

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 446*

*ISSN 1213-418X*

**Milan Ostrý**

**VYUŽITÍ AKUMULACE TEPLA  
PŘI ZMĚNÁCH SKUPENSTVÍ  
V BUDOVÁCH**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

**Ing. Milan Ostrý, Ph.D.**

**VYUŽITÍ AKUMULACE TEPLA  
PŘI ZMĚNÁCH SKUPENSTVÍ V BUDOVÁCH**

USE OF LATENT HEAT STORAGE IN BUILDINGS

Teze habilitační práce



BRNO 2013

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

materiály s fázovou změnou (PCMs); latentní teplo; akumulace tepla; tepelná stabilita; vnitřní prostředí; stavební konstrukce

## **KEY WORDS**

Phase change materials (PCMs); Latent heat; Heat storage; Thermal stability; Indoor environment; Building structure

## **MÍSTO ULOŽENÍ RUKOPISU HABILITAČNÍ PRÁCE**

Rukopis habilitační práce je uložen v archivu pedagogicko-vědeckého oddělení Fakulty stavební VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno.

# OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD .....	6
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	7
2.1 Akumulace tepla .....	7
2.1.1 <i>Princip akumulace citelného tepla</i> .....	8
2.1.2 <i>Princip akumulace latentního tepla</i> .....	8
2.1.3 <i>Změna skupenství u čistých PCMs</i> .....	10
2.1.4 <i>Změna skupenství u směsí PCMs</i> .....	12
2.1.5 <i>Vybrané problémy akumulace při fázových změnách</i> .....	12
2.2 PCMs pro akumulaci latentního tepla.....	13
2.2.1 <i>Materiály organického původu</i> .....	13
2.2.2 <i>Materiály anorganického původu</i> .....	14
2.3 Integrace PCMs ve stavebních konstrukcích.....	15
2.3.1 <i>Impregnace stavebních materiálů</i> .....	16
2.3.2 <i>Mikro kapsle s PCMs rozptýlené ve stavebním materiálu nebo prvku</i> .....	16
2.3.3 <i>Makro zapouzdření</i> .....	17
2.3.4 <i>Tvarově stabilizované PCMs</i> .....	18
3 KOMPLEXNÍ POJETÍ VÝZKUMU A VÝVOJE APLIKACÍ PCMS NA VUT V BRNĚ.....	18
4 TEORETICKÁ A EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA.....	19
4.1 Numerické modelování fázových přechodů .....	19
4.1.1 <i>Metoda entalpie</i> .....	19
4.1.2 <i>Metoda efektivní tepelné kapacity</i> .....	20
4.2 Experimentální ověřování vlastností vybraných PCMs pro použití ve stavebních konstrukcích.....	22
4.2.1 <i>Analýza anorganických PCMs</i> .....	22
4.2.2 <i>Analýza mikro zapouzdřeného organického PCMs</i> .....	24
4.2.3 <i>Analýza organických PCMs</i> .....	24
4.3 Experimentální výzkum v testovacích podkrovních místnostech.....	26
4.3.1 <i>Popis infrastruktury na Ústavu pozemního stavitelství</i> .....	26
4.3.2 <i>Úvodní komparativní měření</i> .....	27
4.3.3 <i>PCMs v hliníkových kontejnerech integrovaných na obalových konstrukcích</i> .....	27
4.3.4 <i>Tepelně akumulací omítka se systémem kapilárních rohoží</i> .....	30
4.3.5 <i>Další testované systémy</i> .....	33
5 ZÁVĚR.....	35
6 LITERATURA.....	36
7 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA .....	38
ABSTRACT.....	40

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

### Osobní údaje

Jméno a příjmení: Ing. Milan Ostrý, Ph.D.  
Narozen: 20.1.1977 v Novém Městě na Moravě  
Bydliště: Merhautova 954/76, 613 00 Brno – Černá Pole  
Státní příslušnost: Česká republika  
Zaměstnavatel: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební  
Ústav pozemního stavitelství, Veveří 95, 602 00 Brno  
Telefon: +420 541 147 499, mobilní telefon: +420 728 551 728  
E-mail: ostry.m@fce.vutbr.cz



### Vzdělání, odborná příprava a školení

- 2005 – vysokoškolské vzdělání, titul Ph.D. – vědní obor 3608V001 Pozemní stavby, VUT v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno;
- 2001 – vysokoškolské vzdělání, titul Ing. – obor Pozemní stavby, zaměření Navrhování pozemních staveb, VUT v Brně, Fakulta stavební;
- 1996 – středoškolské odborné vzdělání, maturita - Střední průmyslová škola stavební ak. Stanislava Bechyně, Jihlavská 628, 580 01 Havlíčkův Brod;
- 1996 – středoškolské odborné vzdělání, výuční list v oboru zedník - Střední odborné učiliště, Lipnice nad Sázavou 4, 582 32 Lipnice nad Sázavou.

### Zaměstnání, pracovní zkušenosti

- od 09/2004 – asistent, odborný asistent a tajemník ústavu pro vědu a výzkum (od 07/2005) – Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství, Veveří 95, 602 00 Brno;
- 07/2003 – 04/2004 – technik specialista – Energ spol.s r.o., Vídeňská 815/89a, 639 00 Brno-Štýřice;
- 07/2001 – 09/2001 – mistr stavební výroby – PKS INPOS a.s., Brněnská 126/38, 591 39 Žďár nad Sázavou.

### Další odborná praxe a činnost

- 04/2005 – 07/2010 – odborný konzultant – Národní institut pro integraci osob s omezenou schopností pohybu a orientace České republiky, o.s., Havlíčkova 4481/44, 586 01 Jihlava;
- od 18.6.2010 – autorizovaný inženýr ČKAIT č. 1005260 pro obor Pozemní stavby;
- od 11.11.2010 – energetický expert při MPO ČR s oprávněním vypracovávat PENB.

### Pedagogická činnost

- od ak. roku 2004/05 výuka ve cvičení: Stavební akustika a denní osvětlení, Stavby s nízkou energetickou náročností, Počítačová aplikace tepelné techniky, Pozemní stavitelství II, Nauka o pozemních stavbách, Pozemní stavitelství I, Tepelná technika budov, Pozemní stavby a urbanizmus, Počítačová aplikace stavební fyziky, Trvale udržitelná výstavba, Stavby s nízkou energetickou náročností
- od ak. roku 2005/06 vedení diplomových prací - celkem 32 obhájených prací;
- od ak. roku 2008/09 vedení bakalářských prací - celkem 18 obhájených prací;
- od ak. roku 2008/09 školitel studentů doktorského studijního programu - 2 práce úspěšně obhájeny (31.1.2012, 29.1.2013), 3 studenti v současnosti studují prezenčně;

- od ak. roku 2008 výuka v rámci doktorského programu: DH Doktorský seminář;
- od ak. roku 2005/06 přednášky: BH02 Nauka o pozemních stavbách (anglicky), BH52 Pozemní stavitelství I (anglicky), CH09 Trvale udržitelná výstavba, AH53 Počítačová aplikace stavební fyziky, TH 51 Trvale udržitelná výstavba;
- člen komisí pro obhajobu bakalářských a diplomových prací;
- člen komisí pro státní doktorské zkoušky.

### **Řešené výzkumné projekty**

- projekt GAČR č. 103/07/0907 „Využití solárních komínů a materiálů se změnou skupenství pro pasivní chlazení budov“ (2007 až 2009) – spolupracovník;
- VG č.50 „Experimentální laboratoř stavební tepelné techniky“ (2007) – spoluřešitel;
- VG č.284 „Řízené větrání experimentálních laboratoří stavební tepelné techniky (2009) – spoluřešitel;
- projekt specifického výzkumu FAST-S-10-33 „Efektivní akumulace skupenského tepla v konstrukcích nízkoenergetických staveb“ (2010) – řešitel;
- projekt GAČR č. P101/11/1047 „Tlumení kolísání teploty tekutiny pomocí akumulace tepla při změně skupenství“ (od 2011) – spolupracovník;
- projekt specifického výzkumu FAST-S-11-60 „Inteligentní systém pasivního chlazení pro energeticky efektivní budovy“ (2011) – řešitel;
- projekt GAČR č. P104/12/1838 „Využití akumulace latentního tepla materiály s fázovou změnou pro snížení spotřeby primární energie v budovách“ (od 2012) – řešitel;
- projekt COST OC 10051 „Využití materiálů se změnou skupenství pro vyšší efektivnost solárních vzduchových systémů“ (2011 až 2012) – spolupracovník;
- projekt „VUT Energetické zdroje“ – odborný garant IA04 „Sestava tepelně akumulčních modulů se systémem kapilárních rohoží pro stabilizaci tepelného mikroklimatu ve stavbách s lehkými obalovými konstrukcemi“ (od 2012).

### **Publikační činnost**

- 5 článků v odborném periodiku s impakt faktorem, které je obsaženo v databázi Web of Science společnosti Thomson Reuters ( $J_{imp}$ );
- 1 článek v odborném periodiku, které je obsaženo v databázi SCOPUS ( $J_{neimp}$ );
- 10 článků v odborném periodiku, které je zařazeno v Seznamu neimpaktovaných recenzovaných periodik vydávaných v České republice ( $J_{rec}$ );
- 2 publikace ve sborníku z mezinárodní konference vedené v databázi „Web of Knowledge“ (D);
- 7 článků v zahraničních časopisech bez IF;
- 11 článků v odborných časopisech;
- 54 příspěvků ve sbornících národního, mezinárodního kongresu, symposia, vědecké konference;
- 9 abstraktů ve sbornících národní nebo mezinárodní vědecké konference;
- 3 studijní opory;
- 21 citací jiným autorem podle Science Citation Index (ke dni 7.3.2013);
- h-index: 2 (ke dni 7.3.2013).

### **Registrované užité vzory a udělené patenty**

- původce a spolupůvodce 7 užitečných vzorů v ČR ( $F_{užit}$ );
- původce a spolupůvodce 2 patentů v ČR (P).

# 1 ÚVOD

Provozní energetická náročnost se v minulých dvou desetiletích dostala do popředí zájmu stavebníků a uživatelů budov. Je to dáno nejen rostoucími cenami energií, ale také legislativními požadavky na úrovni Evropské unie i na úrovni národní. Rozvoj moderní architektury s takovými prvky, jakými jsou bohatě prosklené fasády, otevřené vnitřní prostory s lehkými přemístitelnými příčkami a nárůst výstavby lehkých obvodových plášťů s velmi nízkým součinitelem prostupu tepla, vede často k situacím, kdy pro zajištění vhodných mikroklimatických podmínek je zapotřebí v letním období strojního chlazení.

Velikost energetických zisků ze slunečního záření je samozřejmě závislá na velikosti výplní otvorů, jejich orientaci ke světovým stranám a jejich stínění nebo clonění. Okna a další prosvětlovací konstrukce však musí být navrženy s ohledem na požadavky norem a hygienických předpisů, protože denní osvětlení patří mezi důležité složky vnitřního mikroklimatu. Pokud však předimenzovaná velikost transparentních výplní obvodového pláště a jejich nevhodná orientace ke světovým stranám způsobuje v letním období přehřívání interiéru, je v praxi přistupováno nejdříve k instalaci clonících prvků, následně k instalaci strojního chlazení. Vzhledem k požadavku nízké provozní energetické náročnosti objektu není instalace strojního chlazení žádoucí.

Stavební objekt by tedy měl být navržen tak, aby dokázal efektivně snižovat výkyvy venkovního prostředí a zajistil optimální tepelné mikroklima uvnitř objektu při minimální potřebě energií z neobnovitelných zdrojů. Po řadu staletí bylo využíváno v letním období tepelně akumulací kapacity hmotných stavebních konstrukcí, zejména zdiva z kamene a plných pálených cihel v kombinaci s malým procentem prosklení obvodového pláště. Tyto objekty vykazovaly v letním období mnohem vyšší tepelnou stabilitu v porovnání s řadou stavebních objektů realizovaných v minulých desetiletích s lehkým a bohatě proskleným obvodovým pláštěm.

Pro zajištění nízkých provozních nákladů stavebních objektů je tedy vhodné v zásadě minimalizovat jejich energetickou náročnost a maximalizovat podíl obnovitelných zdrojů energie na celkové spotřebě energie. U obnovitelné energie ze slunečního záření se však setkáváme s typickým problémem, kdy maximální energetické zisky jsou k dispozici v období s nízkou poptávkou po energiích. Pro rozvoj využívání energií z obnovitelných zdrojů, zejména energie slunečního záření, má tedy zásadní význam nejen vývoj v oblasti vlastních aktivních nebo pasivních systémů, ale také vývoj v oblasti akumulace tepla a elektřiny.

Předkládaná práce je zaměřena právě na oblast využití akumulace tepla ve stavebních konstrukcích za účelem snížení provozní energetické náročnosti na chlazení a vytápění budov. Z dostupných technik akumulace tepla byla zvolena akumulace při změnách skupenství u látek PCMs (Phase Change Materials). Potenciál využití těchto materiálů je velký, o čemž svědčí řada v minulosti a současnosti řešených mezinárodních projektů s touto tematikou a vzrůstající množství publikovaných výstupů uvedených ve světových databázích. Nicméně je možné již v úvodu konstatovat, že překážkou pro masový rozvoj akumulací technik s využitím skupenských změn není pouze poněkud vysoká cena akumulací médií a prvků na světovém trhu, ale zároveň řada problémů spojených s efektivitou a spolehlivostí instalovaných systémů. Další překážkou se jeví zatím malý zájem firem o výrobu zapouzdřených akumulací médií a malá informovanost projektantů a stavebníků.

V současné době je na Vysokém učení technickém v Brně k dispozici unikátní infrastruktura, která umožňuje nejen výzkum a vývoj v oblasti vlastních akumulací médií, ale také v oblasti aplikací tepelně akumulací systémů v konstrukcích pozemních staveb a v systémech technického zařízení. Tato infrastruktura a tým pracovníků z Fakulty stavební, Fakulty strojního inženýrství a Fakulty chemické má během několikaleté spolupráce za sebou řadu konkrétních výstupů a skýtá potenciál pro řešení projektů týkajících se akumulace při změnách skupenství na národní, ale i mezinárodní úrovni.

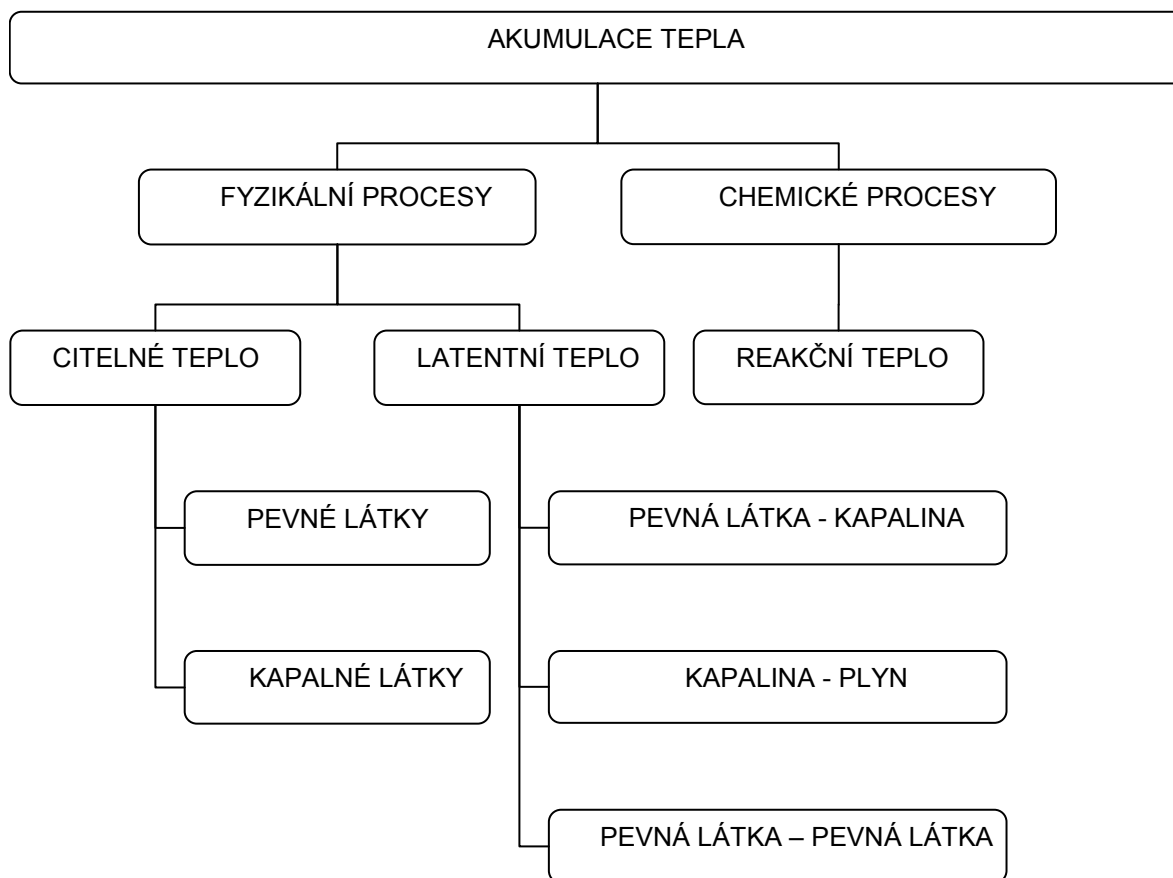
## 2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Akumulace energie hraje důležitou roli v okamžiku, kdy se časově neshoduje výroba nebo dodávka energie s okamžitou poptávkou po ní, a je tedy zásadní např. pro rozvoj přeměny energie z obnovitelných zdrojů. Typickým příkladem je přeměna elektrické a tepelné energie ze slunečního záření pro krytí energetické náročnosti objektů pro bydlení. V tomto případě lze nejvyšší výkon zařízení očekávat v letních měsících, kdy zpravidla poptávka po teple je výrazně nižší, než její nabídka. V zimním období naopak výkon energetického zdroje klesá a potřebu elektřiny a tepla je pak třeba pokrývat z jiných zdrojů. Vývoj vhodných akumulátorů energie má tudíž zásadní význam pro využití energie z obnovitelných zdrojů pro vytápění, chlazení a ohřev teplé vody v objektech. Energeticky nezávislý objekt si tedy nelze představit bez dostatečných zásobníků energie pro krytí jeho energetických potřeb v případě snížené nebo minimální dodávky energie.

### 2.1 AKUMULACE TEPLA

V případě využití energie slunečního záření pro potřeby vytápění, resp. chlazení stavebních objektů, je vhodné se zaměřit na přímou akumulaci tepla ve stavebních konstrukcích. Teplo může být akumulováno ve velmi dobře izolovaných kapalných nebo pevných látkách (GARG *et al.*, 1985). Obecně lze teplo akumulovat prostřednictvím:

- citelného tepla v závislosti zejména na měrné tepelné kapacitě materiálu;
- latentního tepla v závislosti na velikosti tepla skupenské přeměny;
- kombinací výše uvedených metod;
- termochemických procesů.



