

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

Ing. Martin Kolářek, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Teze 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: **Ing. Martin Koláček**

Studijní program: Inženýrská informatika P3902
Studijní obor: Automatické řízení a informatika 3902V037

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

© Martin Koláček

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2018.

Klíčová slova: Akumulace energie, materiály s fázovou změnou PCMs, tepelná stabilita, efektivita akumulčního procesu

Key words: Energy accumulation, Phase Change materials (PCMs), thermal stability, efficiency of the accumulation process

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-769-0

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. Pojednávaná 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	8
ÚVOD.....	9
1. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU	10
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	12
3. POPIS KOMPLEXNÍHO VÝZKUMU A VÝVOJE PCMs	13
3.1 Stanovení požadovaných vlastností PCM	13
3.1.1 Využití termálních panelů obsahujících PCMs	13
3.1.2 Využití panelů PCMs.....	14
3.2 Aplikace PCMs	14
3.3 Tepelně akumulární materiály.....	15
3.3.1 Specifické vlastnosti PCMs	16
3.4 Popis využitých tepelně akumulárních materiálů PCMs	17
3.4.1 DuPont Energain.....	17
3.4.2 Hexahydrát chloridu vápenatého	17
4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM PCMs	18
4.1 Experimentální měření transparentního prvku využívající PCMs	18
4.1.1 Proces krystalizace.....	20
4.2 Akumulace energie v PCMs ve formě chladu	22
4.2.1 Experimentální využití nucené konvekce k zvýšení přestupu tepla z PCM do okolí.....	23
4.2.2 Chlazení tepelně akumulární desky Dupont Energain.....	24
4.3 Funkční vzorek chladicího stropu.....	26
4.3.1 Metodika měření chladicích prvků a úprava laboratoře	27
4.4 Měření chladicího výkonu chladicího stropu	28
4.4.1 Výsledky měření chladicího výkonu chladicího stropu	28
4.5 Přerušovaný provoz chlazení chladicích stropů	30
5. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI.....	31
6. ZÁVĚR.....	32

7. ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	34
POUŽITÁ LETERATURA A ZDROJE	36
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA.....	39
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	42
SEZNAM TABULEK.....	43
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	44

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

<u><i>Symbol</i></u>	<u><i>jednotka</i></u>	<u><i>význam</i></u>
<i>U</i>	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	Součinitel prostupu tepla

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 [2]. 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 využití 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 [10],[16],[20].

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 [6],[13],[17],[23].

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 [9],[15],[21].

Aktivní aplikace popisují některé studie, které se zabývaly specifickou aplikací PCMs s podlahovým vytápěním [1], nebo také montáží v chladicích stropech [22], většina se však zabývala samotnou účinností PCMs na teplotní stabilizaci uvnitř objektů lehké konstrukce během vysokých letních teplot [8]. 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 vybití 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 DupontTM 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. Je 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 [14].

Některé studie [13] 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.

