

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 631

ISSN 1213-418X

Milan Ostrý

ENERGETICKY FLEXIBILNÍ BUDOVY S EFEKTIVNÍ AKUMULACÍ TEPLA

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav pozemního stavitelství

doc. Ing. Milan Ostrý, Ph.D.

**ENERGETICKY FLEXIBILNÍ BUDOVY
S EFEKTIVNÍ AKUMULACÍ TEPLA**

**ENERGY FLEXIBLE BUILDINGS
WITH EFFICIENT HEAT STORAGE**

**TEZE PŘEDNÁŠKY
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
POZEMNÍ STAVBY**



BRNO 2019

KLÍČOVÁ SLOVA

Akumulace tepla; budova; energetická flexibilita; materiály se změnou skupenství (PCMs); citelné teplo; skupenské (latentní) teplo; stavební konstrukce; energie z obnovitelných zdrojů

KEYWORDS

Heat storage; building; energy flexibility; phase change materials (PCMs); sensible heat; latent heat; building structure; renewable energy

© Milan Ostrý, 2019

ISBN 978-80-214-5754-6

ISSN 1213-418X

OBSAH

OBSAH	3
PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	7
2 ENERGETICKY FLEXIBILNÍ BUDOVY	8
2.1 Energetická flexibilita v kontextu obnovitelných zdrojů energie	8
2.2 Definice energeticky flexibilní budovy.....	9
3 VYUŽITÍ AKUMULACE TEPLA VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH PRO ZVÝŠENÍ ENERGETICKÉ FLEXIBILITY BUDOV	10
3.1 Flexibilní budovy využívající akumulaci v budově	11
3.2 Akumulace tepla při změnách skupenství.....	14
3.3 Porovnání akumulace citelného tepla a akumulace tepla při změnách skupenství.....	16
3.4 Lehké tepelně akumulární konstrukce využívající akumulaci při změnách skupenství....	18
3.5 Tepelně akumulární modul	19
4 AKTUÁLNĚ ŘEŠENÁ TÉMATA	22
4.1 Kompatibilita akumulárních látek s obalovými materiály.....	22
4.2 Stabilita akumulárních látek v čase	23
5 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	24
6 POUŽITÁ LITERATURA.....	24
7 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA.....	26
ZÁVĚR	29
ABSTRACT.....	30

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

doc. Ing. Milan Ostrý, Ph.D.

Datum narození: 20.1.1977 v Novém Městě na Moravě

Zaměstnání: Ústav pozemního stavitelství – tajemník

Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 95, 602 00 Brno, ČR

Telefon: +420 541 147 499, e-mail: ostry.m@fce.vutbr.cz

Bydliště: Hapalova 711/18, 621 00 Brno



Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti

- maturitní zkouška – Střední průmyslová škola stavební ak. Stanislava Bechyně Havlíčkův Brod 1996;
- výuční list v oboru zedník – Střední odborné učiliště, Lipnice nad Sázavou 1996;
- titul Ing. – obor Pozemní stavby, zaměření Navrhování pozemních staveb, VUT v Brně, Fakulta stavební 2001;
- titul Ph.D. – vědní obor Pozemní stavby, VUT v Brně, Fakulta stavební 2005;
- titul doc. – vědní obor Pozemní stavby, VUT v Brně, Fakulta stavební 2013.

Působení na FAST VUT v Brně

- asistent (2004–2005), odborný asistent (2005–2013), docent (od 2013);
- tajemník pro vědu a výzkum Ústavu pozemního stavitelství (od 2005);
- člen oborové rady studijního oboru 3608V001 Pozemní stavby doktorského studijního programu P3607 Stavební inženýrství (od 2014).

Odborné zaměření;

- stavební tepelná technika;
- hodnocení energetické náročnosti budov;
- budovy s téměř nulovou spotřebou energie;
- akumulace tepla při změnách skupenství;
- multikriteriální hodnocení budov a trvale udržitelná výstavba.

Další odborná praxe a činnost

- od 2010 autorizovaný inženýr ČKAIT č. 1005260 pro obor Pozemní stavby;
- 04/2005– 07/2010 odborný konzultant pro Národní institut pro integraci osob s omezenou schopností pohybu a orientace České republiky, o.s., Havlíčkova 4481/44, 586 01 Jihlava;
- 07/2003– 04/2004 technik specialista – Energ spol.s r.o., Vídeňská 815/89a, 639 00 Brno;
- 07/2001–09/2001 mistr stavební výroby – PKS INPOS a.s., Brněnská 126/38, 591 39 Žďár nad Sázavou.

Pedagogická činnost

- předseda nebo člen komisí pro obhajobu bakalářských prací (FAST VUT, FSv ČVUT);
- předseda nebo člen komisí pro obhajobu diplomových prací (FAST VUT, FSv ČVUT, FAST VŠB–TUO);
- předseda nebo člen komisí pro státní doktorské zkoušky a komisí pro obhajoby doktorských prací (FAST VUT, FSv ČVUT, FAST VŠB–TUO);
- oponent doktorských prací (FAST VUT, FAST VŠB–TUO, SVF TUKE).
- od ak. roku 2005/06 vedení diplomových prací – celkem 57 obhájených prací;
- od ak. roku 2008/09 vedení bakalářských prací – celkem 40 obhájených prací;

- od ak. roku 2008/09 školitel studentů doktorského studijního programu - 3 práce úspěšně obhájeny (Ing. Roman Brzoň, Ing. Jan Müller, Ing. Tomáš Klubal), 3 studenti v současnosti studují;
- 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 přednášky: BH02 Nauka o pozemních stavbách (anglicky), BH52 Pozemní stavitelství I (anglicky), CH09 Trvale udržitelná výstavba, AH53 Počítačová aplikace stavební fyziky, TH51 Trvale udržitelná výstavba;
- od ak. roku 2008/09 výuka v rámci doktorského programu: DH Doktorský seminář;
- v současné době přednášky a cvičení: CH009 Trvale udržitelná výstavba, TH51 Trvale udržitelná výstavba; cvičení v předmětech BH059 Tepelná technika budov, CH003 Počítačová aplikace stavební fyziky.

Profesní organizace

- autorizovaný inženýr ČKAIT pro obor Pozemní stavby;
- technik diagnostik termografie při ACM DTOCZ;
- člen Společnosti pro techniku prostředí;
- předseda normalizační komise TNK 43 „Stavební tepelná technika“ při ČAS.