Obr.2.1 Přehled technik akumulace tepla podle MEHLING *et CABEZA* (2008)



### 2.1.1 Princip akumulace citelného tepla

Akumulace citelného tepla využívá tepelnou kapacitu a změnu teploty akumulčního média během procesu nabíjení a vybíjení (GARG *et al.*, 1985). Teplota média stoupá v okamžiku, kdy je teplo absorbováno a klesá při odebrání tepla z média. Jednou z nejdůležitějších vlastností tohoto způsobu akumulace je, že lze počítat s kompletní reverzibilitou procesu nabíjení a vybíjení a v podstatě s neomezeným počtem cyklů s přihlédnutím k závislosti na životnosti média.

Citelné teplo  $Q$  dodávané nebo vydávané materiálem při změně teplot z  $T_i$  na  $T_f$  je rovno (KHALIFA *et* ABBAS, 2009):

$$Q = m \int_{T_i}^{T_f} c_p dT = V \int_{T_i}^{T_f} \rho c_p dT \quad (2.1)$$

Kde	$Q$ je	akumulované teplo v J
	$m$	hmotnost akumulčního média v kg
	$c_p$	průměrná měrná tepelná kapacita mezi $T_i$ a $T_f$ v $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
	$\rho$	objemová hmotnost v $\text{kg.m}^{-3}$
	$V$	objem akumulčního média v $\text{m}^3$
	$T_i$	počáteční teplota akumulčního média v K
	$T_f$	konečná teplota média v K

Z rovnice 2.1 je zřejmé, že čím větší bude měrná tepelná kapacita materiálu a jeho objemová hmotnost, tím více bude možné naakumulovat tepla v daném objemu. V současné době je nejvíce tepelně akumulčních zařízení založeno na akumulaci citelného tepla i přes to, že tento systém není izotermický. Často je tepelná kapacita vztažena na množství materiálu, jeho objem nebo hmotnost (MEHLING *et* CABEZA, 2008). Potom hovoříme o měrné molární, objemové nebo hmotnostní tepelné kapacitě. Pro akumulaci citelného tepla se používají pevné a kapalné látky. Plyny mají velice nízkou objemovou tepelnou kapacitu, proto se obvykle nepoužívají pro akumulaci citelného tepla.

### 2.1.2 Princip akumulace latentního tepla

Teplo, které se spotřebovává nebo uvolňuje při změně skupenství látky, se nazývá skupenské neboli latentní teplo. Pokud se podaří nalézt materiál, u něhož fázová změna probíhá ve vhodném teplotním rozsahu, pak při fázové změně pevná látka – kapalina je možné naakumulovat značné množství tepla. Při změně skupenství mezi pevnou látkou a kapalinou dochází k objemovým změnám, které však obvykle bývají do 10 %. Z důvodu malých objemových změn u fázového přechodu pevná látka – kapalina je akumulované teplo rovno změně entalpie (SILVA *et al.*, 2012):

$$\Delta Q = m \Delta h \quad (2.2)$$

kde	$Q$ je	dodané nebo uvolněné teplo v J
	$m$	hmotnost akumulčního média v kg
	$h$	entalpie v $\text{J.kg}^{-1}$

Skupenské (latentní) teplo, které je akumulováno během procesu tání materiálu, lze tedy vypočítat ze změny entalpie mezi pevným a kapalným skupenstvím.

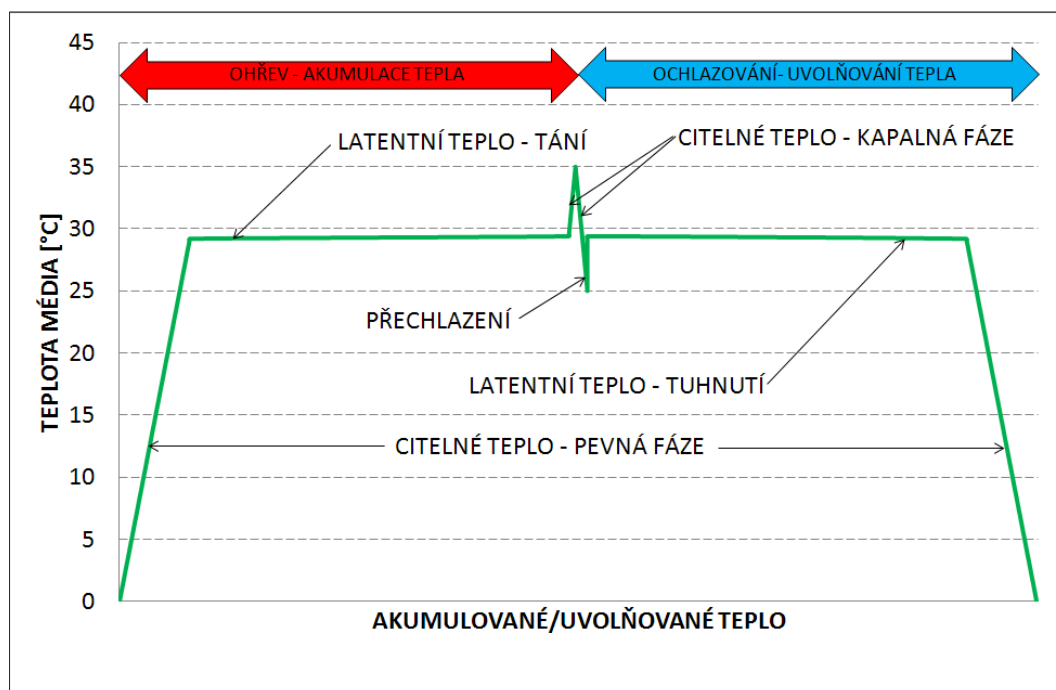
Obecný popis akumulace tepla při změně teploty akumulčního média z počáteční  $T_i$  na konečnou  $T_f$  lze popsat následujícím vztahem (REGIN *et al.*, 2008):

$$Q = m \left[ \int_{T_i}^{T_m} c_{ps}(T) dT + l_{ps} + l_{pl} + \int_{T_m}^{T_e} c_{pl}(T) dT + l_{pg} + \int_{T_e}^{T_f} c_{pg}(T) dT \right] \quad (2.3)$$

kde

$Q$	je akumulované teplo v J
$m$	hmotnost akumulčního média v kg
$c_{ps}$	průměrná měrná tepelná kapacita mezi $T_i$ a $T_m$ (pevná látka) v $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{pl}$	průměrná měrná tepelná kapacita mezi $T_m$ a $T_e$ (kapalina) v $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$c_{pg}$	průměrná měrná tepelná kapacita mezi $T_e$ a $T_f$ (plyn) v $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$l_{ps}$	skupenské teplo fázové změny pevná látka – pevná látka v $J.kg^{-1}$
$l_{pl}$	skupenské teplo fázové změny pevná látka – kapalina v $J.kg^{-1}$
$l_{pg}$	skupenské teplo fázové změny kapalina – plyn v $J.kg^{-1}$
$T_i$	počáteční teplota akumulčního média v K
$T_m$	teplota fázové změny pevná látka – kapalina v K
$T_e$	teplota fázové změny kapalina – plyn v K
$T_f$	konečná teplota akumulčního média v K

Fázová změna pevná látka – plyn, nebo kapalná látka – plyn se vyznačuje značným skupenským teplem, nicméně takový tepelně akumulční systém by vyžadoval poměrně složité zapouzdření akumulčního média z důvodu velkých objemových změn. Z důvodu eliminace nutnosti zapouzdření je současný výzkum zaměřen také na hledání možných akumulátorů při fázové změně pevná látka – pevná látka, při které dochází ke změně krystalické struktury média.



Obr.2.2 Porovnání akumulace citelného a latentního tepla (archiv autora)

Vztah 2.3 zahrnuje změny skupenství pevná látka – pevná látka, pevná látka – kapalina a kapalina – plyn přicházející v úvahu při akumulaci tepla obecným tepelně akumulčním médiem.

V drtivé většině případů je při praktických aplikacích, zejména ve stavebních konstrukcích, uvažováno s akumulací při změně skupenství z pevného do kapalného stavu. Důvodem není

množství latentního tepla při tomto typu fázové změny, ale relativně malá objemová změna, kterou lze technicky řešit. Z výše uvedeného je zřejmé, že akumulární médium, u něhož je uvažováno se změnou skupenství pevná látka – kapalina, musí být zapouzdřeno v obalu, který zabrání úniku média ze systému po přechodu do kapalného stavu.

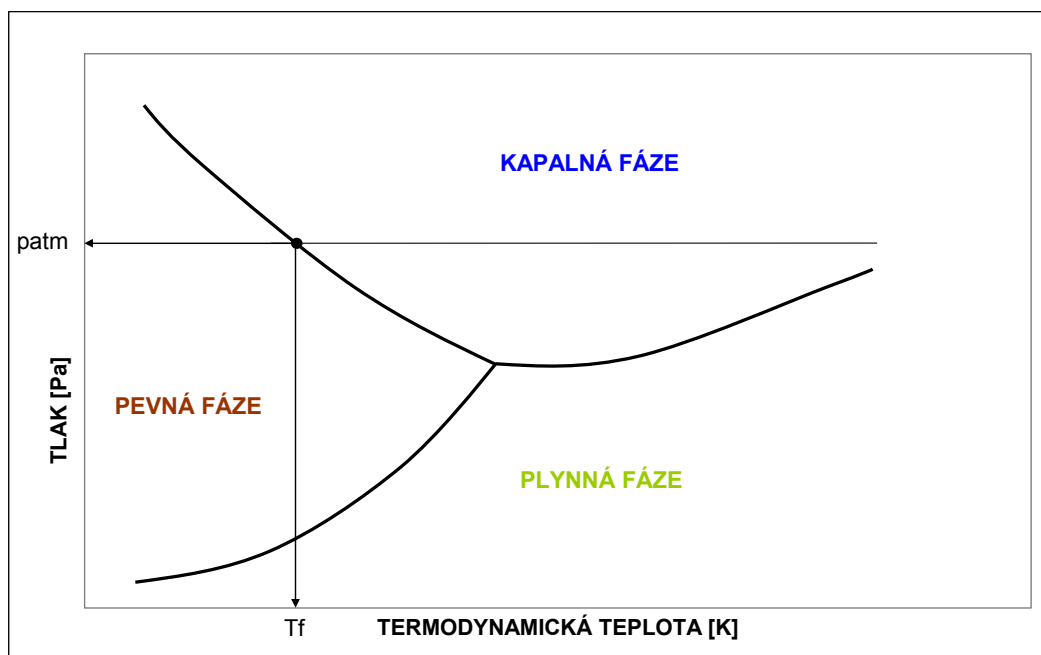
Závislost akumulované energie na teplotě média je znázorněna na Obr.2.2. V tomto případě se však jedná o idealizovaný stav, ve kterém dochází ke změně skupenství při konstantní teplotě. To je však typické pouze pro chemicky čisté látky, které ale není, zejména kvůli riziku přechlazení, možné používat. Při posuzování vhodnosti akumulární látky proto hovoříme nikoliv o teplotě fázové přeměny, ale o teplotním rozsahu, při kterém dochází ke změně skupenství.

Materiály, které mají využití pro akumulaci tepla při změně skupenství mezi krystalickým a kapalným stavem, se nazývají „Phase Change Materials“ (PCMs), což lze přeložit jako materiály s fázovou změnou nebo materiály se změnou skupenství. Označení pro tyto materiály zkratkou PCM, přesněji však PCMs, je však v odborné literatuře natolik zaběhlé, že je vhodné jej používat i v české terminologii a nepřekládat jej.

### 2.1.3 Změna skupenství u čistých PCMs

Fázi čisté látky představuje plocha v prostoru termodynamických parametrů (objem  $V$ , termodynamická teplota  $T$  a tlak  $p$ ), ve kterém je volná energie analytickou funkcí.

Pokud uvažujeme objem materiálu jako fixní, pak plochy, které zaujímají jednotlivé fáze, mohou být reprezentovány v tzv. fázovém diagramu, kde osa  $x$  je termodynamická teplota a osa  $y$  představuje tlak. Příklad fázového diagramu je uveden na Obr.2.3.



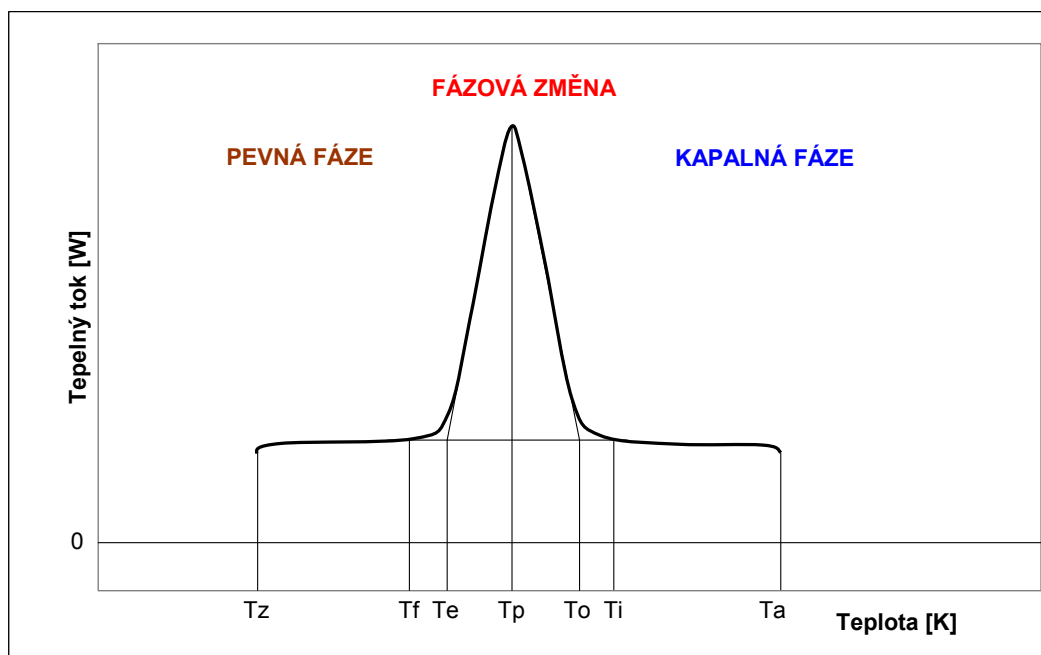
Obr.2.3 Příklad fázového diagramu (archiv autora)

Tři mezní křivky rozdělují rovinu souřadnic  $p$ - $T$  na tři oblasti: pevná fáze, kapalná fáze a plynná fáze. Stav v jednotlivých oblastech přísluší jen jedné fázi, stavy na mezních křivkách koexistenci dvou fází. Na prodloužení mezní křivky vypařování se nachází kritický bod. Teplotu, která přísluší tomuto bodu, označujeme jako kritickou. Nad kritickou teplotou nelze plyn zkapalnit ani při sebevětším stlačení. Změna fáze při konstantním atmosférickém tlaku je znázorněna na Obr.2.3 a čára rovnoběžná s osou  $x$  představuje hranici mezi pevným a kapalným skupenstvím. Teplota v tomto bodě se nazývá teplota fázové změny ( $T_f$ ).

Jinou možností zobrazení dějů při změnách skupenství je vývoj uvolňovaného tepla jako funkce teploty okolí  $T_{ext}$  s definovanou rampou např.  $1,0 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pak je křivka závislá na rychlosti změny teploty okolí. Tento způsob zobrazení je uveden na Obr.2.4. Obsah latentního tepla lze získat z plochy pod křivkou a rychlosti změny teploty okolí, která je konstantní.

Na Obr.2.4 jsou znázorněny následující charakteristické teploty:

- $T_i$  a  $T_f$  jsou počáteční a koncové teploty, resp. začátek a konec odchylky od křivky citelného tepla v K;
- $T_p$  teplota peaku tepelného toku v K;
- $T_o$  a  $T_e$  onsetové teploty na průsečíku tečen se základnou křivky v K.



Obr.2.4 Vývoj tepelného toku v závislosti na teplotě okolí (archiv autora)

PCMs začínají tuhnout při vytvoření iniciačních krystalů. Poté dochází k šíření krystalů materiálem, což způsobí jeho ztuhnutí. Nukleační rychlost materiálu představuje jeho kapacitu produkovat iniciační krystaly při poklesu teploty pod teplotu fázové změny. Pokud je nukleační rychlost příliš malá, může materiál zůstat v tekuté fázi, i když teplota klesne pod teplotu fázové změny. Tuhnutí začne později a teplota vyskočí náhle k teplotě fázové změny.

Obsah latentního tepla lze spočítat následujícím vztahem (KUZNIK *et al.*, 2011):

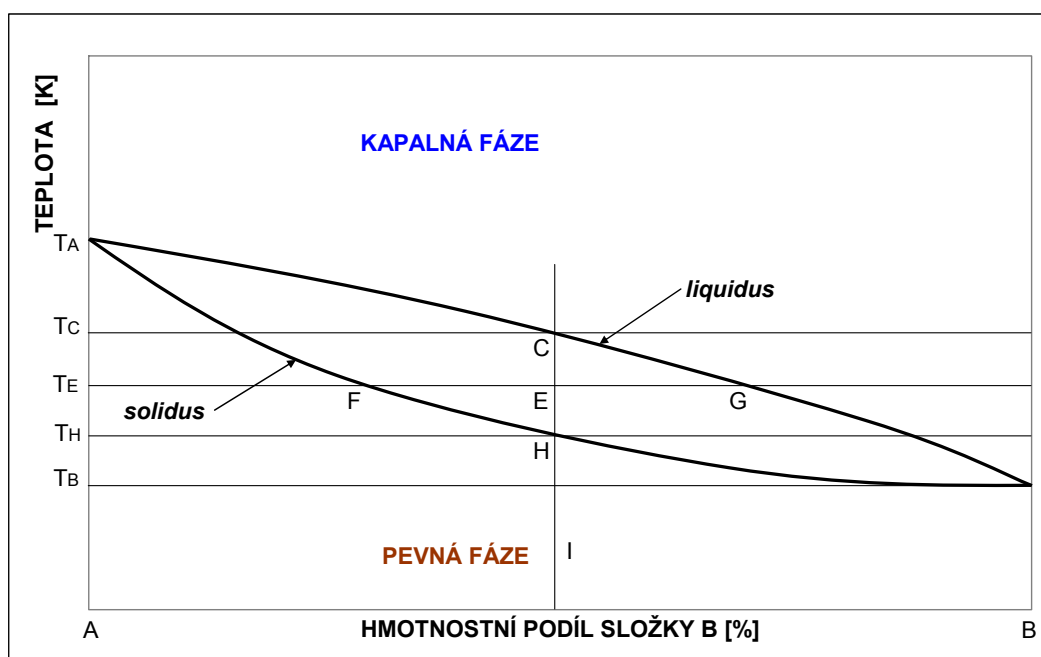
$$l_{ps} = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt = \int_{T_e}^{T_o} Q(T_{ext}) \frac{\partial t}{\partial T_{ext}} = \frac{1}{v_{Text}} A_f \quad (2.4)$$

- kde
- $l_{ps}$  je latentní teplo fázové změny ve Ws
  - $t_1$  čas na začátku v s
  - $t_2$  čas na konci v s
  - $Q$  tepelný tok ve W
  - $T_o, T_e$  onsetová teplota v K
  - $T_{ext}$  teplota okolí v K
  - $v_{Text}$  rychlost změny venkovní teploty v  $\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$
  - $A_f$  plocha pod křivkou ve WK

### 2.1.4 Změna skupenství u směsí PCMs

Pro dvojsložkové soustavy je třeba trojrozměrný fázový diagram, do kterého je možné vynést teplotu, tlak a procentuální zastoupení obou složek soustavy. U tříložkových soustav jde o čtyři veličiny, tj. tlak, teplotu a dva molární zlomky. Na Obr.2.5 je znázorněn příklad fázového diagramu pro dvojsložkovou soustavu. Osa  $x$  představuje podíl složky  $B$  ve směsi  $A+B$  a na ose  $y$  je znázorněna teplota směsi. Objem a tlak jsou uvažovány jako konstantní. Diagram se skládá ze dvou jednofázových polí oddělených dvoufázovým polem.