3.1.2 Využití panelů PCMs

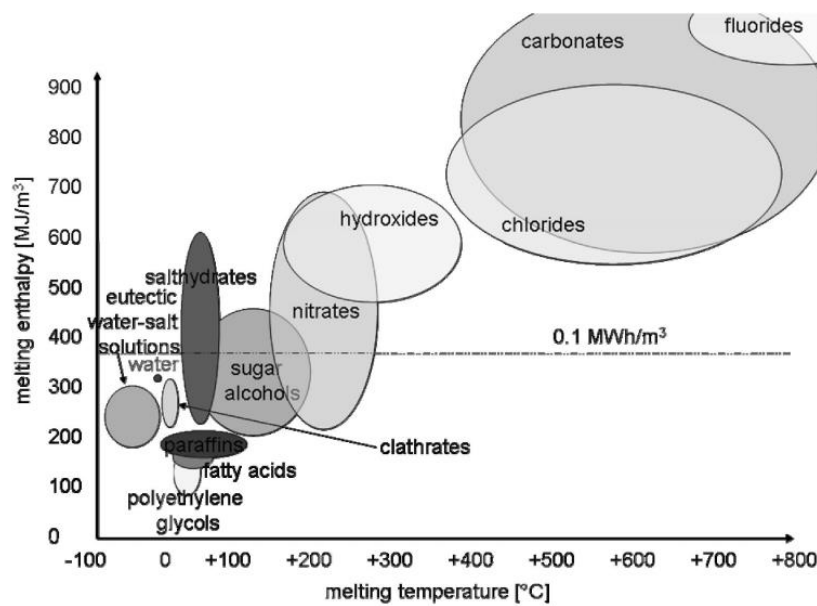
PCMs mají teplotně závislé vlastnosti především měrnou tepelnou kapacitu. Ta se výrazně mění v průběhu fázové změny, tedy stavu, kdy je tento materiál ve stavu tání a tuhnutí. Proto bylo využito možnosti laboratoře k provedení diferenční termické analýzy dále jen DTA, která analyzuje změny vlastností 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.

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 [3],[4],[5] a zároveň byla provedena tak aby umožnila měřit chladicí výkon nejen chladicích stropů ale také chladicích trámců.

3.3 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 [2], 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. 1. jsou uvedeny teploty fázové přeměny některých materiálů PCMs.



Obr. 1 Rozdělení materiálu PCMs, teploty tání a množství akumulované energie jednotlivých druhů [17]

3.3.1 Specifické vlastnosti PCMs

Podchlazení neboli (Supercooling, Subcooling), tento stav nastane v PCMs, když je materiál podchlazen pod teplotu fázové přeměny a proces tuhnutí nenastane. 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 [9], nebo přidání zahušťovadel, které zabrání sedimentaci solí na dno.

Usazování solí, tedy nekongruentnost (nesourodost) tání hydrátů soli, 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 tepelné akumulační 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 akumulačních 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, 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 nekongruentnost 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 akumulačního

systemu 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 [18].

3.4 Popis využitých tepelně akumulčních materiálu 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.

3.4.1 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 parafinu. 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 [7],[11].

3.4.2 Hexahydrát chloridu vápenatého

Hexahydrát chloridu vápenatého $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ je získáván oddělením solného roztoku těžného 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 kapalnou 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 [19].

4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM PCMs

Laboratoř integrovaných systému 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, trámů a především provedení úpravy části kalorimetrické komory, která by umožňovala měřit chladicí výkon těchto prvků.

4.1 Experimentální měření transparentního prvku využívající PCMs

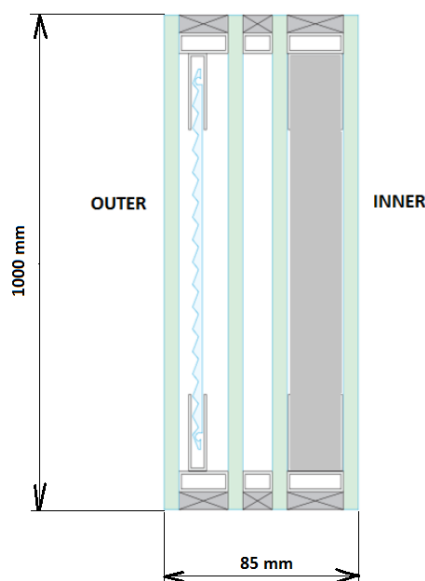
Součástí disertační práce je také pasivní využití specifického transparentního prvku využívající PCMs. Tepelně akumulční materiály PCMs se v posledních letech stávají více populární a to v různých aplikacích například i v transparentních prvcích budov [9],[15],[22]. Materiály, které se využívají

v těchto aplikacích, jsou určeny především k teplotní stabilizaci uvnitř budov, kde redukují tepelnou zátěž způsobenou slunečním zářením. Jak popisují studie [9],[15],[21],[22], 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 akumulativního 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 3.3.1, 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 [9]. Tato změna byla provedena výrobcem za účelem zvýšení tepelně akumulativních 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 akumulativní 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 akumulativního 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. 2. Panel je složen ze čtyř tvrzených skel a celková hmotnost panelu je 95 kg.



