu tepla z povrchu materiálu do okolí. Na výrobě difuzoru a problematice proudění vzduchu jsem spolupracoval s kolegou Ing. Stanislavem Sehnálkem.

Jednotlivá měření ovlivnění povrchových konvektivních vlastností PCMs jsou soustředěna také v laboratoři techniky prostředí v kompenzované kalorimetrické komoře, kde je možné minimalizovat vlivy okolního prostředí a zajistit stabilní mikroklimatické podmínky.

Cílem výzkumné činnosti je stanovení tepelně technických parametrů PCMs, provedení různých možností zefektivnění procesu akumulace a jeho následná aplikace do chladicího nebo topného zařízení. Společně s kolegou Ing. Sehnálkem bylo předmětem výzkumu vytvořit metodiku měření chladících stropů, trámců a především provedení úpravy části kalorimetrické komory, která by umožňovala měřit chladicí výkon těchto prvků.



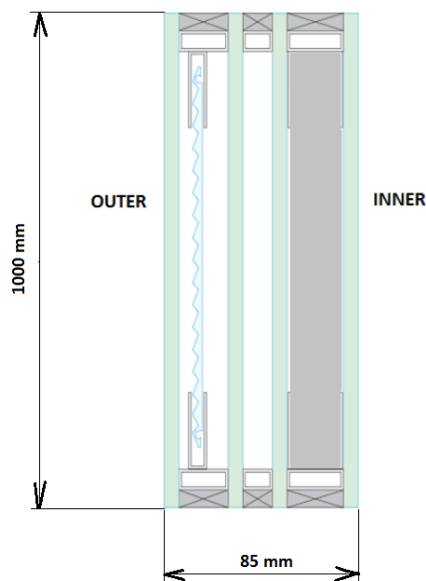
## 4.1 Experimentální měření transparentního prvku využívající PCMs

Součástí disertační práce je také pasivní využití specifického transparentního prvku využívající PCMs. Tepelně akumulární materiály PCMs se v posledních letech stávají více populární a to v různých aplikacích například i v transparentních prvcích budov [20],[21],[32],[48]. Materiály, které se využívají v těchto aplikacích, jsou určeny především k teplotní stabilizaci uvnitř budov, kde redukují tepelnou zátěž způsobenou slunečním zářením. Jak popisují studie [20],[21],[32],[47],[48], aplikace různých druhů PCMs způsobuje rozdílné chování těchto materiálů uvnitř transparentních prvků. Některé transparentní prvky obsahují také reflexní elementy, jako je prizmatické sklo, které odráží přímé sluneční záření. Kombinací reflektivního prvku a tepelně akumulárního jádra PCM, je tento element schopen zajistit komfortní mikroklimatické podmínky a také minimalizovat potřebu chlazení v budovách.

Většina transparentních prvků využívá PCMs na bázi hydrátů soli. Tyto materiály, jak uvádí kapitola 3.8.4, vykazují své specifické vlastnosti z hlediska sourodosti tání. Předmětem výzkumu bylo specifické sklo, které využívá nové technologie umístění PCM do meziskelního prostoru. Předchozí technologie umísťovala PCM materiál do polykarbonátových segmentů, které byly umístěny v meziskelním prostoru [21]. Tato změna byla provedena výrobcem za účelem zvýšení tepelně akumulárních vlastností, a také z důvodů snížení nákladů na výrobu těchto transparentních prvků.

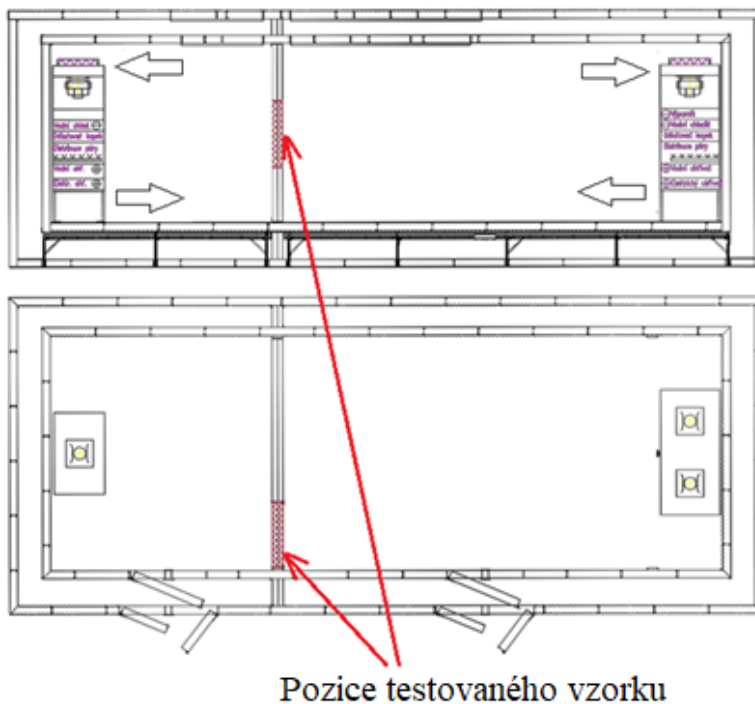
Součástí disertační práce bylo testování tohoto specifického transparentního prvku využívajícího PCM. Jedná se o tepelně akumulární panel, který se díky svým tepelně technickým vlastnostem používá jako náhrada těžkých stavebních výplní v prosklených konstrukcích. Vnější meziskelní prostor obsahuje prizmatické sklo, které odráží během letního období sluneční záření. Významnou částí je však vnitřní meziskelní prostor, který obsahuje PCM ve formě hydrátu soli. Teplotní stabilizace vnitřního mikroklimatu budovy a využití difuzního záření jsou hlavními výhodami těchto prvků. Cílem experimentálního měření však bylo ověřit chování akumulárního média v takto specifickém umístění. Hydrát soli, který je umístěn v tomto elementu je hexahydrát chloridu vápenatého  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

Rozměry testovaného vzorku jsou zobrazeny v Obr. 13. Panel je složen ze čtyř tvrzených skel a celková hmotnost panelu je 95 kg.



Obr. 13 Struktura skla

Testování tohoto panelu bylo prováděno v dělicí přičce kalorimetrické komory. Pozice panelu je také uvedena v Obr. 14, rám skla byl vyroben ze dřeva a řádně izolován v celé délce dilatační spáry.



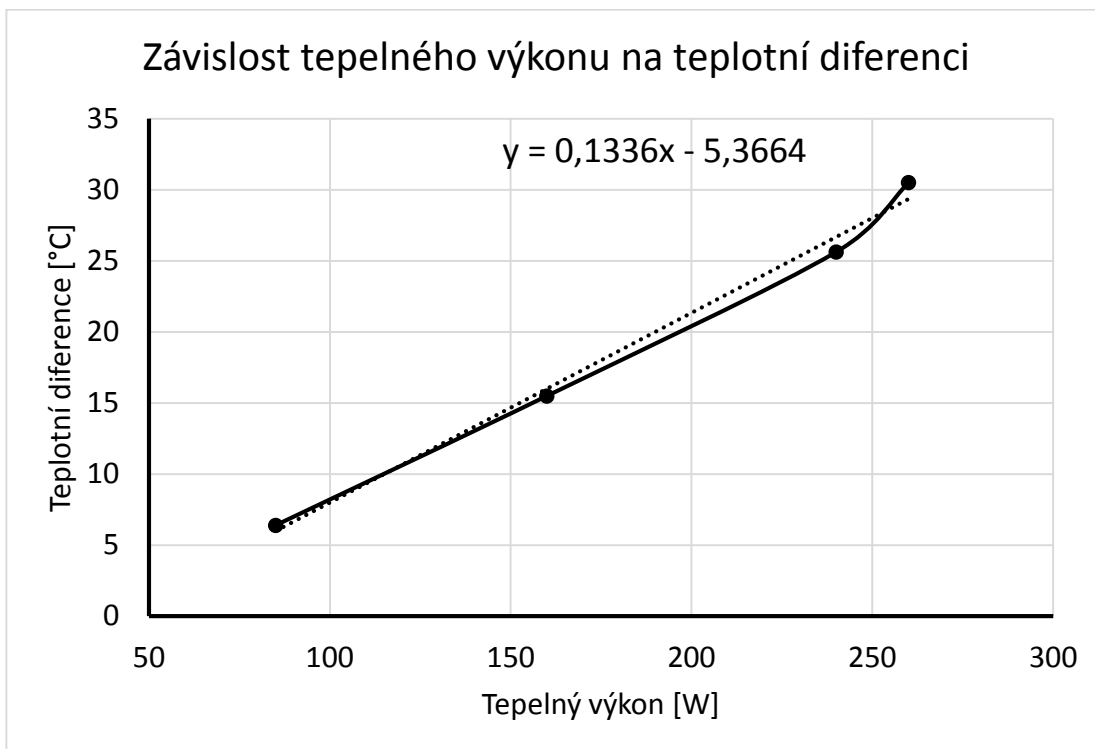
Obr. 14 Umístění panelu uvnitř Kalorimetrické komory

Dělicí příčka KK, ve které byl panel umístěn, je tvořena polyuretanovým panelem, hodnota součinitele prostupu tepla je  $U = 0,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Tato hodnota byla stanovena kalibrační zkouškou KK.

Principem kalibrační zkoušky bylo definovat tepelné ztráty dělicí příčkou mezi částmi Indoor a Outdoor v kalorimetrické komoře. Uvnitř KK bylo prováděno měření teploty vzduchu v několika vrstvách celého objemu obou částí. Byly provedeny čtyři podmínky, při kterých byly udržovány rozdílné teploty vzduchu uvnitř obou částí. U obou částí KK byl měřen tepelný výkon, který následně stanovil tepelnou ztrátu příčkou při daných teplotních podmínkách a především stanovil součinitel prostupu tepla dělicí příčky KK.

Tab. 3 Podmínky měření kalibrační zkoušky

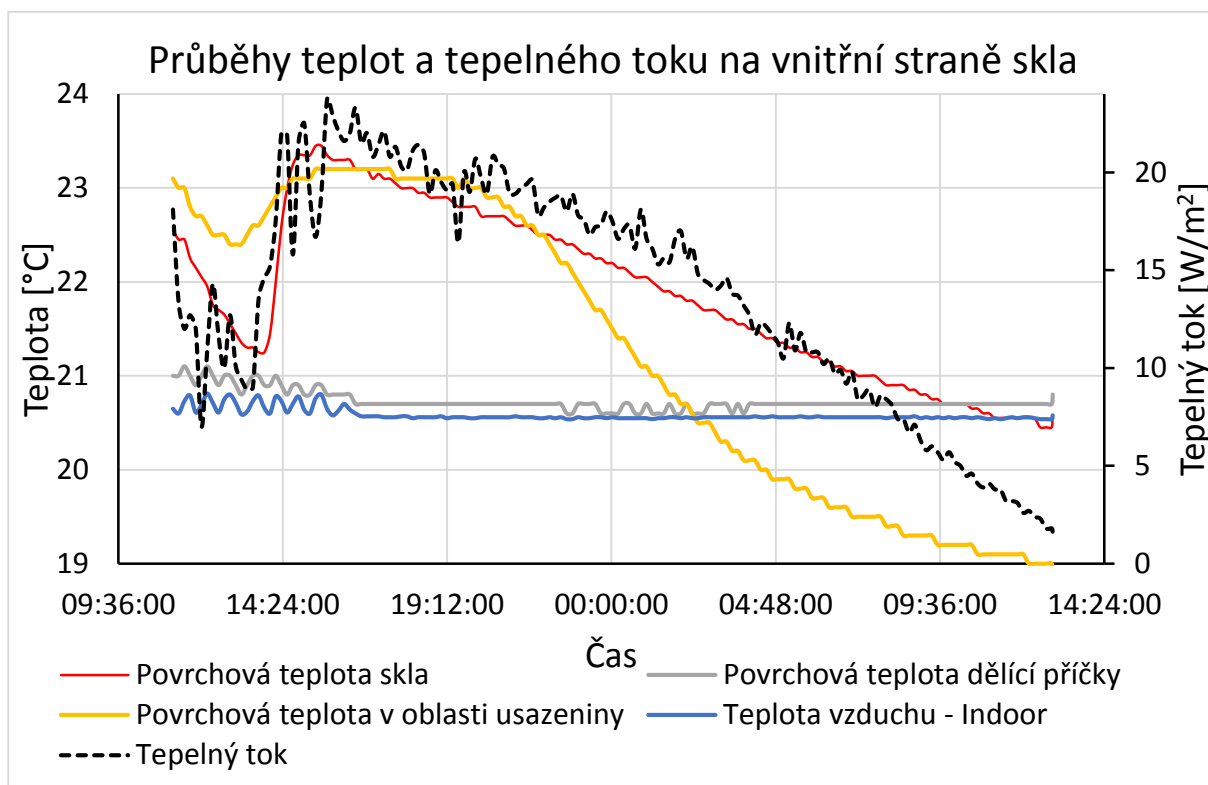
<b>Podmínky</b>	<b>30/35</b>	<b>20/35</b>	<b>10/35</b>	<b>5/35</b>
Teplota vzduchu INDOOR [°C]	29,21	20,27	10,11	5,17
Teplota vzduchu OUTDOOR [°C]	35,59	35,77	35,74	35,67
Teplotní diference	6,39	15,49	25,63	30,51
Tepelný výkon [W]	85	160	240	260



*Obr. 15 Závislost tepelné ztráty dělicí příčky na teplotní diferenci obou části KK*

#### **4.1.1 Proces krystalizace**

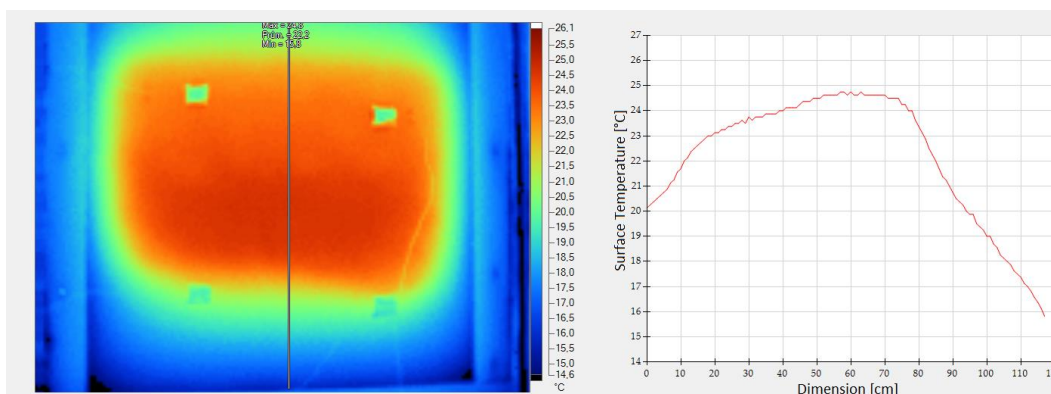
Proces krystalizace představuje obnovu akumulčního média ve fázi tuhnutí z kapalného do pevného stavu. Během tohoto procesu dochází k uvolnění akumulované energie z materiálu do okolního prostoru. Tato zkouška nahrazovala situaci v zimním období, kdy sluneční záření prostupující přes prizmatické sklo způsobí roztání PCM a následně během nočních hodin, kdy je venkovní teplota velmi nízká bude docházet k uvolnění akumulované energie z PCM do okolí.



Obr. 16 Povrchové teploty, tepelný tok na vnitřní straně skla během testu, vnitřní teplota vzduchu 20,5 °C teplota vzduchu na venkovní straně -15 °C.

Obr. 16 zobrazuje průběhy povrchové teploty na vnitřní straně skla během specifického testu v KK, kdy na vnější straně panelu v Outdoor části KK byla teplota vzduchu -15 °C. Tento graf zaznamenává pouze proces krystalizace a zároveň zobrazuje průběh a dobu, za kterou dosáhne povrchová teplota skla teploty okolí. Počáteční podmínky měření byly 20 °C teplota vzduchu v Indoor a Outdoor části. Po vytemperování outdoor části na teplotu vzduchu -15 °C, bylo započato měření, viz Obr. 16. Na počátku měření byl PCM materiál uvnitř panelu v kapalném stavu včetně usazeniny ve spodní části. Červená křivka vykresluje průměrnou povrchovou teplotu skla, která byla měřena ve čtyřech bodech. Žlutá křivka vykresluje průměrnou povrchovou teplotu v oblasti usazeniny. Již v měření je patrný rozdíl mezi teplotou v pásmu usazeniny a okolní teplotou skla. Hydrát soli má v pevném stavu vyšší tepelnou vodivost než v kapalně fázi, proto je na počátku měření teplota v pásmu usazeniny vyšší než v okolní ploše, kde je PCM v kapalném stavu. Počátek krystalizace PCM je patrný v čase 14:20. Tehdy dochází k uvolnění energie, která je způsobena procesem krystalizace. Průměrná povrchová teplota skla vzrostla o 3 °C, v případě teploty usazeniny je tento nárůst menší. Rozdílné chování povrchové teploty zobrazuje celý průběh, jsou tak zřejmé rozdílné vlastnosti usazeniny, která je způsobena nevhodným umístěním PCM v celém objemu meziskelního prostoru. Obdobné výsledky zobrazuje také

termogram, který byl proveden na počátku procesu krystalizace. Tento snímek zároveň vizualizuje množství energie, které je z panelu uvolněno během procesu tuhnutí. Přestože je teplota vzduchu na vnější straně skla  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , je povrchová teplota panelu na vnitřní straně téměř  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Povrchová teplota skla dosáhla teploty okolí až za dobu 19 hodin a to při vnější teplotě vzduchu  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a nulového slunečního záření.



*Obr. 17 Termogram povrchu skla během krystalizace*



*Obr. 18 Fotografie uložení skla v dělicí příčce KK včetně sedimentu*

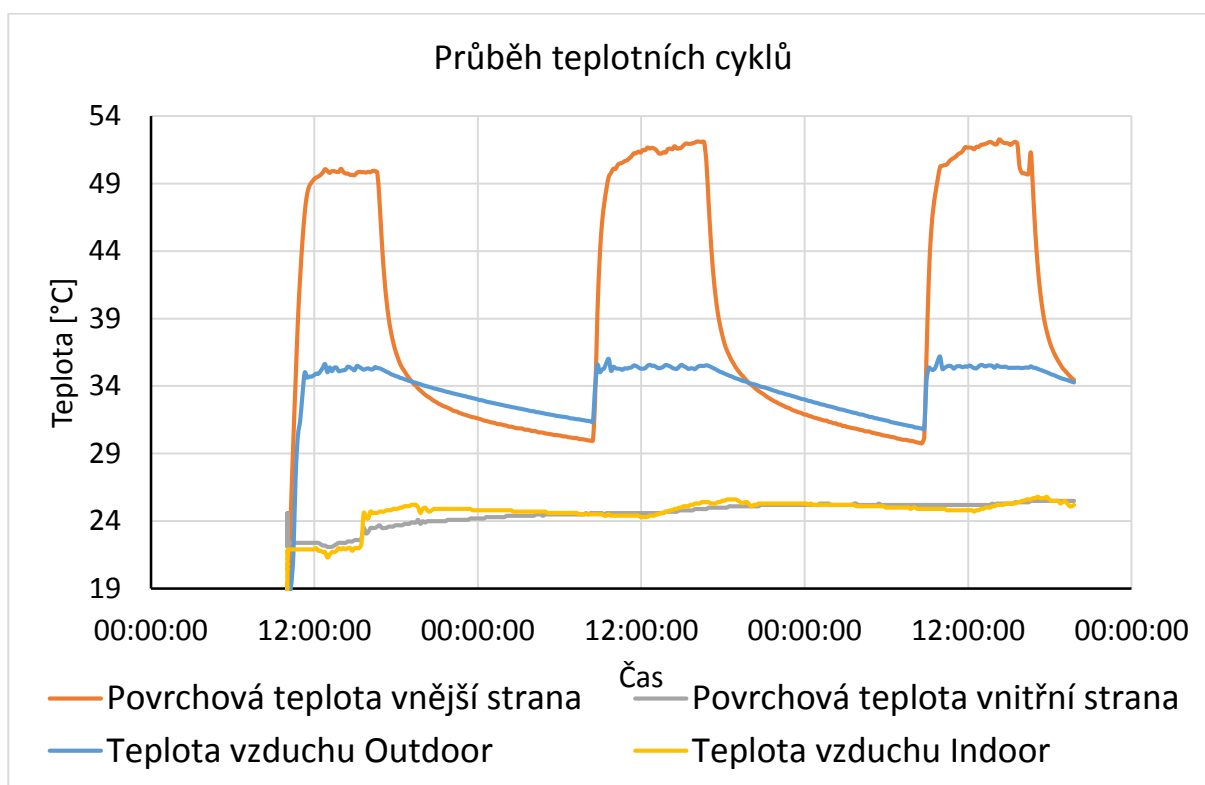
Na fotografii Obr. 18 je zobrazen testovaný vzorek v dělicí příčce KK s vzniklou usazeninou ve spodní části skla. Tato usazenina pokrývá téměř 25 % plochy celého skla. V případě opakovatelnosti cyklů tání a tuhnutí se předpokládá, že PCM bude neustále degradovat a to především jeho tepelně akumulční vlastnosti. Výsledky tohoto experimentu byly publikovány na mezinárodní konferenci Advanced Building Skins ve Švýcarsku, kde byl s těmito výsledky konfrontován přímo výrobce skel.

