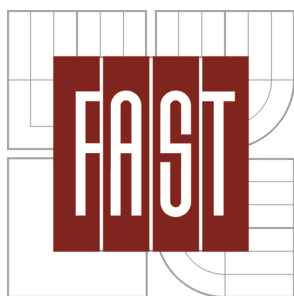


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

INTEGRACE MATERIÁLŮ S FÁZOVOU ZMĚNOU VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH

INTEGRATION OF PHASE CHANGE MATERIALS IN BUILDING STRUCTURES

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DISSERTATION

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ING. TOMÁŠ KLUBAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. MILAN OSTRÝ, PH.D.

BRNO 2016

KLÍČOVÁ SLOVA

Materiál s fázovou změnou, akumulace latentního tepla, sádrová omítka, kapilární rohože, vnitřní prostředí.

KEY WORDS

Phase change material (PCM), Latent heat storage, Gypsum plaster, Capillary tubes, Indoor environment.

MÍSTO ULOŽENÍ RUKOPISU DISERTAČNÍ PRÁCE

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

© Tomáš Klubal, 2016

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	6
2.1 Akumulace tepla	6
2.2 Materiály s fázovou změnou	8
2.3 Způsob zabudování pcms do stavebních konstrukcí.....	10
2.4 Aktivace pcms.....	11
3 CÍLE PRÁCE	12
4 VÝSLEDKY A MĚŘENÍ	12
4.1 Termická analýza použitých materiálů	12
4.2 Termický inkubátor.....	14
4.3 Měření reálných objektů	17
5 ZÁVĚR.....	23
6 LITERATURA	24
7 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA.....	25
PŘEDSTAVENÍ AUTORA	27
ABSTRACT	29

1 ÚVOD

Vývoj cen a spotřeby energie vykazuje v dlouhodobém horizontu neustálý růst. Pro běžnou českou domácnost vzrostla například cena elektřiny mezi roky 2001 až 2011 o 229 % (Bartoš & Strejček, 2012). Energetická provozní náročnost budovy je složena především z vytápění, chlazení, větrání, osvětlení a ohřevu teplé vody. Jedním z důsledků tohoto vývoje je důraz na snížení nákladů na provoz objektů v zimním období. Toho se dosahuje zateplováním obálky budovy, optimalizací výměny vzduchu a návrhu sofistikovaných otopných soustav. Výsledkem je zajištění tepelné pohody při snížení provozní energetické náročnosti.

V letním období naopak dochází často k přehřívání interiérů budov, především u staveb z lehkých materiálů nebo u objektů s vysokým podílem transparentních fasádních prvků. Tepelná stabilita vnitřního prostředí v letním období převážně závisí na tepelných ziscích ze slunečního záření, které do interiéru proniká transparentní částí výplní otvorů. Je možné ji z velké míry ovlivnit orientací objektu ke světovým stranám, racionálním prosklením na jižní a západní straně a návrhem vhodných stínících prostředků. Při projektování budov jsou však často tyto principy návrhu opomíjeny a k zajištění letní tepelné stability se používají klimatizační zařízení. Tato zařízení jsou však z ekonomického a environmentálního hlediska nevhodná.

Z výše naznačených důvodů je jedním z opatření proti přehřívání, na které by měla být zaměřena pozornost, rozvoj a používání metod pasivního chlazení (Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU: o energetické náročnosti budov, 2010). Sálavé či pasivní chlazení může být využito jako doplněk nebo v ideálním případě jako náhrada klimatizace.

Disertační práce se zabývá možností odvodu nadměrné tepelné zátěže v letním období z vnitřního prostředí staveb s využitím tepelně aktivovaných prvků obsahujících materiál s fázovou změnou (Phase Change Materials = PCMs). Tyto materiály jsou schopny při teplotách běžně dosahovaných v interiéru budov akumulovat kromě citelného tepla také teplo latentní. Po dosažení teploty tání probíhá v látce fázová změna, při které je akumulována energie ve formě vázaného tepla. Pro opakování tohoto děje je nutné akumulované teplo ve vhodném okamžiku odvést, k čemuž je potřeba dosáhnout teploty krystalizace. Pro aktivaci PCMs je výhodné noční období, kdy klesne teplota. Takto fungující systém, který nevyužívá pro svůj provoz neobnovitelných zdrojů energie, se zpravidla nazývá pasivní (Garg, Mullick, & Bhargava, 1985). Často je však nutné přirozenou konvekci vzduchu doplnit technickým systémem pro ventilaci nebo chlazení vzduchu či jiného teplonosného média.

Cílem experimentálního zkoumání bylo najít vhodné komerčně dodávané materiály s fázovou změnou pro instalaci v interiéru a ověřit jejich vliv na vnitřní mikroklima v místnosti v letním období. S aplikací PCMs do struktury objektu se pojí další otázky, a to: vhodné umístění v rámci stavebních konstrukcí, určení

množství použitého materiálu a v neposlední řadě způsob aktivace pro možnost opakovaného využití.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

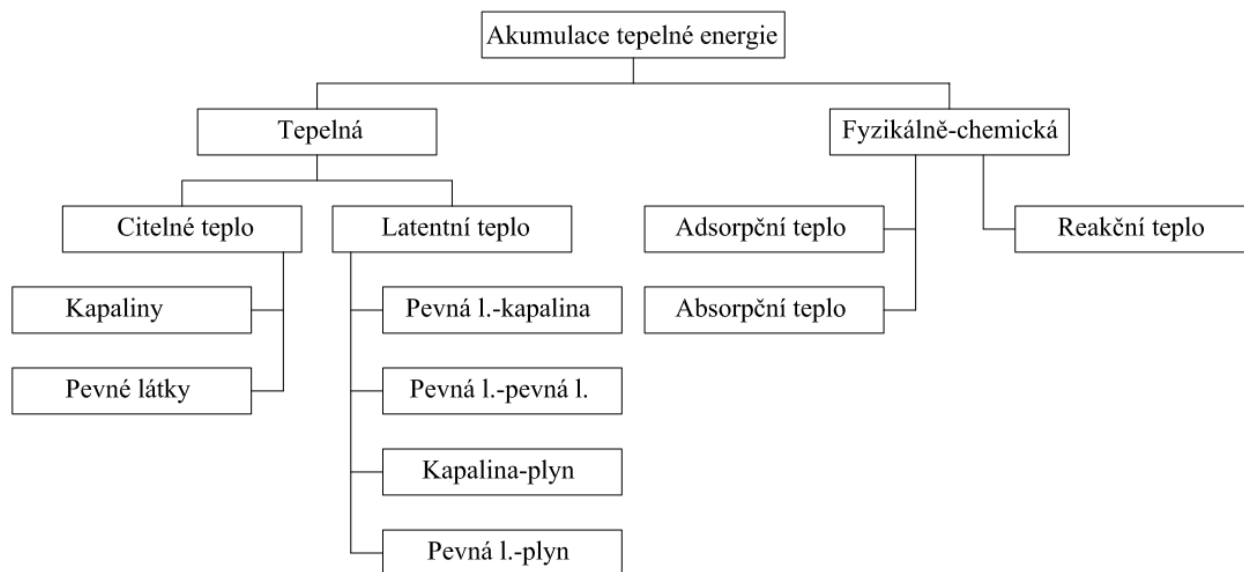
2.1 AKUMULACE TEPLA

Akumulace tepla je jedním ze způsobů ke zlepšení energetické účinnosti budov. Pomocí akumulace tepla je možné převést energii z období, kdy je jí přebytek do období s nedostatkem (den/noc, léto/zima). Akumulaci je možné využít jak pro vytápění, tak reversibilně i pro chlazení vnitřního prostředí budov.

Materiály jsou schopny přijímat teplo nebo chlad po určitou dobu a poté musí být schopny tuto tepelnou energii vrátit zpět do prostředí.

V literatuře se setkáváme s několika možnými způsoby akumulace tepla (Obr. 1):

- akumulace citelného tepla
- akumulace latentního tepla
- akumulace sorpčního tepla
- akumulace termochemickými procesy



Obr. 1 Způsoby akumulace tepelné energie

Akumulace citelného tepla je jednoznačně nejběžnější pro akumulaci tepla. Typickým příkladem je akumulace tepla ve vodě používaná pro vytápění nebo přípravu teplé vody v každé domácnosti. Stále více bývá v současnosti využívána i akumulace tepla v podloží (Mehling & Cabeza, 2008). Jsou využívány šterkové zásobníky, kde teplonosným médiem je proudící vzduch.

$$Q = \int_{T_2}^{T_1} mcdT = mc(T_1 - T_2) \quad \text{R. 1}$$

kde	Q	množství akumulovaného citelného tepla [J]
	m	hmotnost tepelně akumulčního média [kg]
	c	měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	ΔT	změna teploty [K] mezi T_1 (počáteční teplotou) [K] a T_2 (konečnou teplotou) [K]

Historická výstavba, především církevní stavby (kostely, katedrály), ale i běžná městská a venkovská výstavba byla založena na masivních konstrukčních prvcích. Kromě malých stavebních otvorů v obvodovém plášti, které omezovaly nadměrnou tepelnou zátěž, mají masivní konstrukce, dříve kamenné, v současné výstavbě cihelné nebo betonové, poměrně velkou tepelnou kapacitu, která je dána jejich hmotností. Tyto materiály jsou tak schopny akumulovat citelné teplo a tím napomáhat k udržení letní tepelné stability v místnosti. Nicméně tyto stavby trpí vysokými tepelnými ztrátami v zimním období, což má za následek značný tepelný diskomfort pro jejich uživatele.