Jako *liquidus* je označena čára, rozdělující oblast kapalně fáze a oblast, v níž dochází ke krystalizaci pevné fáze stále ve fázi kapalně. Jako *solidus* je označena křivka, oddělující dvoufázové pole od pevné fáze (LANE, 1983). Kontinuálním přidáváním složky  $A$  se zvyšuje bod tuhnutí složky  $B$ , dokud není dosaženo bodu tuhnutí složky  $T_A$ . Čára  $I$  představuje příklad složení dvojsložkové směsi. Pokud je směs v pevném skupenství a roste její teplota, dojde k zahájení tání při teplotě  $T_H$ , tj. v bodě  $H$  a směs je zcela v kapalném stavu při teplotě  $T_C$ , tj. v bodě  $C$ . Pokud je směs tekutá a teplota klesá, nastává tuhnutí při teplotě  $T_C$  a směs je zcela v pevném stavu při teplotě  $T_H$ .



Obr.2.5 Příklad binárního fázového diagram (archiv autora)

### 2.1.5 Vybrané problémy akumulace při fázových změnách

#### *Přechlazení (supercooling, subcooling)*

Jedná se o efekt, kdy teplota akumulárního média klesá pod teplotu tání a nedochází ke krystalizaci (HUANG *et al.*, 2010). V tomto stavu PCMs nemohou tuhnout a tak mohou akumulovat pouze citelné teplo. Schéma nabíjení a vybíjení tepla s uvažováním přechlazení je znázorněno na Obr.2.2. Nemožnost vybití naakumulovanou energii v relativně krátkém čase na regeneraci akumulárního média (zpravidla během nočních hodin) při daných parametrech okolního prostředí může způsobovat v praxi nefunkčnost systému i po několik po sobě jdoucích dnů. Některé materiály vykazují při testování tendenci k přechlazení od několika stupňů až po např. 20 °C (hexahydrát chloridu vápenatého). U velkoobjemových zásobníků je toto riziko menší z důvodu, že cyklického ohřívání a ochlazení se zpravidla nezúčastňuje akumulární médium v celém objemu, ale vždy zůstává v daném objemu krystalický zárodek, který zajistí nastartování tuhnutí média při teplotách obdobných teplotám tání.

### ***Změna vlastností a snížení tepelně akumulací kapacity při cyklickém používání***

Počet cyklů fázové změny se liší od jednoho, kdy jsou PCMs používány pro tepelnou ochranu v případě požáru, po několik tisíc cyklů v případě, kdy se využívají pro vytápění nebo chlazení budov (MEHLING *et al.*, 2008). Nedostatečná dlouhodobá stabilita akumulací média a kontejnerů je problém, který limituje rozšíření technik akumulace latentního tepla. Tato špatná stabilita je z důvodu špatných materiálových vlastností a/nebo koroze mezi PCMs a kontejnerem (ZALBA *et al.*, 2003). Jedním z hlavních problémů při cyklickém používání je separace jednotlivých fází.

### ***Kompatibilita s materiály tvořícími obal akumulací média***

Kompatibilita mezi akumulací médiem a materiálem pro zapouzdření má zásadní vliv na životnost tepelně akumulací systému a na ostatní materiály v případě úniku PCMs. Je možné definovat tři aspekty ovlivňující dlouhodobou stabilitu tepelně akumulací systému (ZHANG *et al.*, 2007):

- těsnost obálky – riziko migrace PCMs nebo jejich komponentů obálkou;
- stabilita obálky v kontaktu s PCMs – riziko změny vlastností obálky z plastů nebo koroze kovů s anorganickými PCMs;
- kompatibilita PCMs s okolními materiály v případě úniku PCMs z obálky.

Zásobník musí zajistit adekvátní bariéru proti ztrátě komponentů z PCMs a zároveň musí zabránit kontaminaci PCMs difúzí různých látek z vnějšího prostředí do kontejneru. Organické látky rozpustné ve vodě, např. polymerní etylén glykoly, jsou ohroženy přijetím vlhkosti. Některé organické látky potřebují kontejner, který brání migraci kyslíku. Plasty na rozdíl od kovů nepodléhají korozi, ale jsou objektem jiných degradačních procesů. Degradace může být způsobena i PCMs, které se rozpouští v matrici plastu a působí jako změkčovadlo. Důsledkem je měknutí a zduření plastu, čímž může dojít ke ztrátě pevnosti obalu a jeho porušení. Např. CASTELLÓN *et al.*, (2011) testovali HDPE, LDPE a PP v kombinaci s organickými a anorganickými PCMs.

Při kontaktu PCMs s obalovým materiálem může docházet ke korozi kovového obalu nebo k negativním změnám plastového obalu. Pro testování kompatibility existuje řada standardizovaných metod. Toto ověření je nezbytné zejména v případě, kdy není možné získat relevantní informace o dané kombinaci PCMs a materiálu obalu. V literatuře (CABEZA *et al.*, 2002) je uveden příklad metodologie testu kompatibility mezi hydráty solí a kovy.

## **2.2 PCMs PRO AKUMULACI LATENTNÍHO TEPLA**

V minulých desetiletích byly prozkoumány tisíce primárních látek a směsí za účelem nalézt nejvhodnější média pro akumulaci tepla při skupenských přeměnách v daných teplotních rozsazích. PCMs vhodné pro použití za účelem akumulace latentního tepla lze obecně rozdělit do třech skupin (KUZNIK, *et al.*, 2011):

- materiály organického původu;
- materiály anorganického původu;
- eutektika.

### **2.2.1 Materiály organického původu**

Komerční parafíny jsou levné při střední tepelně akumulací kapacitě okolo 200 kJ.kg<sup>-1</sup> resp. 150 MJ.m<sup>-3</sup> v širokém spektru rozsahů teplot tání (FARID *et al.*, 2004). Do současné doby byla publikována řada prací týkajících se určení vlastností PCMs pro použití ve stavebnictví.

Chování řady PCMs bylo podrobeno dlouhodobým testům, při kterých se ukázalo, že řada materiálů ztrácí při cyklickém testování svoje vlastnosti. SHUKLA *et al.* (2008) porovnávali vlastnosti vybraných organických a anorganických PCMs před a po cyklickém použití. Z této studie vyšly lépe organické PCMs, které měly lepší výsledky z hlediska změn ve velikosti latentního tepla a teplotního rozsahu fázové změny při cyklickém zatížení.

Mezi výhody organických PCMs patří (GARG, *et al.*, 1985, SHARMA *et al.*, 2009):

- jsou k dispozici v širokém spektru rozsahů teplot tání a tuhnutí;
- mají samonukleační vlastnosti, tj. krystalizují s malým nebo žádným přechlazením;
- jsou kompatibilní s mnoha způsoby zapouzdření, především s kovy a plasty;
- jsou chemicky stabilní;
- mají dostatečně vysoké skupenské teplo;
- jsou stabilní při velkém počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů;
- snášejí dobře rychlou změnu skupenství;
- nejsou toxické a jsou recyklovatelné.

Parafíny jsou obecně vhodnými PCMs pro akumulaci tepla i přes nižší hustotu akumulované energie. Parafíny jsou vhodné pro akumulaci latentního tepla, protože jsou k dispozici v širokém rozsahu teplot tání. Parafíny vykazují nejlepší kinetické vlastnosti pro fázovou přeměnu. Parafíny však nemusí být kompatibilní s plasty. Hořlavost parafínů je možné řešit přidáním retardérů (SITTISART *et FARID*, 2011).

Mastné kyseliny jsou stabilní při cyklickém testování, protože jsou to jednosložkové látky, takže u nich nemůže nastat separace jednotlivých fází. Mastné kyseliny mají malou tepelnou vodivost a vykazují malé přechlazení. Různé mastné kyseliny mohou být smíchány pro použití jako PCMs s odlišnými teplotami tání v porovnání s čistými kyselinami.

Cukr alkoholy jsou relativně novou skupinou materiálů a proto je k dispozici v současné době málo informací (MEHLING *et CABEZA*, 2008). Cukr alkoholy mají obecnou chemickou strukturu  $\text{HOCH}_2[\text{CH}(\text{OH})]_n\text{CH}_2\text{OH}$ . Rozdílné formy se získají v závislosti na orientaci OH skupin. Teploty tání jsou v rozsahu 90 °C až 200 °C. Protože jejich objemová hmotnost je vysoká, je jejich objemová hustota akumulované energie také velká. V porovnání s jinými organickými materiály u cukr alkoholů dochází k malému přechlazení.

### 2.2.2 Materiály anorganického původu

Anorganické PCMs jsou k dispozici v širokém rozsahu teplot tání. V porovnání s organickými materiály mají obvykle podobnou měrnou entalpii vztaženou na jednotku hmotnosti, ale vyšší objemovou entalpii z důvodu vyšší objemové hmotnosti.

Výhody PCMs anorganického původu jsou následující (MEHLING *et CABEZA*, 2008):

- vysoká akumulační schopnost vztažená k objemu média;
- zpravidla nižší cena v porovnání s materiály organického původu;
- u chemicky čistých materiálů lze pozorovat ostrou fázovou změnu;
- vyšší tepelná vodivost při srovnání s organickými materiály;
- objemové změny při změně skupenství do 10%;
- nehořlavost.

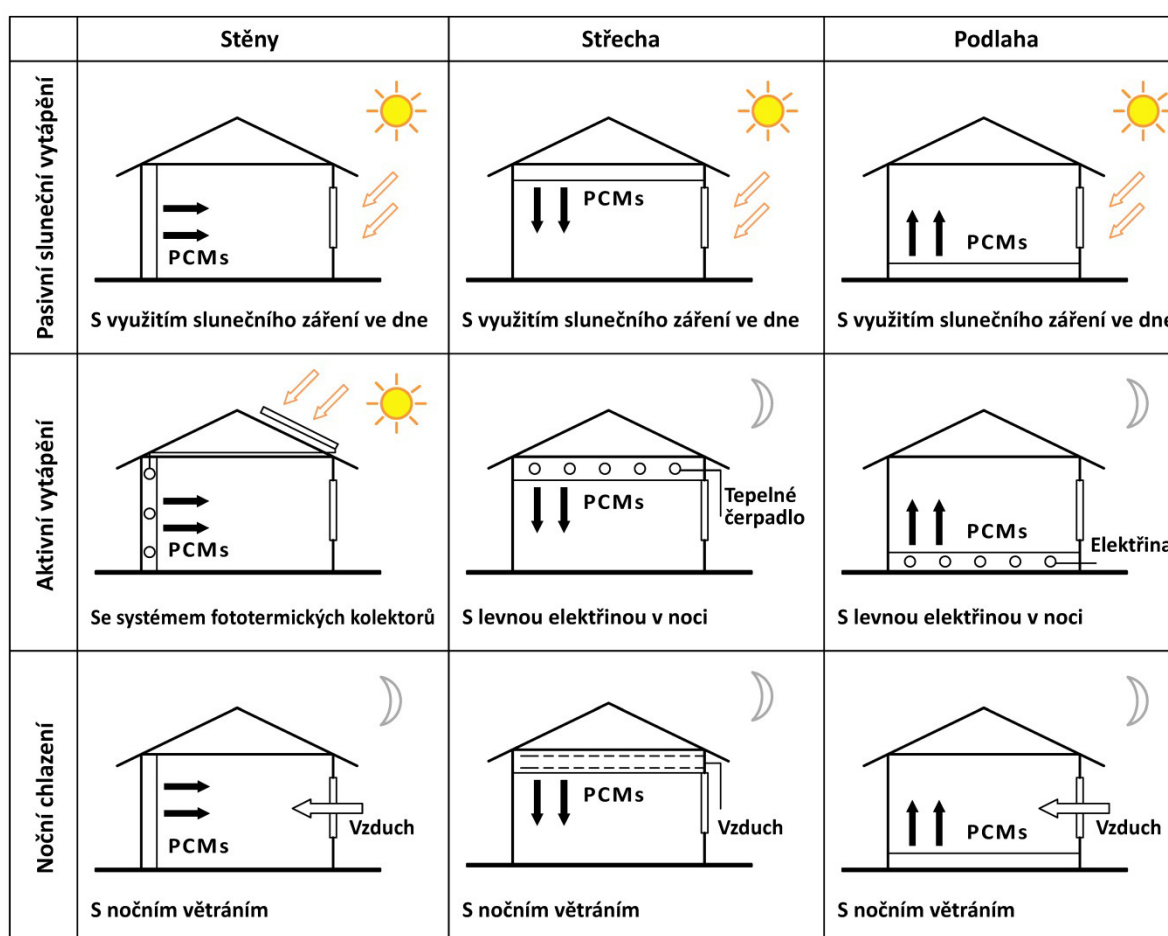
Hydráty solí mají bod tání při teplotách 5 °C až 130 °C. Z důvodu stabilní krystalické struktury hydrátů solí je jejich teplota tání vyšší než u vody (MEHLING *et CABEZA*, 2008). Protože se hydráty solí skládají z několika složek, minimálně jedné soli a vody, mohou se rozdělit na rozdílné fáze, čímž mohou nastat problémy se stabilitou při cyklování. Separace fází proto patří u hydrátů solí k běžným problémům. Mnoho hydrátů solí se při ochlazení přechlazuje.

## 2.3 INTEGRACE PCMs VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH

Pro využití akumulace latentního tepla v PCMs ve stavebních konstrukcích je stěžejní nalezení vhodného způsobu zapouzdření. Každý způsob zapouzdření má své výhody a nevýhody, ať už se jedná o tepelnou vodivost materiálu obalu, poměr povrchu vůči objemu či interakci mezi PCMs a materiálem obalu (REGIN *et al.*, 2008).

PCMs integrované ve stavebních konstrukcích nacházejí dobré uplatnění všude tam, kde není možné aplikovat potřebné množství akumulační látky pro akumulaci citelného tepla. Výhodou v případě integrace PCMs ve stavebních konstrukcích je, že akumulace tepla nastává při změnách skupenství bez výrazného růstu teploty akumulačního média.

Na Obr.2.6 je uvedeno schematické znázornění principů využití akumulace latentního tepla v obalových konstrukcích. Stěny, stropy a podlaha nabízí velkou plochu pro výměnu tepla mezi vnitřním prostředím akumulačním médiem umístěným ve stavební konstrukci. Aplikace PCMs zvýší tepelně akumulační kapacitu pro pasivní solární vytápění a umožní zapojení chlazení nočním větráním a časový posun pro použití strojního chlazení (ZHANG *et al.*, 2007).



Obr.2.6 Využití akumulace tepla PCMs integrovaných v obalových konstrukcích (archiv autora)

Mezi nejznámější způsoby integrace PCMs ve stavebních konstrukcích lze uvést následující principy:

- impregnace stavebních materiálů;
- mikro kapsle rozptýlené ve stavebním materiálu nebo prvku;
- makro zapouzdření;
- tvarově stabilizované PCMs.

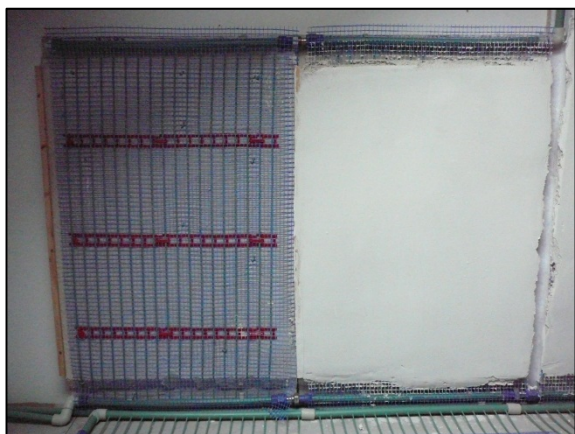


### 2.3.1 Impregnace stavebních materiálů

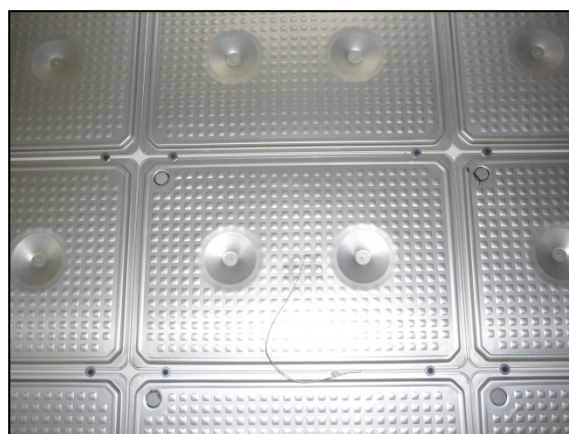
Nejjednodušším způsobem, jak integrovat PCMs ve stavebních materiálech, je jejich impregnace. Nejvhodnější jsou pro tento účel pórovité nebo nasákavé stavební materiály, jako sádrokarton, sádrová omítka, beton, cementová omítka, dřevo, lehčený beton nebo výrobky na bázi dřeva (KUZNIK, *et al.*, 2011). Další možností je napuštění pěnového materiálu. Struktura porézního materiálu pak přenáší teplo do pórů. Důvodem pro vývoj takového způsobu integrace PCMs ve stavebních konstrukcích je snaha o odstranění některých nevýhod makro zapouzdření v kontejnerech. Impregnace PCMs přímo do tradičních stavebních materiálů umožňuje snížit výslednou cenu tepelně akumuláčního systému. Nevýhodou této technologie je, že PCMs mohou ovlivnit pevnostní charakteristiky daného materiálu a PCMs během procesu tání mohou vytékat ze stavebního materiálu (CABEZA *et al.*, 2007). Ve studii (NOMURA *et al.*, 2009) je představen způsob, jak jednoduše vyrobit tepelně akumuláční médium s vysokou hustotou akumulované energie. V daném případě byl použit materiál organického původu  $C_4H_8O_4$  s teplotou tání  $118\text{ }^\circ\text{C}$  a latentním teplem  $354\text{ kJ.kg}^{-1}$  pro akumulaci průmyslového odpadního tepla. Jako porézní materiál byl zvolen expandovaný perlit.

### 2.3.2 Mikro kapsle s PCMs rozptýlené ve stavebním materiálu nebo prvku

Z důvodu možného rizika uvolňování (vytékání, vypařování) PCMs z impregnovaných kompozitních materiálů byla v minulosti vyvinuta řada technologií pro tzv. mikro zapouzdření. Princip toho způsobu zapouzdření spočívá v umístění malého objemu PCMs v polymerní kapsli. Kapsle o průměru v řádu mikrometrů až milimetrů jsou tvořeny jednotlivými částicemi pevného nebo tekutého materiálu, tzv. jádra, které je obaleno polymerním filmem, tzv. pouzdrem (TYAGI *et al.*, 2011).