### 4.1.2 Teplotní cykly

Dalším specifickým testem transparentního vzorku bylo provedení teplotních cyklů pro tři různé délky trvání. Na povrchu obou částí skla byla měřena povrchová teplota a to ve čtyřech bodech. Na vnější stranu skla působilo tepelné záření z infračerveného zářiče o výkonu  $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , teplota vzduchu byla udržována  $34 \text{ }^\circ\text{C}$ . Infrazářič byl umístěn před celou plochu vnější strany skla a nahrazoval tak tepelné záření slunce. Na vnitřní straně skla v Indoor části nebyla teplota vzduchu řízena a pohybovala okolo  $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Působení vysoké teploty a tepelného záření na vnější stranu skla bylo testováno v různé době trvání a to ve třech po sobě následujících cyklech. Tento experiment ověřoval chování transparentního prvku během působení slunečního záření.

Tab. 4 Podmínky měření teplotních cyklů

Test	Teplota vzduchu v Outdoor části KK [ $^\circ\text{C}$ ]	Vnější povrchová teplota [ $^\circ\text{C}$ ]	Doba trvání testu [hod]
1	34	50	3
2	34	51	8
3	34	51	9

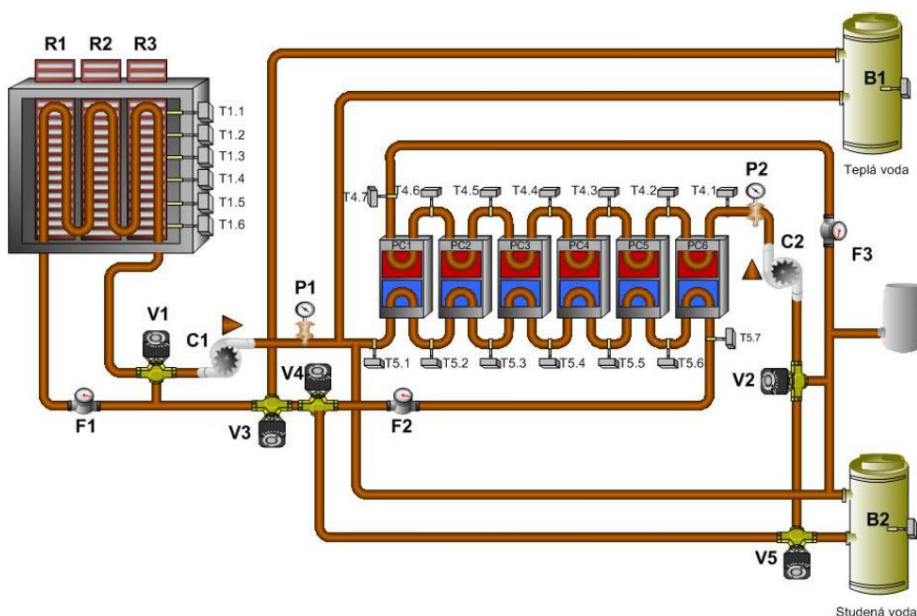


Obr. 19 Průběhy povrchových teplot skla a teploty okolí během teplotních cyklů

Během jednotlivých cyklů byla povrchová teplota na vnější straně skla více než 50 °C. Přesto i v případě déletrvajícího cyklu nepřesáhla povrchová teplota na vnitřní straně skla 26 °C. Tento experiment prokázal vysoké tepelně izolační vlastnosti ale také tepelnou setrvačnost. Přestože bylo sklo vystaveno vysoké teplotě po dobu až 9 hod, nedošlo vlivem vícevrstvé konstrukce skla k zdatelnému prostupu tepla skrz jeho konstrukci do vnitřního prostoru. Výrobce uvádí hodnotu součinitele prostupu tepla  $U = 0,48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  [19].

## 4.2 Akumulace energie v PCMs ve formě chladu

K využití pasivní i aktivní aplikace PCMs bylo provedeno měření na termálních panelech laboratoře D307. Tyto panely byly předmětem výzkumu již v mé diplomové práci [28], kde byly získány hodnoty součinitele přestupu tepla, časové konstanty a to původního a také upraveného povrchu termálního panelu. Jednalo se však především o zprovoznění systému v režimu ohřevu s využitím topných elektrických fólií. Proto v návaznosti na diplomovou práci bylo provedeno měření v režimu chlazení s využitím zdroje chladu a to tepelného čerpadla a peltierových článků. Testování bylo prováděno v letním období, kdy teplota vzduchu uvnitř laboratoře výrazně překračovala 27 °C tedy hranici teploty pro použití chladicího zařízení dle [7].



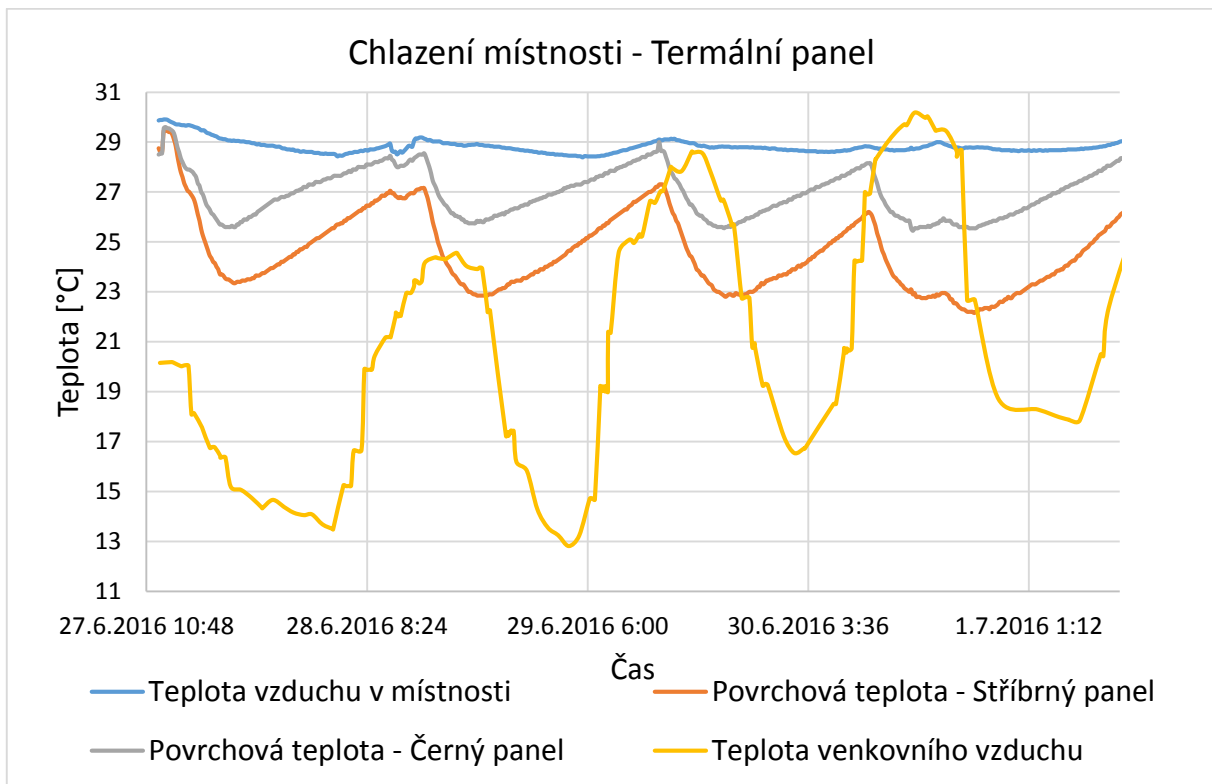
Obr. 20 Schéma technologie s termálními panely [23]

Technologie využívající termální panely s PCM umožňuje využívat akumulaci tepla i chladu. Tento systém lze provozovat v několika režimech dle daných



požadavků. V pasivním režimu využívají termální panely základní funkci tepelně akumulčních materiálů a to akumulovat přebytečné teplo v místnosti. Měření v pasivním režimu nejen v období léta potvrdilo stěžejní nevýhodu akumulace v PCM a to vybíjení akumulované energie. Teplota termálních panelů byla neustále i během chladných nocí nad 22 °C. Z výsledků měření během aktivního režimu akumulace tepla v zimním období, byla teplota PCM rovna teplotě vzduchu v místnosti, která byla cca 22 °C. V průběhu celého roku tak nebylo možné dosáhnout v pasivním režimu nižší teploty PCM než 22 °C. Stabilizace teploty vzduchu v místnosti nebylo v pasivním režimu dosaženo a to z důvodů nízkého bodu tání PCM.

Teploty vody na výstupu z tepelného čerpadla byla 10 °C, teplota vody v nádrži se pohybovala okolo 11 °C. Počáteční teplota vzduchu v místnosti byla 30,4 °C, tomu odpovídala počáteční povrchová teplota obou termálních panelů. Laboratoř je orientována na jih, je prosklená po celé délce obvodové stěny. Přestože technologie pracovala téměř 12 hodin denně, nebylo možné dosáhnout povrchové teploty na termálním panelu méně než 22 °C. Stávající technologie a aplikace trubkového výměníku uvnitř termálního panelu neumožňuje dostatečné chlazení všech vrstev tepelně akumulčních panelů uvnitř termálního panelu. V grafu je zobrazen průběh teplot v letním období po dobu 5 dnů. Přestože nebylo dosaženo ochlazení všech vrstev PCM uvnitř termálního panelu, bylo dosaženo nepatrné teplotní stabilizace uvnitř místnosti. V tomto případě bylo využito především citelného tepla PCM, které umožnilo stabilizovat teplotu vzduchu v místnosti pod 29 °C. V případě pasivního využití těchto termálních panelů dosahovala teplota vzduchu v místnosti až 32 °C.



Obr. 21 Výsledky měření v chladicím režimu

### 4.3 Přenos tepla z tepelně akumulčních materiálů do okolního prostředí

Předmětem měření byl nejen vliv pasivní aplikace PCMs na vnitřní klima místnosti, ale především problematika přenosu tepla z povrchu materiálu do okolního prostředí.



Obr. 22 Termální panely v laboratoři D307

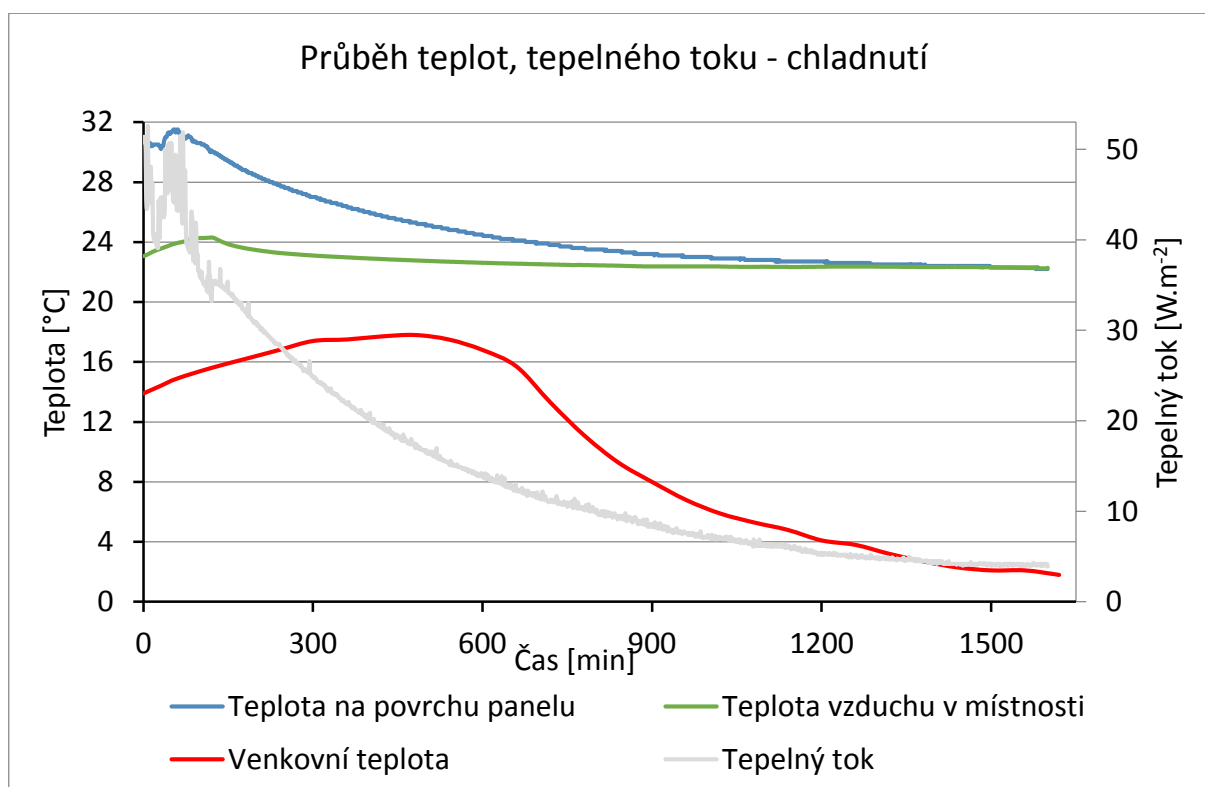
Výsledky předchozích měření, které byly součástí mé diplomové práce, stanovily součinitel přestupu tepla a časovou konstantu [28].

Tab. 5 Hodnoty součinitele přestupu tepla termálního panelu

Původní povrch	Upravený povrch
Součinitel přestupu tepla $h_c$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	
4,1	8,29

Tab. 6 Hodnoty časové konstanty termálního panelu

Původní povrch	Upravený povrch
Časová konstanta $\tau$ (hod)	
6,6	5,5



Obr. 23 Průběh teploty termálního panelu během průběhu chladnutí

Obr. 23 zobrazuje průběh chladnutí termálního panelu v laboratoři. Počáteční podmínky byly 22,5 °C teplota vzduchu a 31,5 °C povrchová teplota termálního panelu, teplota venkovního vzduchu 13,8 °C. Topné fólie, které zvýšily teplotu panelu na požadovanou hodnotu, byly vypnuty a sledovanou veličinou byla povrchová teplota termálního panelu. Z časové konstanty, byla následně určena hodnota součinitele přestupu tepla. Samotná hodnota součinitele přestupu tepla se v průběhu procesu chladnutí mění vlivem změny teploty a také změny měrné tepelné kapacity PCM. Stanovená hodnota tohoto součinitele je pouze průměrná pro daný teplotní rozsah.

Povrchová úprava způsobila zvýšení součinitele přestupu tepla o dvojnásobek, tento jev byl také patrný v době chladnutí, kdy časová konstanta klesla téměř o

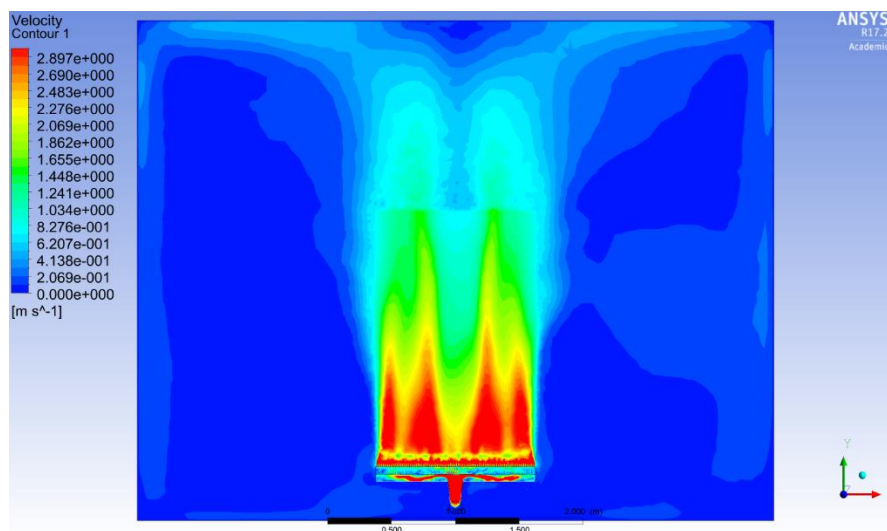
hodinu. Tyto výsledky potvrdily zvýšení dynamiky přenosu tepla a snížení doby chladnutí o 16 %. Přesto nebylo dosaženo mezní hranice fázového přechodu a to také z důvodů teploty vzduchu v místnosti, která po dobu měření neklesla pod 22 °C.

Výsledky těchto měření potvrzují nepříliš vhodně zvolenou teplotu fázového přechodu PCM. Tento akumulární materiál má teplotu přechodu 21,5 °C. Nelze však vždy očekávat ochlazení tohoto materiálu během letních dní pod tuto hranici. Funkčnost systému využívajícího tento tepelně akumulární materiál tak může být omezena.

#### **4.3.1 Experimentální využití nucené konvekce k zvýšení přestupu tepla z PCM do okolí**

Schopnost PCM uvolnit akumulovanou energii nastává při ochlazení daného materiálu pod bod tání, jedná se tedy o proces tuhnutí případně krystalizace. Tento stav v PCM nastává většinou v nočních hodinách, kdy teplota vzduchu v exteriéru a také interiéru klesá, zde dochází k uvolnění akumulované energie. Mnohdy tento jev však vůbec nenastane v případě vysokých teplot vzduchu v místnostech a také v případě jevu podchlazení. Schopnost vybití naakumulovanou energie pro regeneraci akumulárního média může představovat nefunkčnost celého systému a to i během několika dnů, kdy jsou teploty v místnosti nejvyšší. Jednou z možností jak zvýšit efektivitu celého procesu akumulace je zvýšit součinitel přestupu tepla na povrchu daného materiálu. Další možností bylo využít proudění vzduchu, který proudí podél povrchu daného materiálu a zvyšuje tak proces ochlazování. Jednalo se však pouze o experiment, který by zefektivnil přenos tepla z daného materiálu do okolního prostředí.

Důležitým prvkem ochlazování povrchu materiálu je vytvoření difuzního elementu, který by zajišťoval vhodné rozložení proudu vzduchu po celém povrchu daného systému. K návrhu difuzního prvku bylo využito numerické simulace, kde byly testovány různé úpravy difuzního prvku. Jako simulační software byl využit ANSYS Fluent. Dle výsledků byl následně vyroben difuzní element, který byl poté testován na daném systému s PCMs.



Obr. 24 Rozložení proudu vzduchu z difuzoru - Simulace

V případě aplikace difuzoru pro ochlazování termálního panelu bylo využito ventilátoru s průtokem vzduchu, který byl zvolen vzhledem k rychlosti a charakteru proudění vzduchu na  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ . Tato rychlost byla zvolena s ohledem na efektivní rozložení proudu podél povrchu panelu a také vzhledem k přípustným hodnotám rychlosti proudění v pásmu pobytu osob dle nařízení vlády č. 523/2002. Difuzní prvek představuje ve své podstatě štěrbinovou vyústku, u které je důležité dosáhnout požadovaného dosahu proudu vzduchu a také rychlosti proudění. V našem případě se jednalo o volné izotermické proudění vzduchu, kde teplota přiváděného vzduchu byla stejná jako teplota vzduchu v daném prostoru.