V posledních letech narůstá počet staveb z lehkých materiálů, jako jsou dřevostavby, podkroví a moderních kancelářských budov, které mají vysokou míru prosklení fasády. Z tohoto důvodu mají i vysokou míru slunečních zisků, které se v letním období projevují jako tepelná zátěž. Jestliže nelze navyšovat akumulční schopnost zvyšováním hmotnosti konstrukce, je u těchto objektů vhodné navrhovat akumulční prvky na principu **akumulace latentního tepla**.

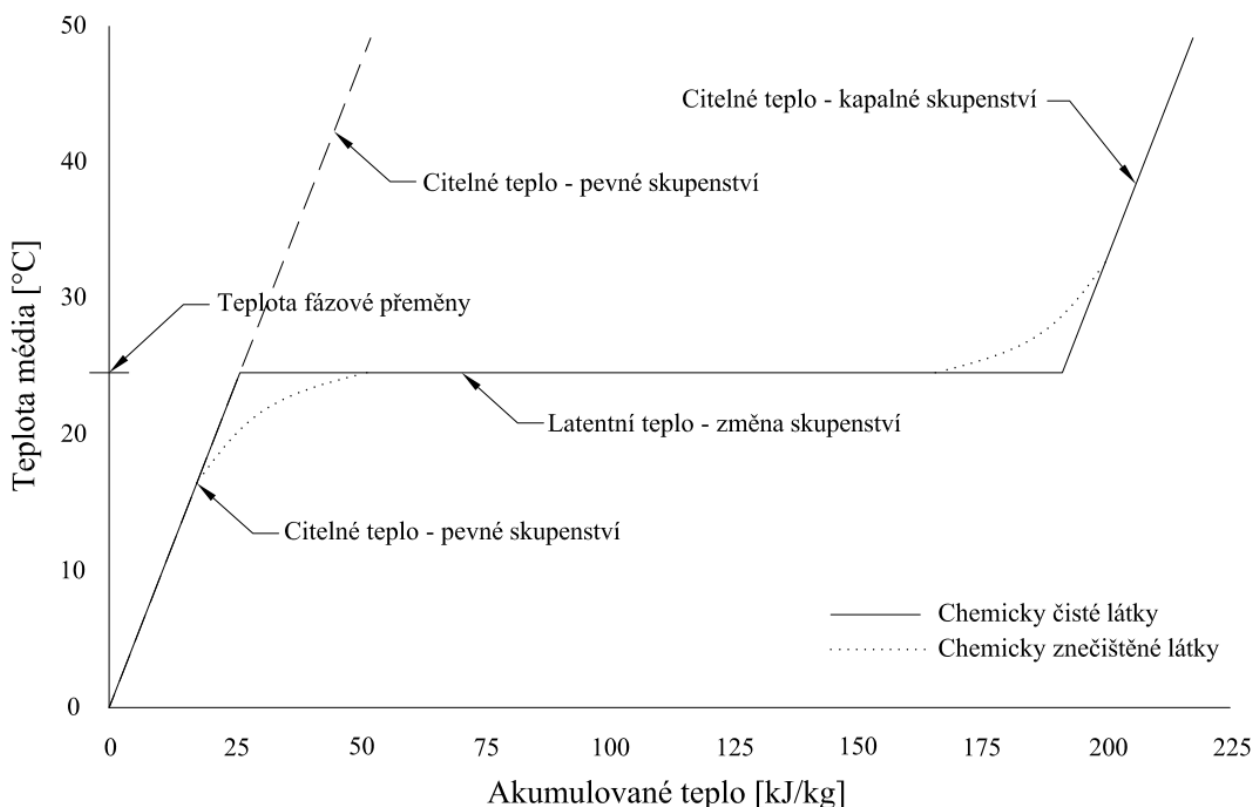
$$Q = \int_{T_1}^{T_m} mc_p dT + ml_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_2} mc_p dT$$

$$= m[l_m \Delta h_m + c_{ps}(T_m - T_1) + c_{pl}(T_2 - T_m)] \quad \text{R. 2}$$

kde	Q	množství akumulovaného tepla [J]
	m	hmotnost tepelně akumulčního média [kg]
	c	měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	T_1	počáteční teplota [K]
	T_2	konečná teplota [K]
	T_m	teplota tání [K]
	c_{ps}	průměrný součinitel tepelné kapacity mezi teplotami T_1 a T_m - pevná fáze [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
	c_{pl}	průměrný součinitel tepelné kapacity mezi teplotami T_m a T_2 - pevná fáze [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

l_m skupenské teplo tání na jednotku hmotnosti [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
 Δh_m hmotnostní podíl látky účastnící se fázové změny [-]

Tento způsob akumulace probíhá u materiálů s fázovou změnou (PCMs = Phase Change Materials). Akumulace tepla při použití materiálů s fázovou změnou je odlišná oproti klasickým stavebním materiálům v tom, že pro akumulaci se využívá mimo prostého ohřevu látky také vratných skupenských změn (Obr. 2). Díky akumulaci latentního tepla je možné akumulovat značné množství tepla na jednotku hmotnosti nebo objemu v porovnání s běžnými stavebními materiály.



Obr. 2 Porovnání průběhu akumulace citelného a latentního tepla

Ve stavebnictví se využívá především přechod z pevného stavu na kapalinu a naopak. Přechod mezi kapalnou a pevnou fází se nazývá tání a tuhnutí. Tání a tuhnutí se vyznačují malými objemovými změnami, obvykle méně než 10 % (Mehling & Cabeza, 2008)

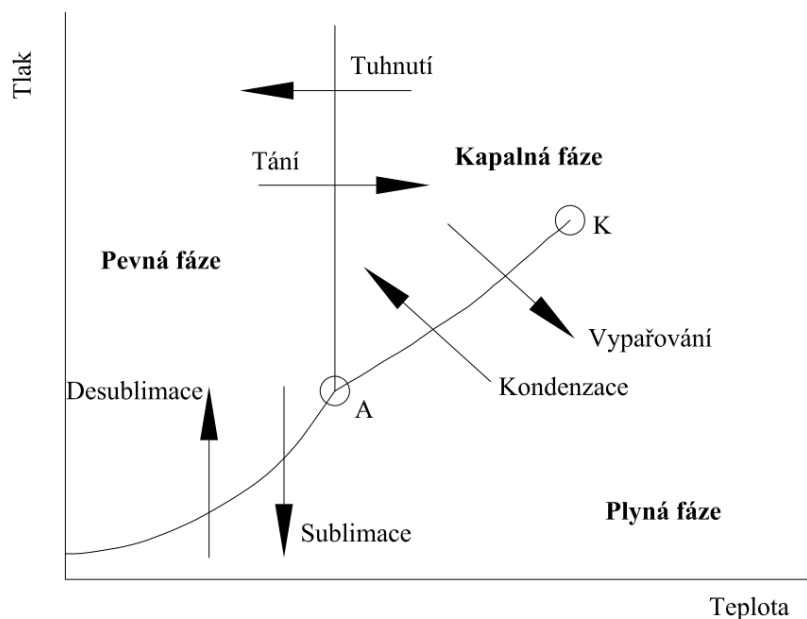
2.2 MATERIÁLY S FÁZOVOU ZMĚNOU

Látky mohou existovat v různých skupenstvích. Typickým příkladem je pevný, kapalný a plynný stav. Přechody mezi jednotlivými fázemi je výhodné sledovat pomocí makroskopických projevů a sledováním teploty, tlaku a objemu. V určitém intervalu je lze měnit, aniž by nastala fázová změna. Při změně za určité hranice

dochází k fázové změně (Schauer, 1998). Je možné se setkat se třemi druhy skupenských přechodů:

- tání - je přechod z pevné fáze na kapalnou, opačný jev je tuhnutí,
- vypařování - je přechod z kapaliny na plyn, opačně plyn kondenzuje na kapalinu,
- sublimace – je přímý přechod z pevné látky na plyn a naopak je desublimace.

Fázový diagram (Obr. 3) charakterizuje vzájemné závislosti dvou stavových veličin. Po dobu fázového přechodu existuje látka dle Gibbsova fázového pravidla současně ve dvou fázích. Tato koexistence je stav na mezních křivkách. Vymezené oblasti náleží vždy jednomu stavu. Na mezní křivce vypařování existuje kritický bod K. Nad touto teplotou nelze plyn již zkapalnit ani při velkém stlačení. Místo koexistence tří fází se nazývá trojný bod A, který vzniká při zcela určitém tlaku a teplotě pro každou látku (Schauer, 1998).