Obr.2.7 Aplikace omítky s PCMs (archiv autora)



Obr.2.8 Panel DELTA®-COOL 24 (autor)

Existuje několik technik výroby mikro kapslí a výběr závisí na vlastní akumuláční látce a materiálu obalu. V první fázi je vytvořena disperze z akumuláčního materiálu. V druhé fázi je disperze transformována a techniky stabilizace a krystalizace jsou aplikovány pro zajištění tvaru mikro kapsle (DELGADO *et al.*, 2012). Prášek tvořený mikro kapslemi s PCMs může být aplikován v kompozitu se stavebními materiály, kterými mohou být beton, sádrové omítky, vylehčené tvarovky nebo materiály na bázi dřevní hmoty. Příklad aplikace je uveden na Obr. 2.7. Výsledný materiál má poté výrazně lepší tepelně akumuláční vlastnosti v porovnání s původním materiálem tvořícím matici. S kompozitním materiálem s rozptýlenými mikro kapslemi s PCMs lze nakládat jako s běžným stavebním materiálem, tzn. je možné jej řezat, upevňovat pomocí šroubů či hřebíků, protože objem média, které unikne z kapsle při poškození, je velmi malý.

Typickým představitelem mononukleárních mikro kapslí je výrobek Micronal® PCM vyráběný firmou BASF SE.

### 2.3.3 Makro zapouzdření

Pro akumulaci tepla ve vzduchotechnických systémech nebo v systémech využívajících jako zdroj tepla sluneční záření, byly v minulosti vyvinuty prvky různých tvarů, které jsou vyplněny vhodnými PCMs. Výhodou technologie zapouzdřování PCMs do objemných prvků je především jejich nižší cena v porovnání s produkcí mikro kapslí. Další výhodou může představovat fakt, že obal zásobníku lze provést z tepelně dobře vodivého materiálu, např. hliníku. Mezi nejznámější prvky, které byly v minulosti vyvinuty a testovány, patří (KHUDHAIR *et* FARID, 2004):

- deskové prvky s kovovým nebo polymerním obalem;
- polymerní dutinkové desky plněné PCMs;
- polštářky plněné PCMs;
- trubice plněné PCMs;
- koule.

Typickými zástupci tohoto způsobu zapouzdření jsou hliníkové kontejnery s náplní DELTA®-COOL 24 nebo DELTA®-COOL 28 na bázi hydrátů solí od firmy Dörken GmbH & Co. KG. Obdobný prvek označený jako CSM module nabízí firma Rubitherm Technologies GmbH. U těchto výrobků jsou k dispozici PCMs náplně s možností výběru rozsahu teplot tání od -4 °C do 100 °C. Panely lze poměrně snadno instalovat na povrch stavebních konstrukcí nebo z nich vytvářet tepelně akumulací moduly u vodních nebo vzduchových systémů. Hliníkové panely náplní DELTA®-COOL 24 byly použity i v experimentech realizovaných v laboratoři stavební tepelné techniky na Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT v Brně. Na Obr.2.8 je uveden detail obkladu z hliníkových panelů s náplní DELTA®-COOL 24.



Obr.2.9 PCMs v nopové folii (archiv autora)



Obr.2.10 Hliníkové polštářky s PCMs (autor)

Jinou možností zapouzdření PCMs je jejich aplikace v dutinkových deskách z polykarbonátu nebo polypropylenu. Výhodou tohoto způsobu zapouzdření je jeho nižší cena v porovnání s hliníkovými deskami.

Další výhodou je rozvrstvení PCMs po výšce desky, protože vrstva PCMs je po výšce rozdělena žebry, které snižují riziko sedání a segregace jednotlivých složek hydrátů solí. PCMs zapouzdřené do polštářků z tepelně vodivého materiálu jsou doporučovány pro aplikaci ve stropních podhledech. Nevýhodou této aplikace však může být snížený přenos tepla mezi vnitřním prostředím a akumulací médiem z důvodu podporující sádkartonové desky. To může být částečně vyřešeno umístěním polštářků s PCMs na perforovaný podhled.

### 2.3.4 Tvarově stabilizované PCMs

Tvarově stabilizované PCMs jsou připravovány z tekutých směsí PCMs a matričního materiálu (KUZNIK, *et al.*, 2011). Směs je pak ochlazena pod tzv. teplotu skelného přechodu matričního materiálu, dokud neztuhne. Vhodný výběr matričního materiálu umožňuje až 80% hmotnostní podíl PCMs ve finálním produktu. Nejznámějším matričním materiálem je vysoko hustotní polyetylén (HDPE) a styren-butadien-styren (SBS). Bohužel tepelná vodivost kompozitu je obvykle malá, což limituje možnosti jejich aplikace. Jako materiál vhodný pro zvýšení tepelné vodivosti kompozitu byl úspěšně zkoušen grafit (ZHANG *et al.*, 2006). Jedním z nejznámějších komerčně vyráběných produktů je DuPont<sup>TM</sup>Energain®. Jedná se o panely zalaminované hliníkovou fólií, které obsahují směs kopolymeru a parafinů. Panely obsahují 60 % své hmotnosti parafinu a tepelná kapacita je 315 kJ.m<sup>-2</sup>. Výrobce uvádí, že panely mohou být řezány, připevňovány hřebíky nebo šrouby. Z provedených experimentů v testovacích místnostech vyplynul pozitivní vliv aplikace tvarově stabilizovaných PCMs na snížení teplotních výkyvů v místnosti s PCMs (MEHLING *et CABEZA*, 2008).

## 3 KOMPLEXNÍ POJETÍ VÝZKUMU A VÝVOJE APLIKACÍ PCMs NA VUT V BRNĚ

Výzkum a vývoj funkčních aplikací se nemůže obejít bez patřičného vybavení, potřebného nejen pro stanovení vlastností PCMs, ale také pro praktické aplikace a ověření navržených řešení a matematické modelování chování PCMs. V rámci řešení několika projektů se podařilo sestavit pracovní tým pedagogicko-vědeckých pracovníků ze třech fakult Vysokého učení technického v Brně za účelem možnosti komplexního výzkumu a vývoje PCMs pro aplikace v budovách, příp. jejich technických systémech. V současné době je tedy výzkumná a vývojová činnost rozdělena do třech hlavních oblastí, které vychází z odborných znalostí pracovníků a vybavení na třech fakultách VUT v Brně.

### 1. Určení chemických a fyzikálních vlastností PCMs

Detailní znalost vlastností PCMs je nezbytnou podmínkou pro návrh praktických aplikací ve stavebních konstrukcích, matematické modelování jejich chování a predikci environmentálního dopadu. Tato činnost je soustředěna na Ústavu chemie materiálů na Fakultě chemické VUT v Brně, kde probíhá intenzivní spolupráce s Mgr. Radkem Příkrylem, Ph.D. Pracoviště disponuje potřebným vybavením pro termické analýzy, tj. diferenčním skenovacím kalorimetrem, např. Perkin Elmer PYRIS1. Dále se na uvedeném pracovišti kontinuálně provádějí termogravimetrické analýzy vybraných PCMs pro stanovení vhodnosti jejich použití v určeném teplotním rozsahu.

### 2. Integrace PCMs ve stavebních konstrukcích

Tato oblast zahrnuje návrhy integrací PCMs ve stavebních konstrukcích, laboratorní měření jejich vlastností v makro měřítku a ověření jejich funkčnosti přímo ve stavebních konstrukcích. Projekty s touto problematikou jsou řešeny na Ústavu pozemního stavitelství Fakulty stavební VUT v Brně. Pro řešení takto zaměřených projektů byly v minulosti zrealizovány testovací podkrovní místnosti včetně technického zázemí v budově D1 a nakoupena měřicí technika.

### 3. Využití PCMs v energetických systémech budov a matematické modelování

Tato činnost je rozvíjena na Fakultě strojní VUT v Brně. Při řešení projektů intenzivně spolupracuji s Ing. Pavlem Charvátém, Ph.D. z Energetického ústavu, Odboru termomechaniky a techniky prostředí. V minulosti byly úspěšně odzkoušeny aplikace v solárním komínu v experimentálním domě. V současné době se práce soustřeďují na aplikaci PCMs ve vzduchových solárních kolektorech a v integrovaném zásobníku tepla. Matematické modelování je využíváno při vývoji tepelně akumulčních zásobníků a predikci vlivu PCMs na vnitřní prostředí.

## 4 TEORETICKÁ A EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

### 4.1 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ FÁZOVÝCH PŘECHODŮ

Během fázových přechodů (tání nebo tuhnutí) PCMs integrované ve stavebních konstrukcích existují ve třech fázích:

- pevná fáze;
- „mushy“ (koexistence obou fází) fáze;
- kapalná fáze.

Procesy přenosu tepla v konstrukci s PCMs jsou komplikované, zvláště když PCMs jsou v přechodovém stavu. Navíc tepelně technické vlastnosti matrice (stavebního materiálu), ve které mohou být PCMs integrovány, jsou odlišné od vlastností PCMs. Diferenciální rovnice vedení tepla v materiálech s proměnlivými tepelně technickými vlastnostmi lze vyjádřit (HEIM *et* CLARKE, 2004):

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(T)h(T) = \nabla \left[ \lambda(T) \nabla T(\vec{x}, t) \right] + g(\vec{x}, t) \quad (4.1)$$

kde	$h$ je	měrná entalpie v $\text{J.kg}^{-1}$
	$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti ve $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
	$\rho$	objemová hmotnost v $\text{kg.m}^{-3}$
	$T$	teplota v K
	$t$	čas v s
	$g$	vnitřní zdroj ve W
	$x$	prostorová souřadnice v m

V současné době se při modelování fázových přechodů používá metoda entalpie a metoda efektivní měrné tepelné kapacity.

#### 4.1.1 Metoda entalpie

U této metody je do funkce objemové entalpie zahrnuto latentní teplo. Entalpie vyjadřuje teplo, které obsahuje jednotkové množství látky. Lze ji obecně vyjádřit například následujícím vztahem (CARBONARI *et al.*, 2006):

$$H = \int_{T_i}^T \rho c dT + L \quad (4.2)$$

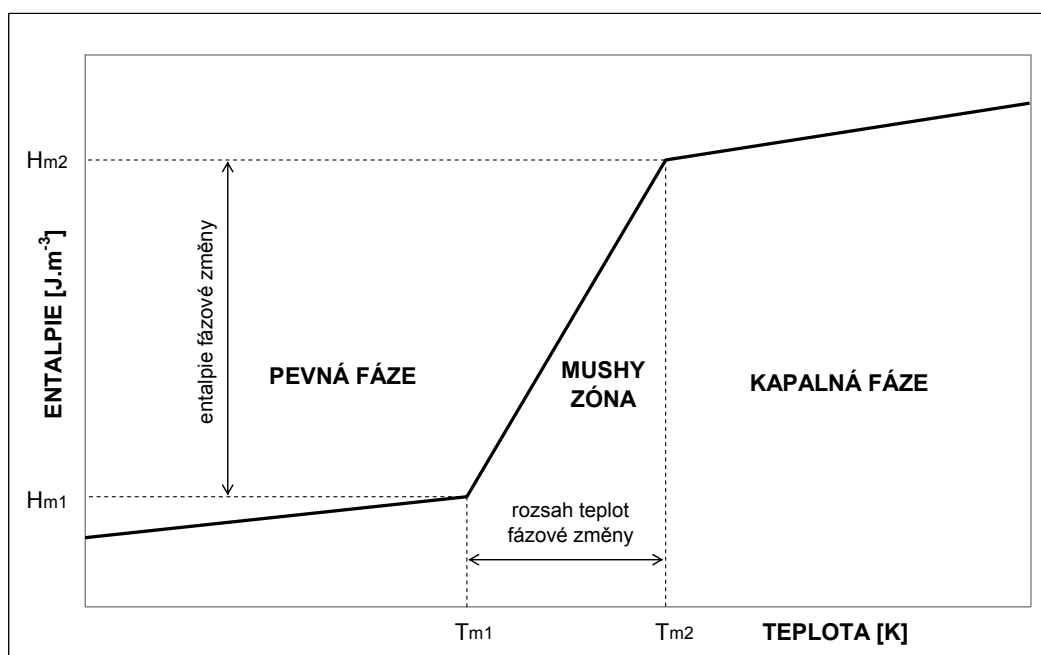
kde	$H$ je	objemová entalpie v $\text{J.m}^{-3}$
	$\rho$	objemová hmotnost v $\text{kg.m}^{-3}$
	$c$	měrná tepelná kapacita v $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
	$T$	teplota v K
	$L$	latentní teplo v $\text{J.m}^{-3}$

Teplotu lze z entalpie vyjádřit ve zjednodušené formě následujícím způsobem:

$$T(h) = \begin{cases} h / c_{ps} + T_i & \dots \dots \dots h < c_{ps} T_{m1} \\ T_{m1} + \Delta T_m (h - c_{ps} (T_{m1} - T_i)) / l_{pl} & \dots \dots \dots c_{ps} T_{m1} < h < c_{ps} T_{m1} + l_m \\ T_{m2} + (h - c_{ps} (T_{m1} - T_i) - l_{pl}) / c_{pl} & \dots \dots \dots h > c_{ps} T_{m1} + l_m \end{cases} \quad (4.3)$$

kde	$h$ je	entalpie v $\text{J.kg}^{-1}$
	$c_{ps}$	měrná tepelná kapacita v pevném stavu v $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
	$c_{pl}$	měrná tepelná kapacita kapaliny v $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
	$l_{pl}$	latentní teplo fázové změny pevná látka-kapalina v $\text{J.kg}^{-1}$
	$T_{m1}$	teplota počátku fázové změny pevná látka-kapalina v K
	$T$	teplota akumulčního média v K
	$\Delta T_m$	teplotní rozsah fázové změny v K
	$T_i$	počáteční teplota akumulčního média v K

Tepelný tok je závislý na teplotě v rozsahu fázové změny. Tepelný tok má záporné znaménko v případě, kdy materiál akumuluje teplo, a kladné, pokud akumulční materiál teplo uvolňuje.



Obr.4.1 Grafické znázornění metody entalpie (archiv autora)

#### 4.1.2 Metoda efektivní tepelné kapacity

U této metody je do tepelné kapacity zahrnuto latentní teplo (HEIM, 2010). Měrná tepelná kapacita udává kolik tepla je zapotřebí pro zvýšení teploty média. Tzn., že efektivní měrná tepelná kapacita musí v sobě zahrnout latentní teplo fázové změny. Proto funkce efektivní tepelné kapacity roste a klesá ostře s peakem, když materiál prochází fázovou změnou. Mezi zásadní výhody tohoto přístupu lze uvést, že teplota je primární závislá proměnná, která je odvozena přímo z řešení, a že použití této metody eliminuje fluktuace při použití metody entalpie (MUHIEDDINE *et al.*, 2009).

Zásadní pro použití metody je správné určení efektivní měrné tepelné kapacity, např. na základě výsledků z měření v DSC. Derivace entalpie podle teploty (při uvažování konstantního tlaku) představuje efektivní tepelnou kapacitu (KOSSECKA *et* KÓSNY, 2010):

$$c_{eff}(T) = \frac{\partial h}{\partial T} \quad (4.4)$$

kde	$h$ je	entalpie v $\text{J.kg}^{-1}$
	$c_{eff}$	efektivní měrná tepelná kapacita v $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
	$T$	teplota v K

Přenos tepla při integrování efektivní měrné tepelné kapacity do rovnice přenosu tepla lze popsat vztahem (HEIM, 2010):

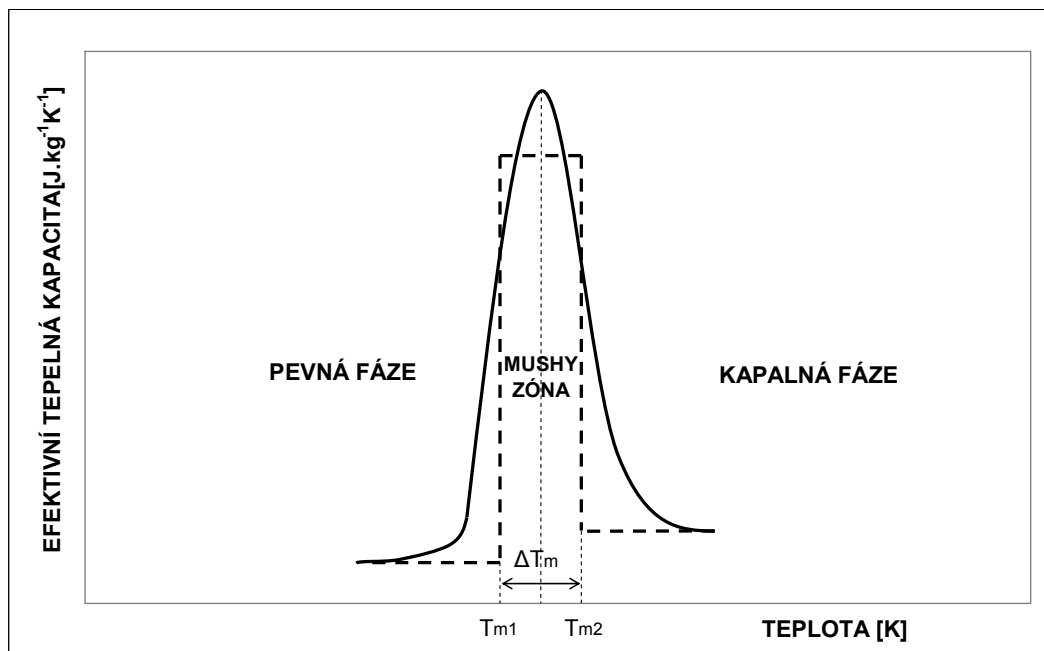
$$\rho(T)c_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left[ \lambda(T) \nabla T(\vec{x}, t) \right] \quad (4.5)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti ve  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$   
 $x$  prostorová souřadnice v m  
 $T$  teplota v K

Jako vztah mezi měrnou tepelnou kapacitou a teplotou v izotermických úlohách zahrnuje náhlé změny, nulová tloušťka intervalu fázové změny musí být aproximována úzkým rozsahem teplot fázové změny. Pokud nejsou materiálové vlastnosti závislé na teplotě, mohou být ekvivalentní parametry získány při uvažování, že fázová změna probíhá v úzkém teplotním intervalu (MUHIEDDINE *et al.*, 2009). V tomto případě lze tepelnou kapacitu vyjádřit vztahem:

$$c_{eff} = \begin{cases} c_{ps} & T < T_m - \Delta T_m \\ \frac{c_{ps} + c_{pl}}{2} + \frac{l_{pl}}{2\Delta T} & T_m - \Delta T_m \leq T \leq T_m + \Delta T_m \\ c_{pl} & T > T_m + \Delta T_m \end{cases} \quad (4.6)$$

kde  $c_{eff}$  je efektivní měrná tepelná kapacita v  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$   
 $c_{ps}$  průměrná měrná tepelná kapacita v pevném stavu v  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$   
 $c_{pl}$  průměrná měrná tepelná kapacita kapaliny v  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$   
 $l_{pl}$  skupenské teplo fázové změny pevná látka-kapalina v  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$   
 $T_m$  teplota fázové změny pevná látka-kapalina v K  
 $T$  teplota akumulčního média v K  
 $\Delta T_m$  teplotní semi-interval fázové změny v K



Obr.4.2 Grafické znázornění efektivní měrné tepelné kapacity a aproximované měrné efektivní tepelné kapacity (archiv autora)

## 4.2 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH PCMs PRO POUŽITÍ VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH

Množství akumulovaného tepla mezi dvěma teplotami je jednou z nejvýznamnějších charakteristik PCMs. Termická analýza (TA) je po mnoho let používána pro určení vlastností polymerních materiálů (DOBKOWSKI, 2006). Vzorek materiálu, který je podroben termické analýze, musí být reprezentativní. Pro zajištění tohoto požadavku je třeba, aby vzorek byl větší než jednotlivé složky materiálu. Korektní určení teploty bývá dosaženo pomocí kalibrační metody, kdy jsou používány materiály se známými teplotami tání (MEHLING *et* CABEZA, 2008).