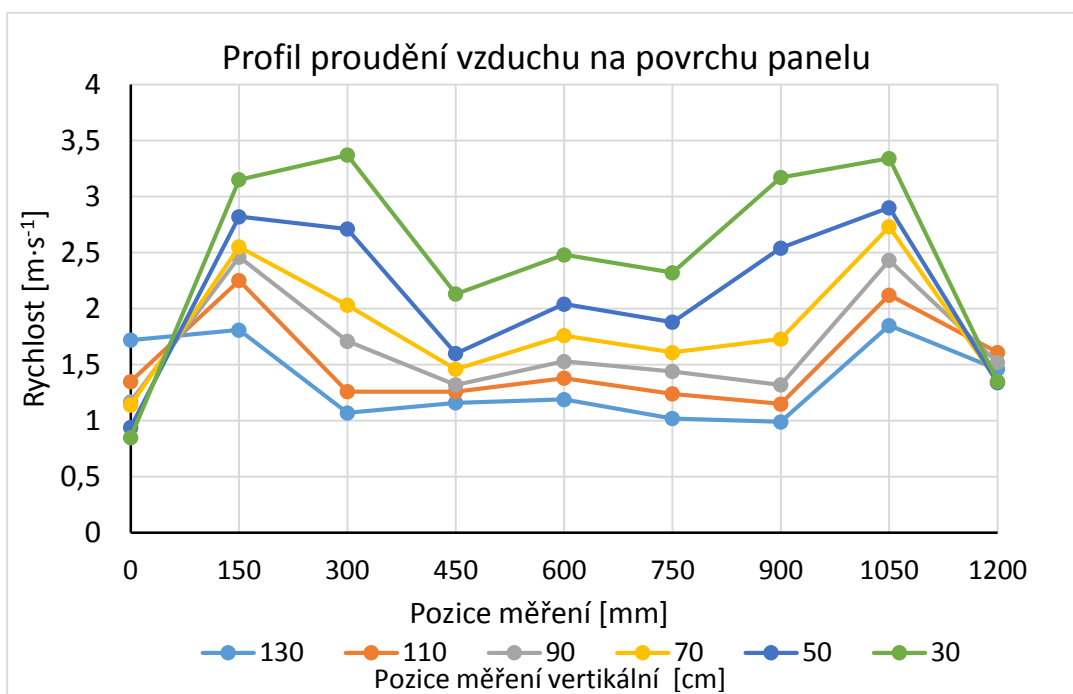
Pro upřesnění bylo využito anemometru, dle kterého byla měřena rychlost proudění v různých bodech na povrchu panelu. Tyto výsledky téměř odpovídaly výsledkům numerické simulace. Rychlost proudění byla v každém bodě na povrchu panelu různá. Tato skutečnost však nepředstavuje podstatnou nepřesnost, protože během ochlazování panelu dochází k fázovým změnám uvnitř PCM. V procesu ochlazování se tepelně technické vlastnosti PCM neustále mění. Během celého procesu chladnutí se součinitel přestupu tepla neustále a výrazně mění, proto nelze přesně definovat jeho průměrnou hodnotu. Jedná se tak pouze experimentální stanovení hodnoty. Stěžejním ukazatelem efektivity dynamiky přenosu tepla se tak stává časová konstanta, dle které lze hodnotit změnu dynamiky přenosu tepla z PCM do okolního prostředí.

Provedení vizualizace proudění podél povrchu termálního panelu bylo velice obtížné. Prvotní metoda využívala kouřové zkoušky společně s nasvětlením halogenových světel a laserů. Další metodou vizualizace bylo použití generátoru heliových bublinek. V tomto případě vizualizace proudění potvrdila výsledky ze

simulace a vznik turbulentního proudění ve vrchní části panelu. Vytvořit však obraz proudu s heliovými bublinkami bylo v takto velké oblasti obtížné. Proto je zde uvedena fotografie pouze kouřové zkoušky termálního panelu.



Obr. 25 Kouřová zkouška rozložení vzduchu z reálného difuzoru

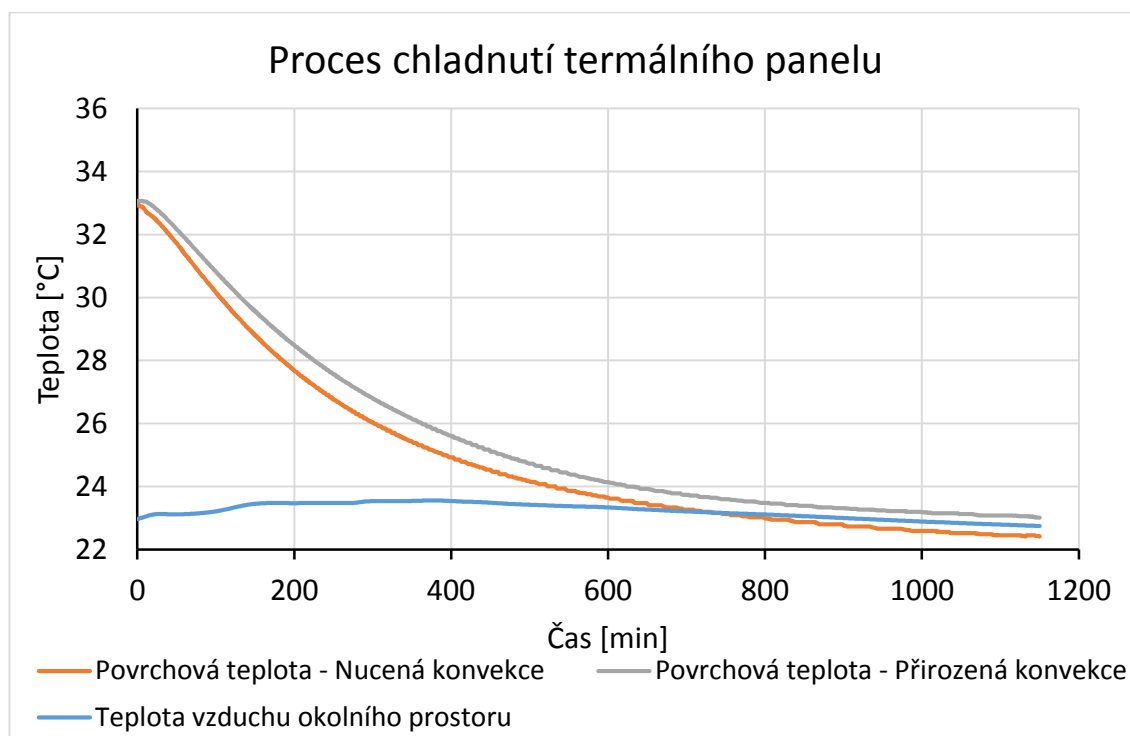


Obr. 26 Rychlost proudění na povrchu panelu

Výsledky měření rychlosti proudění na povrchu panelu měřeného pomocí vrtulkového anemometru jsou zobrazeny na Obr. 26. V grafu je patrná nerovnoměrnost rychlosti proudění, která téměř odpovídá výsledkům numerické simulace a také kouřové zkoušky na reálném panelu. Na různých místech panelu je odlišná rychlost proudění, z toho vyplývá i různý součinitel přestupu tepla. Nelze tak přesně stanovit přesnou hodnotu součinitele přestupu tepla z povrchu panelu do okolí. Na Obr. 26 je patrná změna rychlosti proudění, ta se vzdáleností klesá a v oblasti 1,3 m od vyústky je pouze  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nelze zajistit rovnoměrné proudění podél celého panelu, vyšší rychlosti ventilátoru způsobují rozšíření turbulentní oblasti na povrchu panelu. Ve vrchní vrstvě panelu by docházelo k odtržení mezní vrstvy a vzniku vírů, což by snižovalo efekt ochlazení.

### 4.3.2 Chlazení termálního panelu

Jak je patrné z průběhu kouřové zkoušky, rychlostní profil proudu vzduchu byl velmi nerovnoměrný. Výška panelu 2 m a nerovnosti povrchu tak způsobily nerovnoměrné ochlazování termálního panelu. Přestože nebyl panel ochlazován po celé své ploše, bylo dosaženo snížení časové konstanty panelu z 308 min na 278 min.



Obr. 27 chlazení termálního panelu přirozená a nucená konvekce



Tab. 7 Výsledky experimentu chlazení s využitím nuceného proudění vzduchu

	<b>Přirozená konvekce</b>	<b>Nucená konvekce</b>
Časová konstanta	5,2 hod	4,6 hod
Součinitel přestupu tepla	$9,32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	$18,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Hodnota součinitele přestupu tepla viz Tab. 7, byla určena pro průměrnou rychlost proudění  $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Snížení časové konstanty bylo v tomto případě pouze o 10 %.

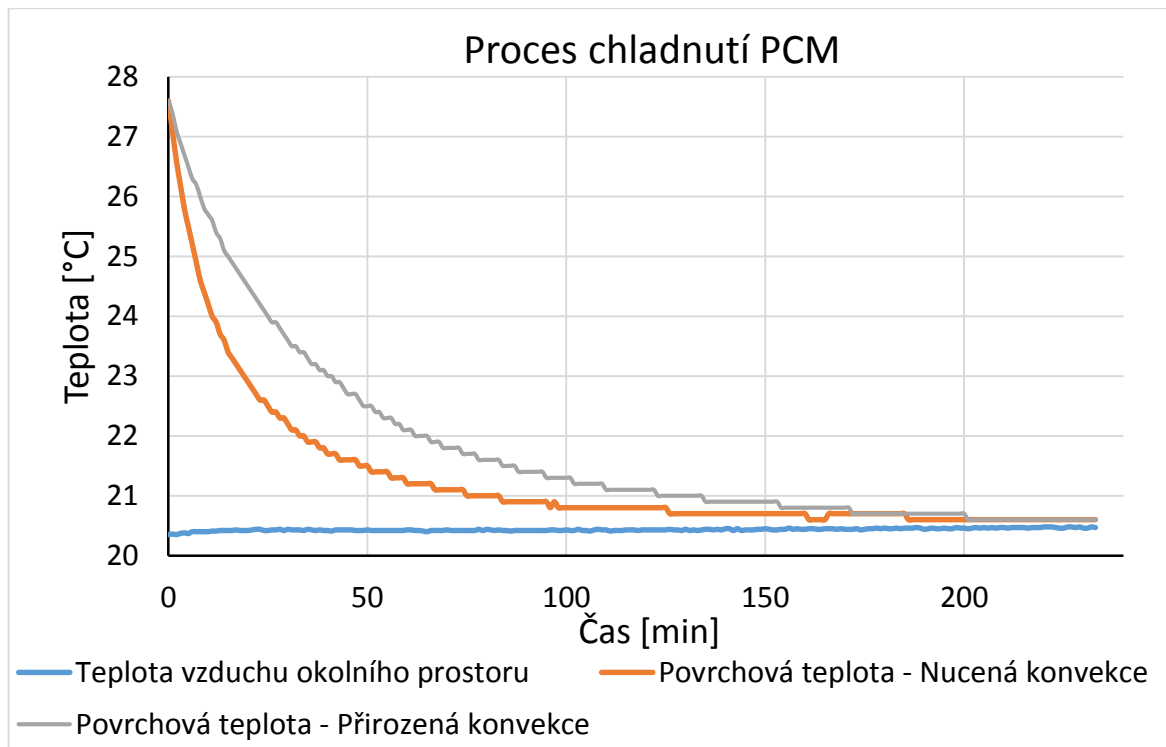
### **4.3.3 Chlazení tepelně akumuláční desky Dupont Energain**

Difuzní prvek byl také aplikován přímo na akumuláční panel o rozměrech 1 x 1,2 m. U tohoto panelu byla provedena povrchová úprava, zvýšení emisivity povrchu na 0,85 a následně byl panel umístěn v kalorimetrické komoře, kde byl minimalizován vliv okolního prostředí na samotný proces chladnutí. Měřicí prvek je zobrazen na Obr. 28, výsledky měření jsou v grafu, viz Obr. 29. Z grafu je patrné urychlení procesu chladnutí, z naměřených hodnot bylo poté vypočten součinitel přestupu tepla.

Určení součinitele přestupu tepla bylo i v tomto případě pouze informativní. Rozložení proudu vzduchu na povrchu panelu bylo v porovnání s termálním panelem rovnoměrnější. Tento efekt je způsoben menší výškou panelu, u termálního panelu docházelo ke snižování rychlosti s rostoucí vzdáleností od výustek difuzoru a také vzniku turbulentního proudění. V případě volné konvekce a určení součinitele přestupu tepla se jedná také o jeho průměrnou hodnotu, která je vztažena k danému teplotnímu rozdílu během jeho ochlazení.



Obr. 28 Použití nucené konvekce (difuzoru) k ochlazení PCM desky

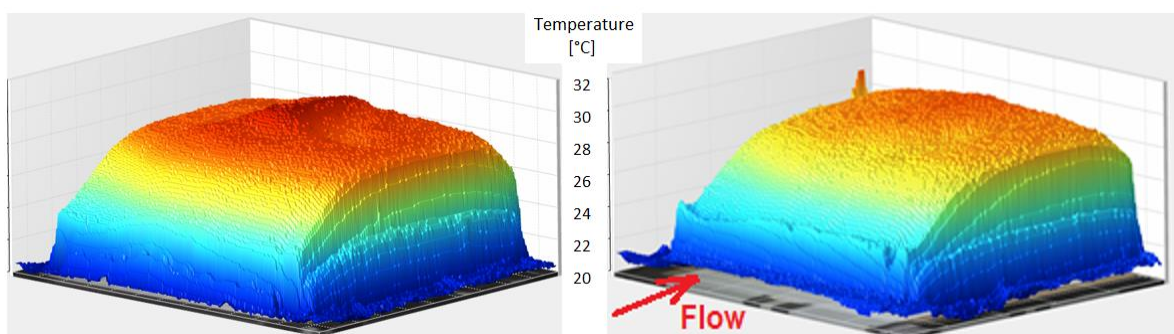


Obr. 29 Křivka chlazení pro nucenou a přirozenou konvekci

Změna součinitele přestupu tepla v procesu nucené konvekce je patrná v hodnotě časové konstanty.

Tab. 8 Výsledky experimentu chlazení akumulární desky

	<b>Přirozená konvekce</b>	<b>Nucená konvekce</b>
Časová konstanta	39 min	19 min
Součinitel přestupu tepla	$6,59 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$21,72 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$



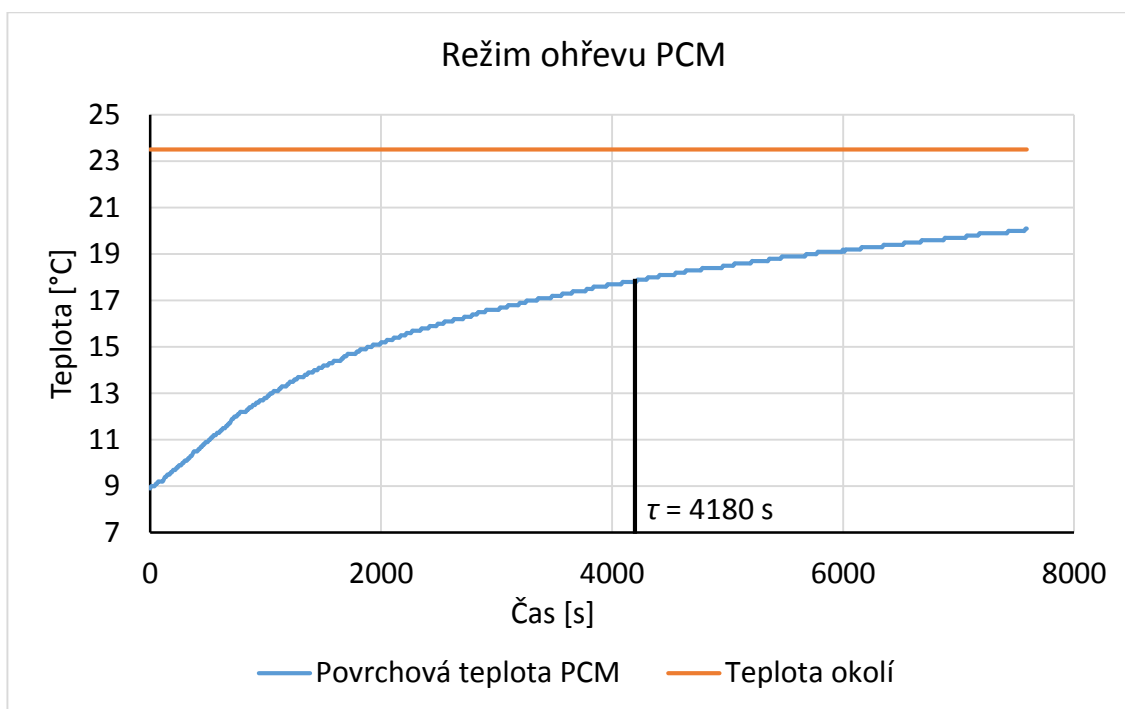
Obr. 30 Termogram na počátku procesu chlazení, vpravo s využitím nuceného proudu vzduchu

Na počátku chlazení byl proveden termogram, který je zobrazen na Obr. 30 vlevo. Ve stejný okamžik byl zapnut ventilátor, to zobrazuje termogram vpravo, kde je prokazatelně patrný vliv ochlazení PCM desky a to v celé ploše.

Hodnoty součinitele přestupu tepla se nepatrně liší v porovnání s termálním panelem to je dáno konstrukcí a také jinou emisivitou povrchu termálního panelu. Nelze však srovnávat tyto dva experimenty a to vzhledem k rozdílným počátečním a okrajovým podmínkám měření. Snížení časové konstanty bylo v tomto případě o 48 %. Takto značné snížení je způsobeno rozdílnou skladbou PCM desek je v termálním panelu dvanáct a v případě měření jednoduché desky bylo použito pouze 2 desek. Metoda využívající nuceného proudění vzduchu při aplikaci na jednoduchou skladbu PCM, představuje jednu z možností zefektivnit proces přenosu tepla z PCM do okolí. Reálná aplikace těchto akumulárních materiálů v budovách je celoplošné umístění na stěnu nebo strop. Zajistit ochlazování pomocí proudění vzduchu podél těchto velkých ploch by v praxi bylo konstrukčně i finančně náročné.

#### 4.3.4 Obrácený proces chladnutí PCM

Výsledky DSC analýzy, které uvádí [15] a také získané výsledky měření z DTA analýzy ukazují na vysokou hodnotu měrné tepelné kapacity PCM v nižším rozsahu teplot. Proto byl proveden experiment s PCM deskou, která byla vystavena procesu ohřevu z nízké teploty na teplotu fázového přechodu. Jednalo se pouze o vzorek 0,5x0,5 m tloušťky 5 mm bez povrchové úpravy. PCM deska byla ochlazena na teplotu 9 °C a následně byla vložena do klima skříně s teplotou vzduchu 23,5 °C.

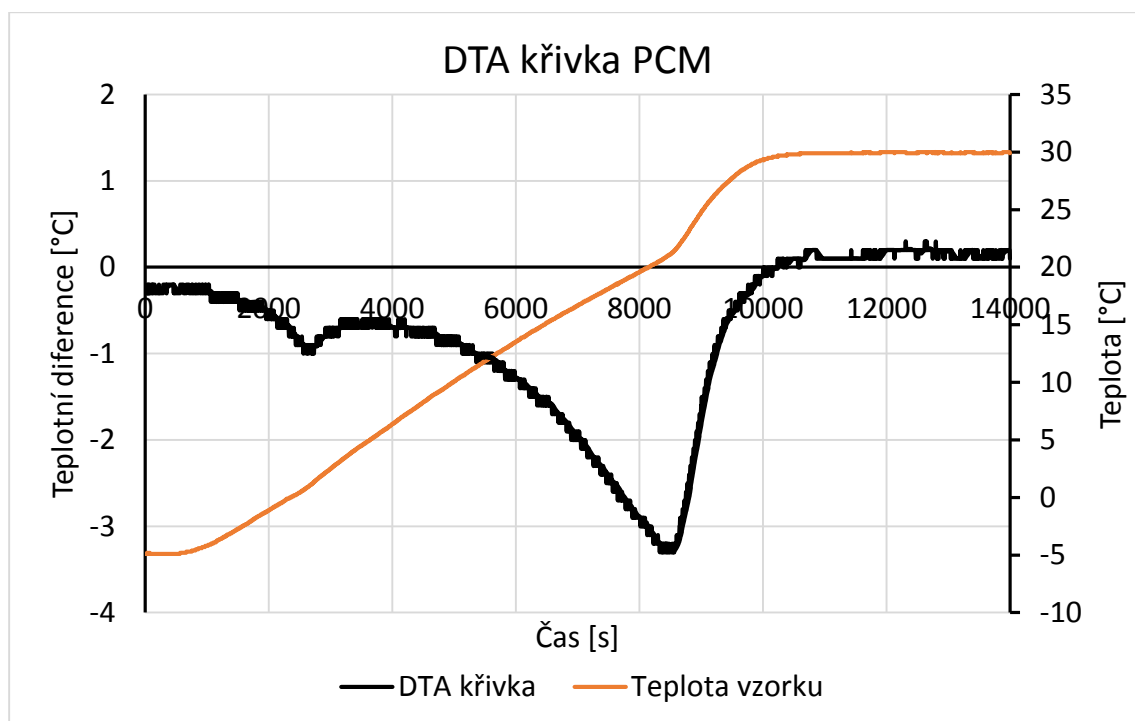


Obr. 31 Režim ohřevu PCM desky Dupont Energain

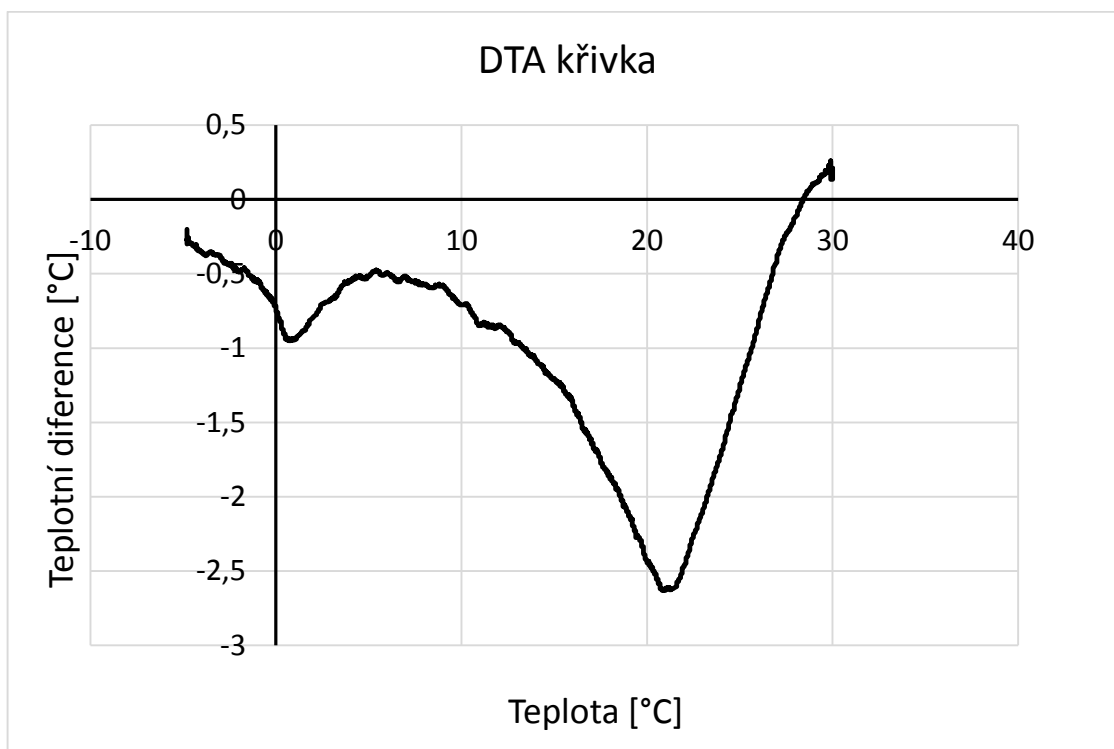
V grafu viz Obr. 31 je zobrazen průběh povrchové teplota PCM. Výsledná hodnota časové konstanty je 4180 s tedy téměř 70 minut. Z hodnoty časové konstanty lze vypočítat průměrnou hodnotu měrné tepelné kapacity pro daný teplotní rozsah. Tato hodnota je přibližně  $6800 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Povrch PCM nebyl nijak upraven, proto byla hodnota časové konstanty vyšší, než v předchozím případě viz Tab. 8. Potřebnou úpravou povrchových vlastností lze tento materiál efektivně využít především v nižší oblasti teplot, použití v chladicím zařízení.