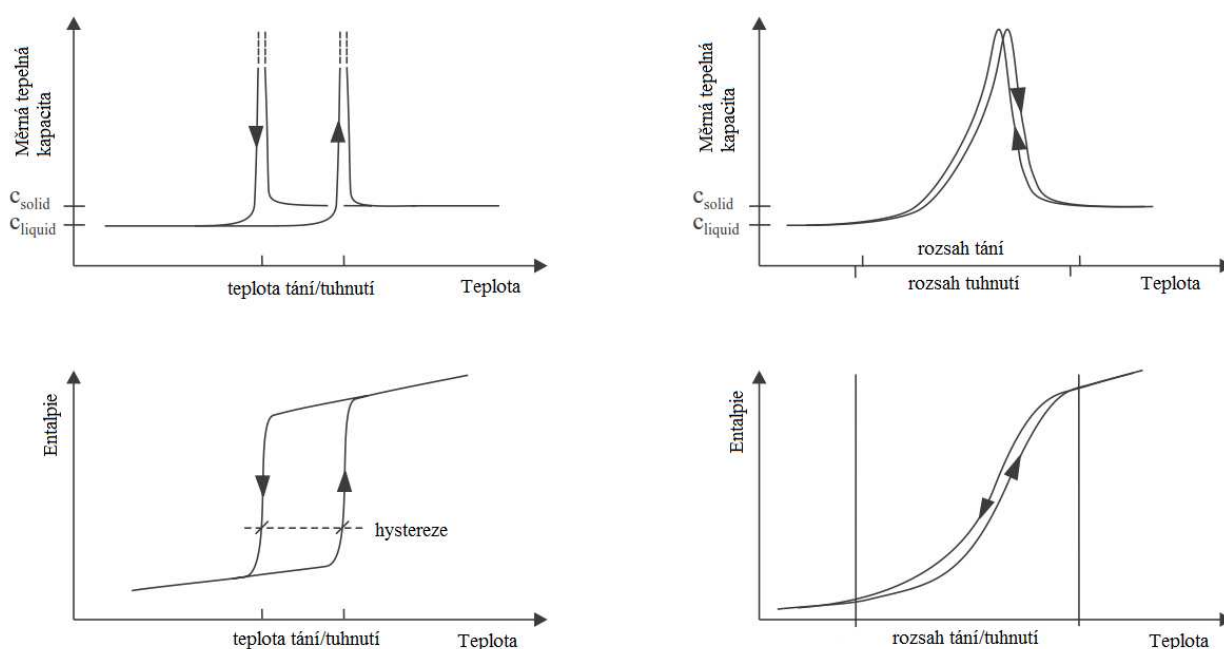


Obr. 3 Fázový diagram(Schauer, 1998)

Nejčastěji využívaným fázovým přechodem v aplikacích pro stavebnictví je pevná látka – kapalina. Je to dáno především využitelnou entalpií fázové změny, malými objemovými změnami a také dostupnými metodami pro zapouzdření materiálu.

V praktických aplikacích jsou jako materiály s fázovou změnou používány organické a anorganické materiály. Jejich hlavními reprezentanty jsou parafíny (organické materiály) a hydráty solí (anorganické materiály), které především svou teplotou tání jsou vhodné pro aplikace ve stavebních konstrukcích.

Obr. 4 ukazuje chování dvou nejdůležitějších skupin materiálů s fázovou změnou, pokud jde o teplotu tání a její rozsah, měrnou tepelnou kapacitu a entalpii. Jak je vidět, anorganické PCMs (schémata vlevo) vykazují relativně úzké rozmezí tání/tuhnutí, a proto zůstávají na konstantní teplotě během celého procesu tání nebo tuhnutí. Hystereze, míra rozdílnosti křivek tání a tuhnutí, je dalším charakteristickým rysem výrazným u anorganických PCMs. Organické PCMs (schémata vpravo) naopak mohou zobrazovat širší škálu tání/tuhnutí ("mushy" oblast = koexistence více skupenství), která se liší v závislosti na čistotě, spolu se zvýšeným nárůstem tepelné kapacity v tomto rozsahu (Koschenz & Lehmann, 2004).



Obr. 4 Chování anorganických a organických materiálů se změnou fáze z hlediska měrné tepelné kapacity a entalpie (Koschenz & Lehmann, 2004)

2.3 ZPŮSOB ZABUDOVÁNÍ PCMS DO STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

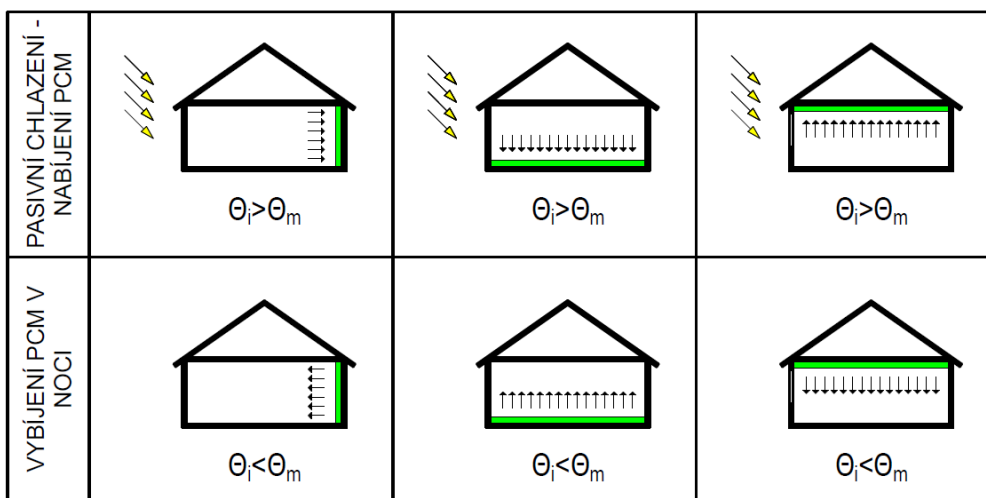
Jelikož u materiálů s fázovou změnou probíhá skupenská změna, nejčastěji z pevné látky na kapalinu, je nezbytné zapouzdření těchto materiálů. Musí být prověřen problém s kompatibilitou mezi PCMs a kontejnerem a obal musí být dostatečně tepelně vodivý, aby byl schopen rychle přenášet teplo při nabíjení a vybíjení. Možné způsoby zabudování jsou:

- penetrace PCMs do stavebních materiálů – disperze přidaná např. do betonových směsí nebo ponoření porovitých materiálů do lázně s PCMs;
- mikro-kapsle – akumulární médium zapouzdřené plastovým povlakem a rozptýlené ve vhodné matici (např. sádra);

- makro-zapouzdření – akumulční médium uloženo v plastových nebo kovových boxech;
- tvarově stabilizované PCMs - tvarově stabilizované PCMs jsou připravovány z tekutých směsí PCMs a matričního materiálu. Směs je pak ochlazena pod tzv. teplotu skelného přechodu matričního materiálu, dokud neztuhne (Ostrý, Brzoň, & Klubal, 2012).

2.4 AKTIVACE PCMS

Důležitou součástí návrhu každého systému s fázovou změnou je zajištění aktivace tohoto materiálu. Během dne, v čase vysoké tepelné zátěže interiéru, se po dosažení teploty tání začne materiál s fázovou změnou nabíjet (dochází ke skupenské změně). Aby tento proces mohl probíhat opakovaně, je nutné naakumulované teplo odvést. Aktivace probíhá v noci, kdy je teplota v interiéru pod teplotou krystalizace PCMs (Obr. 5). Aby skupenská změna proběhla v celém objemu, je často nutné přirozenou konvekci vzduchu doplnit o další zdroj chladu. Tento zdroj spotřebovává elektrickou energii, avšak odběr této energie je přesunut z denního na noční období a je tak odebírán ze sítě v době nižšího tarifu.



Obr. 5 Princip nabíjení a vybíjení PCMs

Pro aktivaci (vybíjení) materiálu s fázovou změnou je možné použít intenzivní mechanické provětrávání vnitřních prostor, podle potřeby strojně dochlazovaného. Proudící vzduch ovšem způsobuje diskomfort pro osoby v takto větraném prostoru. Modifikací tohoto řešení je vytvoření provětrávané vzduchové dutiny mezi konstrukcí objektu a vrstvou s PCMs.

Alternativou k těmto způsobům aktivace materiálů s fázovou změnou je uzavřený vodní chladicí okruh, který je umístěn v prostoru tepelně akumulční vrstvy. Jeho provozem není nijak zhoršena tepelná pohoda v místnosti.

3 CÍLE PRÁCE

Disertační práce je primárně zaměřena na integraci materiálů s fázovou změnou do stavebních konstrukcí. To je jeden ze způsobů k zajištění tepelné stability v letním období, při současném snížení energetické náročnosti technických systémů. Při vhodném technickém řešení je možné tento systém použít i v zimním období.