Přesná hodnota tepelného toku se určuje také pomocí kalibrace. Pokud má být měření velmi přesné, kalibrace by měla být provedena před i po měření vzorku. Teplota vzorku musí být rovnoměrná, jinak výpočet tepelného toku nemůže vycházet z teploty měřené jedním senzorem. Proto měření by mělo probíhat dostatečně pomalu nebo by vzorek neměl být příliš velký. Toto může být v rozporu s potřebou mít dostatečně velký vzorek, který by byl reprezentativní pro zkoumaný materiál. U izotermického ohřevu se sledují změny vlastností zkoumaného materiálu v čase. U neizotermického ohřevu je stanovena rychlost ohřevu a teplotní interval ohřevu.

V rámci doposud prováděných experimentů byl testován vliv akumulace latentního tepla čistých PCMs a komerčně dodávaných PCMs na tepelnou stabilitu interiéru experimentální místnosti na Ústavu pozemního stavitelství FAST VUT v Brně. Termické analýzy prováděli Mgr. Radek Přikryl, Ph.D. a doc. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D. spolu se svými kolegy na Fakultě chemické VUT v Brně. Analýzy byly provedeny pro materiály použité v experimentech na FAST VUT v Brně a pro materiály, u nichž lze předpokládat aplikaci ve stavebních konstrukcích. Jednalo se o:

- čistý hexahydrát chloridu vápenatého;
- PCM na bázi  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ;
- výrobek firmy DÖRKEN: DELTA®-COOL 24;
- mikro pelety firmy BASF: Micronal®PCM DS 5029 X a Micronal®PCM DS 5008 X;
- výrobky firmy SASOL O&S: PARAFOL®16-97, PARAFOL®18-97, LINPAR®17, LINPAR®18-20;
- výrobky firmy RUBITHERM: SP 22 A17, SP 25 A8, RT 21, RT 27;
- sádrovou omítku CEMIX s 30% podílem Micronal®PCM DS 5008.

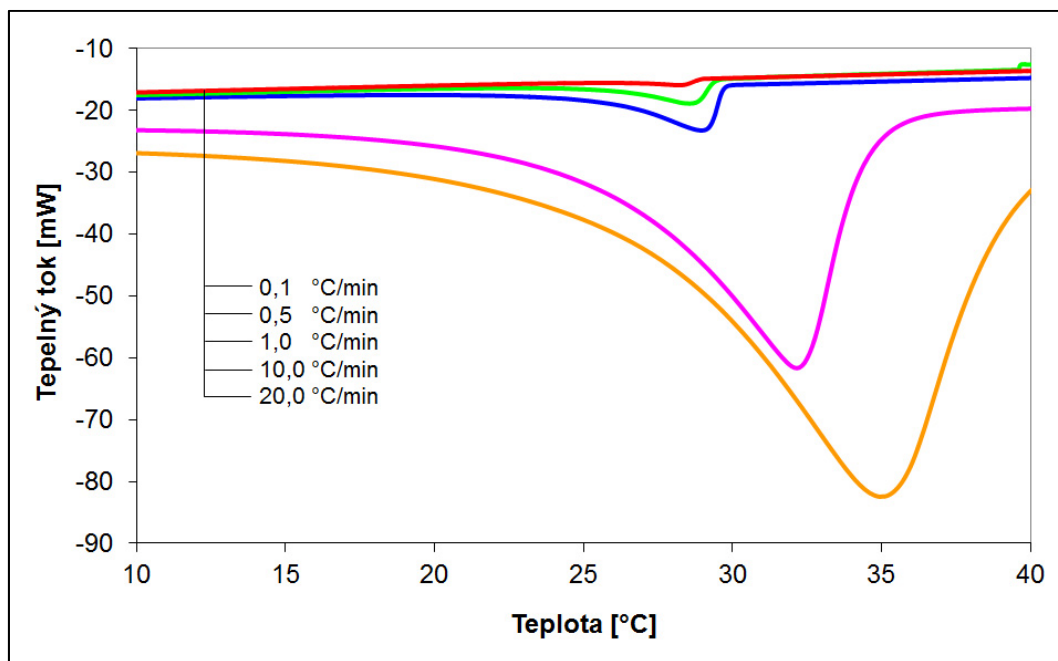
### 4.2.1 Analýza anorganických PCMs

Analýza v tomto případě byla zaměřena na materiál DELTA®-COOL 24, který byl použit při praktických měřeních jako náplň hliníkových kontejnerů integrovaných ve stěnových a podhledových konstrukcích. Tento materiál byl dále použit v dutinkových polypropylenových deskách pro dvojité tepelně akumuláční stěny. Analýza měla za cíl demonstrovat vliv rychlosti ohřevu měřeného vzorku na onsetové teploty a teploty peaku.

Tab.4.1 Přehled analýzy DSC pro DELTA®-COOL 24 při chlazení

RYCHLOST CHLAZENÍ [°C.min <sup>-1</sup> ]	PEAK TUHNUTÍ [°C]	ONSET TUHNUTÍ [°C]	VYDANÉ TEPLLO [kJ.kg <sup>-1</sup> ]
20,0	13,3	15,9	-100,3
10,0	15,3	16,7	-102,4
1,0	18,7	18,9	-114,2
0,5	21,1	21,5	-115,5
0,1	22,6	22,9	-112,3

Z měření vyplývá, že se zvyšující se rychlostí ohřevu rostou hodnoty peakových teplot. Při procesu tuhnutí je naopak zjevné, že s rostoucí rychlostí chlazení se posouvají peakové teploty směrem dolů. Proces chlazení, tj. tuhnutí materiálu, je číselně popsán v Tab.4.1. Pro aplikace ve stavebních konstrukcích, kdy jsou PCMs aktivovány intenzivním větráním v nočních hodinách je třeba upozornit, že při rychlém ochlazení je nezbytné zajistit nižší teplotu větracího vzduchu, než by bylo nutné v případě volné konvekce. Analýza prokázala vhodnost materiálu DELTA®-COOL 24 pro aplikace ve stavebních konstrukcích v případě, kdy je uvažováno pouze s volnou konvekcí okolního vzduchu. V těchto případech PCMs mají potenciál zabránit nárůstu teploty nad povolený horní teplotní limit uživatelského komfortu daný legislativou (27 °C). Graficky je posun v peakových hodnotách zobrazen na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 DSC křivka DELTA®-COOL 24 pro vybrané rychlosti ohřevu (archiv autora)

Z anorganických materiálů byla také testována média firmy Rubitherm Technologies GmbH, která jsou v současné době známa nejen z vědeckých publikací, ale je možné při nejmenším po Evropě nalézt řadu realizací, kde byla tato média použita. Firma nabízí nejen vlastní akumulární materiály, ale také kompletní výrobky, tj. zapouzdřené PCMs. Jedná se o materiály na bázi parafinů označované jako RT. Přehled analýzy dvou vzorků PCMs je uveden v Tab. 4.2.

Tab.4.2 Přehled analýzy DSC výrobků Rubitherm Technologies GmbH (průměr ze 2 měření)

MATERIÁL	PEAK TÁNÍ [°C]	ONSET TÁNÍ [°C]	PŘIJATÉ TEPLO [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	PEAK TUHNUTÍ [°C]	ONSET TUHNUTÍ [°C]	UVOLNĚNÉ TEPLO [kJ.kg <sup>-1</sup> ]
RT 21	22,8	13,3	116,7	22,6	22,8	-106,7
RT 27	27,8	25,9	139,7	27,6	27,7	-139,3

Na základě výsledků první série měření lze konstatovat, že materiál RT 27 by mohl najít uplatnění při aplikaci PCMs ve stavebních konstrukcích při uvažování volného chlazení.



#### 4.2.2 Analýza mikro zapouzdřeného organického PCMs

Jedná se o Micronal®PCM DS 5008 X a Micronal®PCM DS 5029 X vyráběný firmou BASF. Účelem měření bylo posouzení vhodnosti daného typu PCM z hlediska rozsahu teplot fázových změn. Tento materiál byl použit jako tepelně akumulční hmota v sádrové omítce v experimentální místnosti v kombinaci s kapilárními rohožemi. Oba vzorky byly testovány při rychlosti ohřevu (teplotní rampě)  $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ . Analýza prokázala, že u materiálu Micronal®PCM DS 5029X dochází k tání i tuhnutí při nižších teplotách. Materiál Micronal®PCM DS 5008X je naopak vhodnější pro použití v omítce bez možnosti noční aktivace vodním okruhem. I u toho komerčně dodávaného materiálu dochází k mírnému přechlazení, které však není překážkou pro použití ve stavebních konstrukcích. Nebyla však testována změna vlastností po cyklickém opakování fázových změn.

PCMs v této podobě byly uvažovány pro rozptýlení v sádrové omítce, která by byla aplikována vnitřním povrchu stavebních konstrukcí. Pro aktivaci, noční vybíjení naakumulované energie, bylo uvažováno s umístěním kapilárních rohoží ve vrstvě omítky. HAUSSMANN *et al.* (2009) představili obdobný koncept s použitím omítky s rozptýleným materiálem Micronal®PCM DS 5029X.

Tab.4.3 Porovnání analýz DSC pro PCM a sádrovou omítku s 30% podílem PCMs

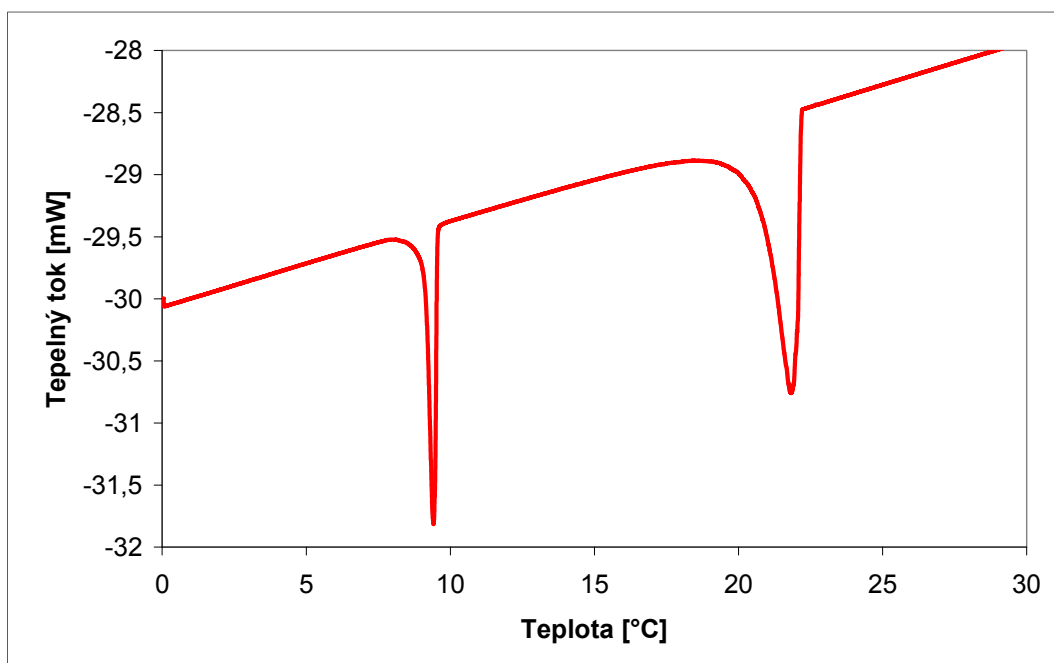
MATERIÁL	PEAK TÁNÍ [°C]	ONSET TÁNÍ [°C]	PŘIJATÉ TEPLO [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	PEAK TUHNUTÍ [°C]	ONSET TUHNUTÍ [°C]	UVOLNĚNÉ TEPLO [kJ.kg <sup>-1</sup> ]
Micronal DS 5008X	24,3	19,8	86,8	22,4	23,3	- 82,7
Omítka s PCMs	26,2	24,5	23,4	24,6	25,5	-23,6
ROZDÍL	1,9	4,7	63,4	2,2	2,2	59,1

Ve firmě LB CEMIX s.r.o. byla zpracována originální receptura sádrové omítky Cemix s obsahem 30 % mikrokapslí Micronal®PCM DS 5008 X. Větší jak 30% podíl PCMs nebylo možné použít z důvodu zpracovatelnosti omítky na stavbě. V Tab.4.3 jsou porovnány sledované veličiny vzorku akumulčního materiálu Micronal®PCM DS 5008 X a vzorku omítky s 30% podílem akumulční látky. Z porovnání uvedeném v Tab.4.3 je zřejmé, že přidáním mikro pelet do sádrové omítky dochází k snížení akumulční kapacity na úroveň 27 %. Dochází zároveň i k posunu teplotních peaků jak při tání, tak při tuhnutí. Toto snížení tepelně akumulční kapacity je poměrně zásadní a odpovídá hmotnostnímu podílu PCMs v omítce.

#### 4.2.3 Analýza organických PCMs

V tomto případě se jedná o vysoce čisté parafíny z obnovitelných zdrojů (HOPPE, 2012). Firma SASOL O&S prezentovala v minulosti portfolio svých výrobků na několika konferencích. Do testování byly vzorky parafínů zahrnuty především z důvodu zajímavých charakteristik (teplota tání, latentní teplo) uvedených v podkladech výrobce. Další výhodou byla ochota zástupců firmy k bezplatnému zaslání poptávaných vzorků materiálů a ochota pro navázání budoucí spolupráce. Firma nabízí výrobky pod označením PARAFOL s teplotou fázové změny od  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , LINPAR s teplotou fázové změny  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  a NACOL s teplotou fázové změny od  $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $62\text{ }^{\circ}\text{C}$  (HOPPE, 2012). Měření probíhala v režimu teplotní rampy  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ . Z provedené analýzy 4 vzorků vyplývá, že materiály se liší jednak velikostí latentního tepla, tak také rozsahem teplot tání. Společným rysem všech testovaných materiálů je malá tendence k přechlazení. Materiály LINPAR 17 a LINPAR 18-20 mají jako jiné materiály na organické bázi, např. Micronal®PCM, dva peaky fázové změny.

Lze konstatovat, že na základě prvních analýz by pro aplikace s chladicím vodním okruhem byl vhodný LINPAR 17, pro aplikace s volným chlazením by našel uplatnění PARAFOL 18-97.



Obr. 4.4 DSC křivka pro LINPAR 17 při ohřevu - tání PCMs (archiv autora)

Tab.4.4 Přehled analýzy DSC výrobků SASOL O&S při ohřevu (průměr ze 2 měření)

MATERIÁL	ONSET PEAK „A“ [°C]	PEAK TÁNÍ [°C]	PŘIJATÉ TEPLO [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	ONSET PEAK „B“ [°C]	PEAK TÁNÍ [°C]	PŘIJATÉ TEPLO [kJ.kg <sup>-1</sup> ]
PARAFOL 16-97	18,1	18,8	223,6			
PARAFOL 18-97	27,8	28,8	221,3			
LINPAR 17	20,6	21,8	144,6	9,0	9,3	39,7
LINPAR18-20	22,4	24,4	102,2	2,9	3,3	18,1

Firma Rubitherm Technologies GmbH nabízí také anorganické materiály pod označením SP. Pro laboratorní stanovení vlastností byly vybrány SP 22 A17 a SP 25 A8. V zásadě byl výběr veden myšlenou možné aplikace daných materiálů v obalových konstrukcích místností na základě informací výrobce o rozsahu teplot fázové změny.

Tab.4.5 Přehled analýzy DSC výrobků Rubitherm Technologies GmbH (průměr ze 2 měření)

MATERIÁL	PEAK TÁNÍ [°C]	ONSET TÁNÍ [°C]	PŘIJATÉ TEPLO [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	PEAK TUHNUTÍ [°C]	ONSET TUHNUTÍ [°C]	UVOLNĚN É TEPLO [kJ.kg <sup>-1</sup> ]
SP 22 A17	22,2	17,9	12,3	22,4	22,5	-11,9
SP 25 A8	26,6	23,9	71,4	18,5	19,0	-78,0

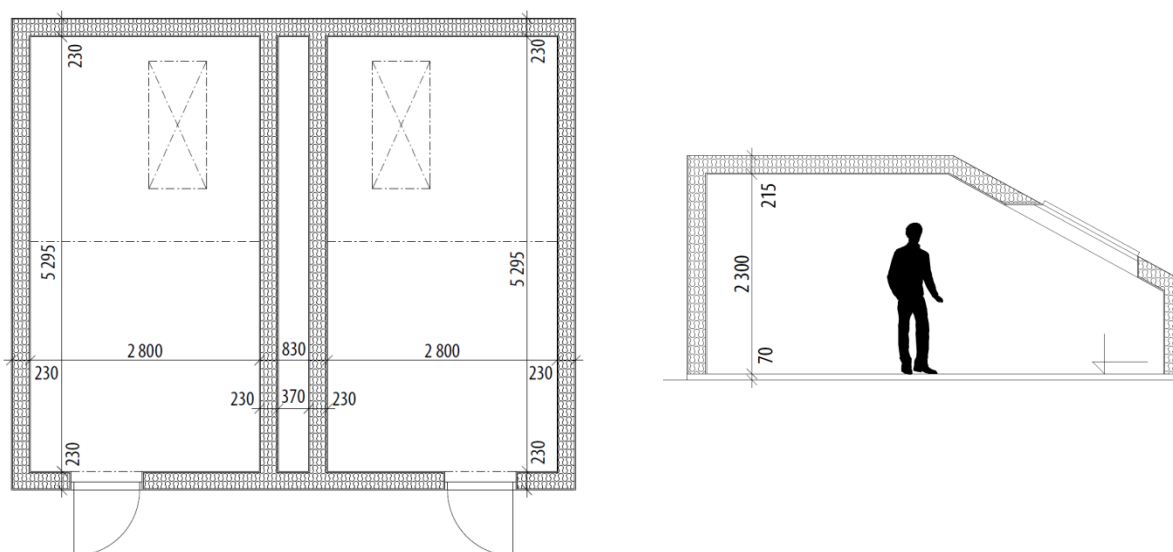
### 4.3 EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM V TESTOVACÍCH PODKROVNÍCH MÍSTNOSTECH

Komparativní měření vlivu PCMs na vnitřní mikroklima místností s obalovými konstrukcemi z lehkých stavebních hmot bylo realizováno v letech 2009 až 2012 v testovacích podkrovních místnostech na Ústavu pozemního stavitelství.

#### 4.3.1 Popis infrastruktury na Ústavu pozemního stavitelství

Testovací podkrovní místnosti byly vybudovány v rámci řešení projektu Vnitřního grantového systému FAST VUT č. 50 „Experimentální laboratoř stavební tepelné techniky“ v roce 2007.

Nosná konstrukce je provedena z ocelových sádkokartonářských profilů. Oboustranné opláštění tvoří sádkokartonové desky. Tepelná izolace každé stěny je v tloušťce 200 mm provedena z vláknité tepelné izolace. Vstupní dveře do místností jsou dřevěné, při čemž na vnitřním líci je integrována 100mm vrstva pěnového polystyrenu. Rozměry místností jsou uvedené na Obr.4.5. Místnosti jsou provedeny symetricky podle plné vazby stojaté stolice.