Řešené projekty

- projekt Grantové agentury České republiky č. 19-20943S „Kompatibilita plastů a kovů s materiály pro akumulaci tepla při změnách skupenství pro aplikaci v budovách“ (od 2019) – řešitel;
- projekt Grantové agentury České republiky č. 18-19617S „Hystereze závislosti teplota-entalpie při částečných změnách skupenství materiálů pro ukládání latentního tepla“ (od 2018) – spolupracovník;
- projekt Grantové agentury České republiky č. 15-19162S „Výzkum a vývoj tepelně akumulčních médií na bázi materiálů se změnou skupenství pro vyšší energetickou účinnost budov“ (2015–2017) – řešitel;
- projekt Grantové agentury České republiky č. P104/12/1838 „Využití akumulace latentního tepla materiály s fázovou změnou pro snížení spotřeby primární energie v budovách“ (2012–2014) – řešitel;
- projekt Grantové agentury České republiky č. P101/11/1047 „Tlumení kolísání teploty tekutiny pomocí akumulace tepla při změně skupenství“ (2011–2013) – spolupracovník;
- projekt Grantové agentury České republiky č. 103/07/0907 „Využití solárních komínů a materiálů se změnou skupenství pro pasivní chlazení budov“ (2007–2009) – spolupracovník;
- projekt č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“ (od 2015) – spolupracovník;
- projekt č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002430 „MOST – Moderní a otevřené studium techniky“ (od 2017) – spolupracovník
- projekt č. CZ.02.2.67/0.0/0.0/16_016/0002574 „InfraS – Modernizace vzdělávací infrastruktury na FAST“ (od 2017) – 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“ (2012–2015);
- projekt CZ.1.07/2.4.00/31.0012 „OKTAEDR – partnerství a síť stavebnictví“ (2012–2014) – spolupracovník;
- projekt CZ.1.07/2.2.00/28.0301 „Středoevropské centrum pro vytváření a realizaci inovovaných technickoekonomických studijních programů“ (2012–2015) – spolupracovník;
- projekt COST OC 10051 „Využití materiálů se změnou skupenství pro vyšší efektivnost solárních vzduchových systémů“ (2011–2012) – spolupracovník;
- projekt COST Action TU0802 „Next generation cost effective phase change materials for increased energy efficiency in renewable energy systems in buildings (NeCoE-PCM)“ (2009–2013) – spolupracovník;
- projekt č. CZ.1.07/2.2.00/07.0410 „OPVK Modernizace magisterského studijního programu SI“ (2009–2012) – spolupracovník;
- VVZ MSM 0021630511 „Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí“ – spolupracovník;
- řešitel a spoluřešitel projektů specifického výzkumu FAST VUT v Brně.

Publikační činnost

- 26 publikačních výstupů v databázi Web of Science společnosti Thomson Reuters;
- 13 článků v odborném periodiku s impakt faktorem;
- 21 článků v odborném periodiku, které je zařazeno v Seznamu neimpaktovaných recenzovaných periodik vydávaných v České republice;
- 16 článků v zahraničních časopisech bez IF;
- 94 příspěvků a 19 abstraktů ve sborníku z národní nebo mezinárodní konference;
- 11 článků v odborných časopisech;
- 4 studijní opory pro kombinované studium;
- 2 odborné příručky;
- 2 učebnice;
- 228 citací jiným autorem dle Science Citation Index bez autocitací (ke dni 1. 4. 2019);
- h-index: 6 (ke dni 1. 4. 2019).

Registrované užité vzory a udělené patenty

- původce a spolupůvodce 13 užitečných vzorů v ČR;
- původce a spolupůvodce 5 patentů v ČR;
- spolupůvodce 1 evropského patentu;
- spolupůvodce 1 registrovaného průmyslového vzoru.

1 ÚVOD

Zdravé vnitřní prostředí v budovách s využitím moderních stavebních materiálů a technologií zajišťujících spolehlivý a levný provoz je klíčem ke spokojenosti uživatelů s danou budovou. Spokojenost s provozováním budov je také závislá na edukaci uživatelů budov, neboť každý návrh budovy včetně technických systémů je založen na predikci chování osob a používání instalovaných technologií. Uživatelé budov významnou měrou ovlivňují nejenom náklady na provoz budov, ale rovněž i kvalitu vnitřního prostředí, např. osvojením si správných návyků větrání budovy. Jednou z cest, jak snížit náklady na provoz budov, je snižování jejich provozní energetické náročnosti, případně využívání obnovitelných zdrojů energie. To může vést ke zvýšení energetické nezávislosti a snížení celkových dopadů přeměny a distribuce energie na životní prostředí. Využívání nestabilních obnovitelných zdrojů energie, např. energie slunce či větru, však vyžaduje vyřešení problému časové neshody mezi nabídkou energie přeměněné z primárního zdroje a aktuální spotřebou. Může se jednat o problém krátkodobý v řádu hodin, nebo dlouhodobý v řádu týdnů či měsíců. Tento nesoulad je obvykle řešen zajištěním flexibility na straně dodávky, přičemž se obvykle využívají zdroje produkující velké množství nežádoucích emisí (např. plynové či hnědouhelné elektrárny). Je však jasné, že v případě naplnění myšlenek a cílů trvale udržitelného rozvoje, ochrany zdraví osob a zvířat, zdravých životních podmínek a životního prostředí, je třeba hledat environmentálně přijatelnější řešení.

V této souvislosti se tedy jeví jako nezbytné zajistit flexibilitu elektrizační soustavy či soustavy zásobování teplem ne jenom na straně dodávky, ale také v místě spotřeby přijetím vhodných opatření. Jedním z nich může být zajištění dostatečné energetické flexibility. Provoz budov představuje významnou část celkové spotřeby energie, tudíž zlepšení flexibility odběru energie hraje klíčovou roli při stabilizaci energetických systémů. V souvislosti s energetickou flexibilitou budov se objevuje potřeba nalezení vhodných technik akumulace energie, buď ve formě elektřiny, nebo tepla.

Právě akumulaci tepla při změnách skupenství se autor věnuje již od roku 2003. V disertační práci autor publikoval vliv pasivních systémů s materiály se změnou skupenství (Phase Change Materials – PCMs) na vnitřní prostředí. Během uplynulých let autor spolupracoval, sdílel informace a zkušenosti s řadou zahraničních odborníků. Ať už v rámci řešení projektu TU0802 „Next generation cost effective phase change materials for increased energy efficiency in renewable energy systems in buildings (NeCoE-PCM)“, nebo na vědeckých konferencích zaměřených na problematiku akumulace tepla a trvale udržitelnou výstavbu. Možnost sdílení informací a zkušeností měla zásadní vliv na autorovu výzkumnou a vývojovou práci. Výsledky byly patrné nejen při řešení výše zmíněného mezinárodního projektu, ale jsou zřejmé i ze společné publikační činnosti. Autor dlouhodobě spolupracuje s kolegy z Fakulty stavební, Fakulty strojního inženýrství a Fakulty chemické VUT v Brně při vývoji a výzkumu akumulace s využitím PCMs. Z této spolupráce vznikla řada publikací, užitečných vzorů a patentů. Některé publikace byly v minulosti hojně citovány. Právě účinná spolupráce pracovníků ze třech fakult VUT v Brně se ukázala jako klíčová při řešení již několika grantových projektů, protože problematika akumulace tepla a jejího využití pro energeticky flexibilní budovy je multioborová. Úspěšné řešení vyžaduje znalosti a zkušenosti z oblasti chemie a stanovování fyzikálních vlastností akumulačních látek. Dále je pak pro vlastní integraci akumulačních prvků do budov potřebná znalost a zkušenost v oblasti navrhování stavebních konstrukcí, stavební tepelné techniky, přenosu tepla a technických systémů budov.