V rámci práce byly vytyčeny tyto cíle:

- ověření tepelných vlastností uváděných výrobcí u komerčně dostupných materiálů s fázovou změnou;
- návrh aplikace PCMs ve vhodné formě do experimentální místnosti;
- instalace vyrobených prototypů tepelně akumulčních panelů v experimentální místnosti;
- ověření funkčnosti navrženého systému pomocí měření a sběru dat za různých okrajových podmínek a za nastavených režimů řízení chování instalovaného systému;

4 VÝSLEDKY A MĚŘENÍ

4.1 TERMICKÁ ANALÝZA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

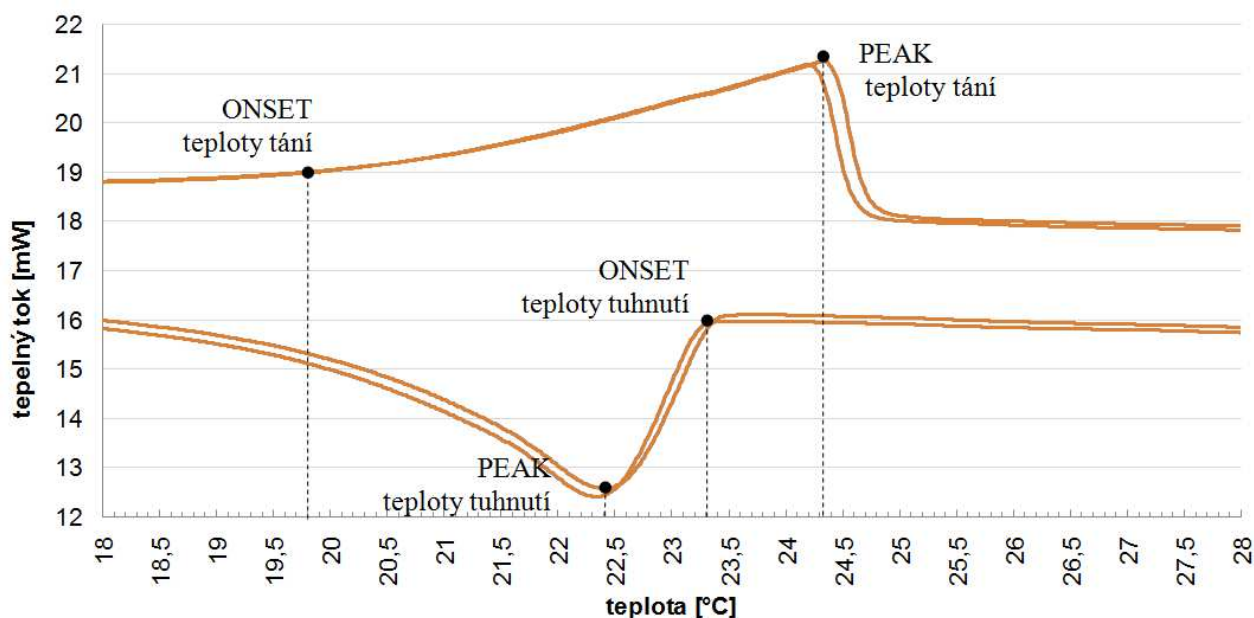
Účelem měření kapslovaného PCMs bylo posoudit vhodnost daného typu PCM z hlediska rozsahu teplot fázových změn. Před instalací tepelně akumulčních panelů pro první sadu měření byly analyzovány dva vzorky Micronalu s rozdílným bodem tání. Jednalo se o Micronal®PCM DS 5008X s bodem tání +23 °C a Micronal®PCM DS 5029X s bodem tání +21 °C (údaje od výrobce). Před modifikací tepelně akumulční omítky pro druhou sadu měření byla provedena termická analýza nově dodávaného materiálu s fázovou změnou Micronal®PCM DS 5040X s bodem tání +23 °C.

Analýza vzorků (Micronal®PCM DS 5008X a Micronal®PCM DS 5029X) před vytvořením první sady panelů 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 případné nebo méně časté noční aktivace vodním okruhem (Tab. 1).

Materiál	PEAK teploty tání [°C]	ONSET teploty tání [°C]	Přijaté teplo [KJ·kg ⁻¹]	PEAK teploty tuhnutí [°C]	ONSET teploty tuhnutí [°C]	Uvolněné teplo [KJ·kg ⁻¹]
Micronal DS 5008X	24,3	19,8	86,8	22,4	23,3	82,7
Micronal DS 5029X	23,3	18,0	75,8	21,6	22,5	87,3
Micronal DS 5040X	24,5	18,8	96,2	multipeak	21,8	92,6

Tab. 1 Přehled analýzy DSC mikro zapouzdřených PCMs (průměry ze dvou měření) s rychlostí ohřevu/tuhnutí 1 °C·min⁻¹

I u těchto komerčně dodávaných materiálů a jejich směsí s omítkou dochází k mírnému přechlazení, tj. teplota tání je nižší než teplota tuhnutí, která však není překážkou pro použití ve stavebních konstrukcích (Obr. 6).



Obr. 6 DSC křivky pro dva cykly Micronalu PCM[®] DS 5008X pro rampu 1 °C·min⁻¹

V Tab. 2 jsou porovnány sledované veličiny vzorku akumulčního materiálu Micronal[®] PCM DS5008 X a vzorku omítky s 30% podílem akumulční látky.

Materiál	PEAK teploty tání [°C]	ONSET teploty tání [°C]	Přijaté teplo [KJ·kg ⁻¹]	PEAK teploty tuhnutí [°C]	ONSET teploty tuhnutí [°C]	Uvolněné teplo [KJ·kg ⁻¹]
Micronal DS 5008X	24,3	19,8	86,8	22,4	23,3	82,7
Omítka s 30% Micronalu	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

Tab. 2 Porovnání analýz DSC pro PCM a sádrovou omítku s 30% podílem PCM s rychlostí ohřevu/tuhnutí 1 °C·min⁻¹

Z porovnání je zřejmé, že přidáním mikropellet do sádrové omítky dochází ke snížení tepelně akumulací kapacity v porovnání s čistým PCMs na úroveň 27 % a k posunu teplotních peaků jak při tání, tak při tuhnutí. Toto snížení tepelně akumulací kapacity je poměrně zásadní a odpovídá hmotnostnímu podílu PCMs v omítce.

Z výsledků termických analýz vyplývá, že:

- materiály s výrobcem deklarovanou teplotou tání 23 °C (Micronal[®]PCM DS 5008X a Micronal[®]PCM DS 5040X) jsou schopny přijmout více tepla než materiály s deklarovanou teplotou tání 21 °C;
- přidáním PCMs do nosné matrice (omítky) se zásadně sníží tepelně akumulací kapacita v odpovídajícím hmotnostním poměru;
- akumulace nebo uvolnění tepla při fázových změnách jsou závislé na rychlosti ohřevu resp. chlazení;
- opakování cyklů tání a tuhnutí materiálu má minimální vliv na jeho charakteristické hodnoty.

4.2 TERMICKÝ INKUBÁTOR

Laboratorní experimenty v klimatické komoře byly zaměřeny na srovnání přenosu tepla a tepelně akumulací kapacity mezi různými druhy PCMs a různými způsoby jejich zapouzdření. Vzhledem k tomu, že velikost vzorků byla relativně malá, byl použit termický inkubátor (Obr. 7) pro cyklickou změnu okrajových podmínek.



Obr. 7 Vzorky omítky v tepelném inkubátoru

Měření byla nastavena tak, aby okrajové podmínky simulovaly pohyb teploty v budově s malou tepelně akumulací kapacitou. Stejný průběh se používal pro měření všech vzorků, aby byla možná komparace výsledků mezi jednotlivými měřeními. Denní cyklus byl rozdělen do 4 lineárních křivek, které průběh idealizují:

- část a byla konstantní s teplotou 30 °C;
- část b byl lineární pokles z teploty 30 °C do 10 °C;
- část c byla konstantní s teplotou 10 °C;
- část d byl lineární nárůst z teploty 10 °C na 30 °C.

První sada měření byla provedena na těchto vzorcích:

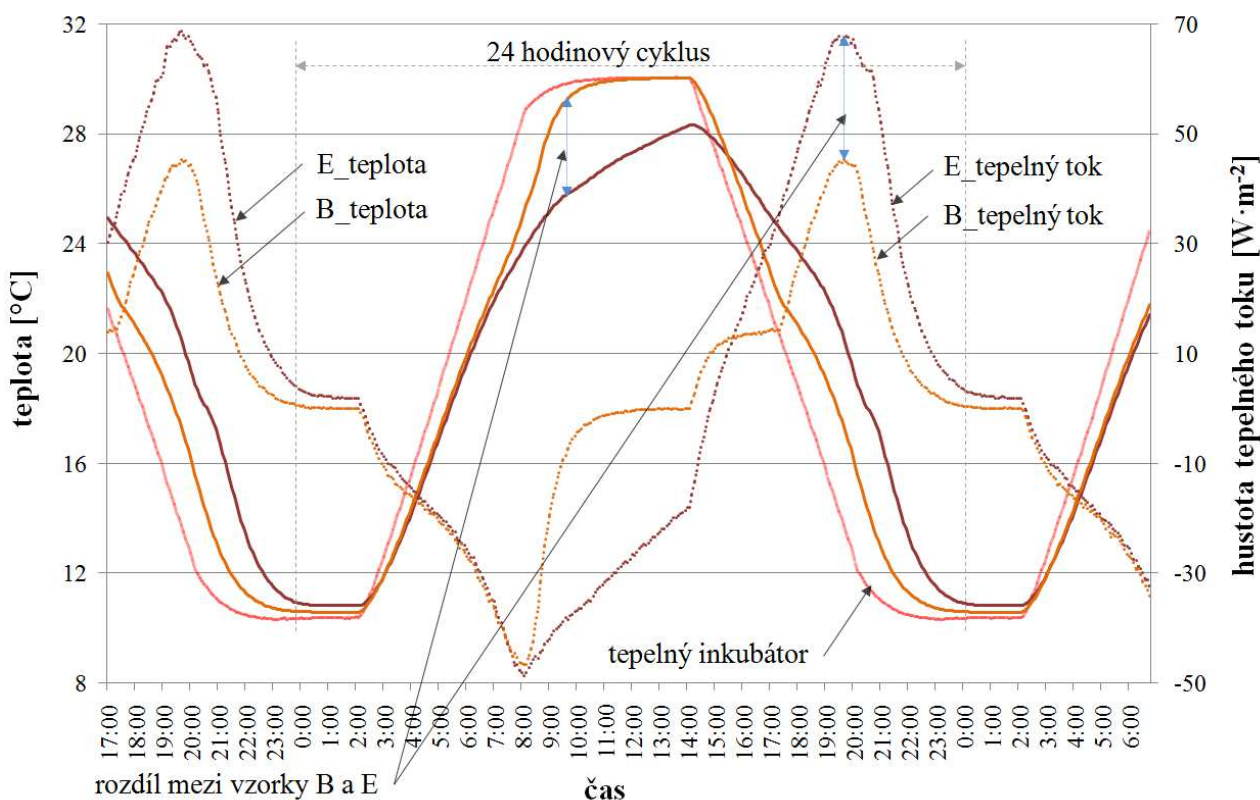
- vzorek A: sádrová omítka;
- vzorek B: modifikovaná sádrová omítka s 30% hmotnostní příměsí Micronalu[®]PCM DS5040 X;
- vzorek C: mikro peletky Micronalu[®]PCM DS5040 X nasypané v plastovém boxu;
- vzorek D: mikro peletky Micronalu[®]PCM DS5040 X nasypané v hliníkovém boxu;
- vzorek E: hliníkové panely s materiálem DELTA[®]-COOL24.