## 4.4 Diferenční termická analýza PCM

Hlavním principem této metody je měření rozdílu teploty mezi sledovaným a referenčním vzorkem. Důležitým bodem analýzy je vystavení obou vzorků totožným klimatickým podmínkám. Proto jsou oba vzorky umístěny ve stejném prostředí a podstupují stejný teplotní program. Referenční vzorek se volí tak, aby během požadovaného teplotního rozsahu nepodstupoval žádné změny a nereagoval s materiálem v měřeném prostředí. Další podmínkou je, aby daný materiál referenčního vzorku měl podobnou teplotní vodivost a tepelnou kapacitu jako vzorek sledovaný. Nelze však v případě PCM vzorku zajistit obdobné vlastnosti i u vzorku referenčního. Vlastnosti PCMs panelů byly testovány pomocí DTA v klimatické skříni laboratoře techniky prostředí. Jako referenční vzorek byla použita vícevrstvá překližka, která měla téměř totožnou teplotní vodivost. Analýza byla provedena v teplotním rozsahu  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  s rychlosti ohřevu  $4,3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ . Výsledkem je DTA křivka, která graficky znázorňuje závislost rozdílu teplot mezi sledovaným a referenčním vzorkem na čase. Na křivce lze sledovat nulové oblasti, kdy neprobíhá žádný děj a především píky kladné při exotermickém ději a záporné při endotermním ději. Teplota u obou vzorků byla měřena uvnitř těchto materiálů, aby nedocházelo k nepřesnosti měření vlivem proudění vzduchu uvnitř klima skříně.



Obr. 32 DTA křivka PCM



*Obr. 33 DTA křivka v, ohřev 4,3 °C/min v rozsahu -5 °C až 30 °C*

Z DTA křivky je patrný nejen bod tání (melting point) v oblasti 20,5-21,4 °C, ale především schopnost akumulace energie v oblasti nižších teplot 10- 21 °C. Zde je hodnota měrné tepelné kapacity a schopnost akumulace výrazně vyšší než je tomu u vyšších teplot. Lze tak předpokládat vysokou schopnost akumulace chladu při aktivní aplikaci do chladicího zařízení.

## 4.5 Funkční vzorek chladicího stropu

Jedním z bodů disertační práce bylo využít aktivní aplikace PCMs ve specifickém zařízení. Z výsledků měření a aplikací tepelně akumulacího média PCM, bylo vyhodnoceno jako nejvhodnější aplikovat PCM v zařízení, které by využívalo režimu chlazení. Návrh takového zařízení byl koncipován tak, aby umožnil využít nejen akumulace chladu, ale zároveň by dokázal odebírat akumulované teplo z PCM. Problematika aplikace PCMs v chladicím stropě není příliš rozšířená. Obdobná aplikace těchto materiálů je popsána v [48], kde předmětem výzkumu je regenerace PCMs při různé pozici PCMs v chladicím stropě.

Navrhnut byl chladicí strop, kde podél celé sálavé plochy byl aplikován PCM. Trubkový výměník s rozšířenou styčnou plochou slouží k chlazení a je v přímém styku s PCM. Obalová konstrukce tohoto stropu byla vytvořena s 1,5mm tlustého plechu s povrchovou úpravou na matnou bílou barvu. Minimální tloušťka tohoto krycího obalu a vysoká hodnota emisivity zajišťuje dostatečný přestup tepla mezi PCM a okolním prostředím.

V chladicím stropu je teplonosným médiem voda, která je chlazená dle žádané hodnoty. Teplota vody se udržuje nad teplotou rosného bodu v dané místnosti. Požadavkem zdroje chladu tak je teplota cca 16 °C. Provoz tohoto zařízení je energeticky hospodárný a při dostatečné chladicí ploše dokáže snadno zajistit komfortní mikroklimatické podmínky uvnitř budovy.

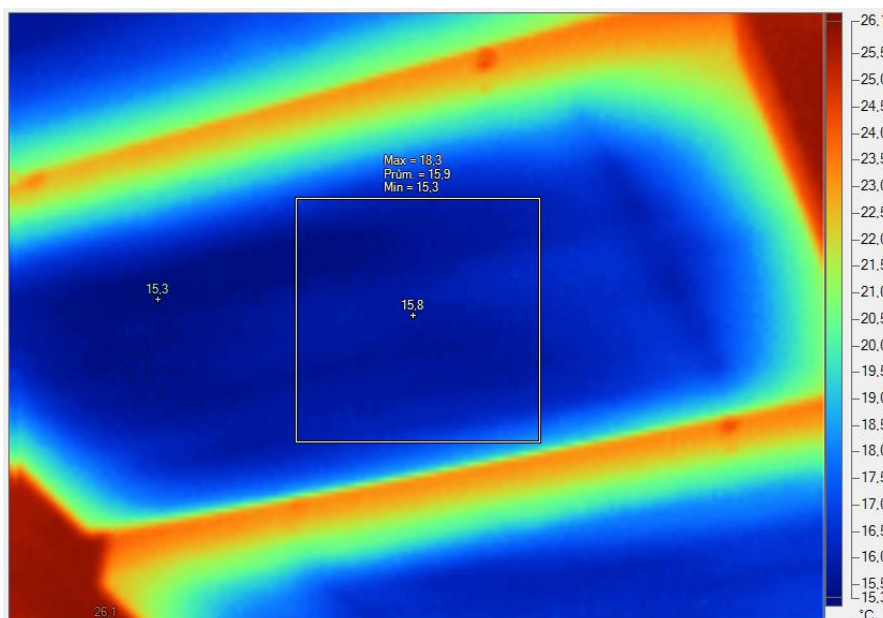
Mezi další výhody tohoto systému je schopnost odebrat akumulované teplo z PCM. Jedná se o regeneraci akumulacího média, které je v případě tohoto materiálu velice problematické. Teplotní rozsah, kdy PCM materiál uvolňuje nashromážděné teplo je 18 - 22 °C. Předchozí testy se zvýšením součinitele přestupu tepla, povrchovou úpravou nebo využití nuceného proudění neumožňovaly dosáhnout teploty fázového přechodu. Během těchto měření nebylo dosaženo této teploty v žádném z nich a to i během zimního období. Nízká teplota fázového přechodu tohoto materiálu způsobuje problematické chování z hlediska využívání opakovatelnosti akumulace tepla. Zařízení chladicího stropu však tento jev eliminuje právě svou schopností ochladit tento materiál pod bod tuhnutí. Funkce regenerovat akumulacího médium představuje jednu z možných dalších funkcí tohoto systému.



*Obr. 34 Funkční vzorek chladicího stropu*

Důležitou vlastností vyrobeného chladicího prvku je dokonalé rozložení povrchové teploty a to především u prvku s PCMs. Trubkový výměník je tvořen chladicími stropními prvky WK-D-UL-KS, které jsou složeny z tepelně vodivého pásu, ve kterém jsou nalisovány trubkové meandry tak, aby bylo zajištěno optimální vedení tepla. Správné vedení tepla přes chladicí pás do PCMs případně boxu je zajištěno pomocí specifického polepu.

K ověření teplotní homogenity takto vyrobeného funkčního vzorku chladicího stropu bylo provedeno termovizní měření.



*Obr. 35 IR snímek chladicích stropů s PCMs, provedeno 6.4.2018 12:46, teplota okolí 26 °C, relativní vlhkost 32 %, Rosný bod 8 °C, Emisivita povrchu 0,85*



Termogram zobrazuje povrchovou teplotu chladících stropů v průběhu měření, ve kterém je patrné velmi dobré rozložení teploty téměř po celé ploše chladícího stropu.

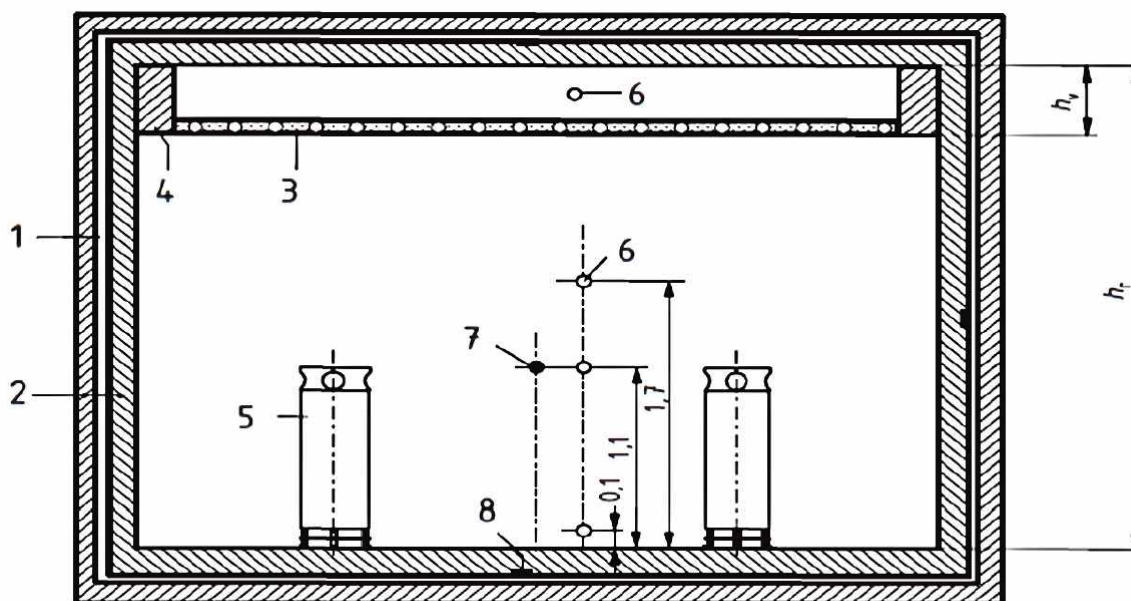
#### **4.5.1 Metodika měření chladících prvků a úprava laboratoře**

Nedílnou součástí vytvoření chladícího stropu bylo také vytvořit postup neboli metodiku měření, dle které by bylo provedeno měření chladícího výkonu tohoto zařízení. Tato metodika vychází z ČSN EN 14240, je aplikována na stávající možnosti laboratoře techniky prostředí v Indoor části komory viz Obr. 36. Z hlediska doby ustálení a stanovení chladícího výkonu bylo potřeba operativně stanovit tuto dobu samotným měřením a to především z důvodů vysoké schopnosti akumulace chladu v PCMs.

Během zkoušky je potřeba zajistit minimální tepelné ztráty okolními stěnami. Proto bude udržována teplota vzduchu v okolním kompenzačním prostoru ale také v Outdoor částí stejná jako uvnitř laboratoře.

Tepelná zátěž je uvnitř laboratoře zajištěna pomocí elektricky vyhřívaných figurín. Elektrický příkon těchto figurín je regulovatelný s maximem 180 W. Maximální vnitřní tepelná zátěž místnosti je  $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Rozmístění těchto figurín proto bylo voleno tak aby byly dodrženy požadované hodnoty tepelné zátěže a především byla udržována teplota vzduchu v místnosti dle normativních požadavků a dle chladícího výkonu chladících jednotek.

Během zkoušek je měřena teplota a vlhkost vzduchu, povrchové teploty okolních ploch včetně chladících prvků, teplota teplonosného média (vody) uvnitř chladících prvků. V měřicí místnosti je dále měřena také teplota kulového teploměru společně s přesně danými pozicemi teplotních čidel viz následující obrázek.



Obr. 36 řez měřenou částí INDOOR, rozmístění teplotní čidel, kulového teploměru a elektrických vyhřívaných figurín 1- kompenzační prostor, 2 izolace (stěna), 3 testované zařízení (chladicí strop, trámec) 4 izolace hran v oblasti chladicích stropů (uzavřený systém), 5 elektricky vyhřívaná figurína, 6 teplotní čidlo, 7 kulový teploměr, 8 měření teploty v kompenzaci. [8]

K stanovení chladicího výkonu daného zařízení je nutné měřit také objemový průtok vody proudící do chladicích stropů. Norma dále stanovuje dobu ustálení alespoň 60 minut, během kterých je měřen chladicí výkon.

Celkový chladicí výkon chladicího stropu je dán rovnicí

$$P = c_p \cdot q_m (\theta_{w2} - \theta_{w1}) \quad (4.1)$$

Kde  $q_m$  je průtok chladicího média [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

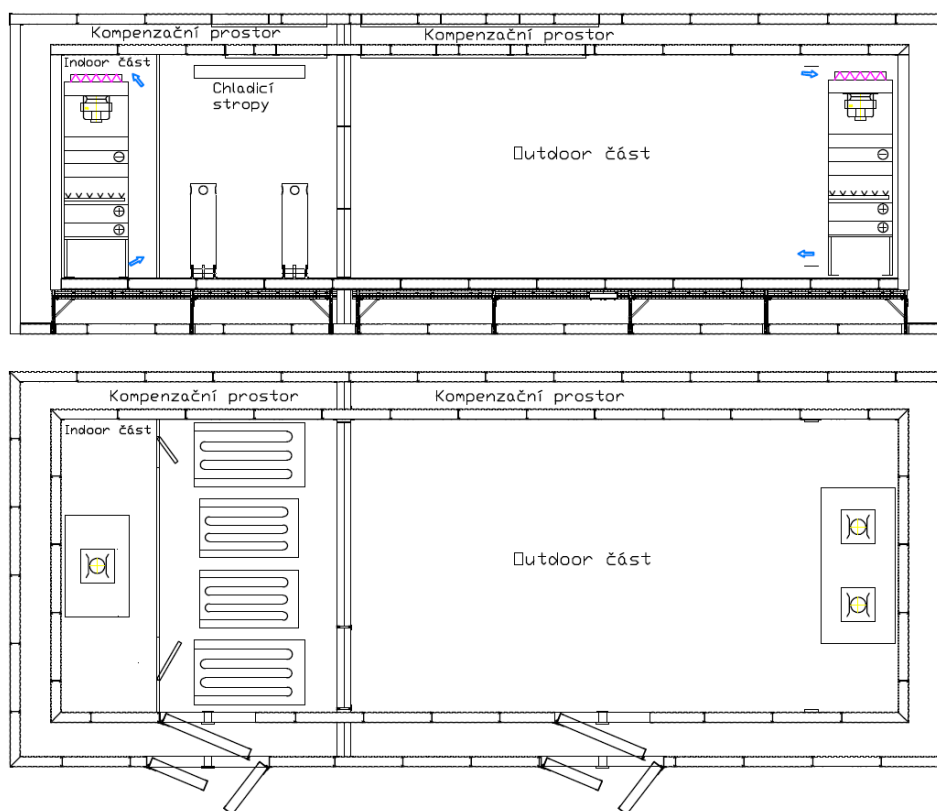
Normalizovaný chladicí výkon

$$P_a = \frac{P}{A_a} \quad (4.2)$$

Kde,  $A_a$  je aktivní plocha chladicích stropů

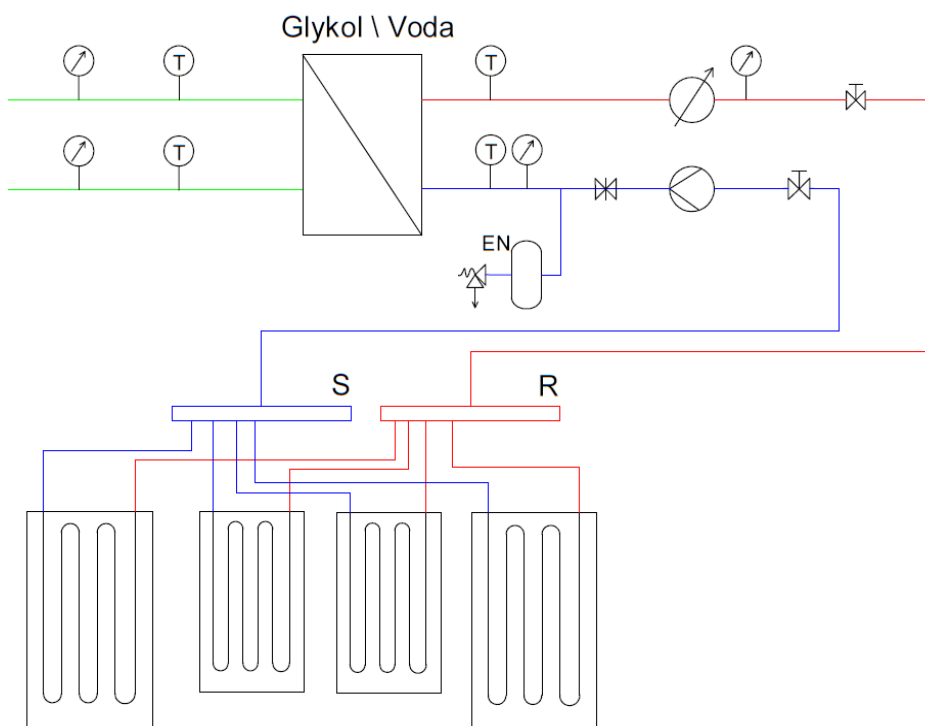
Měření chladicího výkonu je podmíněno tepelně technickými vlastnostmi měřicí místnosti. Z toho důvodu byly provedeny potřebné konstrukční úpravy uvnitř laboratoře. Požadavky metodiky měření definovaly samotnou úpravu laboratoře. Jak již bylo uvedeno metodika měření chladicích stropů a trámců byla aplikována na Indoor část KK v laboratoři techniky prostředí. Měření uvnitř laboratoře je podmíněno těsností a dobrými tepelně izolačními vlastnostmi dané konstrukce. Tyto podmínky umožňují nastavit okrajové podmínky a minimalizují tepelné ztráty okolními stěnami. Plocha místnosti má být v rozsahu 10 až 21 m<sup>2</sup> s výškou 2,7-3 m.

Nejprve byly provedeny úpravy všech povrchů uvnitř laboratoře pro zajištění vysoké hodnoty emisivity. Dále bylo nutné vytvořit dělicí příčku, která by zakryla rekondiční jednotku včetně hydraulického stolu. Navrhnutá a následně vytvořena byla ocelová konstrukce, na kterou byly připevněny PVC desky.