Zájem o problematiku akumulace tepla a energetickou flexibilitu budov lze pozorovat na rostoucím množství publikovaných článků na tato témata v mezinárodně uznávané databázi WoS a textu Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2018/844. Právě zmíněná směrnice vytyčuje směry, jakými se bude stavebnictví a obecně energetika vyvíjet v nadcházejícím období, a na které navazují současné výzkumné a vývojové aktivity na VUT v Brně.

2 ENERGETICKY FLEXIBILNÍ BUDOVY

Vnímání termínu „flexibilita budov“ závisí na souvislostech, ve kterých je uváděn. Např. metodika SBToolCZ [1] hodnotí mj. flexibilitu využití budovy na základě konstrukčního systému budovy, kompletačních konstrukcí, způsobu návrhu budovy a návrhu technického zařízení budovy. Pozitivně se v tomto případě hodnotí budovy s vyšší konstrukční výškou, volným prostorem bez omezujících nosných prvků a dalším technickým a technologickým řešením, které umožní relativně jednoduchou adaptaci budovy na nový způsob užívání. Existuje také konstrukční flexibilita budovy, o které se hovoří v případě návrhu budov v seizmických oblastech.

Výraz „energeticky flexibilní budova“ však popisuje koncepci budovy, která dokáže komunikovat s tzv. chytrými sítěmi a která využívá energii zejména z časově proměnlivých obnovitelných zdrojů na pokrytí provozní energetické náročnosti. Tím je umožněna náhrada obvyklých neobnovitelných primárních zdrojů energie. V případě dopravních prostředků se v této souvislosti hovoří o přechodu od vozidel se spalovacími motory k elektromobilům.

2.1 ENERGETICKÁ FLEXIBILITA V KONTEXTU OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE

V současné době se stále častěji hovoří o nezbytnosti rychlého rozvoje využívání obnovitelných zdrojů energie (RES – Renewable Energy Sources) pro krytí energetických nároků a to nejen na provoz budov. Za RES v našich podmínkách považujeme např. energii slunečního záření, větru, vody, biomasy, kapalných biopaliv, bioplynu nebo skládkového plynu, geotermální energii či energii okolního prostředí. Cílem Evropské unie (EU) týkající se podílu RES na hrubé konečné spotřebě je dosáhnout 32 % v roce 2030. Pro Českou republiku se uvažuje s vnitrostátním příspěvkem k dosažení celkového cíle na úrovni 20,8 %. Naše země už splnila cílovou hodnotu 13% podílu RES na hrubé konečné spotřebě energie stanovenou pro rok 2020, protože v roce 2017 činil podíl RES 14,8 % [2]. Průměrná hodnota 28 členských států EU v roce 2017 byla 17,5 %. Indikativní cíl ve vytápění a chlazení do roku 2030 vychází z principu zvyšování podílu RES ve vytápění a chlazení o 1,1 procentního bodu bez odpadního tepla, nebo o 1,3 procentního bodu ročně s uvažováním odpadního tepla. Dle statistiky vycházející z mezinárodní metodiky výpočtu Eurostat –Shares [2] však došlo v ČR mezi lety 2017 a 2016 k poklesu o 0,13 procentního bodu. Kvůli splnění nového cíle k roku 2030 čeká Českou republiku zavádění technologických inovací, protože podíl budov na koncové spotřebě energie je značný. Ve směrnici [3] se EU zavázala vytvořit do roku 2050 udržitelný, konkurenceschopný, bezpečný a dekarbonizovaný energetický systém. Dále se v tomto dokumentu uvádí, že účelem opatření je do roku 2050 dosáhnout dlouhodobého cíle v oblasti emisí skleníkových plynů za účelem dekarbonizace budov, které jsou odpovědné asi za 36 % všech emisí CO₂ v EU. O energetické flexibilitě směrnice [3] hovoří v odstavci týkající se elektrických vozidel. Zde se uvádí, že přechod na čistou energii je založen na opatřeních v zájmu energetické účinnosti, alternativních palivech, energii z obnovitelných zdrojů a inovativních řešeních v oblasti řízení energetické flexibility.

V současné době je elektrická síť využívána jako virtuální úložiště pro řešení možného nesouladu mezi nabídkou elektřiny a poptávkou po ní. S rostoucím podílem RES zapojených do sítě nebude tento přístup dlouhodobě udržitelný a povede k nestabilitě a poklesu účinnosti velkých zdrojů. Integrace RES ve velkém měřítku proto vyžaduje rozvoj inteligentních rozvodných sítí, označovaných jako chytré sítě (Smart Grids) [4]. U chytrých sítí hrají budovy významnou roli, protože se významnou měrou podílí na celkové spotřebě energie. Ve stávajících budovách lze navíc spatřit velký potenciál pro energetické úspory. Jak u stávající, tak u nové výstavby můžeme aplikovat řízení spotřeby či poptávky po energii (Demand Side Management – DSM). Za tímto účelem je možné aktivně využívat zabudovanou tepelně akumulaci kapacitu budovy. To ovšem bude vyžadovat inteligentní řídicí algoritmy, které vezmou do úvahy nejenom dostupnou akumulaci kapacitu, ale např. i cenu energie.

2.2 DEFINICE ENERGETICKY FLEXIBILNÍ BUDOVY

Patrně nejznámější současnou aktivitou zaměřenou na problematiku energeticky flexibilních budov je činnost IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings, který svou činnost zahájil v roce 2015. Jedním z výstupů by měla na konci činnosti být právě definice energetické flexibility. Ta by se neměla týkat jenom budov, ale také energetických sítí. Jedna ze stávajících definic, kterou lze pro názornost uvést, říká, že energetickou flexibilitou budovy se rozumí schopnost řídit poptávku po energii a její produkci podle místních klimatických podmínek, uživatelských potřeb a požadavků sítě [5]. Energetická flexibilita budovy tedy umožňuje na straně poptávky (budovy) řízení odběru energie na základě požadavků sítě nebo dostupnosti energie z obnovitelných zdrojů např. za účelem minimalizace emisí CO₂. Výsledné ukazatele energetické flexibility berou do úvahy technická zařízení budovy, komfort v budově a místní klimatické a energetické podmínky. Metody kvantifikující energetickou flexibilitu budovy hodnotí její schopnost odchýlit se od referenčního standardního provozování na základě vnějšího podnětu. Jedná se o stanovení množství energie, které může být přesunuto podle požadavků z vnějšku při dodržení požadavků na vnitřní komfort a při uvažování všech technických omezení daných stavebním řešením a technickými systémy budovy.