Obr. 4.5 Půdorys a řez testovacími podkrovními místnostmi (archiv autora)

Funkce testovacích místností spočívá zejména v zajištění prostředí pro komparativní měření, kdy se porovnáváním tepelného mikroklimatu v referenční a experimentální místnosti při stejných parametrech venkovního prostředí zjišťuje efektivita instalovaných materiálů pro zvýšení tepelné stability vnitřního prostředí. Experimentální místnost je primárně určena pro instalaci tepelně akumulčních konstrukcí a prvků. Referenční místnost slouží pro porovnání efektu instalovaných PCMs na tepelné mikroklima.

V druhé fázi výstavby byly testovací místnosti v roce 2009 doplněny o vzduchotechnické zařízení firmy ATREA s.r.o. pro zajištění řízeného větrání vnitřních prostor obou místností. Toto zařízení umožňuje měnit intenzitu výměny vzduchu v místnostech, ale také dokáže zajistit požadovanou teplotu přírodního vzduchu ať v letním, tak v zimním období. Přívod vzduchu je podle nastavení možno volit u podlahy nebo pod stropem.

Ve třetí fázi bylo technické zázemí testovacích místností doplněno v roce 2011 o chladicí jednotku pro přípravu chladicí vody pro aktivaci sádkové omítky s 30% podílem mikropelet s PCMs. Toto zařízení pracuje autonomně na základě vlastního řízení podle teploty interiéru a teploty chlazené vody. Nespornou výhodou testovacích místností je jejich lokalizace v podkrovních prostorech budovy D1, která umožňuje operativní přístup a kontrolu prováděných experimentálních měření.

V rámci měření byly zaznamenávány a následně vyhodnocovány zejména následující veličiny:

- $\theta_i$  teplota vnitřního vzduchu v místnosti ve °C – termočláňkové čidlo Ahlborn typu K;
- $\theta_e$  teplota vzduchu v exteriéru ve °C – stíněný digitální teploměr;
- $\theta_s$  povrchové teploty ve °C – termočláňková čidla Ahlborn typu K;
- $\theta_a$  teplota vzduchu v půdním prostoru ve °C – termočláňkové čidlo Ahlborn typu K;
- $\theta_g$  výsledná teplota kulového teploměru ve °C – kulový teploměr Ahlborn;
- $v$  rychlost proudění vzduchu v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  – anemometrická sonda Ahlborn FVA935TH5;
- $E_g$  globální sluneční ozáření ve  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  – pyranometr meteostanice FAST VUT v Brně;
- $q$  hustota tepelného toku ve  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  – snímač tepelného toku FQ A018 C.

#### 4.3.2 Úvodní komparativní měření

Účelem měření bylo potvrzení správnosti návrhu testovacích místností pro účely komparativních měření a posuzování vlivu PCMs na vnitřní tepelné mikroklíma. Měření probíhalo v letním období roku 2008 při uzavřených střešních oknech a uzavřených vstupních dveřích do testovacích místností. Teplotní čidla byla umístěna na shodných místech v obou místnostech. Cílem měření bylo ukázat, že teplota změřená kulovým teploměrem a teplota vnitřního vzduchu nezávisí na tom, zda bylo měření provedeno v experimentální či referenční místnosti. Stav vnitřní prostředí v místnostech byl popsán pouze veličinami teplota vzduchu a výsledná teplota kulového teploměru, protože instalace PCMs nebude mít na ostatní veličiny (relativní vlhkost vzduchu, rychlost proudění vzduchu atp.) vliv.

Průměrný rozdíl výsledných teplot kulového teploměru v referenční a experimentální místnosti je -0,054 a 95% interval spolehlivosti pro tento rozdíl je (-0,059; -0,049). Hodnoty v celém intervalu spolehlivosti jsou nižší než nejistota měření, která činí 0,06 °C. Lze tedy přijmout závěr, že rozdíly v naměřených teplotách jsou způsobeny chybou měření.

Pro statistické vyhodnocení bylo použito prostředí v programu IBM SPSS Statistics 20. Pro prokázání zřejmé skutečnosti byl vytvořen lineární model, kde nezávislá proměnná je teplota naměřená kulovým teploměrem v referenční místnosti ( $\theta_{g,r}$ ) a závislá proměnná je teplota naměřená kulovým teploměrem v experimentální místnosti ( $\theta_{g,e}$ ). Mezi těmito proměnnými existuje velmi silná závislost, korelační koeficient  $R = 0,999$  je statisticky vysoce významný. Lineární vztah mezi oběma proměnnými lze popsat rovnicí:

$$\theta_{g,e} = 0,983 \cdot \theta_{g,r} + 0,247 \quad (4.7)$$

Koeficient determinace  $R^2 = 0,999$  ukazuje na model, který vysvětluje 99,9 % variability závisle proměnné. Směrnice přímký i absolutní člen jsou statisticky významné, směrnice se blíží 1. Statistická významnost absolutního členu ukazuje opět na výše popsany rozdíl způsobeny nejistotou měření.

#### 4.3.3 PCMs v hliníkových kontejnerech integrovaných na obalových konstrukcích

Vlastnímu měření předcházela montáž hliníkových kontejnerů plněných PCMs. Jedná se o výrobek firmy Dörken GmbH & Co. KG. V hliníkových kontejnerech jsou PCMs na bázi hydrátů solí, výrobcem označované jako DELTA®-COOL 24. Tento typ druhu zapouzdřeného PCMs byl volen z důvodu projeveného zájmu výrobce o experimentální činnost realizovanou na FAST VUT v Brně. Celkem bylo zakoupeno 250 panelů za cenu 1250 €, tzn. 1 hliníkový panel stál 5 €. Je třeba však zdůraznit, že se jednalo o cenu média pro použití v testovacích místnostech. V experimentální místnosti bylo instalováno 270 kg akumulacího média. Jako výhoda tohoto způsobu zapouzdření PCMs se ukázala především možnost snadné montáže.

Je zřejmé, že se jedná o experimentální instalaci, neboť vzhled stěn s instalovanými kontejnery neodpovídá běžným zvyklostem. Experiment měl ukázat, jakého efektu lze dosáhnout v ideálním případě, kdy jsou pokryty kontejnery s akumulacním médiem všechny vnitřní povrchy s výjimkou podlahy. Navíc se jednalo o ideální případ, kdy jsou kontejnery v přímém kontaktu s vnitřním prostředím bez další pohledové konstrukce. Další idealizací je fakt, že podél stěn na rozdíl od reálných kancelářských prostor není umístěn nábytek. Výsledkem je tedy, že na  $m^2$  podlahové plochy připadá 18,2 kg akumulacního média. Vzhledem k tomu, že se jednalo o komparativní měření při simulovaných podmínkách, nebylo v místnostech uvažováno s vnitřními tepelnými zisky.

Měření v testovacích místnostech bylo rozděleno do třech etap, ve kterých byly testovány možné způsoby regenerace akumulacního média:

1. režim přirozeného neřízeného větrání testovacích místností infiltrací okny a dveřmi;
2. režim řízeného větrání v denních hodinách s intenzitou větrání  $2,48 \text{ h}^{-1}$  a větrání vzduchem z exteriéru v nočních hodinách s intenzitou větrání  $5,95 \text{ h}^{-1}$ ;
3. režim řízeného větrání v denních hodinách s intenzitou větrání  $2,48 \text{ h}^{-1}$  a větrání v nočních hodinách ochlazeným vzduchem přiváděným z exteriéru s intenzitou větrání  $5,95 \text{ h}^{-1}$ .

### ***Měření v režimu přirozeného větrání bez vzduchotechniky***

První část tohoto měření byla realizována v měsíci květnu, tedy v období s denními meteorologickými podmínkami, které mohou způsobovat přehřívání vnitřních prostor u staveb z lehkých stavebních hmot. Obvykle se předpokládá, že v tomto ročním období se teplo naakumulované v obalových konstrukcích uvolňuje v nočních hodinách díky poklesu teploty vzduchu v místnosti vlivem přirozeného větrání okny venkovním vzduchem.

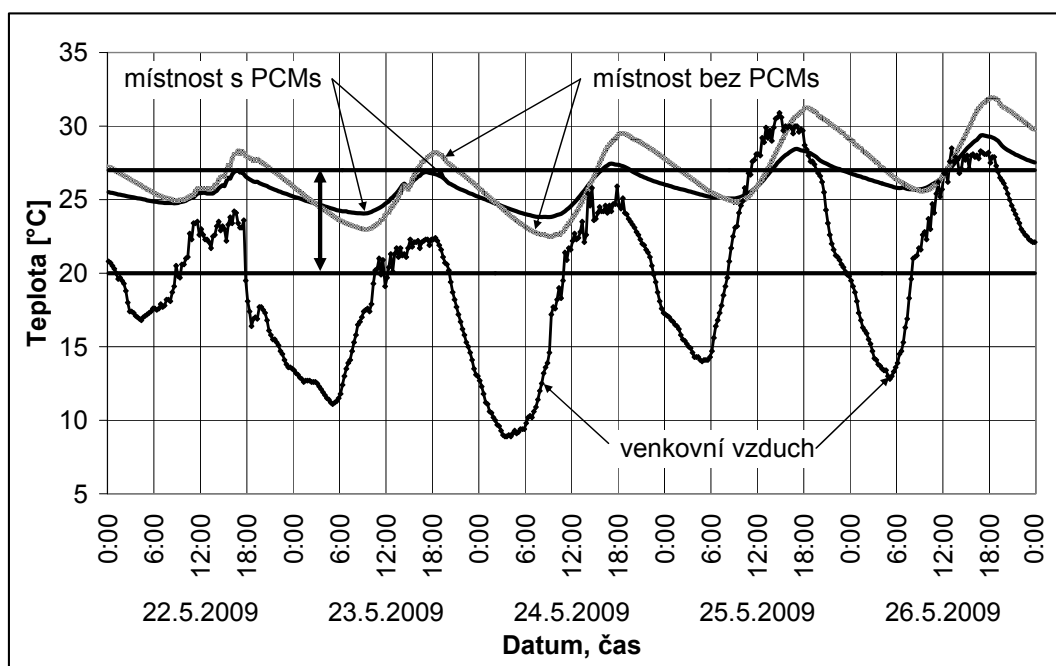


Obr.4.6 Referenční místnost (archiv autora)



Obr.4.7 Experimentální místnost (autor)

V období mezi 22.5. a 26.5. se výrazně projevuje pozitivní vliv tepelně akumulacních vlastností instalovaných PCMs, viz Obr. 4.8. Díky akumulaci tepla byly v experimentální místnosti naměřeny nejvyšší denní operativní teploty výrazně nižší v porovnání s referenční. Z průběhu výsledných teplot v tomto období lze vypočítat zásadní problém s vybíjením naakumulovaného tepla v nočních hodinách. V nočních hodinách ve dnech 23.5. a 24.5. byly zaznamenány vyšší výsledné teploty v experimentální místnosti z důvodu uvolňování naakumulovaného tepla, což svědčí o vhodných podmínkách pro regeneraci akumulacní látky. Nicméně v dalších dnech, kdy výsledné teploty v obou místnostech neklesají pod  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , je teplota v nočních hodinách v obou místnostech stejná. Z toho lze vyvodit jasný závěr, že za těchto okrajových podmínek nedochází k aktivaci akumulacního jádra v kontejnerech. Zároveň je patrný trend kontinuální akumulace tepla, který postupně snižuje efekt pasivního chlazení.



Obr. 4.8 Průběh výsledných teplot kulového teploměru v referenční a experimentální místnosti pro vybraných 5 dnů s vyznačením požadovaného rozmezí operativní teploty (archiv autora)

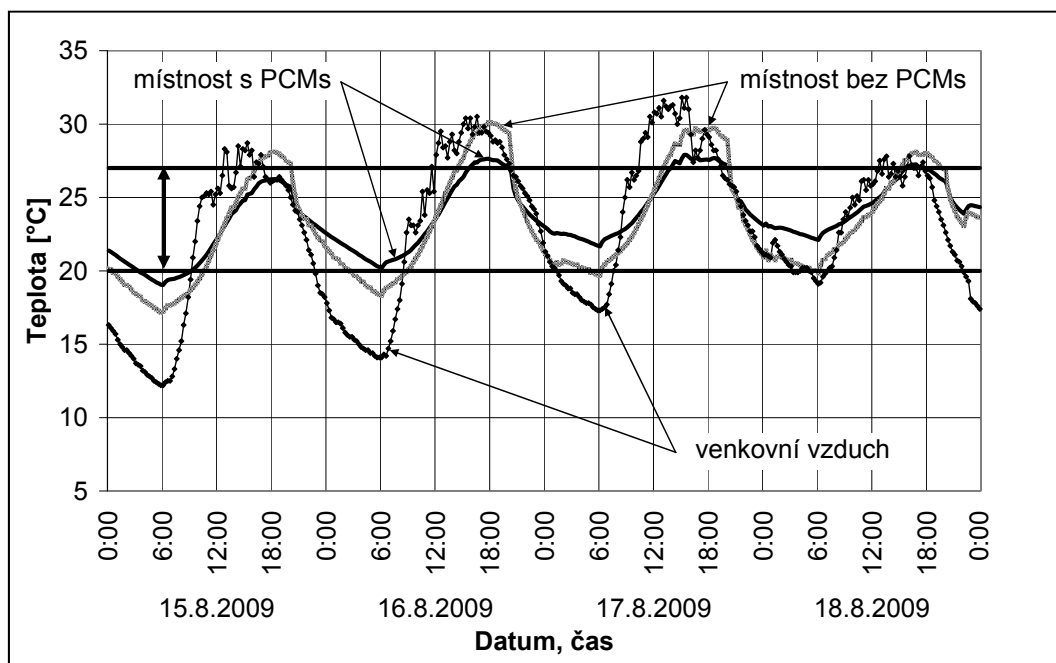
Výsledky z této série měření zcela jednoznačně ukazují na závislost účinku pasivního chlazení v denních hodinách na možnosti odvodu naakumulovaného tepla v nočních hodinách. Přirozené větrání okny dokáže zajistit dostatečně efektivní odvod naakumulované energie pouze v případě nízkých nočních teplot venkovního vzduchu. Při několikanásobném akumulování tepla v PCMs dochází k postupnému snižování účinnosti chlazení. Nicméně tento systém je v přechodových měsících významný díky tomu, že dokáže zachytit výkyvy venkovních teplot a teplo v interiéru způsobené vyššími dávkami slunečního záření pronikajícího přes transparentní konstrukce.

#### ***Měření při intenzivním větrání chlazeným vzduchem v nočních hodinách***

Na základě výše popsaných výsledků měření bylo přistoupeno k instalaci vzduchotechnické jednotky pro zajištění a kontrolu potřebného množství větracího vzduchu v testovacích místnostech. Instalace rozvodů, jednotky a řízení byla hotova v polovině měsíce července 2009. Výsledky měření v režimu intenzivního větrání v nočních hodinách prokázaly, že pro aktivaci akumulačního jádra je třeba zajistit nejen dostatečný objem větracího vzduchu, ale také jeho vhodnou teplotu. Teplota přívodního vzduchu do místnosti byla natolik vysoká, že neumožnila odvod naakumulované energie.

Na základě tohoto poznatku bylo přistoupeno k zapojení chladicí jednotky pro úpravu teploty přiváděného vzduchu v nočních hodinách. Režim se strojním větráním a chlazením přívodního vzduchu byl odzkoušen v průběhu měsíce srpna 2009. Na ovládacím panelu byla nastavena minimální možná teplota v potrubí 17 °C. Při měření byly uzavřeny otvorové výplně a větrání interiéru obou místností bylo pouze vzduchotechnickou jednotkou:

- v čase od 6:30 do 20:00 větrání vzduchem z exteriéru s intenzitou větrání 2,48 h<sup>-1</sup>;
- v čase od 20:30 do 6:00 větrání ochlazeným vzduchem přiváděným z exteriéru s intenzitou větrání 5,95 h<sup>-1</sup>.



Obr.4.9 Průběh výsledných teplot kulového teploměru v referenční a experimentální místnosti pro vybrané 4 dny s vyznačením požadovaného rozmezí operativní teploty (archiv autora)

Z grafu na Obr. 4.9 je zřejmé, se podařilo díky kombinaci akumulace latentního tepla a intenzivního nočního větrání udržet stav vnitřního prostředí téměř v požadovaném teplotním rozmezí i při venkovních teplotách až 32 °C. Zajímavé je především porovnání středních hodnot výsledných teplot v obou místnostech, které se mezi sebou liší podstatně méně v porovnání s maximálními teplotami. Podstatně nižší vypočítané vzestupy teploty vzduchu v experimentální místnosti ukazují na fakt, že pro dosažení maximálních teplot v denních hodinách byla značně odlišná počáteční ranní teplota v obou místnostech.

Na základě výše prezentovaných výsledků měření lze konstatovat:

- pasivní chlazení s akumulací tepla při změnách skupenství je přínosem pro zvýšení tepelné stability staveb s lehkými konstrukcemi v letním a přechodném období;
- zásadní význam pro funkčnost systémů pasivního chlazení má možnost zajištění regenerace, tj. vybíjení naakumulovaného tepla, realizovatelná v nočních hodinách;
- regenerace akumulačního jádra je možná i přirozeným větráním okny;
- regenerace akumulačního jádra je závislá nejen na intenzitě větrání v nočních hodinách, ale i na teplotě přívodního vzduchu;
- výhoda systému s vybíjením naakumulovaného tepla chlazeným větracím vzduchem v nočních hodinách je především v chlazení vzduchu v nočních hodinách, tedy v době levné mimošpičkové elektřiny;
- nevýhodou koncepce regenerace akumulačního média intenzivním provětráváním v nočních hodinách je nemožnost přítomnosti osob v době intenzivního větrání, proto je tento systém možné využít např. u administrativních budov.

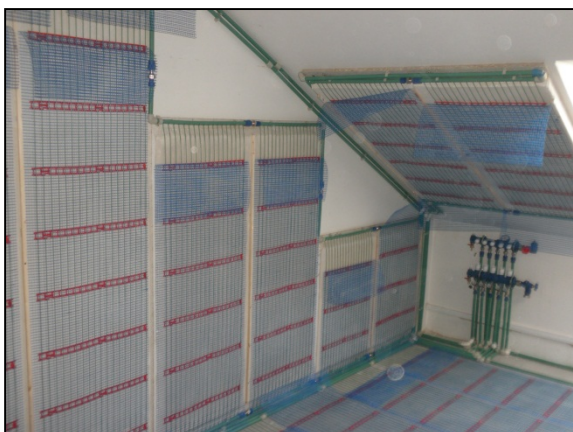
#### 4.3.4 Tepelně akumulační omítky se systémem kapilárních rohoží

Aktivace akumulačního jádra pomocí proudícího vzduchu ukázala, že odvod akumulovaného tepla je značně závislý na teplotě přívodního vzduchu. Systém s oddělným okruhem větracího vzduchu pak představuje relativně komplikované a v řadě situací neefektivní řešení, i když umožňuje pobyt osob v místnostech i v době aktivace akumulačního jádra. Po navázání užší

spolupráce s firmou Inraclima, s.r.o., firmou LB CEMIX s.r.o. a obchodním zástupcem německé firmy BASF, byl sestaven a následně přidělen projekt specifického výzkumu VUT reg. č. FAST-S-11-60 „Intelligentní systém pasivního chlazení pro energeticky efektivní budovy“. Z prostředků tohoto projektu byl financován návrh a realizace systému kapilárního chlazení v testovací místnosti. Oproti standardnímu řešení kapilárního vytápění/chlazení, jehož montáž spočívá v instalaci kapilárních rohoží a jejich zaomítání na místě, byl použit demontovatelný modulový systém. Každý tepelně akumuláční modul sestává z pokladní desky z recyklovaných nápojových kartonů, na kterých je nalepena deska z pěnového polystyrenu. Na desce je osazena kapilární rohož z polypropylenu, která je zalita sádrovou omítkou s 30% hmotnostním podílem mikro pelet Micronal®PCM DS 5008 X. Po stranách desky jsou umístěny rozvodné trubky z polypropylenu. Na koncích rozvodných trubek jsou navařena šroubení pro připojení dalších modulů. Teplo je v denních hodinách akumulováno do tepelně akumuláční vrstvy sádrové omítky s 30% podílem pelet Micronal®PCM DS 5008 X.