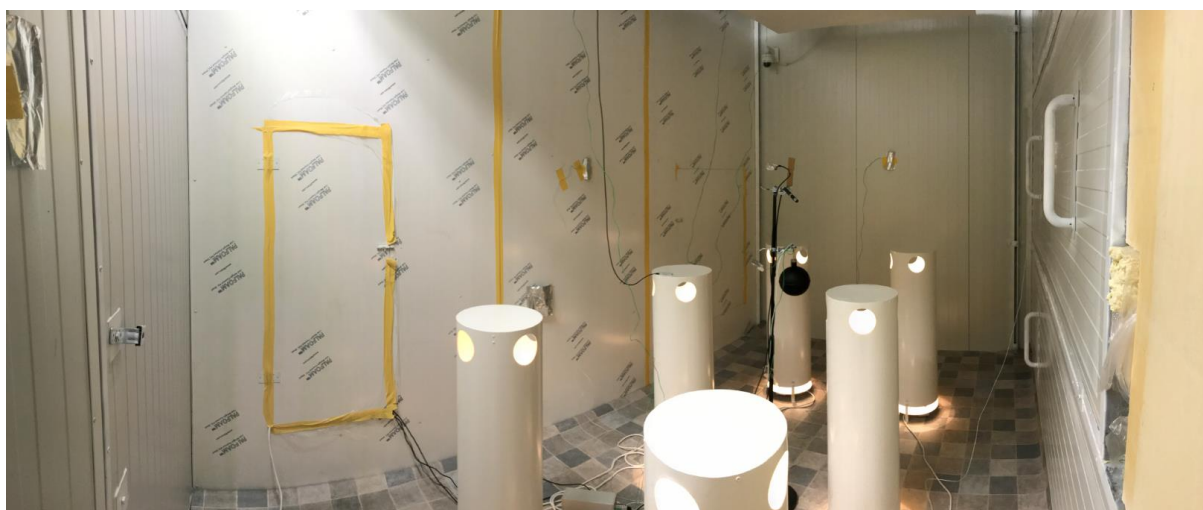


*Obr. 37 schéma měřicího pracoviště*

Stěžejní částí úpravy laboratoře bylo provedení hydraulického zapojení na stávající části hydraulického okruhu. Součástí zapojení byl průtokoměr, rozdělovač a sběrač, přes který je zapojen požadovaný počet chladicích jednotek. Přívodní hadice do chladicích zařízení jsou vedeny za krycí stěnou a jsou přímo napojeny do jednotlivých stropních jednotek.



*Obr. 38 Hydraulické zapojení chladicích stropů*



*Obr. 39 Vnitřní prostor laboratoře během měření*

## 4.6 Měření chladicího výkonu chladicího stropu

V laboratoři byly měřeny chladicí stropy o celkové ploše 4,67 m<sup>2</sup>. Stropní jednotky byly instalovány volně v prostoru stropu a nebyly izolovány v rozích, jak je tomu v případě uzavřeného chladicího stropu. Tento případ tak umožňoval využít konvektivní složky přenosu tepla mezi povrchem stropu a okolním vzduchem. Otevřené funkce stropní jednotky bylo využito především z důvodů využití aplikace PCMs, kde tato metoda umožňuje využít lepší akumulaci schopnosti PCMs. Pro srovnání bylo provedeno měření s a také bez aplikace PCMs v chladicích stropech.

### 4.6.1 Počáteční a okrajové podmínky měření

Okrajové podmínky měření a zároveň minimalizace tepelných ztrát měřící laboratoře byly zajištěny pomocí kompenzačního prostoru a Outdoorové částí KK. Během jednotlivých měření, tak byly teploty vzduchu všech okolních prostor měřící laboratoře stejné jako teplota vzduchu uvnitř laboratoře. Výsledný tepelný tok okolními stěnami byl téměř nulový. U všech použitých teplotních čidel byla ověřena jejich přesnost v teplotních testech v klimatické skříni. Tyto výsledky stanovily teplotní offsety k jednotlivým čidlům, které zvýšily přesnost samotného měření.

Vnitřní mikroklimatické podmínky laboratoře a především nízká relativní vlhkost vzduchu, umožnily provést měření s nízkou teplotou chladicí kapaliny. Hodnota rosného bodu se během zkoušek pohybovala v rozmezí 8-12 °C. Měření bylo provedeno dle normativních požadavků, viz [8], a to pro střední účinný rozdíl teplot (6±1)K, (8±1)K, (10±1)K, (12±1)K.

Výsledný chladicí výkon chladicího stropu byl určen výpočtem z průtoku a teplotního spádu teplotního média. Chladicí výkon byl také určen pomocí tepelného výkonu elektricky vyhřívaných figurín. Přesnost měření byla zhoršena, v případě měření elektrického výkonu figurín, kolísáním napětí, které způsobovalo nejistotu měření typu A v rozsahu až 10 W. Přesnost měření samotného wattmetru byla ±0,85 %. Celková nepřesnost se projevila v tepelné bilanci, která je 5% z vypočteného chladicího výkonu.

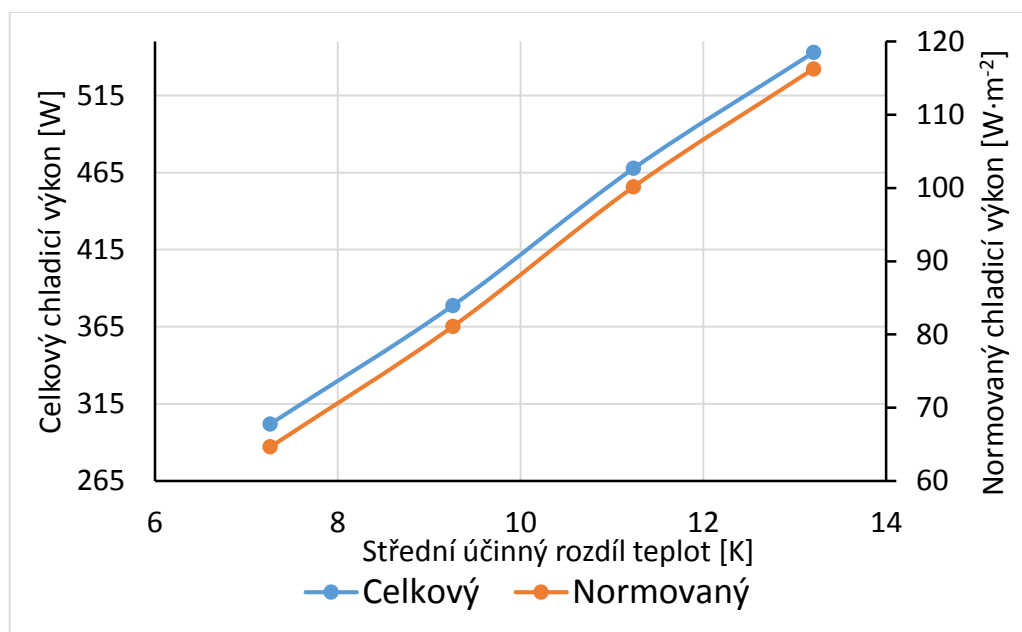
Stanovení chladicího výkonu bylo provedeno ve čtyřech bodech měření dle středního účinného rozdílu teplot a to pro rychlost průtoku vody v chladicích stropech 5 l·min<sup>-1</sup>.

#### 4.6.2 Výsledky měření chladicího výkonu chladicího stropu

Teplota vzduchu uvnitř laboratoře byla během všech měření udržována v požadovaném teplotním rozsahu 26-28 °C, průtok chladicího média 5 l·min<sup>-1</sup>. Jednotlivá měření vyžadovala potřebnou dobu ustálení teploty vzduchu v místnosti. Teplota vzduchu v místnosti byla regulována pomocí elektrického výkonu simulačních figurín. Tepelný výkon těchto figurín byl eliminován chladicím výkonem chladicích stropů. Pro zajištění větší přesnosti měření byla v případě ustálení chladicích stropů s PCMs doba ustálení řádově dvakrát větší než v případě chladicích stropů bez PCMs.

##### *Chladicí výkon chladicího stropu s PCMs*

Stanovení chladicího výkonu jednotek s PCMs představoval zdlouhavý proces a to z hlediska ustálení a stanovení daného výkonu.



Obr. 40 Celkový a normovaný chladicí výkon chladicího stropu s PCMs

Obr. 40 zobrazuje celkový a také normovaný chladicí výkon, který byl naměřen při daném průtoku a rozdílu teplot. Celkový chladicí výkon představuje výkon všech měřených jednotek o aktivní ploše 4,67 m<sup>2</sup>. V průběhu je patrná malá nepřesnost v linearitě chladicího výkonu a to při teplotním rozdílu 13 °C. Nepřesnost je dána ve stanovení chladicího výkonu během ustalovacího procesu. PCMs neustále absorbuje tepelnou zátěž z elektrických figurín a teploty chladicího média nepatrně kolísají. Výsledky chladicího výkonu pro jednotlivé teplotní rozdíly jsou uvedeny v Tab. 9

Tab. 9 Výsledky měření chladicího výkonu

Číslo měření	1	2	3	4
Střední účinný rozdíl teplot	13,21	11,24	9,26	7,26
Chladicí výkon aktivní plochy	-116	-100	-81	-64
Celkový chladicí výkon	-542	-467	-378	-302

Z výsledků měření lze stanovit chladicí výkon samotného funkčního vzorku, který byl vyroben ve dvou rozměrech.

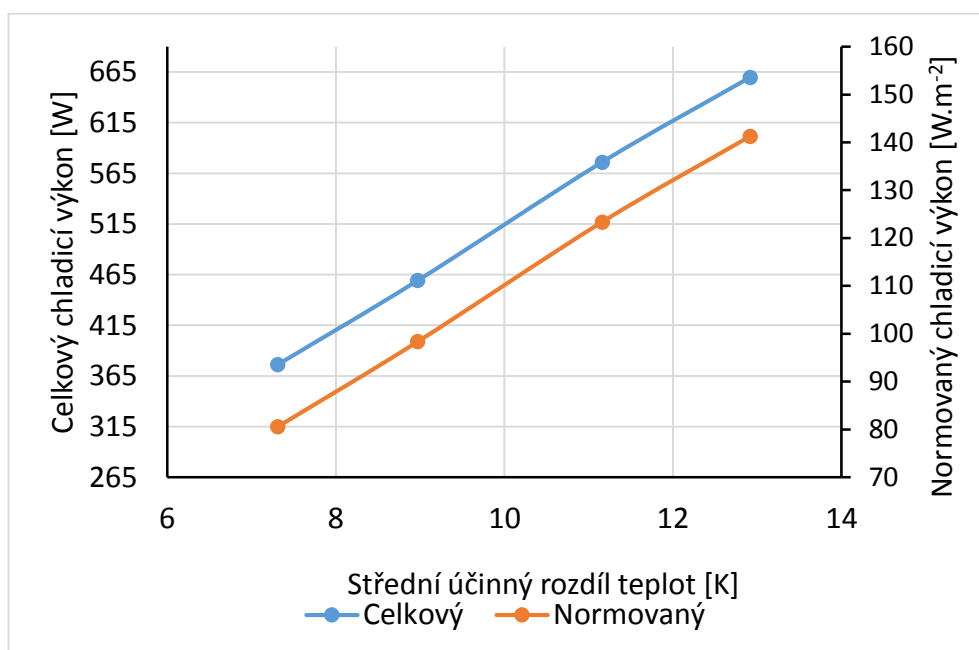
Tab. 10 Chladicí výkon stropních jednotek s PCMs při nominálním průtoku  $5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Typ funkčního vzorku	Chladicí výkon [W]	Rozdíl teplot [K]
Chladicí strop 1,4 x 0,8m	97	10
Chladicí strop 1,6 x 0,8m	112	

Podrobné výsledky jednotlivých měření, jsou uvedeny ve výsledcích měření, viz příloha. Rozšířená nejistota měření u elektrického výkonu vyhřívaných figurín je vysoká především vlivem nejistoty měření typu A. Ta v tomto případě byla vysoká z důvodů kolísání napětí v síti 230 V, které způsobovalo změny výstupního napětí na zdroji napájení elektrického regulátoru pro elektricky vyhřívané figuríny.

### *Chladicí výkon chladicího stropu bez PCMs*

V případě chladicích jednotek bez PCMs, byla vrstva PCMs z chladicího boxu odstraněna. Tepelně vodivé pásy trubkového výměníku byly v přímém kontaktu s plochou chladicího stropu a způsobovaly tak vyšší chladicí výkon. Proces ustálení byl v tomto případě rychlejší v porovnání s použitím PCMs. Ustálení procesu během jednotlivých zkoušek bylo zřetelně rychlejší a systém vykazoval rychlejší reakci na teplotní změny, než tomu bylo v případě použití PCMs.



Obr. 41 Celkový a normovaný chladicí výkon chladicího stropu bez PCMs

Chladicí výkon pro jednotlivé rozdíly teplot jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 11 Výsledky měření chladicího výkonu bez PCMs

Číslo měření	1	2	3	4
Střední účinný rozdíl teplot	12,92	11,16	8,97	7,31
Chladicí výkon aktivní plochy	-141	-123	-98	-80
Celkový chladicí výkon	-659	-576	-459	-376



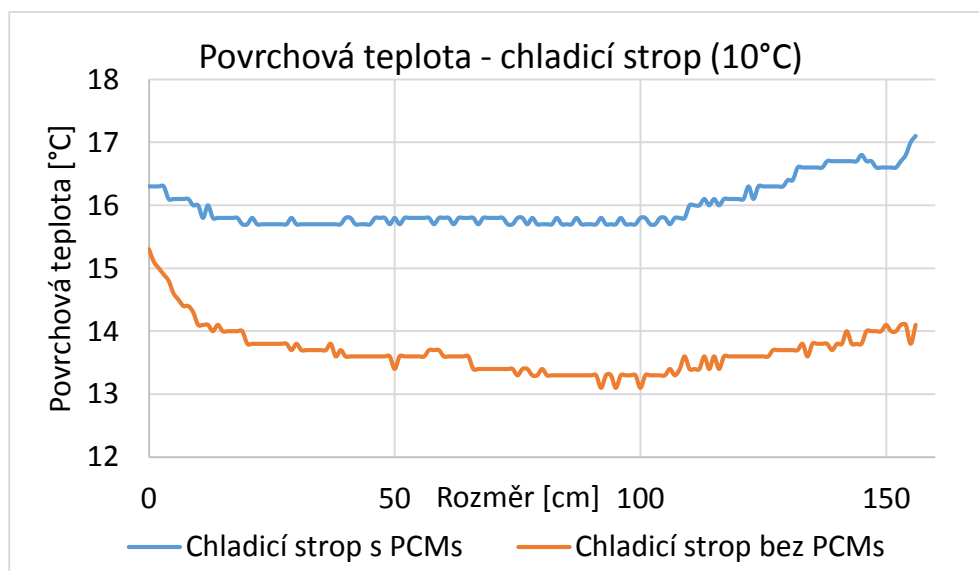
Tab. 12 Chladicí výkon stropních jednotek bez PCMů při nominálním průtoku  $5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Typ funkčního vzorku	Chladicí výkon [W]	Rozdíl teplot [K]
Chladicí strop 1,4 x 0,8m	123	10
Chladicí strop 1,6 x 0,8m	140	

Podrobné výsledky včetně nejistot měření jsou uvedeny ve výsledcích měření, viz příloha.

### *Zhodnocení výsledků měření*

Z výsledků měření chladicího výkonu je patrný rozdíl při použití tepelně akumulčního materiálu PCM. Chladicí výkon byl v případě použití tohoto materiálu menší cca o 25 %. Snížení chladicího výkonu u jednotek s PCMů je zapříčiněno právě aplikací tohoto materiálu do kontaktní vrstvy tepelně vodivých pásů chladicích jednotek. Vedení chladu je omezeno touto vrstvou, které odebírá značnou část chladu. Ta je využívána na stabilizaci pevné fáze PCMů v prostoru s vysokou teplotou vzduchu. Přestože je vrstva PCMů v chladicím stropu pouze 5 mm široká, je vedení tepla omezeno tak, že povrchová teplota chladicí jednotky je znatelně nižší než v případě jednotky bez PCMů.



Obr. 42 Teplotní pole chladicího stropu s a bez využití PCMů, teplota chladicího média  $10 \text{ }^\circ\text{C}$

Snížení chladicího výkonu bylo ověřeno stanovením teplotního pole chladicího stropu během zkoušky s využitím stejných podmínek a teploty chladicího média. Obr. 42 zobrazuje teplotní pole podél povrchu chladicího stropu. Teplotní pole

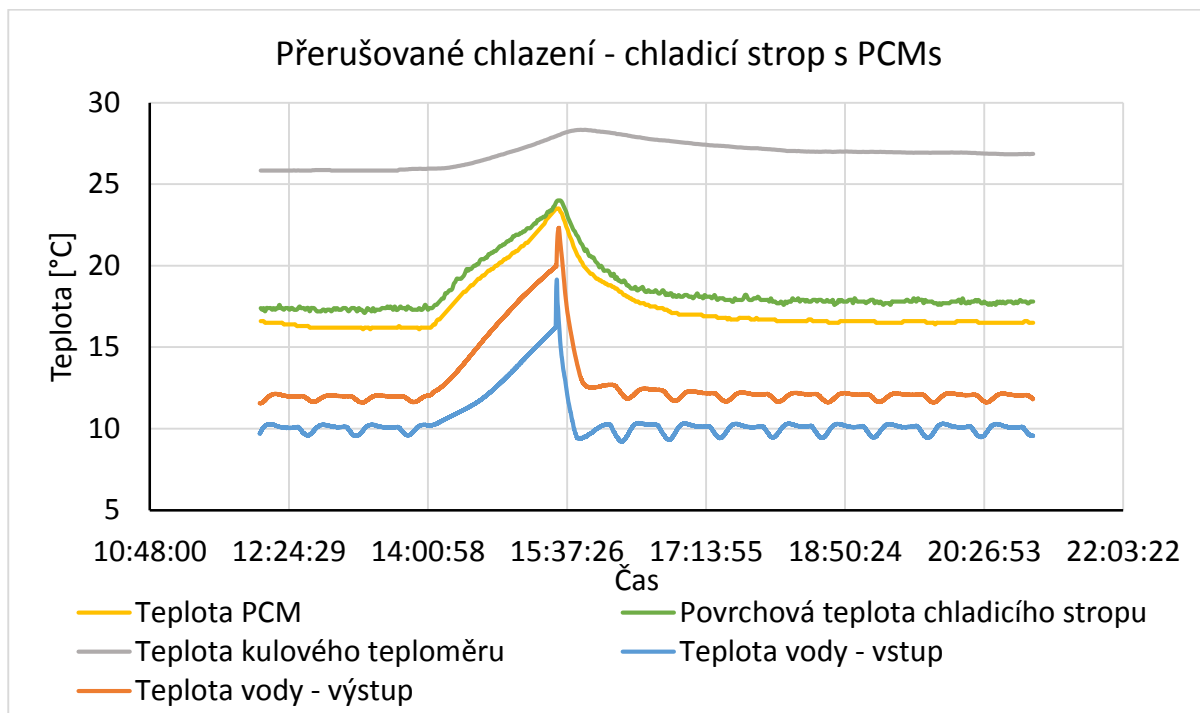
bylo snímáno pomocí termokamery během zkoušky s teplotou chladicího média na vstupu 10 °C. Rozdíl průměrné povrchové teploty je 2,3 °C.

#### **4.7 Přerušovaný provoz chlazení chladicích stropů**

Podmínky měření pro zkoušení přerušovaného provozu chlazení byly: teplota vzduchu uvnitř laboratoře 26 °C, teplota všech okolních prostor 26 °C, teplota vody na vstupu 10 °C.

Aplikace PCMs uvnitř chladicích stropů zvyšuje především jeho tepelně akumulaci schopnosti. Dalším experimentálním měřením, proto bylo ověřit schopnost akumulace chladu v chladicím stropě a to během přerušovaného provozu chlazení. Oběhové čerpadlo zajišťující proudění média v chladicích stropích bylo během testu vypnuto, zároveň však tepelná zátěž elektrickými figurínami byla v provozu. Uvnitř místnosti tak docházelo k zvyšování teploty vzduchu. Předmětem tohoto měření bylo ověřit chování zařízení během vypnutého provozu a zároveň stanovit jak přerušovaný provoz chlazení ovlivní tepelnou setrvačnost celé místnosti.