Druhá sada měření byla provedena na těchto vzorcích:

- vzorek F: modifikovaná sádrová omítka s 30% hmotnostní příměsí Micronalu[®]PCM DS5040 X;
- vzorek G: modifikovaná sádrová podlahová stěrka s 30% hmotnostní příměsí Micronalu[®]PCM DS5040 X;

- vzorek H: modifikovaná sádrová omítka s 15% hmotnostní příměsí Micronalu[®]PCM DS5040 X.

Na Obr. 8 je srovnání dvou vzorků vykazující nejlepší parametry. Jsou to vzorky B a E, tj. sádrová omítka s Micronalem[®]PCM DS5040 X a hliníkový panel s DELTA[®]-COOL24. Z grafu je patrné, že nejlepší výsledků dosahuje právě tento panel. Díky své vysoké tepelné vodivosti a velkému množství PCMs ve vzorku je jeho akumulční kapacita výrazně vyšší než v případě, kdy je vzorek proveden z omítky obsahující mikrokapsle PCMs pouze z 30 hmotnostních %.



Obr. 8 Průběh teplot a tepelného toku u vzorků B a E

Z výsledků měření v tepelném inkubátoru vyplývá, že:

- nejvyšší tepelně akumulční kapacitu má vzorek s hydrátem soli DELTA[®]-COOL24 zapouzdřeným v hliníkových boxech;
- zvýšení tepelně akumulční kapacity omítky je možné docílit přidáním parafínu Micronal[®]PCM DS5040 X;
- volně vsypané peletky Micronalu[®]PCM DS5040 X do boxu bez propojení s vodivou maticí nevykazují v nastaveném teplotním profilu předpokládanou odezvu;
- při nastaveném teplotním cyklu je poměrně malý rozdíl v maximální hodnotě tepelného toku mezi vzorky omítky obsahující 15 a 30 % PCMs.

4.3 MĚŘENÍ REÁLNÝCH OBJEKTŮ

V současnosti jsou na Ústavu pozemního stavitelství VUT FAST v Brně v provozu dvě experimentální místnosti pro možnost komparativního měření tepelně vlhkostního mikroklimatu vnitřního prostředí.

Do experimentální místnosti byly instalovány v roce 2011 a 2013 různé tepelně akumulční panely s omítkou modifikovanou mikroenkapslovaným PCMs. V panelech jsou zabudovány kapilární rohože, které jsou přes rozdělovač a sběrač napojeny na tepelné čerpadlo vzduch-voda, které umožňuje dochlazování nebo dohřev akumulčních panelů.

Referenční místnost je totožná s místností experimentální. Je prostá akumulčních panelů, pouze je doplněna klimatizační jednotkou pro možnost porovnání ekonomické náročnosti provozu obou místností.

První sada měření probíhala s panely, které jsou složeny z podkladní vrstvy z recyklovaných nápojových kartonů, vrstvy pěnového polystyrenu tloušťky 30 mm a modifikované omítky tloušťky 10 mm (modifikace Micronalem DS 5008X). Na panelu, v úrovni vrstvy omítky, byly umístěny kapilární rohože (Obr. 9).



Obr. 9 Výroba tepelně akumulčních panelů (1. sada měření)

Byl sledován vliv na vnitřní mikroklima při různých způsobech nastavení řízení kapilárního chlazení. Řízení případného dochlazování pomocí tepelného čerpadla vzduch-voda je možné na dvou úrovních. První je časová, ta může být s výhodou použita pro nastavení, aby jednotka mohla místnost dochlazovat v období platnosti nízkého tarifu elektrické energie. Druhá je teplotní, kdy je v experimentální místnosti osazen termostat, který řídí běh jednotky dle předem nastaveného

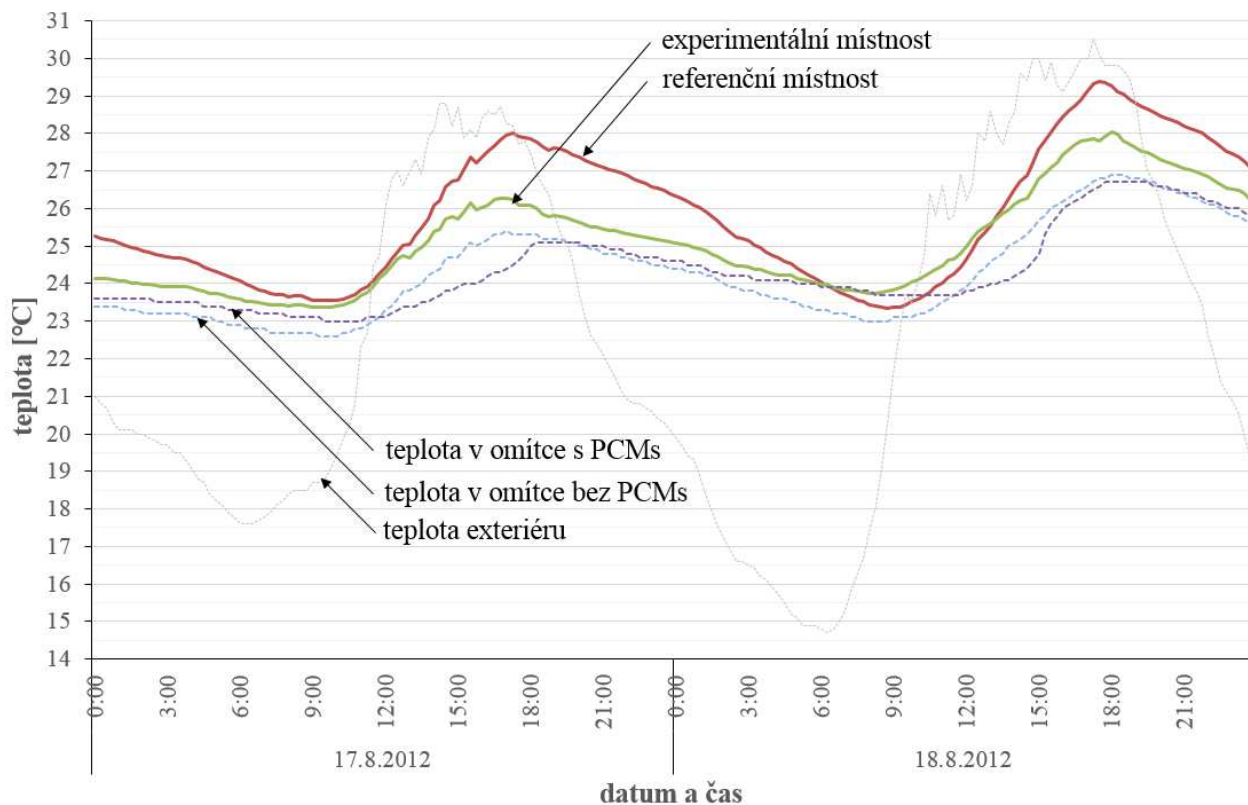
maximálně přípustného teplotního profilu. Výměna vzduchu v experimentální i referenční místnosti byla zajištěna po celé sledované období provětráváním otevřenými střešními okny ve ventilační poloze.

Během měření byly studovány tři režimy nastavení provozu místnosti:

- Regenerace PCMs je provedeno přirozeným prouděním vzduchu v době, kdy teplota v noci klesne pod teplotní rozsah fázové změny.
- PCMs je aktivováno krátkým dochlazováním během noci. Tento způsob je vhodný pro letní období bez extrémních hodnot maximální denní teploty.
- PCMs je chlazeno v noci a během dne systém umožňuje dochlazování v souladu s aktuálními požadavky na tepelnou pohodu. Tento režim je vhodný pro období s vysokou tepelnou zátěží během dne.

Pilotním režimem zkoumání systému s integrovaným materiálem s fázovou změnou ve struktuře omítky byla situace, kdy vnitřní prostředí v experimentální ani v referenční místnosti nebylo aktivně ovlivňováno žádným technickým systémem (chladicí jednotky jsou vypnuty). V tomto režimu byla aktivace PCMs provedena přirozeným prouděním vzduchu. Z tohoto pohledu se jedná o systém pasivního chlazení.