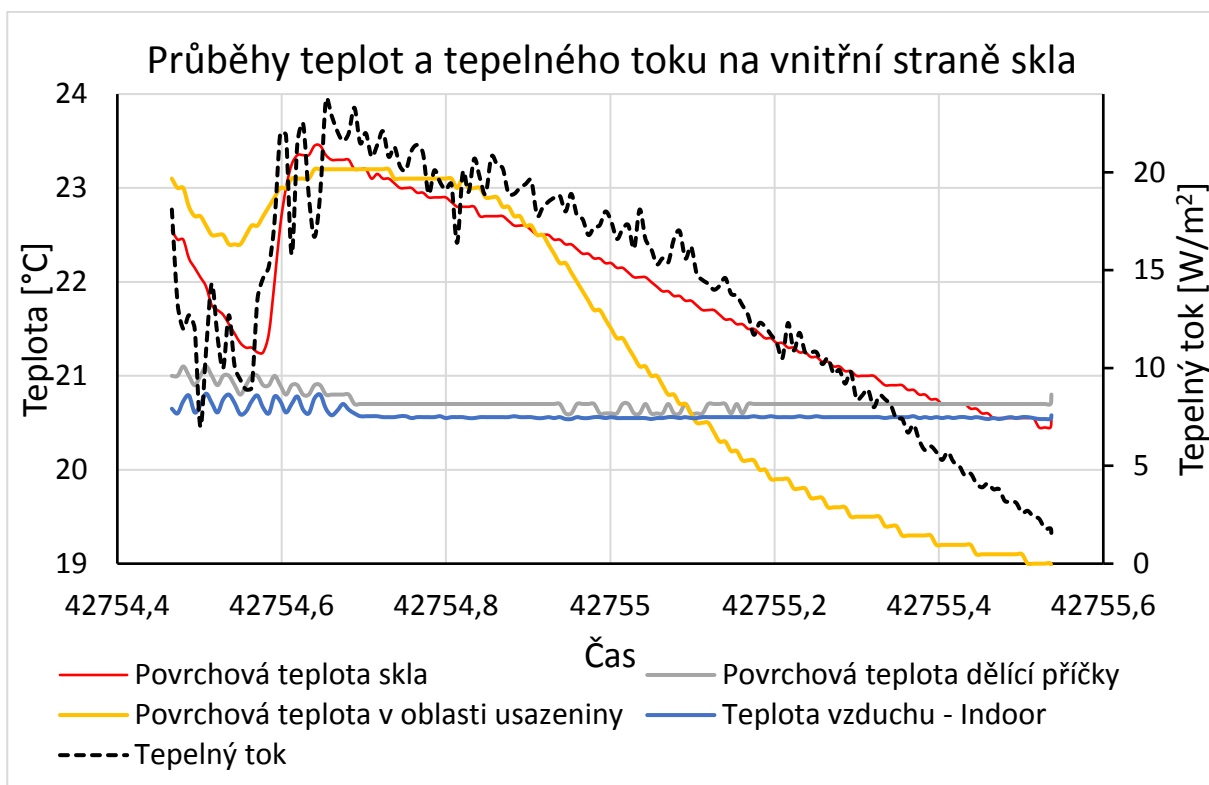
Obr. 2 Struktura skla

Testování tohoto panelu bylo prováděno v dělicí příčce kalorimetrické komory. Rám skla byl vyroben ze dřeva a řádně izolován v celé délce dilatační spáry. 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.