Energeticky flexibilní budovy tedy mohou urychlit přechod k nízkouhlíkovému energetickému systému. V případě významného navýšení podílů energie z obnovitelných zdrojů, pro které je typické kolísání v čase, může být významným způsobem ovlivněna přenosová soustava. Místní rozdíly mezi produkcí elektřiny a poptávkou mohou také vést k problémům se stabilitou napětí v soustavě a využitelností zdrojů. Budovy tedy mohou být součástí řešení v budoucích energetických sítích, ve kterých bude pravděpodobně kolísat produkce elektřiny z obnovitelných zdrojů. Moderní budovy v současné době nejenom že spotřebovávají energii, ale mohou mít integrovaný vlastní zdroj energie, což jim umožní dodávat přebytky do okolní sítě. Pro označování těchto budov se pak používá v zahraniční literatuře termín „prosumers“ [6]. Zároveň mají vysoký akumulací potenciál ve stavebních konstrukcích, nebo technických zařízeních budov, jako jsou vodní zásobníky nebo baterie. Kromě toho budovy a jejich uživatelé mohou přizpůsobit svou poptávku po energii a být flexibilní.

Schopnost energetické flexibility je stanovována buď s použitím naměřených dat, nebo na základě výsledků ze simulací založených na optimalizačních metodách zahrnující modely prediktivního řízení. Termín flexibilita se vyskytuje aktuálně v příloze IA směrnice [3], která pojednává o připravenosti budov pro chytrá řešení. V textu přílohy se mj. uvádí: „*ukazatel připravenosti pro chytrá řešení zahrnuje prvky zlepšené úspory energie, referenční srovnávání a prvky flexibility, rozšířené funkce a schopnosti vyplývající ze vzájemně více propojených a inteligentních zařízení*. V této příloze je dále popisována metodika, která uvádí tři klíčové funkce související s budovou a jejími technickými systémy a které jsou pro metodiku klíčové:

- „*schopnost zachovat míru energetické náročnosti a energeticky účinný provoz budovy přizpůsobením spotřeby energie například využíváním energie z obnovitelných zdrojů;*
- *schopnost přizpůsobovat svůj provozní mód v reakci na potřeby uživatelů s náležitým zohledněním uživatelské vstřícnosti, zachování zdravého vnitřního prostředí a schopnosti podávat zprávy o využívání energie;*
- *flexibilita, pokud jde o celkové potřeby budovy z hlediska elektřiny, včetně její schopnosti umožnit účast na aktivní i pasivní a implicitní i explicitní reakci na potřeby, vzhledem k síti, například flexibilitou a schopností přesouvat zatížení“ [3].*

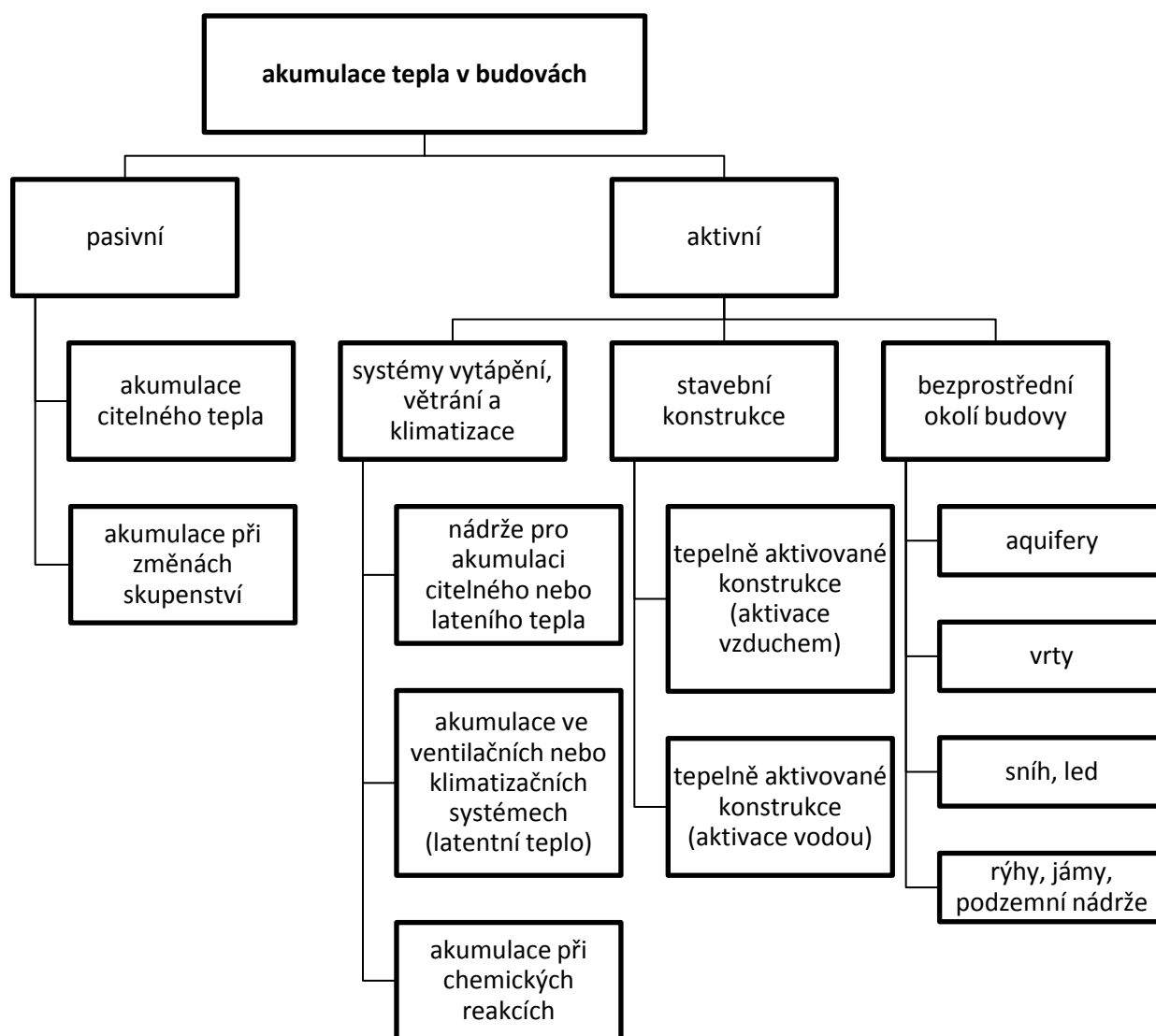
Na uvedené citaci tak lze demonstrovat aktuálnost tématu a důležitost, kterou mu přisuzují vrcholné orgány EU. Energeticky flexibilní budovy tím, že umožní vyšší zapojení obnovitelných zdrojů energie, mohou přispět i k vyšší energetické bezpečnosti pokud dojde k odklonu od tradičních fosilních paliv bez jejich náhrady např. jadernou energetikou.