V období, kdy teplota během nočních hodin klesne pod teplotní rozsah fázové změny PCMs, není s aktivací akumulčního média problém. Takto je možné snížit teplotu v místnosti během dne o 1,5 až 2,0 °C (Obr. 10). Jestliže teplota v nočních hodinách neklesne nebo klesne na krátký časový úsek pod teplotní rozsah fázové změny, PCMs se zcela neaktivuje a následující den má sníženou tepelně akumulční kapacitu.



Obr. 10 Průběhy operativních teplot v testovacích místnostech a teploty uvnitř omítek s a bez PCMs ve dnech 17. 8. - 18. 8.2012

Teplota uvnitř omítky bez PCMs je vyšší než u omítky s PCMs v období mezi 11:30 až 19:30. V tomto období sádrová omítka akumuluje citelné teplo, což se projeví narůstající teplotou akumulčního média. Sádrová omítka s PCMs naopak akumuluje latentní teplo, což se projevuje pozvolnějším růstem teploty prvku. V nočních a dopoledních hodinách je naopak vyšší teplota u omítky s PCMs, jelikož ta se aktivuje (vybívá), což má za následek zvýšení teploty. V tomto období je vyšší také teplota v interiéru experimentální místnosti, jelikož je do něj uvolňováno akumulované teplo.

Z výsledků měření v experimentálních místnostech vyplývá, že:

- v období, kdy teploty přes noc klesnou pod teplotu fázové změny, není nutné aktivní dochlazování omítky, je možné tímto pasivním chlazením snížit teplotu v místnosti až o 2 °C;
- při režimu s aktivací PCMs pomocí krátkodobého nočního vychlazování je možné snížit teplotu v místnosti během denních špiček o 5 °C;
- při režimu, kdy je ke snížení denních maxim využito i kapilární dochlazování během dne, je možné tyto maxima snížit o 7,5 °C a je možné v každém okamžiku udržet teplotu v požadovaném rozsahu, avšak za cenu vyšších provozních nákladů.

Druhá sada měření byla provedena s panely připravenými v dílně a následně jako prefabrikát ukotvenými a připevněnými v místnosti (Obr. 11).



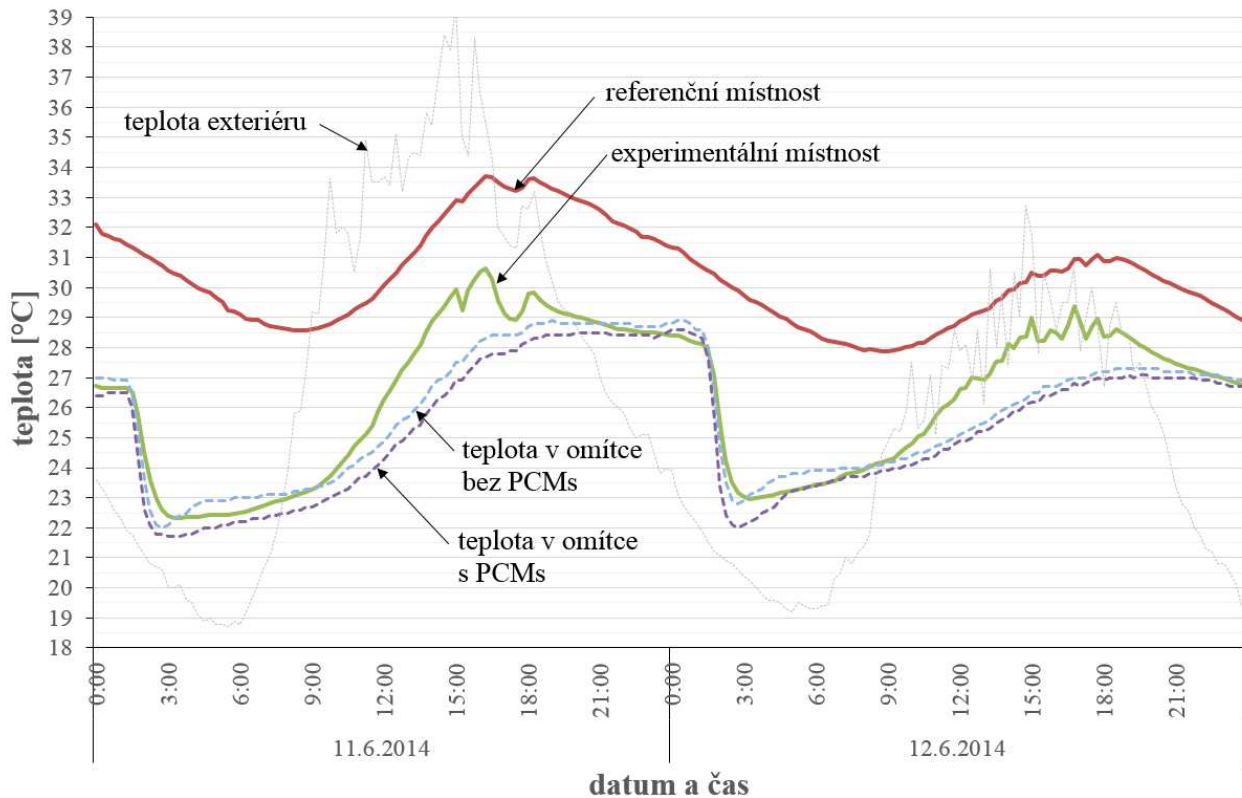
Obr. 11 Montáž tepelně akumulčních panelů (2. sada měření)

Panel je tvořen podkladní OSB deskou, která má na zadní straně připevněna ztužující žebra (dřevěné trámký 40/25 mm případně kovové CD profily 60/27 mm), která zároveň slouží jako vymezení prostoru pro rozvodné potrubí (přívod i odvod). Deska je napenetrována kontaktním můstkem, po zaschnutí je na ní připevněna kapilární rohož a do osazeného obvodového rámečku je nanesena modifikovaná omítka v tloušťce 15 mm. Micronal DS 5040X je přidán do omítky v množství 30 hmotnostních %. Obdobným principem jsou provedeny i podlahové desky se samonivelační sádrovou stěrkou s Micronalem DS 5040X, kde podkladní rošt je nahrazen lepeným polystyrenem tloušťky 50 mm.

Stejně jako u 1. sady byl sledován vliv tepelně akumulčních panelů s modifikovanou omítkou s materiálem s fázovou změnou na interní mikroklima. Byly nastaveny různé provozní režimy a byl sledován jednak vliv na teplotu, ale také spotřeba energie k referenci, kterou byla klimatizační jednotka umístěná v referenční místnosti.

Ve druhé sadě měření byl nastaven mimo jiné režim krátkého nočního dochlazování (Obr. 12). Systémy pracovaly v následujícím režimu:

- tepelně akumulční panely v experimentální místnosti byly aktivovány vodou v kapilárních rohožích v období 1:00-2:00 vždy, když teplota v místnosti během tohoto období překročila 17 °C. Jiným aktivním způsobem není klima v místnosti ovlivňováno;
- v referenční místnosti byla klimatizační jednotka vypnuta.



Obr. 12 Průběhy operativních teplot v testovacích místnostech a povrchové teploty omítek s a bez PCMs ve dnech 11. 6. - 12. 6. 2014

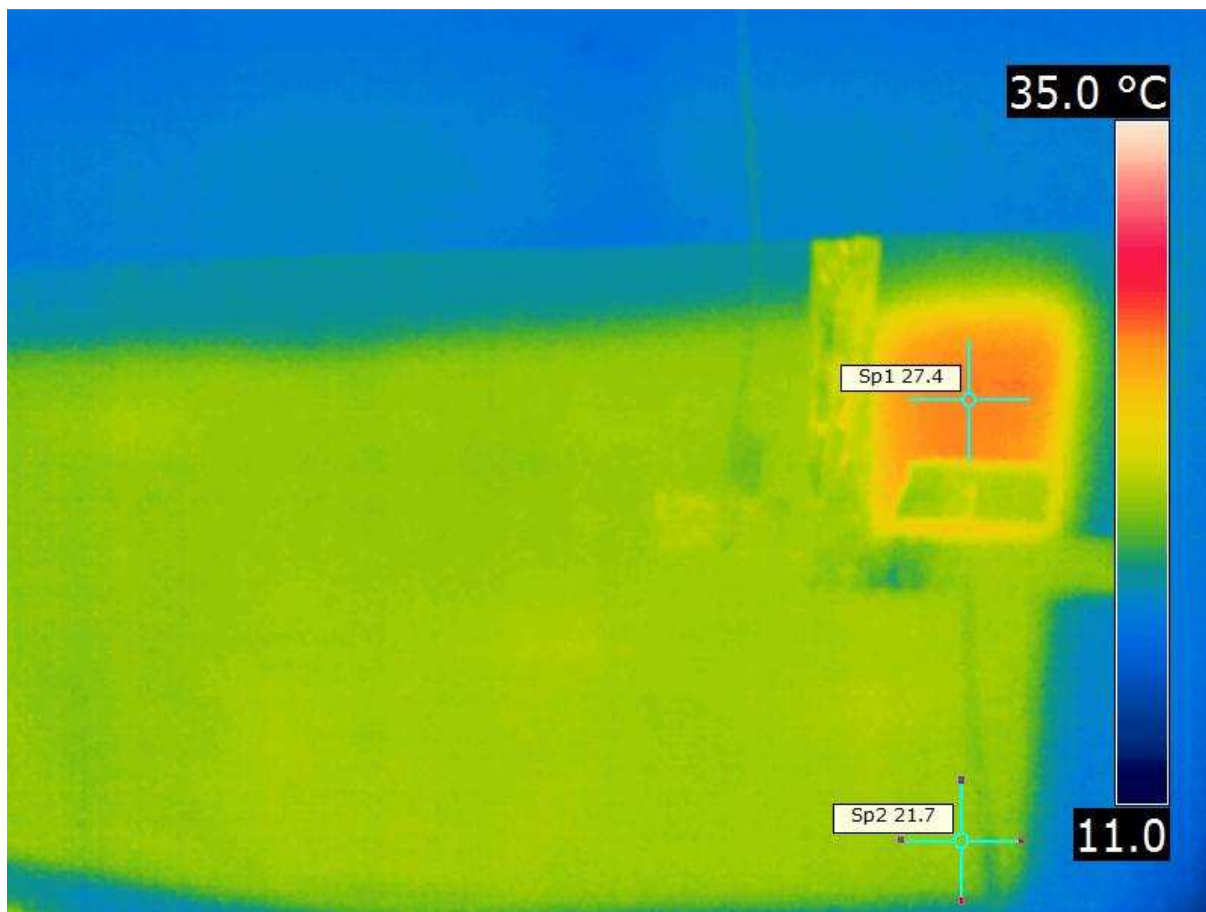
Působením tepelně akumulční kapacity PCMs a hodinového nočního chlazení klesnou špičkové teploty během dne až o 2,5°C.