Vzhledem k tomu, aby byla zajištěna dokonalá regenerace akumuláčního média (vybití naakumulovaného tepla) v nočních hodinách, je v tepelně akumuláční omítce umístěna kapilární rohož. Kapilární rohože jsou trvale zaplaveny vodou. Tím dochází k zvýšení tepelně akumuláční kapacity při akumulaci citelného tepla vodou. V nočních a mimošpičkových hodinách proudí v kapilární rohoži chladicí voda, která umožňuje odvod naakumulované energie.

V případě, kdy noční teploty v místnosti jsou pod teplotou krystalizace PCMs, je možné uvažovat se samovolným uvolňováním tepla z omítky do místnosti. Tím dochází k sálavému vytápění místnosti a dalším úsporám energie. Na rozdíl od známých systémů kapilárního vytápění/chlazení, umožňuje sestava z tepelně akumuláčních modulů suchou montáž díky navařeným šroubovým spojům.



Obr.4.10 Kapilární rohože (archiv autora)



Obr.4.11 Rohože po omítnutí (autor)

### ***Měření v režimu aktivace tepelně akumuláční omítky chladicí vodou***

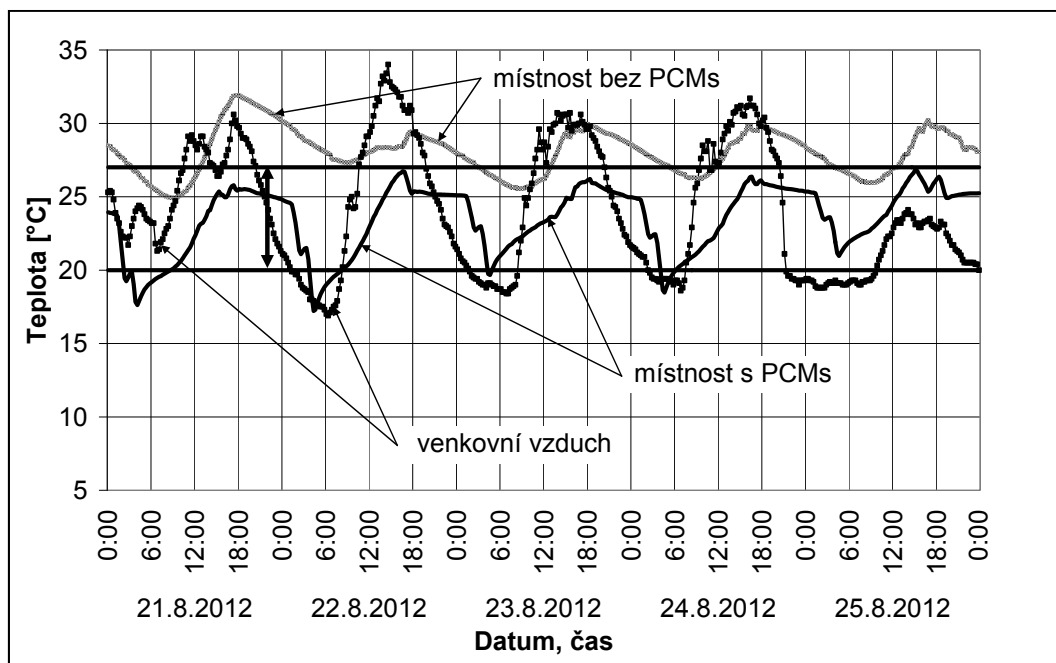
V letních měsících 2012 bylo přistoupeno k ověření funkčnosti systému s využitím aktivace akumuláčního jádra (mikro pelet s PCMs) pomocí chladicího vodního okruhu. Cílem bylo nalézt takovou variantu provozu chladicího zařízení, která by s co nejmenší provozní ekonomickou náročností byla schopna zajistit stav vnitřního prostředí v testovací místnosti v požadovaném rozmezí.

Provozní náklady lze v daném případě šetřit tím, že se pro přípravu chladicí vody využívá odběr mimošpičkové elektřiny, tzn. zejména v nočních hodinách. Peletky s PCMs rozptýlené v sádrové omítce by měly zajistit absorpci tepla v místnosti v denních hodinách. Příklad komparativního měření v režimu aktivace PCMs chladicí vodu je uveden na Obr.4.12.



Na základě pilotních měření pak došlo k úpravě režimu provozu chlazení. Systém provozu chladicí jednotky je řízen na základě informací o teplotě v místnosti, tj. aby teplota v místnosti příliš neklesla, což by způsobovalo výrazný diskomfort pro uživatele v ranních hodinách.

Chlazení bylo zapnuto v nočních hodinách mezi 0:00 až 5:00 hod. a na termostatu bylo nastaveno vypnutí chladicí jednotky při dosažení 21 °C. Na grafu na Obr.4.12 je vidět, že v nočních hodinách výsledná teplota klesala i pod nastavenou mez. V denních hodinách (7:00 až 20:00) pak bylo nastaveno spuštění dochlazování interiéru při dosažení teploty v interiéru 26 °C. Větrání obou místností bylo pouze pootevřenými okny bez regulace.



Obr.4.12 Průběh výsledných teplot kulového teploměru v referenční a experimentální místnosti pro vybraných 5 dnů s vyznačením požadovaného rozmezí operativní teploty (archiv autora)

Je zřejmé, že při provozování chlazení ve výše popsaném režimu, je možné zajistit stav vnitřního tepelného mikroklimatu v požadovaném rozsahu teplot. Ukazuje se, že tepelně akumulční kapacita instalovaných PCMs je schopna zpomalit počáteční nárůst vnitřních teplot. Po vyčerpání latentního tepla však dochází k rychlému vzestupu teploty v místnosti.

Provozování testovacích místností bude třeba kombinovat i s řízeným větráním, což by mohlo mít pozitivní vliv na odvod naakumulované energie. Provoz chladicí jednotky by bylo v denních hodinách vhodné zkoordinovat s aktuálním spouštěním nízkého tarifu elektřiny, aby se maximálně využilo tepelně akumulční kapacity PCMs a při minimálních provozních nákladech tak bylo dosaženo tepelného komfortu v místnosti. Zároveň je třeba zmínit, že průběžně docházelo k vyhodnocování spotřeb elektřiny na provoz chladicí jednotky.

Z vyhodnocení výsledků vyplývá, že:

- instalované kapilární chlazení dokáže zajistit v denních hodinách požadovaný stav vnitřního prostředí;
- tepelně akumulční kapacita PCMs je přínosem pro snížení provozních nákladů na chlazení, protože chlazení vody může být realizováno v době odběru mimošpičkové elektřiny;
- pro zajištění požadovaného stavu vnitřního prostředí je možné zapojit i krátkodobé dochlazení tepelně akumulční omítky v denních hodinách;
- díky vhodnému rozsahu teplot fázové změny použitých mikropelet s PCMs bude možné systém použít i v zimním období pro úsporné sálavé vytápění.

### 4.3.5 Další testované systémy

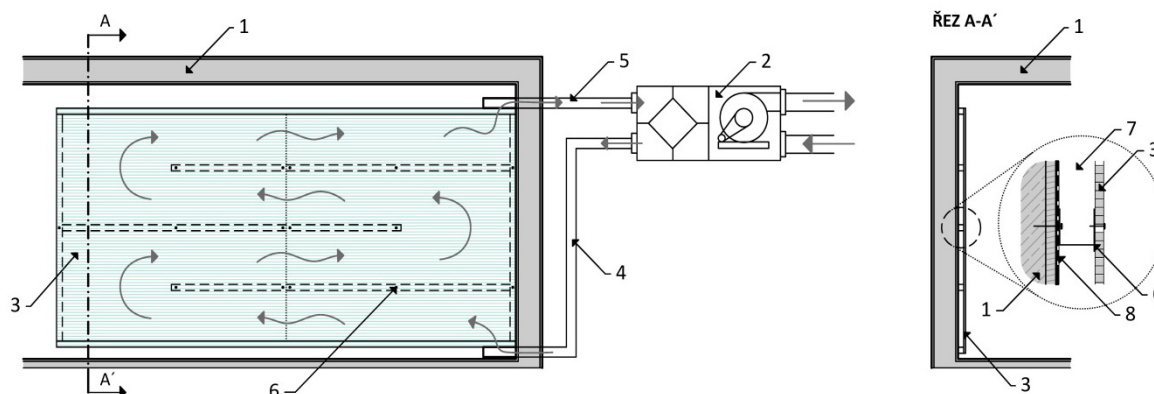
Cílem experimentálních instalací bylo nalezení vhodného systému pro zapouzdření PCMs s možností aktivace (vybíjení naakumulovaného tepla) odděleným okruhem větracího vzduchu. Toto řešení umožňuje pobyt uživatelů v době aktivace akumulárního jádra.

#### *Dvojitá tepelně akumulární stěna*

Na Obr. 4.13 je vidět dvojitá stěna se vzduchotechnickým zařízením, jejíž přední plochu tvoří dutinková stěna z polypropylenu plněná PCMs, přičemž zadní nosná stěna je z běžného stavebního materiálu. Mezi dvojitou stěnou a vzduchotechnickým zařízením je uspořádáno přírodní a odvodní potrubí. Po stranách experimentální místnosti byly umístěny polypropylenové dutinkové desky, které byly vyplněny materiálem DELTA®-COOL 24. Dutinky se nezaplňují zcela, aby byl zajištěn prostor pro objemové změny. Těsnění desek je provedeno silikonovým tmelem.

Ve spodní části je do větracího meziprostoru zaústěno potrubí obdélníkového průřezu, které je možné zabudovat do podlahové konstrukce. V horní části je umístěn otvor napojený na odváděcí potrubí obdélníkového průřezu. Vzduch nasávaný do odváděcího potrubí je pomocí ventilátoru ve vzduchotechnické jednotce odváděn ze systému do okolí objektu.

Přírodní vzduch je nasáván ze střešního prostoru přes jednotku umožňující strojní chlazení tzn., že i v období s vyššími teplotami vzduchu v nočních hodinách je zajištěn odvod naakumulovaného tepla z akumulárního média plněného do dutinkové desky.



#### Legenda

- |                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1 stavební konstrukce    | 2 vzduchotechnické jednotka |
| 3 dutinková deska s PCMs | 4 přírodní potrubí          |
| 5 odvodní potrubí        | 6 distanční prvek           |
| 7 vzduchová mezera       | 8 reflexní folie            |

Obr.4.13 Schematické uspořádání dvojitě tepelně akumulární stěny (archiv autora)

Dutinky jsou umístěny v horizontálním směru a zajišťují rovnoměrné rozvrstvení akumulárního média po výšce stěny. Tím se odstranil problém s boulením obalu média, které bylo pozorováno u hliníkových kontejnerů. Komparativní měření ukázalo, že:

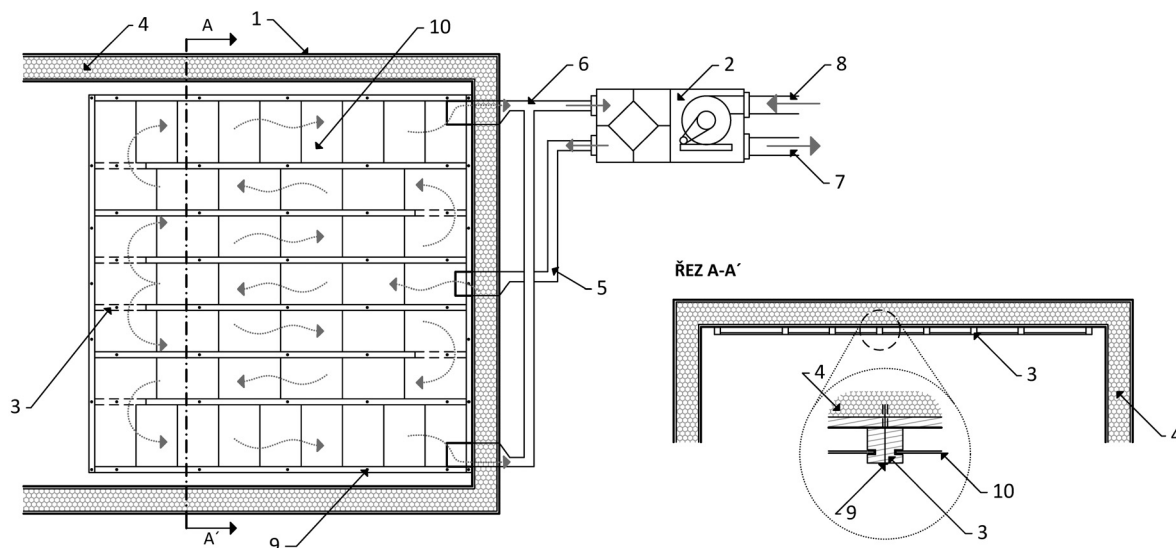
- systém pracuje s minimálními provozními náklady pouze v době, kdy jsou vysoké denní a nízké noční teploty (max. 15 °C), kdy postačuje k aktivaci akumulárního jádra pouze intenzivní větrání mezery v nočních hodinách;
- dvojitě tepelně akumulární konstrukce ale nepřinesly předpokládaný efekt, nadto se jedná o relativně komplikované řešení.;
- pro využití potenciálu instalovaných tepelně akumulárních schopností PCMs je třeba uvažovat s jiným tepelně více vodivým zapouzdřením.

### ***Tepelně akumuláční podhled aktivovaný větranou vzduchovou mezerou***

Po testování dvojítych akumuláčních stěn byl vyvinut jednodušší systém, využívající průmyslově vyráběných zapouzdřených PCMs v hliníkových panelech. Na Obr. 4.14 je uvedeno půdorysné uspořádání stropního podhledu a řez skladbou podhledu.

Vzduch proudí v nočních hodinách v mezeře mezi akumuláční hmotou umístěnou v hliníkových panelech a spodním lícem stropní konstrukce. Větrací kanály jsou vymezeny distančními prvky, které slouží zároveň pro upevnění hliníkových panelů s akumuláční látkou. Distanční prvky jsou opatřeny zářezem pro upevnění akumuláčních panelů. Mezi interiérem a větraným meziprostorem jsou umístěny hliníkové panely, ve kterých je uzavřeno akumuláční médium DELTA®-COOL 24. Směr proudění vzduchu v mezeře je znázorněn šipkami. Akumulační médium je umístěno v hliníkových kontejnerech, čímž je zajištěn rychlý přenos tepla z interiéru k akumuláčnímu médiu. Je také možné v zimním a přechodném období použít obrácený systém, kdy je ze vzduchového kolektoru přiváděn teplý vzduch do větrané mezery, zde se akumuluje teplo a následně sálá do interiéru.

Vstupní vzduch může být upravován vzduchotechnickou jednotkou, která umožňuje volit rychlost proudění vzduchu a teplotu přiváděného vzduchu. Přívod vzduchu je potrubím vyústěným uprostřed podhledu, odvod vzduchu zpět do jednotky pak potrubím zaústěným po stranách podhledu.



#### **Legenda**

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1 obvodová konstrukce z lehkých hmot   | 2 vzduchotechnická jednotka      |
| 3 distanční dřevěné prvky              | 4 tepelná izolace                |
| 5 přívodní potrubí                     | 6 odvodní potrubí                |
| 7 odvod vzduchu z jednotky VZT         | 8 přívod vzduchu do jednotky VZT |
| 9 vruty pro upevnění distančních prvků | 10 hliníkový akumuláční panel    |

Obr.4.14 Půdorysné schéma a řez tepelně akumuláčním podhledem (archiv autora)

Z výsledků provedených experimentálních měření vyplynulo, že:

- tepelně akumuláční podhled nebyl schopen zajistit požadovaný stav teplotního mikroklimatu při větrání vzduchové mezery venkovním vzduchem bez jeho chlazení;
- v případě chlazení přívodní vzduchu na teplotu 17 °C se ale výsledné teploty kulového teploměru v referenční místnosti pohybovaly v požadovaném rozmezí.

## 5 ZÁVĚR

Předložená práce pojímá problematiku akumulace tepla při změnách skupenství v širším rozsahu a nesoustředí se jen na aplikace ve stavebních konstrukcích. V rámci několikaletého výzkumu a vývoje se podařilo sestavit tým odborníků, který se zabývá testováním vlastních akumulčních médií v laboratoři, návrhem a matematickým modelováním integrace PCMs ve stavebních konstrukcích a realizací navržených konceptů integrace PCMs v testovacích místnostech. Díky projektu COST Action TU0802 se podařilo navázat mezinárodní spolupráci napříč různými pracovišti v Evropské unii.

Laboratorní měření zahrnovala především testování komerčních PCMs, u kterých byl předpoklad použití ve stavebních konstrukcích. Byla prokázána závislost onsetových teplot a teplot peaku na rychlosti ohřevu/chlazení. Z toho vyplývá důležitost uvádět při prezentaci charakteristik PCMs nejen způsob jejich stanovení, ale i podmínky testů. Na základě výsledků testů byli vybráni vhodní kandidáti z řad komerčních PCMs pro praktické aplikace. Testy prokázaly problematické chování PCMs na bázi hydrátů solí, protože u nich dochází k většímu přechlazování v porovnání s PCMs na organické bázi. Bohužel se ukazuje, že cena komerčních PCMs vyráběných v Evropské unii neklesá, a proto je nutné se zaměřit i na jiné světové výrobce. Z tohoto důvodu probíhá v současné době intenzivní testování vzorků PCMs od světových výrobců. Výzkum v této oblasti bude na pracovištích VUT dále pokračovat.

V roce 2007 se podařilo realizovat výstavbu podkrovních testovacích místností na Ústavu pozemního stavitelství. Místnosti byly vybaveny vzduchotechnickým zařízením pro řízenou výměnu vzduchu a zařízením pro přípravu vody pro chladicí vodní okruh. Testovací místnosti byly také vybaveny potřebnou technikou pro komparativní měření a monitoring sledovaných veličin. Je tedy zajištěna infrastruktura potřebná pro evaluaci efektivity akumulace tepla s využitím PCMs a bude možné se této činnosti věnovat i v budoucnu.