4.1.1 Proces krystalizace

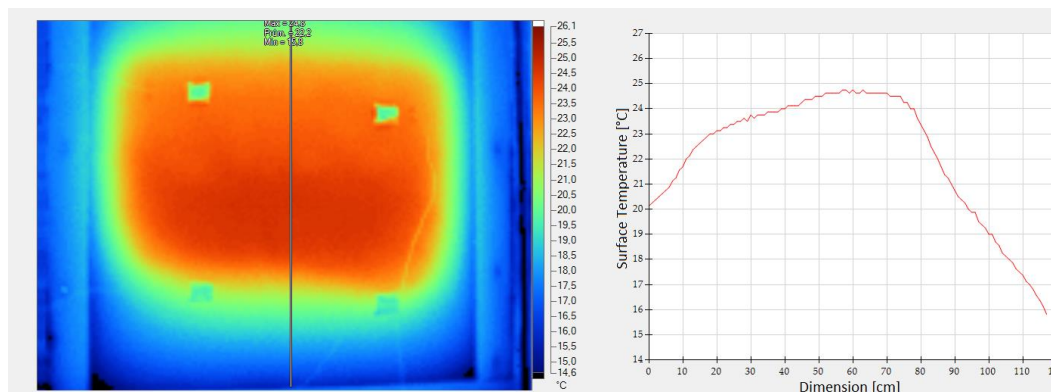
Proces krystalizace představuje obnovu akumulčního média ve fázi tuhnutí z kapalného do pevného stavu. Během tohoto procesu dochází k uvolnění akumulované energie z materiálu do okolního prostoru. Tato zkouška nahrazovala situaci v zimním období, kdy sluneční záření prostupující přes prizmatické sklo 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. 3 Povrchové teploty, tepelný tok na vnitřní straně skla během testu, vnitřní teplota vzduchu 20,5 °C teplota vzduchu na venkovní straně -15 °C.

Obr. 3 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. 3. 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. 4 Termogram povrchu skla během krystalizace

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 [12], 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 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ tedy hranici teploty pro použití chladicího zařízení dle [2].

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 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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.

4.2.1 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 akumulčního 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.

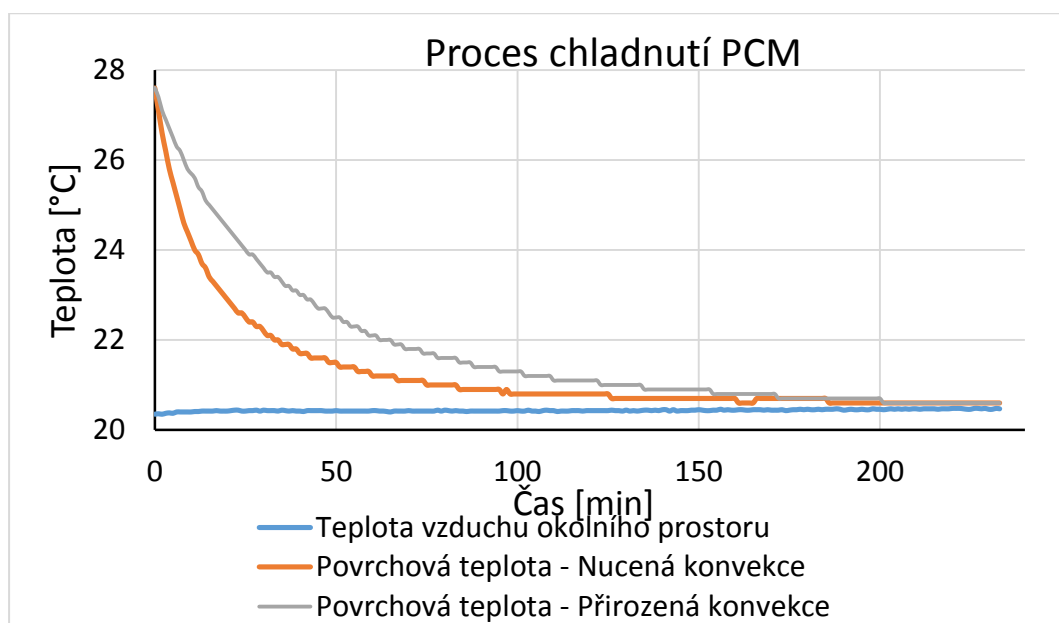
V případě aplikace difuzoru pro ochlazování termálního panelu bylo využito ventilátoru s průtokem vzduchu, který byl zvolen vzhledem k rychlosti a charakteru proudění vzduchu na $100 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$. Tato rychlost byla zvolena s ohledem na efektivní rozložení proudu podél povrchu panelu 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.