Rozdíl mezi povrchovými teplotami omítky s PCMs a bez PCMs je patrný z dílčího měření, kdy na počátku měření byla v místnosti teplota 16,4 °C. Pomocí kapilárních rohoží umístěných v omítce se interiér místnosti začal vytápět na 30 °C.

Dílčí část jednoho z panelů byla provedena z běžné sádrové omítky bez přídavku PCMs a byla měřena povrchová teplota termočlávkovými čidly na obou površích (s a bez PCMs) a pomocí termokamery (Obr. 13). Omítka obsahující materiál s fázovou změnou brzy po začátku vytápění akumulovala částečně latentní teplo, což se projevilo pozvolnějším nárůstem povrchové teploty.

Teplota v ploše s modifikovanou omítkou odpovídala povrchové teplotě ostatních panelů. V místě, kde byla umístěna neupravená sádrová omítka, byla však

povrchová teplota o 5,7 °C vyšší. Na tomto rozdílu bylo patrné, že v počáteční fázi zátopy bylo akumulováno v omítce modifikované PCMs skupenské teplo tání, které se neprojevovalo, na rozdíl od akumulace citelného tepla v omítce bez PCMs, vzrůstem teploty této části panelu.



Obr. 13 Stav v čase 0:45 – panel s omítkou s i bez PCMs

Z výsledků měření v experimentálních místnostech vyplývá, že:

- měření 2. sady experimentálních panelů potvrdilo výsledky zjištěné realizací 1. sady panelů;
- v období, kdy teploty přes noc klesnou pod teplotu fázové změny a není nutné aktivní dochlazování omítky, je možné tímto pasivním chlazením snížit teplotu v místnosti o 1 °C
- při režimu s aktivací PCMs pomocí krátkodobého nočního vychlazování je možné snížit teplotu v místnosti během denních špiček o 2,5 °C (1hodinové dochlazování) a o 5 °C (3 hodinové dochlazování);
- dochlazování experimentálních panelů během noci s pomocí soustavy kapilár zajistí udržení denních teplot v rozsahu požadovaných legislativou při nižších provozních nákladech, než při úpravě vnitřního mikroklimatu klimatizačním zařízením;

- v zimním období je značný přínos v tepelně akumulaci kapacitě omítky, která zajistí pozvolnější pokles teploty po přerušení zátopy;
- v počáteční fázi zátopy je nižší povrchová teplota u omítky s PCMs z důvodu akumulace latentního tepla.

5 ZÁVĚR

V důsledku technického pokroku ve všech oborech lidské činnosti se dostávají i ve stavebnictví do popředí stavební materiály, které mají oproti dříve využívaným určitou přidanou hodnotu. Jsou to materiály, které mají vyšší pevnostní charakteristiky, delší životnost, lepší hydroizolační případně tepelně izolační vlastnosti. V kooperaci s vývojem zařízení pro techniku prostředí se především otopné soustavy v kombinaci s tepelně technickými vlastnostmi obalových konstrukcí stali základem pro úsporu nákladů a energií na vytápění v zimním období.

Naproti tomu tepelná stabilita místnosti v letním období je na okraji zájmu investorů i projektantů, přestože je v legislativních požadavcích vedena na stejné úrovni jako tepelná stabilita v období zimním. Přehřívání objektů je často řešeno pouze instalací klimatizačních zařízení, případně volbou druhu zasklení.

Především u lehkých objektů, jejichž typickým představitelem jsou dřevostavby, nebo u vysoce prosklených administrativních budov, mohou náklady na chlazení v letním období převýšit náklady na vytápění v zimě. Jedním ze způsobů, jak je možné přehřívání v letním období omezit a tak tyto náklady snížit, je zvýšení tepelně akumulaci kapacity stavby. To lze zajistit v rovině hmotnostní, nebo tam, kde není účelné zvyšování hmotnosti stavebních konstrukcí, pomocí materiálů s fázovou změnou. Zmiňovaný technologický vývoj přinesl ve 20. století výzkum a komerční výrobu materiálů s fázovou změnou, které při vhodném použití a způsobu zabudování do stavebních konstrukcí, zajistí zlepšenou tepelnou stabilitu objektů v letních měsících. Předkládaná disertační práce se snaží v reálných podmínkách experimentálně ověřit vliv zabudování těchto materiálů do stavebních konstrukcí.

Zkoumané tepelně aktivované panely představují alternativu ke klimatizačním zařízením. Pracují s akumulací energie ve formě vázaného tepla, což zvýší tepelnou kapacitu konstrukcí, na které jsou instalovány. Pro zajištění opakovaného využití je nutné PCMs aktivovat. K tomu slouží systém kapilárních rohoží v omítkě, pomocí kterých je možné omítku dochlazovat, jestliže aktivaci nezajistí přirozená konvekce vzduchu.

Z výsledků měření je zřejmé, že využití materiálů s fázovou změnou ve stavebních konstrukcích má vliv na vnitřní mikroklima a přispívá k udržení letní tepelné stability v místnosti. Systém je však nutné navrhovat a realizovat jako celek s prostředkem pro aktivaci naakumulovaného tepla pro období s vysokými opakujícími se teplotami, kdy teplota ani přes noc neklesne pod teplotu fázové změny.

Masovějšímu rozšíření materiálu ve stavební praxi v současné chvíli zabraňuje jak malé povědomí o existenci případně funkci těchto materiálů, tak především cena komerčně dostupných materiálů s fázovou změnou.

6 LITERATURA

Bartoš, T., & Strejček, P. (31. 12 2012). *Vývoj cen elektrické energie v regionu západní a střední Evropy v letech 2001–2011*. Získáno 8. 10 2014, z TZB-info: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energie/8998-vyvoj-cen-elektricke-energie-v-regionu-zapadni-a-stredni-evropy-v-letech-2001-2011>

Castell, A., Martorell, I., Medrano, M., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (Duben 2010). Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings* , stránky 534–540.

Cihelka, J., & kol. (1975). *Vytápění a větrání*. Praha: SNTL.

Garg, H. P., Mullick, S. C., & Bhargava, A. K. (1985). *Solar Thermal Energy Storage*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.

Koschenz, M., & Lehmann, B. (2004). Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy and buildings* , stránky 567-578.

Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). *Heat and cold storage with PCM : an up to date introduction into basics and applications*. Berlin: Springer-Verlag.

Ostrý, M., Brzoň, R., & Klubal, T. (2. 4 2012). *Pasivní chlazení v letním období s využitím akumulace tepla při změně skupenství*. Získáno 5. 12 2014, z TZB-info [online]: <http://stavba.tzb-info.cz/stavebni-fyzika/8434-pasivni-chlazení-v-letnim-obdobi-s-vyuzitim-akumulace-tepla-pri-zmene-skupenství>

Řehánek, J. (2002). *Tepelná akumulace budov*. Praha: Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě.

Schauer, P. (1998). *Termika a záření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU: o energetické náročnosti budov. (2010). *Úřední věstník Evropské unie* .

7 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA

Ostrý, M.; Brzoň, R.; Klubal, T. (2012). Pasivní chlazení v letním období s využitím akumulace tepla při změně skupenství. *TZB- info*, 2012, roč. 2012, č. 4, s. - (- s.)ISSN: 1801- 4399.

Brzoň, R.; Ostrý, M.; Klubal, T. (2012). Tepelně technické posouzení ISO-nosníků. *Stavební obzor*, 2012, roč. 21, č. 3, s. 72-77. ISSN: 1210- 4027.

Klubal, T.; Ostrý, M. (2014). Vliv sálavého chlazení a vytápění s PCMs na vnitřní mikroklima a spotřebu energie. *TZB- info*, 2014, roč. 2014, s. - (- s.) ISSN: 1801-4399.