3 VYUŽITÍ AKUMULACE TEPLA VE STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍCH PRO ZVÝŠENÍ ENERGETICKÉ FLEXIBILITY BUDOV

Téměř při jakékoliv lidské činnosti je uvolňováno teplo. To je buď nějakým způsobem odváděno jako teplo odpadní, nebo je využito vhodným způsobem, např. pro vytápění budov, ohřev teplé vody, nebo přeměnu na elektřinu. Pokud není možné nebo žádoucí teplo využít v daném okamžiku, kdy je uvolňováno, je možné jej akumulovat. Akumulaci tepla lze dle [7] využít zejména při:

- řešení časové neshody mezi uvolňováním tepla a jeho případnou spotřebou;
- řešení rozdílu v ceně v době špičkového odběru a mimo něj;
- řešení transportu tepla, pokud se teplo neprodukuje v místě jeho spotřeby.

V případě budov využíváme akumulaci tepla pro zvýšení jejich energetické flexibility, snížení provozních nákladů (např. využití výhodnějšího tarifu elektřiny) nebo zvýšení podílu časově nestabilních obnovitelných zdrojů energie pro krytí energetických potřeb. Na obr. 1 jsou přehledně znázorněny možnosti využití nejčastěji využívaných technik akumulace tepla v budovách.



Obr. 1 Možnosti akumulace tepla v budovách nebo v jejich blízkém okolí (autor podle [7])

Zásadní rozdíl je mezi pasivním a aktivním přístupem. U pasivního přístupu využíváme obvykle akumulčních schopností hmotných stavebních konstrukcí pro akumulaci citelného tepla. Tepelné zisky jsou buď z vnějšího prostředí např. slunečního záření, nebo z vnitřního prostředí v důsledku přítomnosti osob a zařízení uvolňujících teplo. V případě tzv. aktivní akumulace využíváme pro akumulaci materiály, které jsou pak součástí technických systémů budov. Zpravidla se jedná o systémy vytápění, větrání a klimatizace (Heating, Ventilating, Air-Conditioning – HVAC), např. tepelně aktivované konstrukce.

Obecně platí, že mezi faktory, které ovlivňují schopnost budovy zajistit energetickou flexibilitu, patří [8]:

- tepelně-technické vlastnosti stavebních konstrukcí, tj. akumulční schopnost, tepelně izolační vlastnosti či objemový faktor tvaru budovy;
- technologie instalované v budově, tj. HVAC nebo akumulční zásobníky;
- systém řízení, který umožní uživatelské interakce, možnost odezvy a reakce na externí signály jako jsou cena elektřiny nebo produkce emisí CO₂;
- chování uživatelů a požadavky na vnitřní komfort.

V literatuře lze nalézt celou řadu definic a metodik pro popis a hodnocení energeticky flexibilní budovy využívající akumulaci tepla, přičemž aktuální přehled je uveden zejména v [9,10]. Kim *et al.* [11] uvádí, že významná akumulční kapacita ve stavebních konstrukcích umožňuje budovám být využívány jako distribuční energetické zdroje zajišťující flexibilitu na straně poptávky (Demand-Side Flexibility – DSF). Flexibilita využívající tepelnou setrvačnost budov může být v tomto případě dosažena s využitím systémů HVAC.

3.1 FLEXIBILNÍ BUDOVY VYUŽÍVAJÍCÍ AKUMULACI V BUDOVĚ

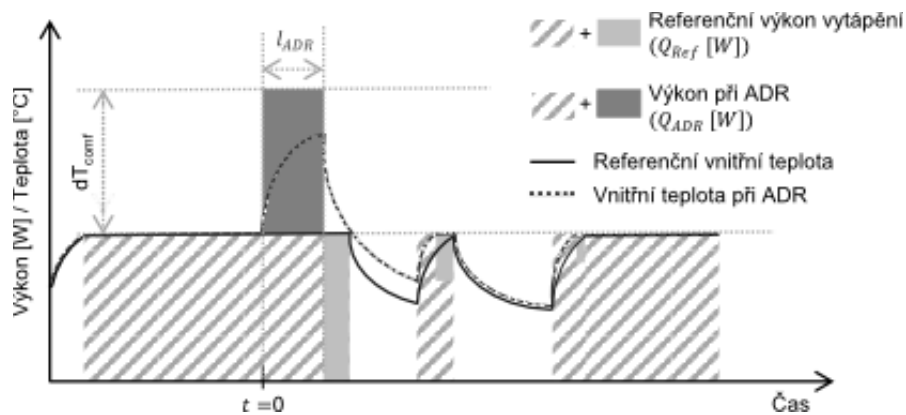
V dalším textu je uvedena vybraná metodika popisu DSF jako virtuální akumulční kapacity. Dostupná tepelně akumulční kapacita vyjadřuje množství tepla, které může být akumulováno do stavebních konstrukcí během aplikace tzv. aktivní reakce na potřebu energie (Active Demand Response – ADR). Tzn., že množství tepla (obecně energie), které může být uchováváno v budově resp. ve stavebních konstrukcích, není závislé jen na tepelně technických vlastnostech stavebních materiálů, ale také na technickém řešení, aktuálním režimu provozování a řízení systémů HVAC. Množství uchovávané energie se ale mění v závislosti na klimatických podmínkách a chování uživatelů, a proto popis ADR musí brát v potaz časově závislé aspekty.

Dostupnou kapacitu v případě uvažování ADR lze tedy definovat jako množství energie, které můžeme uložit do akumulčního systému bez ohrožení komfortu v časovém rámci ADR za daných dynamických okrajových podmínek [12]. ADR začíná v situaci, kdy vnitřní teplota v budově se rovná minimální teplotě pro stanovený rozsah teplotního komfortu. Dostupná tepelná kapacita je pak dána integrací rozdílů mezi tepelným výkonem při ADR a tepelným výkonem při normálním provozu:

$$C_{ADR} = \int_0^{l_{ADR}} (Q_{ADR} - Q_{Ref}) dt \quad (1)$$

kde C_{ADR} je dostupná tepelná kapacita ve Ws
 Q_{ADR} výkon tepelné soustavy při ADR ve W
 Q_{Ref} výkon tepelné soustavy při běžném profilu užívání ve W
 l_{ADR} doba trvání ADR v s

Na obr. 2 je znázorněn proces ADR, při kterém vzrůstá teplota v důsledku provozu otopné soustavy o ΔT_{comf} pro časový úsek l_{ADR} . Referenční profil užívání odpovídá profilu výkonu otopné soustavy, která udržuje teplotu rovnou minimální teplotě pro zajištění komfortu pro optimální potřebu tepla.