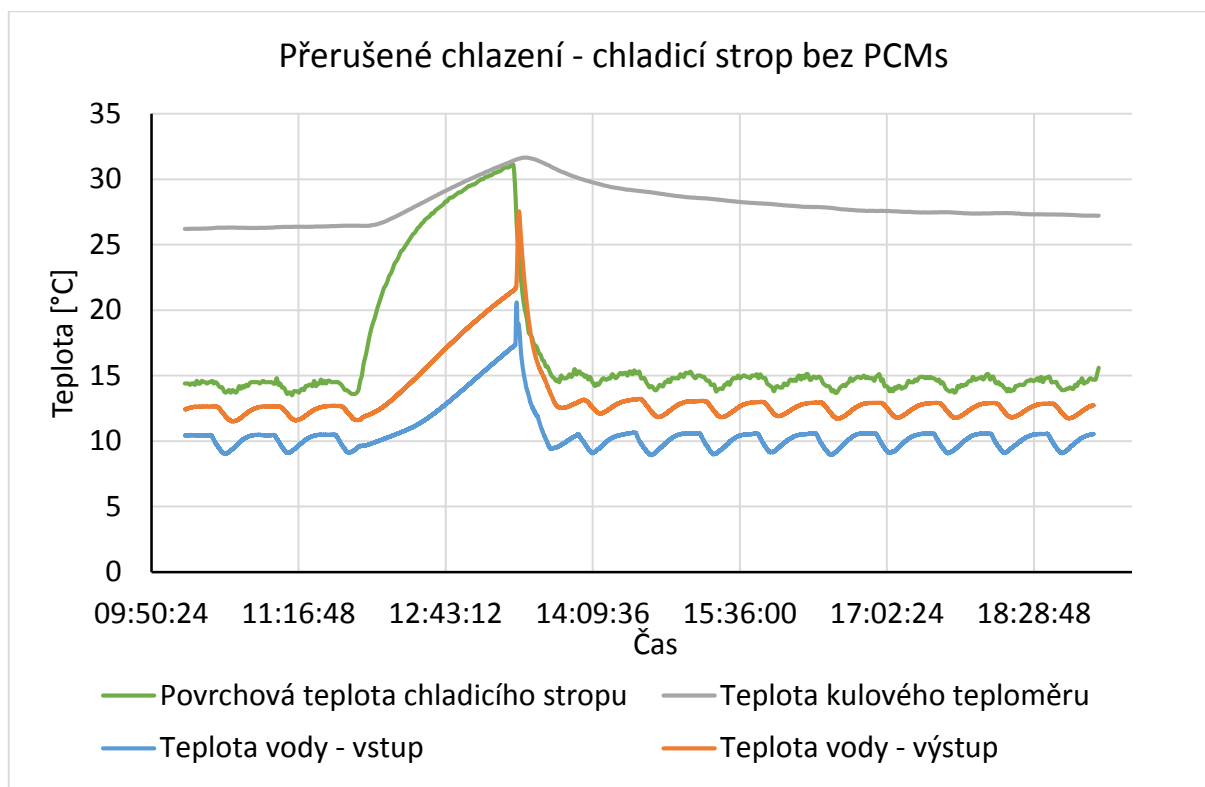
Nejprve bylo dosaženo ustáleného stavu všech teplot v laboratoři a následně byl zdroj chlazení přerušen po dobu 90 minut. Výsledky měření zobrazují chování systému, které způsobuje velmi pozvolný nárůst teploty vzduchu uvnitř laboratoře. Po zapnutí chlazení došlo téměř okamžitě k stabilizování teploty vzduchu uvnitř místnosti. Dosažení původní teploty vzduchu tedy ochlazení o 2 °C trvalo v tomto případě téměř 4 hodiny. Tepelná setrvačnost je vlivem aplikace PCMs v chladicích stropích velmi zdlouhavý proces.



Obr. 43 Průběhy teplot přerušovaného chlazení s aplikací PCMs

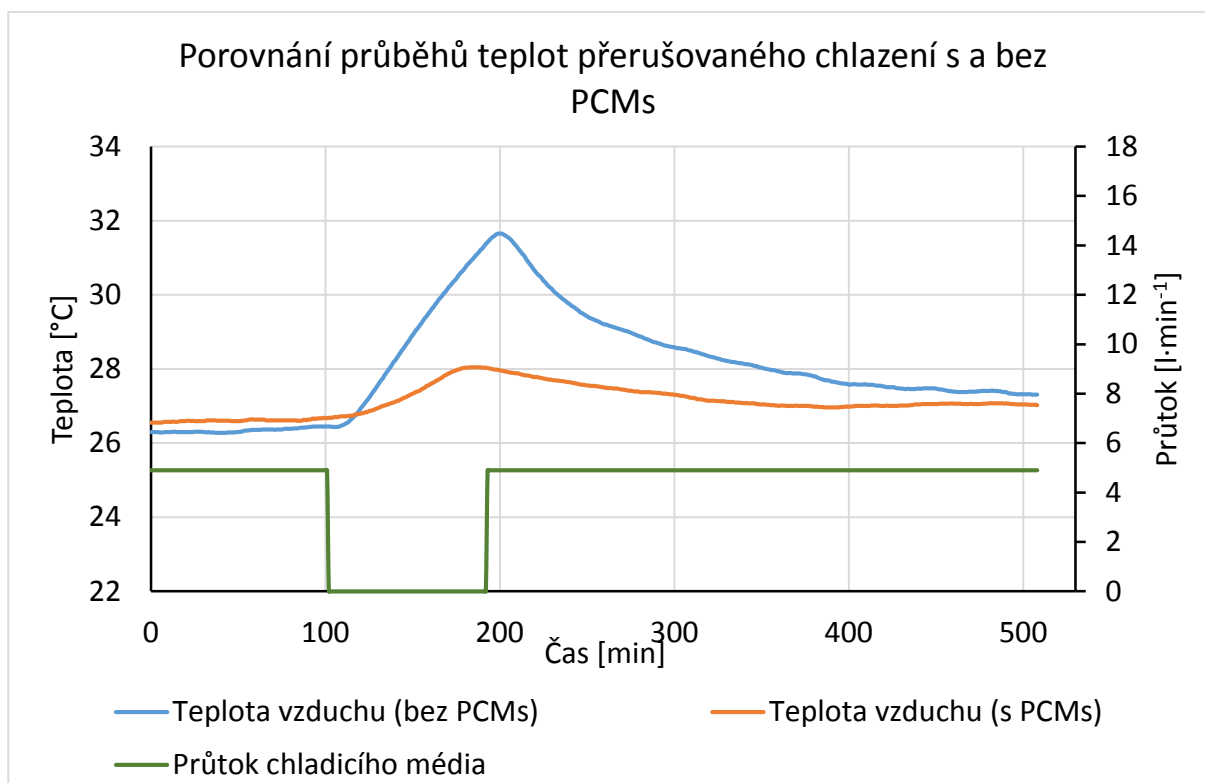
Přerušované chlazení pomocí chladicího stropu s PCMs umožnilo stanovit přibližnou hodnotu množství akumulované energie v průběhu vypnutého provozu chlazení. V ustáleném stavu, jak je patrné v grafu, byl provoz chlazení vypnut v čase 14:00. Teplota PCM materiálu ztelně rychleji rostla než teplota vzduchu, ta je zobrazena teplotou kulového teploměru. V oblasti 21-22 °C je patrná změna rychlosti ohřevu PCM, to je způsobeno fázovým přechodem a akumulací latentního tepla. Během vypnutého provozu chlazení byla v provozu tepelná zátěž o výkonu 586 W. Teplota vzduchu v místnosti vzrostla o 2,4 °C, zatímco teplota PCM vzrostla o 6,9 °C. V průběhu vypnutého provozu chlazení byla řízena teplota všech okolních ploch laboratoře. Lze tak předpokládat minimální tepelné ztráty místnosti a celková tepelná energie, která byla do laboratoře dodána, byla spotřebována na ohřev vzduchu a především byla akumulována chladicími jednotkami. Matematicky lze stanovit celkovou dodanou energii v průběhu přerušování chlazení a to 3165 kJ. Chladicí jednotky obsahují celkem 22,95 kg PCMs, které během ohřevu z teploty 16,6 °C na teplotu 23,5 °C spotřebovaly přibližně 3100 kJ tepla. Pro přepočítání na plochu se jedná o absorpci tepla až 660 kJ.m<sup>-2</sup>. Výrobce uvádí hodnotu 515 kJ.m<sup>-2</sup>, ovšem pro vyšší teplotní rozsah 18-24 °C.

Ověření přerušované chlazení bylo provedeno také pro chladicí strop bez aplikovaného PCM. Podmínky měření byly totožné jako v předchozím případě.



Obr. 44 Průběhy teplot přerušovaného chlazení bez aplikace PCMs

Obr. 44 zobrazuje průběhy teplot během zkoušky přerušovaného chlazení chladicích stropů bez PCMs. Princip přerušovaného chlazení byl totožný jako v předchozím případě s PCMs. Během přerušování způsobily elektrické figuríny okamžitý nárůst teploty vzduchu v místnosti. Je nutné poznamenat, že v případě chladicích jednotek bez PCMs byl chladicí výkon vyšší, a povrchová teplota chladicích jednotek nižší než v případě stropních jednotek s PCMs, přestože byla použita stejná teplota chladicího média. V tomto případě byla vyšší i tepelná zátěž elektrických figurín a to 679 W. Teplota vzduchu vzrostla o 5,4 °C v porovnání s aplikací PCMs to bylo pouze o 2,4 °C. Z průběhu teploty kulového teploměru je patrná rychlá odezva na zapnutí chlazení. Teplota vzduchu v místnosti klesá výrazně rychleji než v předchozím případě chladicích jednotek s PCMs.



*Obr. 45 Srovnání výsledků přerušovaného chlazení s a bez aplikace PCMs*

Srovnání výsledků měření přerušovaného chlazení s a bez aplikace PCMs je zobrazeno na Obr. 45. Zde je patrný rozdíl tepelné setrvačnosti chladicího systému využívajícího PCMs. Průběh průtoku chladicího média zároveň představuje provoz a vypnutí chladicích stropů. Vypnutí chlazení způsobilo rychlý a prudký nárůst teploty vzduchu v místnosti v případě chladicích stropů bez PCMs. Reakce tohoto systému po zapnutí vykazuje rychlou odezvu a teplota v místnosti klesá rychleji než v případě použití PCMs. Z hlediska dosažení původní teploty je však tento proces velmi zdlouhavý. Systém využívající PCMs umožňuje díky nízkému teplotnímu nárůstu dosáhnout ochlazení vzduchu v místnosti rychleji a to i přesto, že chladicí jednotky s PCMs mají nižší chladicí výkon.

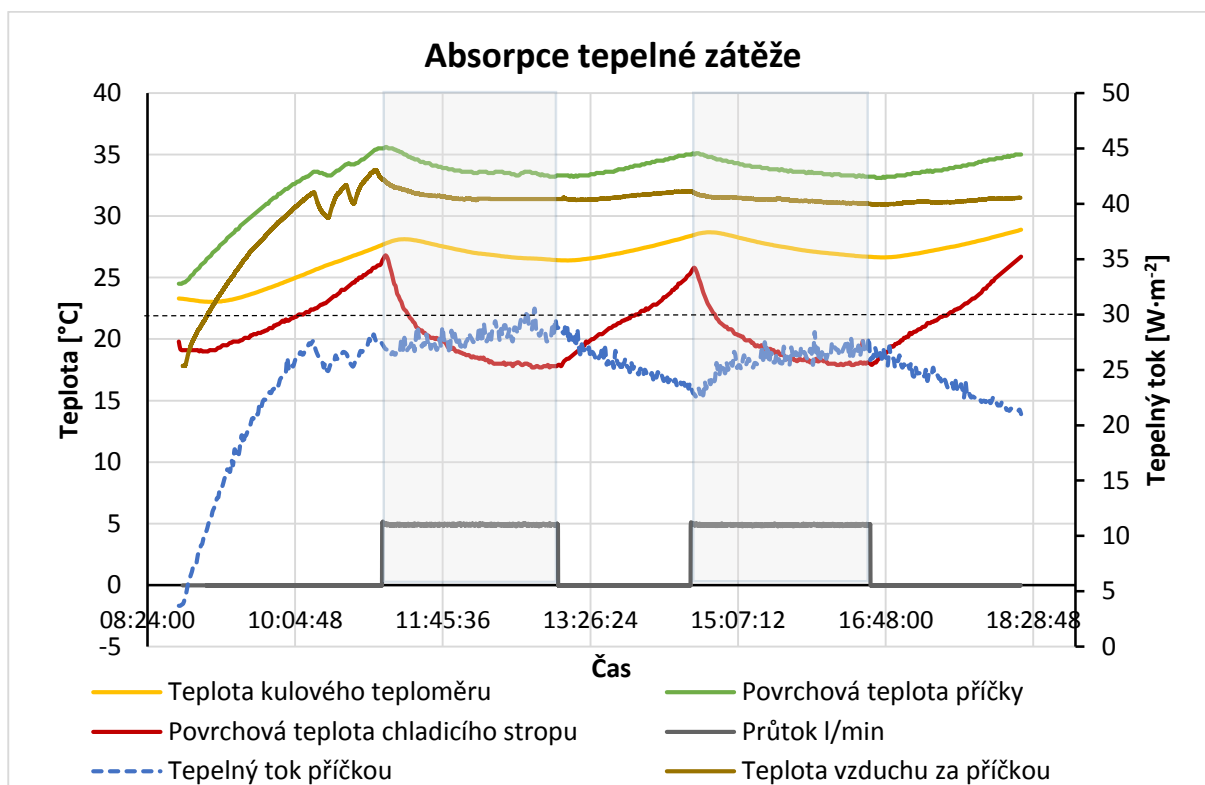
Experimentální měření přerušovaného chlazení potvrdilo vhodnou aplikaci PCMs v nižším rozsahu teplot, jak bylo ověřeno také v DTA analýze. PCM má velmi vysokou hodnotu měrné tepelné kapacity právě v nižším teplotním rozsahu, to bylo potvrzeno absorpcí tepelné energie během přerušovaného provozu chlazení.

## 4.8 Absorpce tepelné zátěže pomocí chladicích stropů s PCMs

Předmětem této zkoušky bylo ověření chování chladicího systému v podmínkách, kdy na vnitřní prostor laboratoře působí tepelná zátěž skrz krycí příčku laboratoře. Teploty v okolních prostorech Outdoor části i kompenzačního prostoru byly udržovány po celou dobu měření na 24 °C. Uvnitř laboratoře nebyla teplota vzduchu nijak ovlivněna ani řízena. Za krycí příčkou v indoor části komory byla teplota vzduchu udržována v rozsahu 40 – 42 °C. Během zkoušky tak docházelo k prostupu tepla skrz krycí příčku do laboratoře. Předmětem takto vytvořených mikroklimatických podmínek byla simulace reálného stavu v místnosti, na kterou působí tepelná zátěž skrz celou plochu stěny laboratoře. Tepelná zátěž byla měřena pomocí tepelného toku, teploty vzduchu a teploty povrchu krycí příčky.

Principem měření bylo ověřit působení tepelné zátěže na vnitřní klima laboratoře a to do doby než teplota vzduchu v laboratoři překročí hranici 27 °C. Dle normativních [7] požadavků je v takovémto případě nutné použít aktivní chlazení. Aktivní chlazení bylo využito pomocí chladicích stropů s PCMs, kdy v okamžiku dosažení 27 °C bylo zapnuto chlazení. Během chlazení neustále působila tepelná zátěž skrz krycí příčku. Po vychlazení chladicích stropů bylo chlazení přerušeno. V tomto případě byla testována tepelná setrvačnost a také akumulace chladu v podobě časové konstanty chladicích stropů.

Experimentální měření eliminace tepelné zátěže bylo hodnoceno pomocí cyklické regenerace akumulčního média PCM. Působení tepelné zátěže způsobovalo nabíjení akumulčního média. Samotná regenerace je dána ochlazením PCM pomocí chladicího stropu, kdy je jeho nashromážděná energie předána chladicímu médiu. PCM je následně schopen znovu absorbovat tepelnou zátěž uvnitř místnosti a eliminovat její přehřívání a to bez využití neustálého provozu chladicího zařízení.



Obr. 46 Průběhy teplot, tepelného toku a průtoku chladicího média během absorpce tepelné zátěže

Obr. 46 zobrazuje průběhy teplot od počátku měření, kdy byly počáteční podmínky měření: teplota vzduchu v laboratoři 23 °C. Žlutá křivka zobrazuje průběh teploty kulového teploměru, kde při dosažení 27 °C bylo zapnuto chlazení. Doba provozu chlazení je patrná z průběhu rychlosti průtoku a byla 120 minut. Teplota chladicího média byla 10 °C. Během této doby teplota PCM dosáhla hodnoty 17,7 °C. Sledovaným parametrem během průběhu zkoušky byla také teplota rosného bodu. Po celou dobu měření se teplota rosného bodu pohybovala v rozmezí 11 až 15 °C, zatímco nejnižší povrchová teplota chladicího stropu byla 17,7 °C. Po vypnutí chlazení je nárůst teploty vzduchu v místnosti velmi pozvolný. Okamžik fázového přechodu je patrný v grafu na povrchové teplotě chladicího stropu oblast 22 °C (zvýrazněno přerušovanou čarou), zde PCM akumuluje velké množství latentního tepla. Dosažení mezní hranice 27 °C teploty vzduchu v místnosti následně trvalo 90 minut. Tepelná zátěž, která působila na vnitřní mikroklima byla 350 W.

Experiment absorpce tepelné zátěže byl proveden také, jako možnost ověření funkce přerušovaného chlazení chladicích stropů. Jsou-li místnosti vystaveny velké tepelné zátěži dochází během dne k postupnému přehřívání to následně vede k nucenému použití chladicích zařízení. Jak již bylo uvedeno v problematických

vlastnostech PCMs, tyto materiály mají velmi nízkou teplotu fázového přechodu, která znemožňuje obnovu akumulčního média.

Regenerace akumulčního média představuje dosažení teploty pod teplotu fázového přechodu PCMs, tedy odebrání akumulované energie z PCM. Této teploty bylo dosaženo při použití chladicého média o teplotě 10 °C po době 30 minut. Princip aktivní aplikace PCMs v chladicím zařízení prokazatelně představuje efektivní proces jak zajistit obnovu akumulčního média.

Využití chladicích stropů s PCMs v režimu absorbování tepelné zátěže představuje významnou možnost jak zefektivnit proces akumulace PCM, snížit provoz chladicích zařízení a zároveň minimalizovat provozní náklady. Provoz takto vytvořeného chladicého zařízení využívá pouze oběhové čerpadlo a teplotonosné médium o teplotě cca 10 °C. Náklady tak mohou být velmi nízké, kdy je nutné pouze zajistit požadovanou teplotu chladicého média, které je možné například využít přes studnu či zemní kolektor. Jedná se nejen o ekonomicky nenáročný systém, ale především jsou minimalizovány negativní vlivy na zdraví bez víření prachu, vzduch je ohříván pouze vlivem sálání.



## 5. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

Specifické zaměření na možnosti využití a vylepšení vlastností tepelně akumulčních materiálu PCMs představuje jeden z hlavních přínosů této práce. Soubor dat získaný provedením experimentálních měření PCMs v režimech chlazení i ohřevu se stal významným zdrojem informací, který umožnil stanovit vhodnou aplikaci těchto materiálů. Modifikace povrchových vlastností PCMs, které zvýší efektivitu procesu akumulace, mohou být v praxi snadno aplikovány. Tyto aplikace následně sníží energetickou náročnost budov, ale především umožní stanovit komfortní mikroklimatické podmínky uvnitř budov.

Výsledky disertační práce byly přínosem v oblasti vědecké komunity především z hlediska specifického zájmu výzkumu PCMs. Získané poznatky byly publikovány v několika odborných člancích, které byly publikovány na mezinárodních konferencích a v mezinárodních recenzovaných časopisech evidovaných v databázích Scopus a Web of Science.

Významným bodem nejen pro vědu ale také pro praxi je vytvoření laboratorního zázemí v laboratoři techniky prostředí. Vytvoření měřicího pracoviště zároveň rozšiřuje již tak specifické schopnosti kalorimetrické komory a představuje další možnosti využití laboratorního zázemí s veřejnými subjekty. Laboratoř je schopna testovat chladicí výkony aktivních i pasivních chladicích stropů a trámů.

Přínosem pro vědu a praxi je zaměření celé práce, které se zabývá testováním, úpravou specifických vlastností a především aplikací akumulčních materiálů. Experimentální testování transparentního prvku bylo přínosem především v oblasti praxe a samotného využití. Výsledky testování tohoto transparentního prvku s PCMs upozornily na nevhodné použití PCM, na které byl následně upozorněn samotný výrobce.

Se vzrůstající potřebou chlazení v oblasti techniky prostředí je přínosem vytvoření chladicího zařízení, které umožňuje stabilizovat teplotu vzduchu v místnosti s minimálními náklady na jeho provoz.