Klubal, T.; Ostrý, M.; Brzoň, R. (2014). Použití tepelně aktivovaných panelů se sádrovou omítkou s PCMs. *Stavební obzor*, 2014, č. 3-4, s. - (- s.) ISSN: 1805-2576.

Ostrý, M.; Dostálová, D.; Klubal, T.; Příkryl, R.; Charvát, P. (2015). Micro-encapsulated Phase Change Materials for latent-heat storage: Thermal characteristics. *Materials and Technology*, 2015, roč. 49, č. 5, s. 813-816. ISSN: 1950-2949.

Ostrý, M.; Klubal, T.; Charvát, P.; Klimeš, L. (2012). Comparison of different latent heat storage techniques integrated in building structures. In: *Proceedings of 12th International Conference on Energy Storage Innostock 2012*. Lleida, Španělsko: GREA Innovacio Concurrent, University of Lleida, 2012. s. 140-147. ISBN: 978-84-938793-3- 4.

Klubal, T.; Ostrý, M. (2012). Aktivace sádrové omítky s PCMs vodním chladícím okruhem. In: *7. Mezinárodní konference enviBUILD Budovy a prostředí 2012*. Brno: Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, 2012, s. 240-243. ISBN 978-80-214-4600-7.

Klubal, T.; Brzoň, R.; Ostrý, M. (2013). Passive cooling of buildings using phase change materials. In: *World Sustainable Energy Days 2013 / WSEDnext Young Researchers*. Wels, Rakousko: OÖ Energiesparverband, 2013

Ostrý, M.; Klubal, T.; Brzoň, R. (2013). Challenges in the latent heat storage technology for building applications. In: *CESB13 – Central Europe towards Sustainable Building 2013*. Prague: Grada Publishing for Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, 2013. s. 433-436. ISBN: 978-80-247-5015-6.

Klubal, T.; Ostrý, M.; Brzoň, R. (2013). Application of Phase change materials to maintain operative temperature in the framework of legislative requirements in

the summer period. In: *Proceedings of the International Scientific Conference, enviBUILD – Buildings and Environment 2013*. Bratislava: STU – Nakladatel'stvo STU, Bratislava, 2013. s. 386-390. ISBN: 978-80-227-4070-8.

Ostrý, M.; Dostálová, D.; Klubal, T.; Přikryl, R.; Charvát, P. (2013). Microencapsulated phase change materials for latent heat storage: thermal characteristics and building application. In: *21 st INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND TECHNOLOGY*. Portorož: Institut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, Lepi pot 11, Ljubljana, Slovenija, 2013.

Klubal, T.; Ostrý, M.; Brzoň, R. (2014). Application of Phase Change Materials to Reduce the Risk of Overheating of Building Interior. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Inc., 2014. s. 479-486. ISBN: 1662-8985.

Ostrý, M.; Klubal, T.; Brzoň, R. (2014). Thermally activated heat storage structures combined with a heat pump for the use in low energy buildings. In: *9th International Conference "Environmental Engineering"*. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University, 2014.

Klubal, T.; Ostrý, M. (2014). Integration of PCMS and capillary radiant cooling / heating to ensure of thermal comfort. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Inc., 2014. s. 350-353. ISBN: 1662-8985.

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Osobní údaje

Jméno a příjmení Tomáš Klubal
Narozen 25. 5. 1986 v Třebíči
Bydliště Botanická 831/50, Brno
Státní příslušnost Česká republika
Telefon +420 723 399 760
Email klubalt@seznam.cz

Vzdělání

2011 – dosud vysokoškolské studium, doktorské studium
Integrace materiálů s fázovou změnou ve stavebních konstrukcích
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Veveří 331/95, 602 00 Brno (Česká republika)

2009 – 2011 vysokoškolské studium, titul Ing.
Navrhování pozemních staveb
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Veveří 331/95, 602 00 Brno (Česká republika)

2005 – 2009 vysokoškolské studium, titul Bc.
Pozemní stavby
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Veveří 331/95, 602 00 Brno (Česká republika)

2005 – 2009 středoškolské odborné vzdělání, maturita
Pozemní stavitelství
Střední průmyslová škola stavební Třebíč
Kubišova 1214/9, 674 01 Třebíč (Česká republika)

Zaměstnání

2011 – dosud projektant pozemních staveb
Atelier Habina
Kopečná 987/11, 602 00 Brno-Staré Brno

2009 – 2010 projektant pozemních staveb
Projekční a architektonická kancelář FORMARCH,
Ing. Arch. Vlasta Loutocká
Hansmannova 491/24, 613 00 Brno-Černá Pole

2008 THP (mistr na stavbě)
Skanska a.s., závod 77 Mosty
Bohunická 133/50, 619 00 Brno (Česká republika)

Pedagogická činnost

Výuka ve cvičeních: Nauka o pozemních stavbách, Pozemní stavitelství I, Pozemní stavitelství III.

Řešené výzkumné projekty

- spoluřešitel na grantovém projektu GAČR P104/12/1838 „Využití akumulace latentního tepla materiálu s fázovou změnou pro snížení spotřeby primární energie v budovách“
Hlavní řešitel: Ing. Milan Ostrý, Ph.D.
- spoluřešitel na projektu specifického výzkumu č. FAST-J-11-17/1279 - Optimalizace současné konstrukce Izo-nosníku
Hlavní řešitel: Ing. Roman Brzoň, spoluřešitel: Ing. Tomáš Klubal
- spoluřešitel na projektu specifického výzkumu č. FAST-S-11-60 - Inteligentní systém pasivního chlazení pro energeticky efektivní budovy
Hlavní řešitel: Ing. Milan Ostrý, Ph.D., spoluřešitel: Ing. Tomáš Klubal, Ing. Roman Brzoň
- mladší výzkumný pracovník pro projekt VaVpI č. CZ.1.05/3.1.00/13.0274 VUT Energetické zdroje

Registrované užité vzory a udělené patenty

Spolupůvodce registrovaných užitečných vzorů:

- „Tepelně akumulací modul se systémem kapilárních rohoží a sestava z těchto modulů“, „Tepelně akumulací pohled aktivovaný větranou vzduchovou mezerou“ a „Tepelně izolační modul pro tlakem namáhané konstrukce“.

Spolupůvodce registrovaného průmyslového vzoru:

- „Tepelně akumulací modul se systémem kapilárních rohoží“.

Spolupůvodce patentu:

- „Tepelně akumulací modul se systémem kapilárních rohoží a sestava z těchto modulů“.

Publikační činnost

- spoluautor 1 článku v odborném periodiku s impakt faktorem, které je obsaženo v databázi Web of Science společnosti Thomson Reuters (Jimp)

- autor 2 článků a spoluautor 2 článků v odborném periodiku, které je zařazeno v Seznamu neimputovaných recenzovaných periodik vydávaných v České republice (Jrec);
- autor nebo spoluautor 23 příspěvků ve sbornících tuzemských nebo zahraničních konferencí

ABSTRACT

The thesis deals with the integration of phase change materials (PCMs) into building structures. The basic requirement is improved thermal stability during the summer season without using an air conditioner. This can be achieved by increasing the thermal storage capacity of the building structures. If the thermal capacity cannot be increased on the level of weight, phase change materials can be used. These materials are capable of storing latent heat and thus increasing the thermal storage capacity of the building.

The thesis presents a general introduction to the problem and a survey of foreign research on phase-change materials and legislative requirements in the Czech Republic. The subsequent part deals with phase change materials, their properties, their utilization method and activation, and a summary of commercially produced phase change materials.

In the thesis the phase change materials were investigated in a thermal incubator by thermal analysis and, above all, in full-scale experiments using comparative measurements. Thermal analysis and tests in the thermal incubator were carried out to determine the real thermal properties of the materials used. The comparative measurements were carried out in two attic rooms at the Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, where in one was used as a reference and the other for the experiment. Manufactured heat storage panels were installed in the experimental room. These panels are composed of a base plate; the capillary tubes placed on it are coated with modified plaster. The gypsum plaster is modified with micro-capsules paraffin for improving the thermal storage capacity. This system is connected to a thermal air-water pump, by which the storage panels can be additionally cooled or heated.

In the experimental measurements, different operating modes were investigated and their effect on the indoor environment was evaluated. Thermal storage in PCMs dampens the temperature amplitude in the building during the summer season and, at the same time, allows the stored heat to be discharged during the night. The shifting of the operation of the “active” cooling equipment to the night hours makes it possible to utilize the off-peak electricity. Moreover, the time interval of withdrawing electric energy from the supply mains is much shorter than in the case of air conditioning. A conventional air conditioner must operate simultaneously with the thermal load, i.e. at the time of peak consumption of electric energy. Thanks to the set regimes, the installed system is capable of responding to external thermal

conditions. Although the indoor temperature in the room cannot be kept at a constant level, the daily maximum can be reduced and the temperature in the room can be kept within the range required by legislation.

A cooling system utilizing latent heat storage should be designed as a single unit. The selected PCMs of the required range of melting and solidification temperatures should be combined with a cooling device capable of initiating the recrystallization of the PCMs without a negative impact on the indoor environment while contributing to the required indoor micro-climate.

The obtained results should serve as a confirmation of the supposed positive effect of the system on the indoor micro-climate and as a basis for creating a computer model. These models can then be analyzed in a proper software; additional results thus obtained enable an optimized solution to be proposed.