Obr. 2 Znárodnění vlivu výkonu vytápění a akumulace na vnitřní teplotu (autor podle [9])

Dostupná tepelná kapacita C_{ADR} pak představuje maximální množství tepla, které může být akumulováno během daného času a které závisí na okrajových podmínkách pro tepelný komfort, na klimatických podmínkách a chování uživatelů. Významnou roli při užití akumulace stavebními konstrukcemi za účelem zvýšení energetické flexibility hraje tepelně izolační schopnost obálky budovy, kdy u budovy s velmi dobře izolovanou obálkou můžeme očekávat větší stabilitu a efektivitu z důvodu nižších tepelných ztrát [6].

Pro zajištění maximální energetické flexibility budovy ve vztahu k okolní síti je třeba, aby už při jejím návrhu nebo při větší modernizaci byla jak obálka budovy, tak systémy HVAC navrženy s cílem minimalizace spotřeby energie. I zde platí, že „nejlevnější“ je ta energie, kterou budova pro svůj provoz vůbec nepotřebuje.

Ze schématu na obr. 2 vyplývá, že využívání tepelně akumuláční kapacity stavebních konstrukcí způsobuje nárůst teploty v budově a tím zvýšení tepelných ztrát prostupem příp. větráním. Jenom určitá část akumulovaného tepla může být efektivně využita pro udržování tepelného komfortu a snížení tepelného výkonu v době, která následuje po ADR. Účinnost akumulace η_{ADR} je v tomto kontextu definována jako podíl tepla akumulovaného během ADR, který může být následně využit pro snížení tepelného výkonu potřebného pro udržování tepelného komfortu. Účinnost akumulace lze tedy vyjádřit následujícím vztahem dle [12]:

$$\eta_{ADR} = 1 - \frac{\int_0^{\infty} (Q_{ADR} - Q_{Ref}) dt}{\int_0^{l_{ADR}} (Q_{ADR} - Q_{Ref}) dt} \quad (2)$$

kde η_{ADR} je účinnost akumulace
 Q_{ADR} výkon tepelné soustavy při ADR ve W
 Q_{Ref} výkon tepelné soustavy při běžném profilu užívání ve W
 l_{ADR} doba trvání ADR v s

Integrál ve jmenovateli odpovídá teplu akumulovanému v době akumulace (na obr. 2 tmavě šedá oblast), nebo dostupné tepelné kapacitě. Část tohoto tepla tedy může být využita po ukončení ADR. Možné snížení výkonu je pak označeno na obr. 2 světle šedou oblastí. Ztráty při akumulaci vyvolané tepelnou aktivací stavebních konstrukcí představované čitatelem v rovnici (2) pak odpovídají části tepla akumulovaného během ADR, které není následně využito.

Zatímco C_{ADR} a η_{ADR} můžeme využít pro popis vlastností budovy ve fázi návrhu, schopnost posunu výkonu v čase (Power Shifting Capability – PSC) je mírou okamžité energetické flexibility. PSC představuje vztah mezi změnou výkonu vytápění (Q_{δ}) a dobou trvání (t_{δ}),

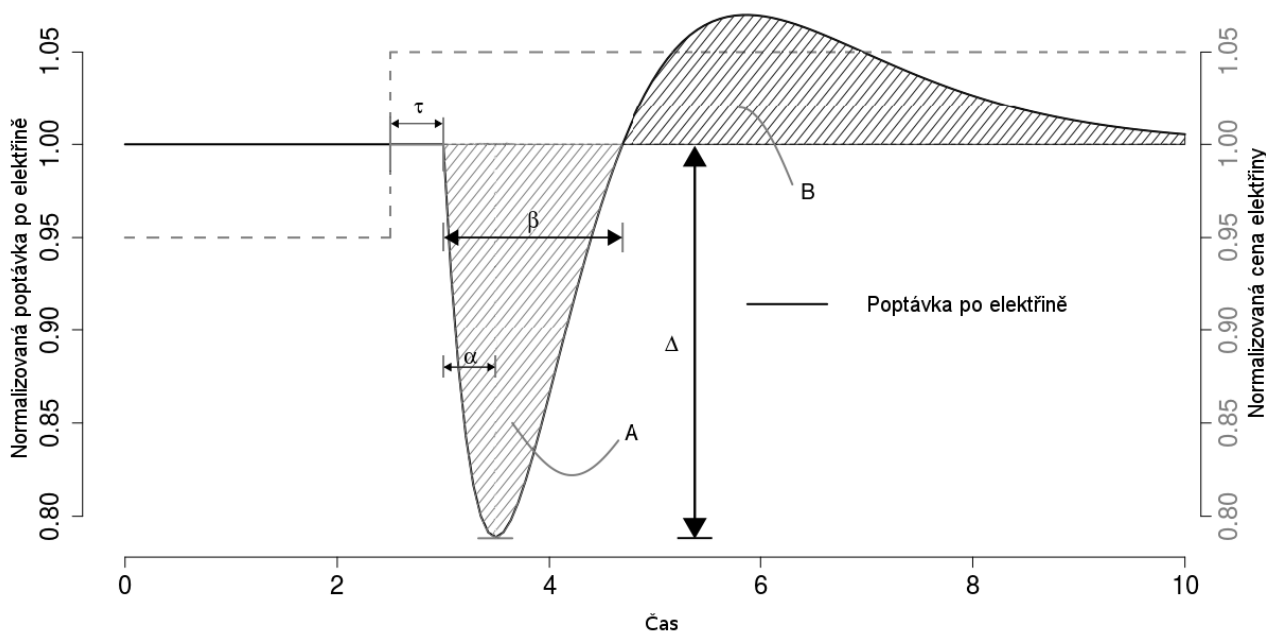
po kterou může být tento posun udržován, při uvažování budoucích okrajových podmínek za situace, že nebude ohrožen tepelný komfort. Změna výkonu je definována jako rozdíl mezi tepelným výkonem během ADR a referenčním výkonem během standardního profilu užívání.

$$Q_{\delta} = Q_{ADR} - Q_{Ref} \quad (3)$$

kde Q_{δ} je změna výkonu ve W
 Q_{ADR} výkon tepelné soustavy při ADR ve W
 Q_{Ref} výkon tepelné soustavy při běžném profilu užívání ve W

Doba trvání (t_{δ}) představuje časový úsek, dokud nejsou dosaženy hranice tepelné pohody, tedy buď T_{max} nebo T_{min} . PSC při změně teplot směrem nahoru nebo dolů odpovídá zvýšení, nebo snížení výkonu vytápění oproti běžné situaci.