4.2.2 Chlazení tepelně akumulární desky Dupont Energain

Difuzní prvek byl také aplikován přímo na akumulární 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. Výsledky měření jsou v grafu, viz Obr. 5. 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 vyústek 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. 5 Křivka chlazení pro nucenou a přirozenou konvekci

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

Tab. 1 Výsledky experimentu chlazení akumulární desky

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

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 Funkční vzorek chladicího stropu

Jedním z bodů disertační práce bylo využít aktivní aplikace PCMs ve specifickém zařízení. Z výsledků měření a aplikací tepelně akumulčního 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 [22], 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 akumulčního 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 materiálů 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 akumulční médium představuje jednu z možných dalších funkcí tohoto systému.



Obr. 6 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.

4.3.1 Metodika měření chladicích prvků a úprava laboratoře

Nedílnou součástí vytvoření chladicího stropu bylo také vytvořit postup neboli metodiku měření, dle které by bylo provedeno měření chladicího výkonu tohoto zařízení. Tato metodika vychází z ČSN EN 14240, je aplikována na stávající možnosti laboratoře techniky prostředí v Indoor části komory. Z hlediska doby ustálení a stanovení chladicího 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 chladicího výkonu chladicích jednotek.

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

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 trámů 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 m², s výškou 2,7 až 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 vytvořená byla ocelová konstrukce, na kterou byly připevněny PVC desky.

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.

4.4 Měření chladicího výkonu chladicího stropu

V laboratoři byly měřeny chladicí stropy o celkové ploše 4,67 m². 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.

4.4.1 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⁻¹.

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 chladícím 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.

Celkový chladicí výkon představuje výkon všech měřených jednotek o aktivní ploše 4,67 m². 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.

Tab. 2 Chladicí výkon stropních jednotek s PCMs při nominálním průtok 5 l·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	

Chladicí výkon chladicího stropu bez PCMs

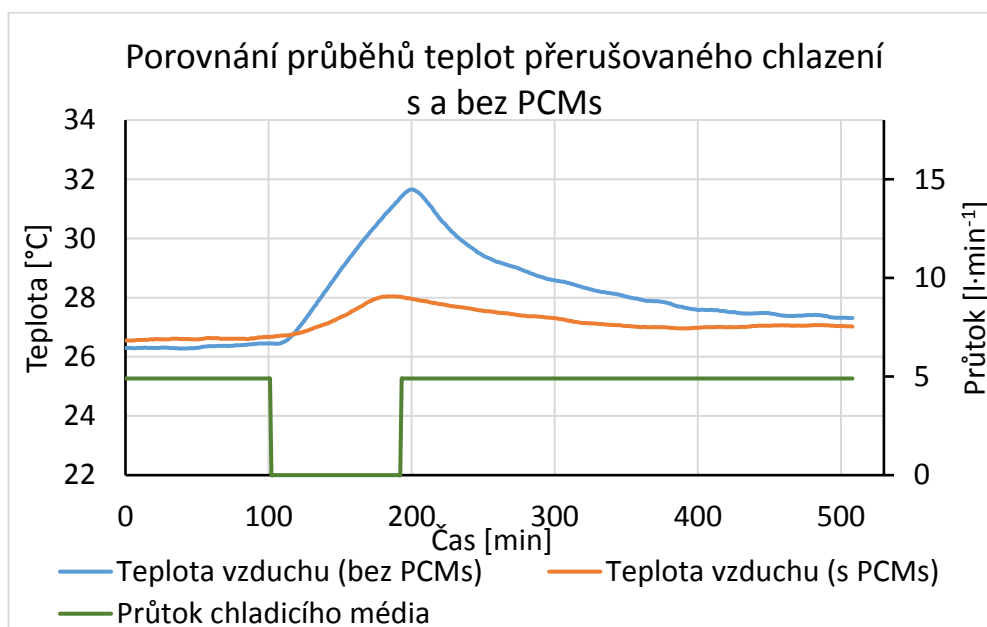
V případě chladicích jednotek bez PCMs, byla vrstva PCMs z chladicího boxu odstraněna. Tepelně vodivé pásy trubkového výměníku byly v přímém kontaktu s plochou chladicího stropu a způsobovaly tak vyšší chladicí výkon. Proces ustálení byl v tomto případě rychlejší v porovnání s použitím PCMs. Ustálení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