## 6. ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá pasivním i aktivním využitím tepelně akumulčních materiálů PCMs. Stěžejní částí práce je dynamika přenosu tepla z PCMs do okolí, která definuje důležité povrchové konvektivní vlastnosti určující schopnost akumulace energie a její následné uvolnění do okolí.

V rámci disertační práce byly splněny všechny cíle, které byly stanoveny. Definovány byly tepelně technické parametry PCMs. Hlavním kritériem definice těchto parametrů a samotné dynamiky přenosu tepla z materiálu do okolí se stala časová konstanta a součinitel přestupu tepla. Experimentálním měřením aplikace tepelně akumulčních materiálů bylo možné ověřit chování těchto materiálů v různých podmínkách a to v režimu ohřevu i chlazení. Pro výzkum PCMs bylo využito termálních panelů obsahující tyto materiály a zároveň také tepelně akumulčních desek Dupont Enegain.

Principem zefektivnění akumulčního procesu bylo změnit tepelně technické parametry, tedy časovou konstantu a zároveň zvýšit přestup tepla na povrchu tohoto materiálu. Bylo využito několika možností jak změnit a zlepšit chování systému využívajícího PCMs. První metodika využívala pouhé změny povrchové úpravy těchto parametrů. Výsledky potvrdily zvýšení součinitele přestupu tepla a tedy snížení časové konstanty. Přesto šlo o snížení časové konstanty pouze o 17 %. Další metoda využívala nuceného proudění vzduchu podél povrchu akumulčních panelů. Oproti původnímu stavu došlo ke snížení časové konstanty téměř o 30 %. Z důvodů nízké teploty fázového přechodu použitého PCMs 22 °C, nebylo možné dosáhnout tohoto stavu v žádném experimentálním měření a to ani i s použitím nuceného proudění vzduchu. Výsledky potvrdily obtížné využití těchto materiálů v pasivní formě a to právě z důvodu velmi nízké teploty fázového přechodu, která neumožňuje efektivně využít procesu akumulace.

Jedním z bodů disertační práce bylo ověřit chování a vlastnosti PCM v aktivní aplikaci ohřevu a chlazení. Součástí experimentálních měření bylo také testování chování tohoto materiálů v širším teplotním rozsahu. Pro tento účel byla provedena DTA analýza v patřičném teplotním rozsahu. Výsledky DTA analýzy předpokládaly vhodnější aplikaci PCM v nižším rozsahu teplot, který by také umožnil dosáhnout uvolnění akumulované energie uvnitř PCMs.

Součástí práce byl také experimentální výzkum aplikace PCMs v transparentním prvku. Výsledky poukázaly na nedostatky z hlediska správných tepelně technických vlastností a především na problematiku vhodného

zapouzdření použitého PCM. Tyto informace posloužily ke konfrontaci s výrobcem těchto prvků a také s širokou veřejností na mezinárodní konferenci.

Hlavním cílem disertační práce bylo využití aktivní aplikace PCMs s danými úpravami takovým způsobem, aby bylo efektivně využito principu akumulace tepelné energie. Výsledky jednotlivých měření umožnily ověřit chování těchto materiálů, které následně sloužily k využití aplikace PCM do specifického chladicího zařízení. Disertační práce obsahuje souhrn poznatků z testování a aplikací těchto materiálů, které umožní rozšířit přehled o současném stavu a využití tepelně akumulčních materiálů.

## 7. ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

### Osobní údaje:

Martin Koláček

Oděská 1572, Rožnov pod Radhoštěm 75661 (Česká republika)

Tel. 737 078 169

Email: kolacek@fai.utb.cz

### Pracovní zkušenosti:

10/2016 – 08/2018

Výzkumný projektový pracovník

CEBIA-Tech, Zlín

Nad Stráněmi 5656, 760 05 Zlín

Projekt OPPIK-CZ.01.1.02/0.0/0.0/15\_019/0004581

Projekt Cebia-Tech, NPU I projekt č. LO1303

09/2014 – 09/2018

Lektor

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Nad Stráněmi 4511, Zlín, 76005

Cvičící ve výuce předmětů: Hydraulika, Vybrané parametry budov, Mechanika Tekutin.

2009-2011

Brigáda

Steko produkt s.r.o. Rožnov pod Radhoštěm

Stavba a úprava dřevostaveb

2007-2008

Praxe

Myonic s.r.o. Rožnov pod Radhoštěm

Tvorba výkresové dokumentace pro návrh ergonomického pracoviště. Montáž ložisek a elektromotorů.

### Vzdělání

09/2014 – do současnosti

Doktorské studium

Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně.

Technické zařízení budov, Tepelná akumulace budov, Výzkum a uplatnění tepelně akumulčních materiálů PCM. Simulace tepelných dějů.

Interní grantové projekty UTB ve Zlíně, IGA 2014/015, 2015/002, 2016/001, 2017/002, 2018/001

- 2012-2014                      Magisterské studium  
Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně.  
Zaměření: Integrované systémy v budovách.  
Diplomová práce: Tepelně akumulární panel a jeho parametry.
- 2009-2012                      Bakalářské studium  
Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně  
Zaměření: Integrované a řídicí systémy  
Bakalářská práce: Měření elektrostatického náboje na elektrosoučástkách.
- 2005-2009                      Střední škola  
Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel,  
Rožnov pod Radhoštěm  
Zaměření: Elektronické počítačové systémy.

### **Odborná příprava a kurzy**

- 2014                              Vyhláška 50/1978Sb  
Hael Elektro, Rožnov pod Radhoštěm  
§6 pracovník znalý s vyšší kvalifikací pro samostatnou činnost prostory třídy A.
- 2015                              Základní kurz KNX  
Školící centrum KNX, Fakulta aplikované informatiky UTB ve Zlíně. Systémové argumenty a sběrníkové přístroje KNX- Topologie a instalace KNX Komunikace a telegram KNX. Projektování, nahrávání a diagnostika ETS, Praktická část obsahující projektování, nahrávání a diagnostiku zadaného KNX.
- 2016                              Termografická diagnostika budov  
Centrum termografie – Workswell s.r.o. Praha

### **Osobní dovednosti:**

Cizí jazyk:	Porozumění	Mluvení	Písemný projev
Němčina	A2	A2	A2
Angličtina	B2	B1	B1

Řidičský průkaz: skupina B

## POUŽITÁ LETERATURA A ZDROJE

- [1] AHLBORN. [online]. 2018 [cit. 2018-3-12]. Katalog měřící přístroje a snímače. Ahlborn měřící a regulační technika spol. s.r.o. Praha. 71. Vydání. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz//out/pictures/wysiwigpro/flash-listovaci-katalog/katalog.html> .
- [2] BAETENS, R., B. P. JELLE, and A. GUSTAVSEN. "Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review." *Energy and Buildings*. 2010, 42 (9): 1361-1368.
- [3] BAHRAMI, M. *ENSC 388 Engineering Thermodynamics and Heat Transfer. Forced Convection Heat Transfer*. 2011. Dostupné z: <http://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20388/Notes/Forced%20Convection.pdf>.
- [4] BARZIN, R., CHEN, J. J., J. YOUNG, B. R., and FARID, M.,M. "Application of PCM Underfloor Heating in Combination with PCM Wallboards for Space Heating using Price Based Control System." *Applied Energy*. 2015, 148: 39-48.
- [5] CASTELL, A., MARTORELL, I., MEDRANO, M., PÉREZ, G., CABEZA, L.F. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*. 2010, 42, 534–540.
- [6] CSN 73 0548. *Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů*. Úřad pro normalizaci a měření: Praha, 1985.
- [7] ČSN 730540. *Tepelná ochrana budov. Část 2: Požadavky*. 2011. Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.
- [8] ČSN EN 14240. *Větrání budov – Chladicí kryty – Zkoušení a hodnocení*. 2004. Český normalizační institut.
- [9] ČSN EN 14518. *Větrání budov – Chladicí trámce – Zkoušení a hodnocení pasivních trámců*. 2005. Český normalizační institut.
- [10] ČSN EN 15116. *Větrání budov – Chladicí trámce – Zkoušení a hodnocení aktivní chladících trámců*. 2008. Český normalizační institut.
- [11] DEMIRBAS, M.F. Thermal energy storage and phase change materials: An overview. *Energy Sour. Part B Econ. Plan. Policy*. 2006, 1, 85–95.

- [12] DISCOVERY MY. *Angelantoni* [online]. 2018 [cit. 2018-3-13]. Discovery New climatic and thermostatic chambers. Angelantoni Test Technologies. Dostupné z: [https://www.test-chamber.tech/userfiles/DM\\_2017.pdf](https://www.test-chamber.tech/userfiles/DM_2017.pdf).
- [13] DOMBAYCI, Ö.A. The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings. *Building and Environment*. 2007, 42, 3855–3859.
- [14] DuPont™ Energain® PCM Guidebook; DuPont™: Wilmington, DE, USA, 2010. Dostupné z: [http://www.edsl.myzen.co.uk/downloads/misc/DuPont%20ENERGAIN\(r\)%20PCM%20Guidebook\\_December%202010.pdf](http://www.edsl.myzen.co.uk/downloads/misc/DuPont%20ENERGAIN(r)%20PCM%20Guidebook_December%202010.pdf).
- [15] EDDHAHAK-OUNI, A, J. COLIN, and Denis Bruneau. On an Experimental Innovative Setup for the Macro Scale Thermal Analysis of Materials: Application to the Phase Change Material (PCM) Wallboards. *Energy and Buildings*. 2013, Vol. 64. doi://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.008.
- [16] EVOLA, G., L. MARLLETA, and F. SICURELLA. "A Methodology for Investigating the Effectiveness of PCM Wallboards for Summer Thermal Comfort in Buildings." *Building and Environment*. 2013, 59: 517-527.
- [17] FLUKE Products. *Fluke* [online]. 2018 [cit. 2018-3-12]. Dostupné z: <http://en-us.fluke.com/products/infrared-cameras/fluke-ti45ft-infrared-camera.html#overview> .
- [18] GIRO-PALOMA, J., MARTINEZ, M., CABEZA, L.F., FERNANDEZ, A.I. Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2016.
- [19] GlassX AG. *GLASSX® crystal The glass that stores, heats and colds*. GlasXAG. Zurich Switzerland. 2005, Dostupné z: [http://glassx.ch/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/GLASSX\\_AG\\_products\\_e.pdf](http://glassx.ch/fileadmin/_migrated/content_uploads/GLASSX_AG_products_e.pdf).
- [20] GOIA, F. "Thermo-Physical Behaviour and Energy Performance Assessment of PCM Glazing System Configurations: A Numerical Analysis." *Frontiers of Architectural Research* 1 2012, (4): 341-347.
- [21] GRYNINNG, S., GOIA, F., ROGNVIK, E., and TIME, B. "Possibilities for Characterization of a PCM Window System using

Large Scale Measurements." *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2013, 2 (1): 56-64.

- [22] HAALAND H.T. Flow and heat transfer in a radially spreading liquid metal jet related to casting of ferroalloys. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim 2000. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:125422/FULLTEXT01.pdf>
- [23] HABROVANSKÝ, T. *Control and Monitoring of Heating and Cooling Units in Laboratory of Building Control Systems*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008. Diplomová práce.
- [24] HEIM, D., J. A. CLARKE. Numerical Modelling and Thermal Simulation of PCM–gypsum Composites with ESP-R. *Energy and Buildings*. 2004, Vol. 36. doi://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.004.
- [25] INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. BERGMANN, T. L., TED. L, ADRIENNE. *Fundamentals of Heat and Mass transfer*. USA. 2007 Rozsah: 997 stran. ISBN: 0-471-76115-X
- [26] KASAEIAN, A, L. BAHRAMI, F. POURFAYAZ, E. KHODABANDEH, and WEI-MON YAN. Experimental Studies on the Applications of PCMs and Nano-PCMs in Buildings: A Critical Review. *Energy and Buildings*. 2017, Vol. 154. doi://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.037.
- [27] KING, A.J, Hydrocarbon-based PCM Applications. DuPont Building Innovations. 2010, Dupont. Dostupné z: [https://cdn2.hubspot.net/hub/55819/file-14755587-pdf/docs/buildings-xi/dupont\\_energain.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hub/55819/file-14755587-pdf/docs/buildings-xi/dupont_energain.pdf).
- [28] KOLÁČEK, M., Tepelně akumulární panel a jeho parametry. Zlín. 2012. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky, Ústav automatizace a řídicí techniky. Vedoucí práce Ing. Martin Zálešák, CSc. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/30216/kol%C3%A1%20ek\\_2014\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/30216/kol%C3%A1%20ek_2014_dp.pdf?sequence=1).
- [29] KOSNY, J. PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures; *Engineering Materials and Processes*; Springer: Berlin, Germany, 2015, pp. 64–81.



- [30] KUMAR, A. and S. K. SHUKLA. A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application. *Energy Procedia*. 2015, Vol. 74. doi://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.728.
- [31] KUZNIK, F., VIRGONE, J., NOEL, J. Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering*. 2008, 28, 1291–1298.
- [32] LI, S., G. SUN, K. ZOU, and X. ZHANG. "Experimental Research on the Dynamic Thermal Performance of a Novel Triple-Pane Building Window Filled with PCM." *Sustainable Cities and Society*. 2016, 27: 15-22.
- [33] MADAD, A. MOUHIB, T., MOUHSEN, A. Phase Change Materials for Building Applications: A Thorough Review and New Perspectives. *Buildings* 2018, 8, 63.
- [34] MEHLING, H., CABEZA, L. F., 2008. *Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications*. Berlin; Heidelberg: Springer.
- [35] MEMON, S.A. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 31, 870–906.
- [36] OSTERMANN, E., V.V. TYAGI, V. BUTALA, N.A. RAHIM, U. STRITIH, Review of PCM based cooling technologies for buildings, *Energy and Buildings*. 49 2012, 37–49.
- [37] OSTRÝ, M. Využití akumulace tepla při změnách skupenství v budovách. 2013. Teze habilitační práce. VUT Brno. ISSN: 1213-418X.
- [38] OSTRÝ, M., KLUBAL, T., CHARVÁT, P., Advanced radiant heating and cooling system with microencapsulated phase change materials, příspěvek na konferenci CESB16 - Central europe towards sustainable buildings 2016, ISBN 978-80-271-0248-8, Grada Publishing, a.s., Praha, Česká Republika, 2016.
- [39] ÖZISIK N., M. *Heat transfer a basic approach*. Singapore: International edition, McGraw-HillBook, 1985. Rozsah: 745 stran. ISBN 0-07-047982-8.
- [40] PASUPATHY, A., VELRAJ, R., SEENIRAJ, R.V. Phase change material-based building architecture for thermal management in

residential and commercial establishments. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2008, 12, 39–64.

- [41] PATIL N. D. and S. R. KARALE. "Design and Analysis of Phase Change Material Based Thermal Energy Storage for Active Building Cooling: A Review." *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2012, 4 (6): 2502.
- [42] POMIANOWSKI, M., HEISELBERG, P., ZHANG, Y. Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy and Buildings*. Volume 67.2013, Pages 56-69, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.006>.
- [43] SOARES, N., J. J. COSTA, A. R. GASPAR, and P. SANTOS. "Review of Passive PCM Latent Heat Thermal Energy Storage Systems Towards Buildings' Energy Efficiency." *Energy and Buildings*. 2013, 59: 82-103.
- [44] SOCCACIU, L.G. Thermal Energy Storage with Phase Change Material. *Leonardo Electr. J. Pract. Technol.* 2012, 75–98. Dostupné z: [http://lejpt.academicdirect.org/A20/get\\_htm.php?htm=075\\_098](http://lejpt.academicdirect.org/A20/get_htm.php?htm=075_098) .
- [45] STRITIH, U., CHARVÁT, P., KOŽELJ, R., KLIMEŠ, L., OSTERMAN, E., OSTRÝ, M., BUTALA, V., PCM thermal energy storage in solar heating of ventilation air—Experimental and numerical investigations. *Sustainable Cities and Society*. 2018. Volume 37. ISSN 2210-6707. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.018> .
- [46] SUWONO A., Y. SINDARANO, M. IRSYAD, I. C. AL-AFKAR. Application of Calcium Chloride as an Additive for Secondary Refrigerant in the Air Conditioning System Type Chiller to Minimized Energy Consumption. *7th International Conference on Cooling and Heating Technologies ICCHT 2014*. Doi:10.1088/1757-899X/88/1/012035.
- [47] VIGNA, I., BIANCO, L., GOIA, F., SERRA, V. Phase Change Materials in Transparent Building Envelopes: A Strengths, Weakness, Opportunities and Threats (SWOT) Analysis. *Energies*. 2018, 11, 111.
- [48] WEINLADER, H., KLINKER, F., and YASIN, M. "PCM Cooling Ceilings in the Energy Efficiency Center—passive Cooling Potential of Two Different System Designs." *Energy and Buildings*. 2016, 119: 93-100.

- [49] XIAO, J., ZHANG, G., ZHOU, J., XU, F. The Influence of Wall's Insulation Thickness to Building Energy Consumption. *In Proceedings of the International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, Wuhan, China, 26–28 June 2010, pp. 4241–4244.
- [50] ZALBA, B., J. M. MARÍN, L. F. CABEZA, and H. MEHLING. "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications." *Applied Thermal Engineering*. 2003, 23 (3): 251-283.
- [51] ZAVORALOVÁ, P. *PCM ve stavebnictví Díl 1: Základní charakteristiky PCM*. 2011. Online [8.6.2017]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7360-pcm-ve-stavebnictvi-dil-1-zakladni-charakteristiky-pcm>.
- [52] ZHOU, D., ZHAO, C.Y., TIAN, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Appl. Energy*. 2012, 92, 593–605.
- [53] ZHOU, G., ZHANG, Y., WANG. X., LIN, K., XIAO, W. An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar heating. *Solar Energy*. 2007. Volume 81, Issue 11. ISSN 0038-092X.
- [54] ZHOU, G., ZHANG, Y., LIN, K., XIAO, W. Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates. *Renewable Energy*, 2008. Volume 33 Issue 6. ISSN 0960-1481.

## PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

Články v odborných periodících s impakt faktorem, které jsou obsaženy v databázi Web of Science

1. Koláček, M.; Charvátová, H.; Sehnálek, S. Experimental and Numerical Research of the Thermal Properties of a PCM Window Panel. *Sustainability* 2017, 9, 1222. doi:10.3390/su9071222. IF: 1,789.
2. Skovajsa, J, Koláček, M, Zálešák, M. 2017. "Phase Change Material Based Accumulation Panels in Combination with Renewable Energy Sources and Thermoelectric Cooling." *Energies* 10 (2): 152. doi:10.3390/en10020152. IF: 2,262.

Články v odborném periodiku, který je obsažen v databázi SCOPUS.

1. Koláček, M, Sehnálek, S. Heat transfer by Forced Convection from a Vertical PCM plate. *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, ISSN / E-ISSN: 1790-5044 / 2224-3461, Volume 11, 2016, Art. #7, pp. 56-61.
2. Koláček, M. Sehnálek, S. Heat Transfer Analysis of Roof Drains in the Calorimetric Chamber. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, ISSN / E-ISSN: 1991-8763 / 2224-2856, Volume 12, 2017, Art. #28, pp. 263-267.

Články v odborném periodiku, ze seznamu neimpaktovaných recenzovaných periodik vydávaných v České Republice.

1. Koláček, M. Zálešák, M. Měření a využití tepelně akumulčních panelů PCM. *Tepelná ochrana budov*. 2014. ISSN: 1213-0907. strany 31-36
2. Skovajsa, J. Koláček, M. Zálešák, M. Možnost akumulace energie ve formě tepla a chladu do akumulčních panelů. *TZB Haustechnik* 4/2016.s.24-27. ISSN: 1803-4802.

Článek v zahraničních časopisech nevidovaný v databázi SCOPUS

1. Koláček, M. Zálešák, M. The parameters of the thermal panel based on a phase change materials. *International Journal of Materials*. 2016. ISSN:2313-0555. p.7-12.

## Články ve sborníku z mezinárodní konference vedené v databázi SCOPUS

1. Skovajsa, J. Koláček, M. Zálešák, M. Thermal energy storage in the form of heat or cold with using of the PCM-based accumulation panels. Matec Web of Conferences. 20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers CSCC. Corfu Island. 2016. ISSN: 2261-236X.
2. Koláček, M. Measurement of four-pane building window filled with a PCM. Matec Web of Conferences. 21th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers. Crete Island. 2017. eISSN: 2261-236X.
3. Koláček, M. Non-stationary behavior of roof drainage systems. Matec Web of Conferences. 21th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers. Crete Island. 2017. eISSN: 2261-236X
4. Sehnálek, S. Koláček, M. Evaluation of cooling ceilings with application of PCMs at specialized laboratory. Matec Web of Conferences. 22th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers. Majorca. Spain. 2018. eISSN: 2261-236X. (Akceptovaný v publikačním řízení).
5. Sehnálek, S. Koláček, M. Customization of laboratory for radiant cooling ceiling measurements. Matec Web of Conferences. 22th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers. Majorca. Spain. 2018. eISSN: 2261-236X.(Akceptovaný v publikačním řízení).