Mezi lety 2009 až 2012 byly realizovány a testovány různé způsoby integrace PCMs ve stavebních konstrukcích. PCMs byly integrovány na povrchu obalových konstrukcí, ve dvojitých stěnách a podhledech a v tepelně akumulční omítce s rozptýlenými peletkami s PCMs. Výsledky několika sérií experimentů ukazují, že problém nespočívá jen v návrhu vhodné integrace PCMs, ale zejména ve způsobu jejich aktivace. V případě, kdy se pro aktivaci využívá větracího vzduchu, je nezbytné jeho chlazení v nočních hodinách pro dosažení efektu pasivního chlazení interiéru v denních hodinách. Dvojitě tepelně akumulční konstrukce nepřinesly předpokládaný efekt, nadto se jedná o relativně komplikované řešení. Bylo proto přistoupeno k realizaci tepelně akumulčních vrstev v kombinaci s kapilárními rohožemi, které při vhodném provozním režimu dokáží zajistit požadovaný stav vnitřního tepelného mikroklimatu nejen v letním, ale i zimním období.

Vzhledem k vybudované infrastruktuře a sestavenému týmu odborných pracovníků ze třech fakult VUT v Brně, je možné uvažovat s pokračováním výzkumu a vývoje v oblasti využití PCMs. Do současné doby byl naším výzkumným týmem vyhodnocován především přínos PCMs na stabilitu vnitřního tepelného mikroklimatu a možnosti integrace PCMs ve stavebních konstrukcích. V dalším kroku bude nezbytné provést také ekonomické vyhodnocení. Nejedná se však jen o rozvoj aplikací PCMs přímo ve stavebních konstrukcích, ale zejména o aplikace ve spojení s technickým zařízením budov. Právě zde se naskýtá velký prostor pro výzkum a vývoj, protože s masivnějším využíváním energie slunečního záření, např. pro ohřev teplé vody, roste požadavek na ekonomicky výhodnou akumulaci tepla.

Implementace výsledků výzkumu a vývoje je a bude silně závislá na cenové politice dodavatelů PCMs. Bez zvýšení konkurence mezi výrobci a snížení cen akumulčních médií pravděpodobně není reálné očekávat masivnější uplatnění těchto akumulátorů tepla ve stavbách v České republice. Pro projektanty bude nezbytné vypracovat podklady použitelné pro praktický návrh akumulátorů tepla. Pro realizační firmy pak bude zapotřebí zajistit certifikaci navržených výrobků pro jejich použití ve stavbách v České republice.

## 6 LITERATURA

1. CABEZA, L. F.; ROCA, J.; NOQUES, M.; MEHLING, H.; HIEBLER, S. Immersion corrosion tests on metal-salt hydrate pairs used for latent heat storage in the 48 to 58 °C temperature range. *Materials and Corrosion*, 2002, vol. 53, no. 2002, pp. 902-907. ISSN: 1521-4176.
2. CABEZA, L. F.; CASTELLÓN, C., NOGUÉS M.I; MEDRANO M.; LEPPERS, R.; ZUBILLEGA, O. Use of microencapsulated PCM in concrete wall for energy saving. *Energy and Buildings*, February 2007, vol. 39, no. 2, pp. 113-119. ISSN 0378-7788.
3. CARBONARI, A.; DE GRASSI, M.; DI PERNA, C.; PRINCIPI, P. Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls. *Energy and Buildings*, May 2006, vol. 38, no. 5, pp. 472-483. ISSN 0378-7788.
4. CASTELLÓN, C.; MARTORELL, I.; CABEZA, L.F.; FERNÁNDEZ, A. I.; MANICH, A.M. Compatibility of plastic with phase change materials (PCM). *International Journal of Energy Research*, July 2011, vol. 35, no. 9, pp. 765-771. ISSN 1099-114X.
5. DELGADO, M.; LÁZARO, A.; MAZO, J.; ZALBA, B. Review on phase change materials emulsions and microencapsulated phase change material slurries: Materials, heat transfer studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, January 2012, vol. 16. no. 1, pp. 253-273. ISSN 1364-0321.
6. DİNÇER, I.; ROSEN, M. A. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2002. 579 p. ISBN 0-471-49573-5.
7. DOBKOWSKI, Z. Thermal analysis techniques for characterization of polymer materials. *Polymer Degradation and Stability*, March 2006, vol. 91, no. 3, pp. 488-493. ISSN 0141-3910.
8. DUTIL, Y.; ROUSSE, D. R.; SALAH, N., B.; LASSUE, S.; ZALEWSKI, L. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. January 2011, vol. 15, no. 1, pp. 112-130. ISSN 1364-0321.
9. FARID, M. M.; KHUDHAIR, A. M.; RAZAK, S. A. K.; AL-HAJJAR, S. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, June 2004, vol. 45, no. 9, pp. 1597-1615. ISSN 0196-8904 .
10. GARG, H.P.; MULLICK, S.C.; BHARGAVA, A.K. *Solar Thermal Energy Storage*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1985. 642 p. ISBN 90-277-1930-6.
11. HAUSSMANN, T.; SCHOSSIG, Peter; GROSSMANN, L. Experience with lowex PCM chilled ceilings in demonstration buildings. In *Proceedings of the 8th Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning*, Karlsruhe, 2009. Ed. Michael Kaufeld. Karlsruhe, 2009, pp.145-154. ISBN 978-2-913149-69-4.
12. HEIM, D.; CLARKE, J. A. Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r. *Energy and Buildings*, August 2004, vol. 36, no. 8. ISSN 0378-7788.
13. HEIM, D. Isothermal storage of solar energy in building construction. *Renewable Energy*, April 2010, vol. 35, no. 4, pp. 788-796. ISSN 0960-1481.
14. HOPPE, S. High purity Paraffin from renewable resources for PCM. In *Proceedings of the 10th Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning*. Kobe, 2012, pp. 289-296. ISBN 978-2-913149-91-5.
15. HUANG, L.; AI M.; YANG, L. Prediction of melting organic phase change materials (PCMs) for energy storage with simple low eutectic systems. *Advanced Materials and Research*, January 2010, vol. 96, no. 2010, pp. 277-281. ISSN 1662-8985.
16. KHALIFA, A. J. N.; ABBAS E. F. A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating. *Energy and Buildings*, April 2009, vol. 41, no. 4, pp. 407-415. ISSN 0378-7788.

17. KOSSECKA, E; KOŚNY, J. Thermal balance of a wall with PCM-enhanced thermal insulation. In *Proceedings of the 1st Central european symposium on building physics, 13-15 September 2010, Cracow-Lodz, Poland*. Ed. M. Jabłoński. Cracow, 2010, pp. 265-271. ISBN 978-83-7283-367-9.
18. KUZNIK, F.; DAVID, D.; JOHANNES, K.; ROUX, J-J. A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. January 2011, vol. 15, no. 1, pp. 379-391. ISSN 1364-0321.
19. LANE, G. A. *Solar Heat Storage: Latent heat Materials. Volume I: Background and Scientific Principles*. Boca Raton: CRC Press, Inc., 1983. 248 p. ISBN 978-0849365850.
20. LANE, G. A. *Solar Heat Storage: Latent heat Materials. Volume II: Technology*. Boca Raton: CRC Press, Inc., 1986. 248 p. ISBN 978-0849365867.
21. MEHLING, H.; CABEZA, L. F. *Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 308 p. ISBN 978-3-540-68556-2.
22. MUHIEDDINE, M.; CANOT, É.; MARCH, R. Various Approaches for Solving Problems in Heat Conduction with Phase Change. *IJFV International Journal On Finite Volumes*, 2009, vol. 9, no. 6, pp. 1-6. ISSN 1634-0655.
23. NOMURA, T.; OKINAKA, N.; AKIYAMA, T. Impregnation of porous material with phase change material for thermal energy storage. *Materials Chemistry and Physics*, June 2009, vol. 115, no. 2-3. ISSN 0254-0584.
24. REGIN, Felix A.; SOLANKI, S.C.; SAINI, J.S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, December 2008, vol. 12, no. 9, pp. 2438-2458. ISSN 1364-0321.
25. SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, February 2009, vol.13, no. 2, pp. 318-345. ISSN 1364-0321.
26. SHUKLA, A.; BUDDHI, D. SAWHNEY, R. L. Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials. *Renewable Energy*, December 2008, vol. 33, no. 12, pp. 2606-2614. ISSN 0960-1481.
27. SITTISART, P.; FARID, M. M. Fire retardants for phase change materials. *Applied Energy*, September 2011, vol. 88, no. 9, pp. 3140-3145. ISSN 0306-2619.
28. TYAGI, V. V.; KAUSHIK, S.C.; TYAGI, S.K.; AKIYAMA, T. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, February 2011, vol. 15, no. 2, pp. 1373-1391. ISSN 1364-0321.
29. SILVA, T.; VICENTE, R.; SOARES, N.; FERREIRA, V. Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution. *Energy and Buildings*, June 2012, vol. 49, pp. 235-245. ISSN 0378-7788.
30. ZALBA, B.; MARÍN, J. M.; CABEZA, L. F.; MEHLING, H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, February 2003, vol. 23, no. 3, pp. 251-283. ISSN 1359-4311.
31. ZHANG, Y.; ZHOU, G.; LIN, K.; ZHANG, Q.; DI, H. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, June 2007, vol. 42, no. 6, pp. 2197-2209. ISSN 0360-1323.
32. ZHANG, Y.; DING, J.; WANG, X.; YANG, R.; LIN, K. Influence of additives on thermal conductivity of shape-stabilized phase change material. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, July 2006, vol. 90, no. 11, pp. 1692-1702. ISSN 0927-0248.

## 7 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA

Články v odborných periodících s impakt faktorem, které jsou obsaženy v databázi Web of Science společnosti Thomson Reuters (J<sub>imp</sub>):

1. VOELKER, C.; KORNADT, O.; OSTRÝ, M. Temperature reduction due to the application of phase change materials. *Energy and Buildings*, 2008, vol. 40, no.5, pp.937-944. ISSN 0378-7788.
2. KLIMEŠ, L.; CHARVÁT, P.; OSTRÝ, M. Challenges in Computer Modeling of Phase Change Materials. *Materiali in tehnologije*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 335-338. ISSN:1580-2949
3. CHARVÁT, P.; MAUDER, T.; OSTRÝ, M. Simulation of latent heat thermal storage integrated with room structures. *Materiali in tehnologije*, 2012, vol. 46, no. 3, pp. 239-242. ISSN: 1580- 2949.
4. OSTRÝ, M.; PŘIKRYL, R.; CHARVÁT, P. MLČOCH, T.; BAKAJOVÁ, B. Laboratory assessment of microencapsulated phase-change materials. *Materiali in tehnologije*, 2012, vol. 46, no. 5, pp. 531-534. ISSN:1580- 2949.
5. OSTRÁ, M.; BEKLOVÁ, M.; STOUPALOVÁ, M.; OSTRÝ, M., Ecotoxicity evaluation in municipal and food industry wastewaters. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, vol. 18, no. 9a, pp. 1674-1680. ISSN 1018-4619.
6. OSTRÝ, M.; PŘIKRYL, R.; CHARVÁT, P. Characterization of selected phase change materials for proposed use in building applications. Přijato k publikování v *Materiali in tehnologije*, 2013, vol. 47, no. 2. ISSN: 1580- 2949.

Článek v odborném periodiku, který je obsažen ve světově uznávané databázi SCOPUS (J<sub>neimp</sub>):

1. FIŠAROVÁ, Z.; OSTRÝ, M.; ODEHNAL, A. Landing block to reduce transmission of vibration and impact noise from staircases and elevators in buildings. *Akustika*, 2010, vol. 14, no. 09, pp. 23-31. ISSN 1801- 9064

Článek v odborném periodiku, které je zařazeno v Seznamu neimpaktovaných recenzovaných periodik vydávaných v České republice (J<sub>rec</sub>):

1. OSTRÝ, M. Potenciál využití materiálů s fázovou změnou v lehkých konstrukcích. *Vytápění, větrání, instalace*, 2007, vol. 16, no. 3, pp.155-157. ISSN 1210-1389.
2. OSTRÝ, M.; NOVOTNÝ, M. Poruchy obalových konstrukcí podkrovních místností. *Soudní inženýrství*, 2009. vol. 20, no. 4. ISSN 1211-443X.
3. OSTRÝ, M. Snížení tepelné zátěže interiéru budov s využitím akumulace latentního tepla. *Vytápění, větrání, instalace*, 2009, vol. 18, no. 5, pp. 231- 235. ISSN 1210-1389.
4. FIŠAROVÁ, Z.; OSTRÝ, M.; ODEHNAL, A., Snížení přenosu vibrací a kročejového hluku pomocí podestových bloků. *Časopis stavebnictví*, 2010, vol. 4, no. 9, pp. 55-58. ISSN 1802-2030.
5. SEDLÁK, J.; OSTRÝ, M. Klimatická hodinová data pro posuzování energetické potřeby pro vytápění a chlazení. *Vytápění, větrání, instalace*, 2010, vol. 19, no. 3, pp. 148-152. ISSN 1210-1389.
6. OSTRÝ, M.; NOVOTNÝ, M. Kvalita obalových konstrukcí podstřešních prostor v praxi. *Časopis stavebnictví*, 2010, vol. 4, no.3, pp. 28-32. ISSN 1802-2030.
7. BRZOŇ, R.; OSTRÝ, M. Porovnání nejběžněji dostupných značek ISO-nosníků na českém trhu. *Časopis stavebnictví*, 2011, vol. 5, no. 9, pp. 48-53. ISSN 1802-2030.
8. BRZOŇ, R.; OSTRÝ, M. Snížení spotřeby primární energie v budovách s využitím ISO nosníků a akumulace tepla. *Konstrukce*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 25-31. ISSN: 1213- 8762.
9. OSTRÝ, M.; BRZOŇ, R.; KLUBAL, T. Pasivní chlazení v letním období s využitím akumulace tepla při změně skupenství. *TZB- info*, 2012, vol. 2012, no. 4,

10. BRZOŇ, R.; OSTRÝ, M.; KLUBAL, T. Tepelně technické posouzení ISO- nosníků. *Stavební obzor*, 2012, vol. 21, no. 3, s. 72-77. ISSN: 1210- 4027.

Publikace ve sborníku z mezinárodní konference vedené v databázi „Web of Knowledge“ (D):

1. OSTRÝ, M.; CHARVÁT, P. The influence of passive cooling on energy saving. In *Proceedings of the Central Europe towards Sustainable Building*, June, 2010. Prague: Grada Publishing for Department of Building Structures and CIDEAS Research Centre, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, c2010, p. 327-330. ISBN 978-80-247-3624-2
2. OSTRÝ, M.; BEČKOVSKÝ, D. Influence of Panels with Phase Change Materials on the Thermal Stability of Attic Spaces. In *Proceedings of the 8th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning*, June 3-5, 2009, Karlsruhe: International Institute of Refrigeration, c2009, p. 163-169. ISBN 978-2-913149-69-4

Články v zahraničních časopisech bez IF

1. OSTRÝ, M. Utilization of latent heat storage and applications in building structures. *Sovremennyj Naučnyj věstnik*, 2009, vol. 67, no. 11, pp. 65-72. ISSN 1561-6886.
2. OSTRÝ, M. Phase change materials for passive cooling of attic spaces. *Materials, Methods & Technologies*, 2009, vol. 3, no.1, pp. 264-271. ISSN 1313-2539.
3. OSTRÝ, M.; BEČKOVSKÝ, D. Estabilidad térmica en espacios de áticos influencia de paneles con materiales de cambio de fase PCM). *Frio-calor aire acondicionado*, 2010, vol. 37, no. 423, pp. 54-58. ISSN 0210-0665.
4. OSTRÝ, M.; CHARVÁT, P. Etude sur l'efficacité du refroidissement passif par matériaux à changement de phase dans les immeubles à structure légère. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration*, 2010, vol. 110, no. 6, pp. 27-32. ISSN 0020-6970.
5. OSTRÝ, M.; BEČKOVSKÝ, D. Structures with incorporated phase change materials. *Czasopismo techniczne - Budownictwo*, 2010, vol.107, no. 4, pp.171-176. ISSN 0011-4561.
6. OSTRÝ, M.; BEČKOVSKÝ, D.; CHARVÁT, P. Potential of passive cooling for office buildings. *KSI Transactions on Knowledge Society*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 114-115. ISSN 1313-4787.
7. BEČKOVSKÝ, D.; OSTRÝ, M.; KALÁBOVÁ, T. Thermal stability of attic spaces with integrated PCM in light building constructions during the climatic year. *KSI Transactions on Knowledge Society*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 116-119. ISSN 1313-4787.

Příspěvek ve sborníku národního, mezinárodního kongresu, sympozia, vědecké konference

1. OSTRÝ, M.; BEČKOVSKÝ, D. Thermal stability in experimental attic rooms using phase change materials. In *Proceedings of IX international scientific-technical seminar Energodom 2008*, Krakow: Politechnika Krakowska, 2008, p. 339-342.
2. OSTRÝ, M.; CHARVÁT, P. The investigation of the efficiency of passive cooling by phase change materials in light-weight buildings. In *Proceedings 9th IIR Conference on Phase-Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning*. Refrigeration science and technology, Sofia: International institute of refrigeration, 2010, p.161-166. ISBN 978-80-7399-931- 5.
3. OSTRÝ, M.; CHARVÁT, P. Latent heat cold storage in building structures. In *Proceedings of Thermal and Environmental Issues in Energy Systems*. Pisa, Italy: Edizioni ETS, 2010, p. 83-86. ISBN 978-884672659- 9.
4. OSTRÝ, M.; CHARVÁT, P. Thermal comfort in the rooms with integrated phase change materials. In *Proceedings The 23rd IIR International Congress of Refrigeration*. Praha: International Institute of Refrigeration, 2011, p. 548-552. ISBN 978-2-913149-89- 2.



## ABSTRACT

Habilitation thesis deals with the heat storage research and development during the phase changes of matter using PCMs (Phase Change Materials). It is based on the long-term requirement to lower the operating energy consumption of buildings. The work is focused on using heat storage in envelope structures for increasing the thermal stability of rooms especially during summer.

The first part of the thesis deals with the current state of knowledge in the heat storage field which comes out of the research of home but especially foreign literary sources and information from the experts on the given subject. This part of the work contains a complete survey of the actual heat storage, storage media and the ways of integration in building structures. The description of the current state is supplemented with legislative requirements valid in the Czech Republic.

The theoretical analysis is focused on the ways of simulating heat storage during phase changes using PCMs. The analysis is supplemented with information about climatic data for the area of the Czech Republic which are necessary for mathematical simulations. The experimental analysis is focused both on the actual storage media and on practical applications of PCMs in building structures. The selected PCMs usable for applications in building structures were put to laboratory tests in order to find out the range of phase change temperatures and the amount of latent heat because these characteristics influence the heat storage effectiveness. The experimental analysis of PCMs' applications in building structures is based on the measurement results in test rooms in the Institute of Building Structures at FCE BUT. This part of the thesis contains suggestions of integrations of commercially supplied PCMs and results of comparative measurements. PCMs encapsulated in the form of aluminium containers, hollow boards and micro pellets scattered in cement plaster were integrated in envelope structures in an experimental attic room. Various modes of ventilation of the room interior were tested in case of aluminium containers fixed on the walls of the room. Regeneration of PCMs by a separate circuit of ventilation air was tested with double walls and a double ceiling. Capillary tubes with a circuit of cooling water were integrated into the plaster with scattered micro pellets.

The results of the theoretical and experimental analysis confirmed the PCMs' potential to increase the thermal stability of rooms during summer. The thesis points out the problem of the regeneration of the storage medium, whose solution was suggested and tested within the research and development at FCE BUT.