Tab. 3 Chladicí výkon stropních jednotek bez PCMs při nominálním průtok 5 l·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	

4.5 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 akumuláční 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 stropěch 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.



Obr. 7 Srovnání výsledků přerušovaného chlazení s a bez aplikace PCMs

Srovnání výsledků měření přerušovaného chlazení s a bez aplikace PCMs je zobrazeno na Obr. 7. 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 zdoluhavý. 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.

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 LITERATURA A ZDROJE

- [1] 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.
- [2] ČSN 730540. *Tepelná ochrana budov. Část 2: Požadavky*. 2011. Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha.
- [3] ČSN EN 14240. *Větrání budov – Chladicí kryty – Zkoušení a hodnocení*. 2004. Český normalizační institut.
- [4] ČSN EN 14518. *Větrání budov – Chladicí trámce – Zkoušení a hodnocení pasivních trámců*. 2005. Český normalizační institut.
- [5] ČSN EN 15116. *Větrání budov – Chladicí trámce – Zkoušení a hodnocení aktivní chladících trámců*. 2008. Český normalizační institut.
- [6] DEMIRBAS, M.F. Thermal energy storage and phase change materials: An overview. *Energy Sour. Part B Econ. Plan. Policy*. 2006, 1, 85–95.
- [7] 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).
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] KOLÁČEK, M., Tepelně akumulční 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
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] MADAD, A. MOUHIB, T., MOUHSEN, A. Phase Change Materials for Building Applications: A Thorough Review and New Perspectives. *Buildings* 2018, 8, 63.
- [17] MEHLING, H., CABEZA, L. F., 2008. *Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications*. Berlin; Heidelberg: Springer.
- [18] OSTRÝ, M. Využití akumulace tepla při změnách skupenství v budovách. 2013. Teze habilitační práce. VUT Brno. ISSN: 1213-418X.
- [19] 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.
- [20] 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>.

- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.

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 Rozdělení materiálu PCMs, teploty tání a množství akumulované energie jednotlivých druhů [17]	15
Obr. 13 Struktura skla.....	20
Obr. 3 Povrchové teploty, tepelný tok na vnitřní straně skla během testu, vnitřní teplota vzduchu 20,5 °C teplota vzduchu na venkovní straně -15 °C.....	21
Obr. 4 Termogram povrchu skla během krystalizace	22
Obr. 5 Křivka chladnutí pro nucenou a přirozenou konvekci	25
Obr. 6 Funkční vzorek chladičího stropu	27
Obr. 7 Srovnání výsledků přerušovaného chlazení s a bez aplikace PCMs.....	30

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Výsledky experimentu chlazení akumulární desky	25
Tab. 2 Chladicí výkon stropních jednotek s PCMs při nominálním průtok 5 l·min ⁻¹	29
Tab. 3 Chladicí výkon stropních jednotek bez PCMs při nominálním průtok 5 l·min ⁻¹	29

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

Ing. Martin Koláček

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

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

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Martin Koláček

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Pořadí vydání: první

Rok vydání 2018

ISBN 978-80-7454-769-0