## Příspěvky ve sborníku národní, mezinárodní vědecké konference

1. Koláček, M. Zálešák, M. Možnosti zvýšení tepelně akumulčních parametrů budov pomocí PCM materiálů. Sborník konference Tepelná ochrana budov 2015. 186-189. ISBN: 978-80-89627-04-2.
2. Koláček, M. Zálešák, M. The measurement and application of the thermal panel based on a phase change materials. The 19th International Conference on Systems Part of CSCC. Zakynthos Island. ISSN: 1790-5117.
3. Zálešák, M. Koláček, M. Sehnálek, S. Difficulties of heat transfer from PCM type board to ambient room. Advanced Building Skins. International Conference Bern Switzerland. 2015. ISBN: 9783981205381.P. 667-672.

4. Skovajsa, J. Koláček, M. Zálešák, M. Možnost akumulace energie ve formě tepla a chladu do akumulčních panelů. Sborník konference Alternativní zdroje energie Společnosti pro techniku prostředí. 2016. ISBN: 978-80-0202-666-2. s.165-172.
5. Zálešák, M. Koláček, M. Sehnálek, S. Thermal properties of a four-pane window filled with Phase Change Material. Advanced Building Skins. International Conference Bern Switzerland. 2017. ISBN: 978-3-9524883-1-7.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Struktura termálního panelu .....	13
Obr. 2	Termokamera Fluke Ti45 [17].....	15
Obr. 3	Datalogger Ahlborn ALMEMO 2690-8A a datalogger ALMEMO 8690-9A [1] .....	15
Obr. 4	Klimaskřín Discovery DM340 [12].....	15
Obr. 5	Kalorimetrická kompenzovaná komora - pohled z vnější strany .....	16
Obr. 6	Metody akumulace tepla [34] .....	17
Obr. 7	Akumulace latentního tepla pro fázovou změnu pevná-kapalina [34]....	19
Obr. 8	Rozdělení materiálu PCMs, teploty tání a množství akumulované energie jednotlivých druhů [34].....	22
Obr. 9	Teplotní schéma během změny fáze pro ohřev a chlazení [34] .....	24
Obr. 10	Průběh měrné tepelné kapacity PCM Dupont Energain [15] .....	28
Obr. 11	Deska PCM Dupont Energain [27].....	28
Obr. 12	Fázový diagram chloridu vápenatého [46] .....	29
Obr. 13	Struktura skla .....	34
Obr. 14	Umístění panelu uvnitř Kalorimetrické komory.....	34
Obr. 15	Závislost tepelné ztráty dělicí přičky na teplotní diferenci obou částí KK .....	36
Obr. 16	Povrchové teploty, tepelný tok na vnitřní straně skla během testu, vnitřní teplota vzduchu 20,5 °C teplota vzduchu na venkovní straně -15 °C.....	37
Obr. 17	Termogram povrchu skla během krystalizace .....	38
Obr. 18	Fotografie uložení skla v dělicí přičce KK včetně sedimentu.....	38
Obr. 19	Průběhy povrchových teplot skla a teploty okolí během teplotních cyklů .....	39
Obr. 20	Schéma technologie s termálními panely [23] .....	40
Obr. 21	Výsledky měření v chladicím režimu .....	42
Obr. 22	Termální panely v laboratoři D307.....	43

Obr. 23 Průběh teploty termálního panelu během průběhu chladnutí .....	44
Obr. 24 Rozložení proudu vzduchu z difuzoru - Simulace .....	46
Obr. 25 Kouřová zkouška rozložení vzduchu z reálného difuzoru.....	47
Obr. 26 Rychlost proudění na povrchu panelu.....	47
Obr. 27 chladnutí termálního panelu přirozená a nucená konvekce .....	48
Obr. 28 Použití nucené konvekce (difuzoru) k ochlazení PCM desky .....	50
Obr. 29 Křivka chladnutí pro nucenou a přirozenou konvekci .....	50
Obr. 30 Termogram na počátku procesu chladnutí, vpravo s využitím nuceného proudu vzduchu .....	51
Obr. 31 Režim ohřevu PCM desky Dupont Energain .....	52
Obr. 32 DTA křivka PCM.....	53
Obr. 33 DTA křivka v, ohřev 4,3 °C/min v rozsahu -5 °C až 30 °C.....	54
Obr. 34 Funkční vzorek chladicího stropu .....	56
Obr. 35 IR snímek chladicích stropů s PCMs, provedeno 6.4.2018 12:46, teplota okolí 26 °C, relativní vlhkost 32 %, Rosný bod 8 °C, Emisivita povrchu 0,85 ..	56
Obr. 36 řez měřenou částí INDOOR, rozmístění teplotní čidel, kulového teploměru a elektrických vyhřívaných figurín 1- kompenzační prostor, 2 izolace (stěna), 3 testované zařízení (chladicí strop, trámec) 4 izolace hran v oblasti chladicích stropů (uzavřený systém), 5 elektricky vyhřívaná figurína, 6 teplotní čidlo, 7 kulový teploměr, 8 měření teploty v kompenzaci. [8] .....	58
Obr. 37 schéma měřicího pracoviště .....	59
Obr. 38 Hydraulické zapojení chladicích stropů .....	60
Obr. 39 Vnitřní prostor laboratoře během měření .....	60
Obr. 40 Celkový a normovaný chladicí výkon chladicího stropu s PCMs .....	62
Obr. 41 Celkový a normovaný chladicí výkon chladicího stropu bez PCMs .....	64
Obr. 42 Teplotní pole chladicího stropu s a bez využití PCMs, teplota chladicího média 10 °C .....	65
Obr. 43 Průběhy teplot přerušovaného chlazení s aplikací PCMs .....	67
Obr. 44 Průběhy teplot přerušovaného chlazení bez aplikace PCMs .....	68



Obr. 45 Srovnání výsledků přerušovaného chlazení s a bez aplikace PCMs .....	69
Obr. 46 Průběhy teplot, tepelného toku a průtoku chladicího média během absorpce tepelné zátěže .....	71

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Technické vlastnosti Dupont Energain [14].....	27
Tab. 2 Technické vlastnosti hexahydrátu chloridu vápenatého [46].....	29
Tab. 3 Podmínky měření kalibrační zkoušky.....	35
Tab. 4 Podmínky měření teplotních cyklů .....	39
Tab. 5 Hodnoty součinitele přestupu tepla termálního panelu.....	43
Tab. 6 Hodnoty časové konstanty termálního panelu .....	44
Tab. 7 Výsledky experimentu chlazení s využitím nuceného proudění vzduchu .....	49
Tab. 8 Výsledky experimentu chlazení akumulární desky .....	51
Tab. 9 Výsledky měření chladičoho výkonu.....	63
Tab. 10 Chladičí výkon stropních jednotek s PCMs při nominálním průtok 5 l·min <sup>-1</sup> .....	63
Tab. 11 Výsledky měření chladičoho výkonu bez PCMs .....	64
Tab. 12 Chladičí výkon stropních jednotek bez PCMs při nominálním průtok 5 l·min <sup>-1</sup> .....	65

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ANSI	American National Standards Institute
ASHRAE	American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers
ČSN	Česká technická norma
DTA	Diferenční termická analýza
FAI	Fakulta aplikované informatiky
HPE	Hydrogenous polyethylene
LSA	Lumped System Analysis
PCM	Phase change material
PVC	Polyvinylchlorid
TES	Thermal Energy Storage
UTB	Univerzita Tomáše Bati

# Příloha P I: Výsledky měření chladicího výkonu chladicího stropu s PCMs

Plocha stropní části			Rozměry laboratoře			
Celková plocha	$A_t$	10,96	Výška stropu	2,67		
Projektovaná plocha	$A_i$	5,09	Šířka	2,55		
Aktivní plocha	$A_a$	4,67	Délka	4,3		
Výsledky měření						
Číslo měření			1	2	3	4
Datum měření			3.4.2018	4.4.2018	4.4.2018	5.4.2018
Průtok chl. kapaliny [ $l \cdot \min^{-1}$ ]		$q_w$	$4,96 \pm 0,08$	$4,98 \pm 0,07$	$4,97 \pm 0,08$	$4,99 \pm 0,07$
Teplota [ $^{\circ}C$ ]	Voda - vstup	$\theta_{w1}$	$13,00 \pm 0,29$	$15,01 \pm 0,21$	$17,01 \pm 0,20$	$19,01 \pm 0,20$
	Voda - výstup	$\theta_{w2}$	$14,57 \pm 0,23$	$16,36 \pm 0,20$	$18,05 \pm 0,21$	$19,87 \pm 0,20$
	Kulový teploměr	$\theta_g$	$26,99 \pm 0,23$	$26,92 \pm 0,23$	$26,81 \pm 0,22$	$26,70 \pm 0,22$
	Vzduch - 1.7 m	$\theta_{a1.7}$	$27,07 \pm 0,24$	$27,04 \pm 0,24$	$26,80 \pm 0,23$	$26,88 \pm 0,23$
	Vzduch - 1.1 m	$\theta_{a1.1}$	$26,93 \pm 0,41$	$26,90 \pm 0,42$	$27,00 \pm 0,44$	$26,75 \pm 0,33$
	Vzduch - 0.1 m	$\theta_{a0.1}$	$27,03 \pm 0,22$	$27,01 \pm 0,24$	$27,02 \pm 0,21$	$26,79 \pm 0,22$
	Povrch Stěna 1	$\theta_{s1}$	$26,4 \pm 0,22$	$26,38 \pm 0,23$	$26,37 \pm 0,22$	$26,39 \pm 0,22$
	Povrch Stěna 2	$\theta_{s2}$	$26,54 \pm 0,24$	$26,54 \pm 0,23$	$26,48 \pm 0,22$	$26,50 \pm 0,21$
	Povrch Stěna 3	$\theta_{s3}$	$26,68 \pm 0,22$	$26,77 \pm 0,24$	$26,63 \pm 0,22$	$26,74 \pm 0,22$
	Povrch Stěna 4	$\theta_{s4}$	$26,74 \pm 0,23$	$26,69 \pm 0,24$	$26,69 \pm 0,22$	$26,70 \pm 0,23$
	Povrch podlahy	$\theta_{podlaha}$	$26,73 \pm 0,24$	$26,49 \pm 0,27$	$26,75 \pm 0,22$	$26,33 \pm 0,25$
	Povrch chl. stropu	$\theta_{strop}$	$19,78 \pm 0,31$	$20,70 \pm 0,27$	$21,55 \pm 0,29$	$22,76 \pm 0,22$
	Rosný bod	$\theta_r$	6,5	7,5	8,5	8,5
Vlhkost vzduchu		$\varphi$	$33,18 \pm 0,51$	$31,65 \pm 0,28$	$33,91 \pm 0,33$	$33,72 \pm 0,52$
Tepelný výkon - figuríny [W]		$P_s$	$509,62 \pm 15,77$	$464,50 \pm 10,16$	$352,48 \pm 16,25$	$279,80 \pm 18,91$
Vypočtené hodnoty						
Číslo měření			1	2	3	4
Referenční teplota		$\theta_{ref}$	26,99	26,60	26,43	26,62
$\Delta\theta$ [K]	Teplotní spád	$\Delta\theta_w$	$1,57 \pm 0,26$	$1,35 \pm 0,20$	$1,05 \pm 0,20$	$0,87 \pm 0,20$
	Střední účinný rozdíl teplot [ $W \cdot m^{-2}$ ]	$\Delta\theta$	$13,21 \pm 0,24$	$11,24 \pm 0,21$	$9,28 \pm 0,21$	$7,26 \pm 0,21$
Chladicí výkon	Celkové plochy místnosti [ $W \cdot m^{-2}$ ]	$P_t$	-49,54	-42,68	-33,09	-27,56
	Projektované plochy [ $W \cdot m^{-2}$ ]	$P_i$	-106,66	-91,90	-71,25	-59,34
	Aktivní plochy [ $W \cdot m^{-2}$ ]	$P_a$	-116,26	-100,16	-77,66	-64,68
	Celkový [W]	$P$	$-542,92 \pm 0,17$	$-467,77 \pm 0,14$	$-362,68 \pm 0,14$	$-302,04 \pm 0,14$
Tepelný tok okolními stěnami [W]		$P_B$	7,4	4,18	4,43	5,33
Tepelná bilance [W]		$\Delta Q$	25,90	-0,91	5,77	16,91
Maximální hodnota Tepelné bilance [W]		0.05 P	27,15	23,39	18,13	15,10

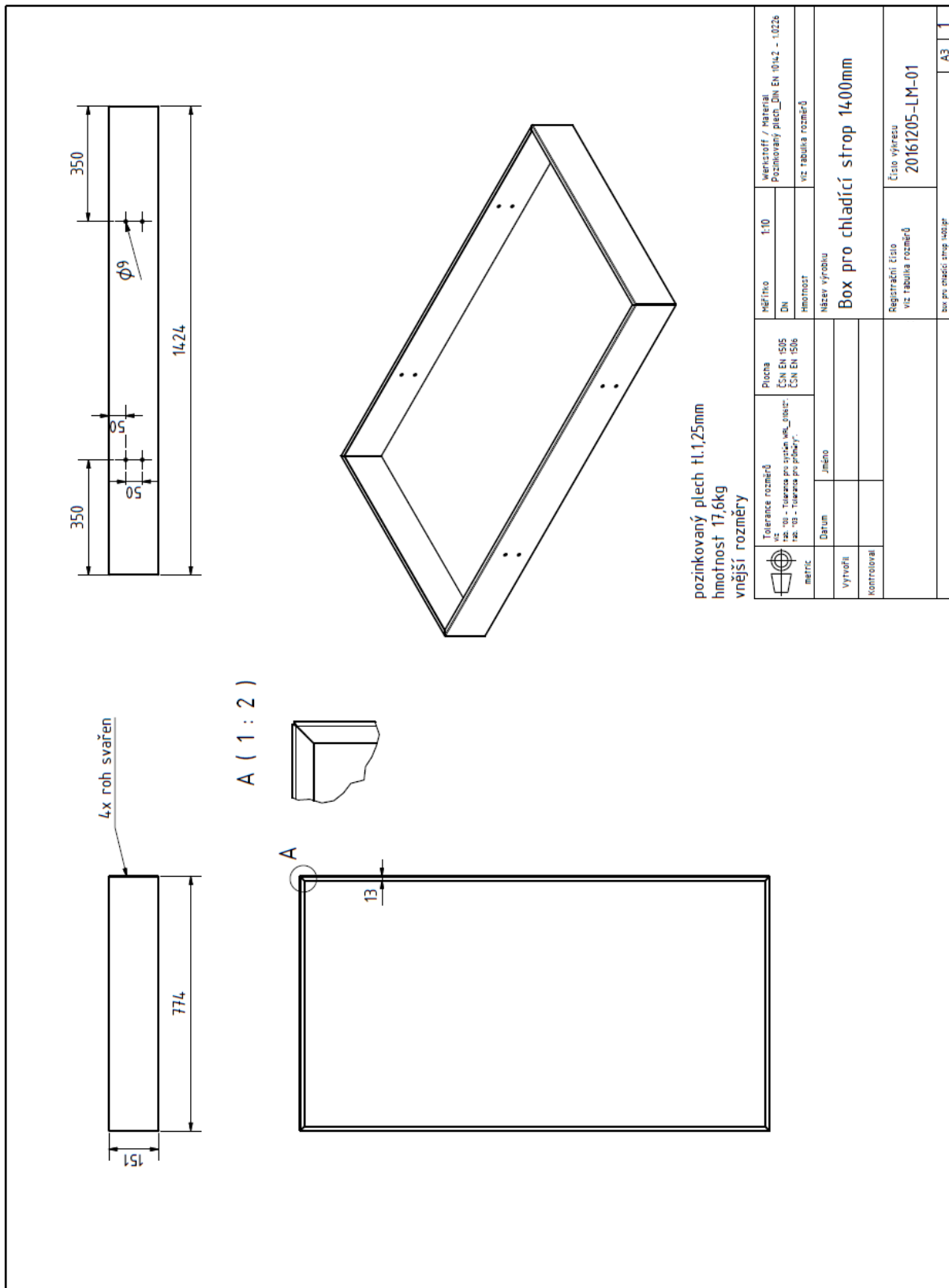
Výsledky jsou uvedeny včetně standardní rozšířené nejistoty s koeficientem rozšíření  $k = 2$ .

## Příloha P II: Výsledky měření chladičho výkonu chladičho stropu bez PCMs

Plocha stropní části			Rozměry laboratoře			
Celková plocha	$A_t$	10,96	Výška stropu	2,67		
Projektovaná plocha	$A_i$	5,09	Šířka	2,55		
Aktivní plocha	$A_a$	4,67	Délka	4,3		
Výsledky měření						
Číslo měření			1	2	3	4
Datum měření			23.4.2018	24.4.2018	25.4.2018	25.4.2018
Průtok chl. kapaliny [l.min <sup>-1</sup> ]		$q_w$	4,91±0,08	4,90±0,08	4,90±0,08	4,90±0,08
Teplota [°C]	Voda - vstup	$\theta_{w1}$	13,01±0,12	15,00±0,05	17,01±0,03	19,00±0,02
	Voda - výstup	$\theta_{w2}$	14,94±0,22	16,69±0,20	18,35±0,20	20,11±0,20
	Kulový teploměr	$\theta_g$	26,89±0,24	27,01±0,21	26,65±0,21	26,87±0,20
	Vzduch - 1.7 m	$\theta_{a1.7}$	26,92±0,25	27,04±0,23	26,77±0,21	27,01±0,21
	Vzduch - 1.1 m	$\theta_{a1.1}$	26,52±0,30	26,67±0,29	26,36±0,29	26,58±0,23
	Vzduch - 0.1 m	$\theta_{a0.1}$	26,89±0,26	27,02±0,22	26,68±0,21	26,91±0,21
	Povrch Stěna 1	$\theta_{s1}$	26,10±0,26	26,35±0,23	26,19±0,21	26,46±0,22
	Povrch Stěna 2	$\theta_{s2}$	26,40±0,26	26,78±0,26	26,54±0,22	26,84±0,21
	Povrch Stěna 3	$\theta_{s3}$	26,29±0,25	26,52±0,22	26,26±0,22	26,60±0,22
	Povrch Stěna 4	$\theta_{s4}$	26,42±0,25	26,68±0,22	26,44±0,22	26,76±0,20
	Povrch podlahy	$\theta_{podlaha}$	26,44±0,32	26,87±0,23	26,39±0,24	26,75±0,22
	Povrch chl. stropu	$\theta_{strop}$	16,29±0,31	17,87±0,27	19,35±0,24	20,95±0,23
	Rosný bod	$\theta_r$	11,60	12,90	12,00	12,00
	Vlhkost vzduchu		$\varphi$	41,26±0,28	41,93±0,25	42,72±0,29
Tepelný výkon - figuríny [W]		$P_s$	673,51±14,80	545,58±15,55	439,62±11,40	354,23±9,71
Vypočtené hodnoty						
Číslo měření			1	2	3	4
Referenční teplota		$\theta_{ref}$	26,89	27,01	26,65	26,87
$\Delta\theta$ [K]	Teplotní spád	$\Delta\theta_w$	1,93±0,17	1,69±0,13	1,35±0,12	1,10±0,11
	Střední účinný rozdíl teplot [W.m <sup>-2</sup> ]	$\Delta\theta$	12,92±0,19	11,13±0,15	8,97±0,15	7,31±0,14
Chladičho výkon	Celkové plochy místnosti [W.m <sup>-2</sup> ]	$P_t$	-60,20	-52,56	-41,91	-34,33
	Projektované plochy [W.m <sup>-2</sup> ]	$P_i$	-129,62	-113,18	-90,24	-73,92
	Aktivní plochy [W.m <sup>-2</sup> ]	$P_a$	-141,28	-123,36	-98,35	-80,57
	Celkový [W]	$P$	-659,77±0,13	-576,10±0,10	-459,30±0,10	-376,26±0,10
Tepelný tok okolními stěnami [W]		$P_B$	6,91	5,42	4,84	5,14
Tepelná bilance [W]		$\Delta Q$	-20,65	25,09	14,84	16,88
Maximální hodnota Tepelné bilance [W]		0.05 P	32,99	28,80	22,96	18,81

Výsledky jsou uvedeny včetně standardní rozšířené nejistoty s koeficientem rozšíření  $k = 2$ .

# Příloha P III: Výkres chladicího stropu 1600 mm



# Příloha P IV: Výkres chladicího stropu 1400 mm