Jak bylo zmíněno, energetická flexibilita budovy není konstantní veličinou v čase, ale mění se pod vlivem různých faktorů (např. hodinová cena energie, technologická opatření, přítomnost RES, okolní teplota) a také ji ovlivňují řídicí signály (PS – Penalty Signals). Tyto faktory pak vyvolávají odezvu budovy [13], která je schopná přesunout okamžitou poptávku po energii pro minimalizaci dopadu PS. Tento řídicí signál může být navržen tak, aby buď minimalizoval spotřebu energie, nebo minimalizoval cenu, nebo minimalizoval uhlíkovou stopu domu, příp. se jedná o kombinaci.



Obr. 3 Příklad odezvy spotřeby elektřiny v budově na řídicí signál (autor podle [13] a [8])

Na obr. 3 je znázorněno 6 veličin, které popisují flexibilitu. Čas (τ) je prodleva mezi signálem a startem změny v poptávce, α je čas počítaný od startu změny v poptávce po dosažení nejnižší úrovně spotřeby, β je celkový čas snížené poptávky po energii, Δ je maximální změna výkonu po vyslání řídicího signálu, A je celkové množství snížené poptávky po energii a B je celkové množství zvýšené poptávky po energii. Tyto veličiny zároveň popisují proveditelnost řídicích strategií. Pokud vliv řízení vyžaduje rychlou odezvu, pak je důležitá krátká prodleva (τ) a čas (α).

Energetická flexibilita budovy nezáleží jen na fyzikálních vlastnostech budovy. Jednou z dalších podmínek pro dosažení energetické flexibility budov je ochota jejich uživatelů přijmout za své chytré technologie a změnit svůj zaběhnutý přístup k zacházení s energií.

Li *et al.* [14] publikovali výsledky výzkumu v Nizozemí, ze kterého vyplynulo, že 60 % dotázaných dosud neslyšelo o chytrých sítích. Tato neznalost roste s věkem respondentů. Z výzkumu dále vyplynulo, že 11 % dotázaných bylo shledáno potenciálními uživateli flexibilních budov. Autoři za potenciální uživatele považují ty, kteří jsou ochotní:

- odložit čas spuštění nejméně poloviny domácích spotřebičů;
- začít používat nejméně polovinu chytrých technologií uvedených v dotazníku, např. chytré myčky nádobí, pračky, sušičky, ledničky, domácí systém pro řízení spotřeby energie apod.
- snížit nastavenou teplotu vytápění.

Dostupná tepelně akumulací kapacita definovaná výše je také závislá na způsobu akumulace, tedy zda se jedná o akumulaci citelného tepla, skupenského tepla, nebo tepla vratných chemických reakcí. Standardní přístup využívá akumulaci citelného tepla do hmotných stavebních konstrukcí, příp. se využívá vodních zásobníků v rámci HVAC. Další text je zaměřen na popis a využití zatím málo rozšířené akumulace tepla při změnách skupenství.

3.2 AKUMULACE TEPLA PŘI ZMĚNÁCH SKUPENSTVÍ

Hmotné stavební konstrukce je možné nahradit konstrukcemi lehkými, do kterých lze integrovat materiály se změnou skupenství (Phase Change Materials – PCMs), které v úzkém teplotním intervalu dokáží akumulovat značné množství tepla. Vzhledem k tomu, že při akumulaci a zpětném uvolňování tepla dochází k změně skupenství, je třeba, aby tyto materiály byly uzavřeny v zásobníku nebo ve struktuře stavebního materiálu.

Obecně se při integraci PCMs do stavebních konstrukcí využívá impregnace porézních materiálů akumulací látkou, rozptýlení kapslí s PCMs např. do sádrové nebo jílové omítky, instalace kontejnerů, sáčků nebo polštářků s PCMs ve stropním podhledu. Nejnovější technologií je instalace tvarově stabilizovaných PCMs, sestávajících z akumulací látky a matričního materiálu (vysoko hustotní polyetylén nebo styren-butadien-styren). V případě, kdy uvažujeme s instalací PCMs uzavřených v nějakém vhodném obalu, dělíme jednotlivé prvky dle velikosti na: kontejnery či zásobníky tzv. makrokapsle (nad 1 mm), mikrokapsle (od 0 do 1000 μm) a nanokapsle (od 0 do 1000 nm) [15].

V současné době je k dispozici velké množství průmyslově vyráběných akumulací látek dostupných na evropském či světovém trhu. U řady aplikací se používají právě speciálně vyráběné látky, které jsou nabízeny i v různých typech obalů. Tyto materiály se liší jak rozsahem teplot tání, tak obsahem latentního tepla využitelného při akumulaci. Rozdílná je také tepelná vodivost, kdy horší je zpravidla u materiálů organického původu. Vyšší obsah latentního tepla mají anorganické materiály, které ale mohou mít nekongruentní tání. Mimo speciálně vyráběných PCMs lze akumulací látky vybírat ze dvou skupin. Obecně PCMs dělíme dle [16,17] na:

- organické materiály
 - parafíny – lineární alkany;
 - mastné kyseliny, např. kyselina stearová;
 - estery mastných kyselin;
 - cukr alkoholy;
 - glykoly, např. polyetylén glykol (PEG).
- anorganické materiály
 - soli, např. LiNO_3 , MgCl_2 nebo KF ;
 - hydráty solí, např. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ nebo $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$;
 - solná eutektika např. $\text{CaCl}_2/\text{NaCl}/\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$ (48/4,3/0,4/47,3);
 - kovy a slitiny kovů, např. celsium nebo indium.

Hustotu akumulované energie v určitém teplotním rozsahu vymezeném teplotami T_{high} a T_{low} lze vyjádřit rozdílem entalpií [18]:

$$\Delta h(T_{high} - T_{low}) = h(T_{high}) - h(T_{low}) \quad (4)$$

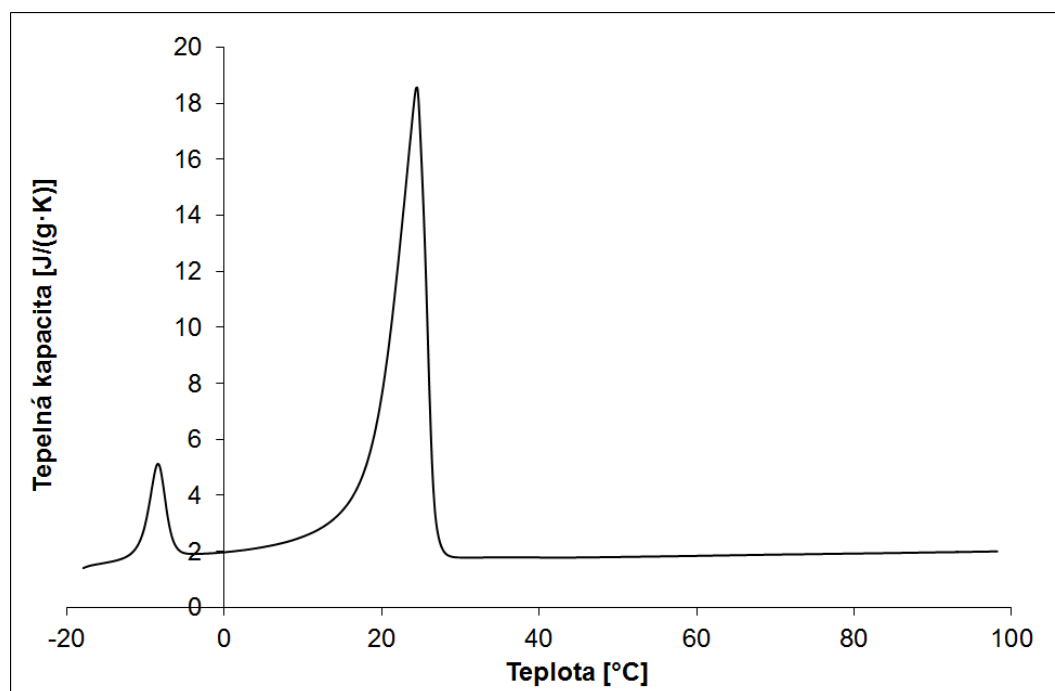
kde Δh je změna entalpie v J/kg
 T_{low} teplota na začátku akumulace v K
 T_{high} teplota na konci akumulace v K
 $h(T_{low})$ entalpie na začátku akumulace v J/kg
 $h(T_{high})$ entalpie na konci akumulace v J/kg

V případě idealizovaného PCM předpokládáme, že tání, nukleace a tuhnutí probíhá při stejné teplotě, tzn. při teplotě fázové změny T_{pc} . Změnu entalpie pak můžeme popsat následujícím vztahem, ve kterém je navíc uvažováno s konstantními tepelnými kapacitami v pevném a kapalném skupenství [18]:

$$\Delta h(T_{high}, T_{low}) = c_{p,sol} \cdot (T_{pc} - T_{low}) + \Delta_{pc}h + c_{p,liq} \cdot (T_{high} - T_{pc}) \quad (5)$$

kde Δh je změna entalpie v J/kg
 T_{low} teplota na začátku akumulace v K
 T_{high} teplota na konci akumulace v K
 $c_{p,sol}$ měrná tepelná kapacita v pevném stavu v J/(kg·K)
 $c_{p,liq}$ měrná tepelná kapacita v kapalném stavu v J/(kg·K)

Velikost vypočítané „efektivní“ tepelné kapacity při ohřevu akumulární látky, v daném případě mikrokapsle s PCM (MPCMs – Microencapsulated Phase Change Materials) s obchodním názvem Micronal PCM® DS 5040X, je uvedena na obr. 4. Křivka byla vypočítána na základě výsledků měření z diferenční skenovací kalorimetrie (DSC – Different Scanning Calorimetry).



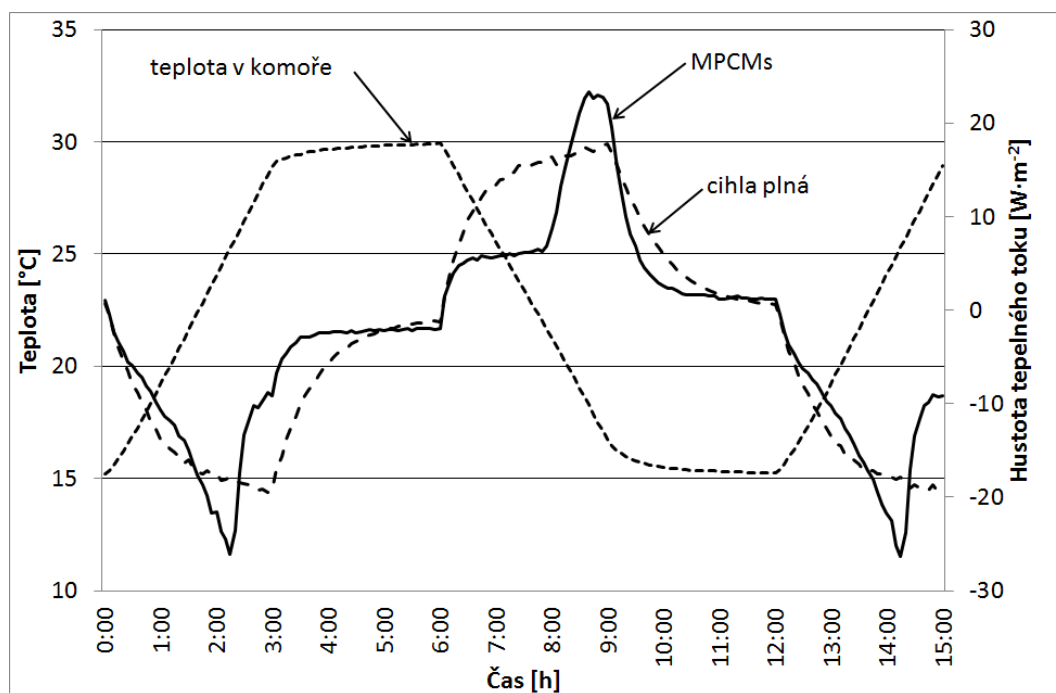
Obr. 4 Průběh hodnot vypočítané tepelné kapacity pro vybrané MPCM (archiv autora)

Analýza DSC byla prováděna v rámci řešení projektu Grantové agentury České republiky č. 15-19162S „Výzkum a vývoj tepelně akumulčních médií na bázi materiálů se změnou skupenství pro vyšší energetickou účinnost budov“. Analýza ukazuje, že u těchto materiálů organického původu dochází ke dvěma fázovým změnám. Dále je zřejmé, že k fázovým změnám dochází v určitém teplotním intervalu, což je typické pro organické látky a látky, které nejsou chemicky čisté. Zvolený typ kapslí se ukázal jako vhodný pro aplikace ve stavebních konstrukcích, protože kapsle s PCM je možné přimísit do omítkových směsí.

3.3 POROVNÁNÍ AKUMULACE CITELNÉHO TEPLA A AKUMULACE TEPLA PŘI ZMĚNÁCH SKUPENSTVÍ

Vyšší hustotu akumulované energie u PCMs v relativně úzkém teplotním rozsahu v porovnání s akumulací citelného tepla lze demonstrovat na obr. 5. Jedná se o komparativní měření, kdy v malé klimatické komoře byla umístěna cihla plná pálená a dutá plastová deska vyplněná kapslemi s PCMs (ozn. MPCMs). Teplotní profil v klimatické komoře byl nastaven a udržován s časovými kroky o délce 3 hodiny:

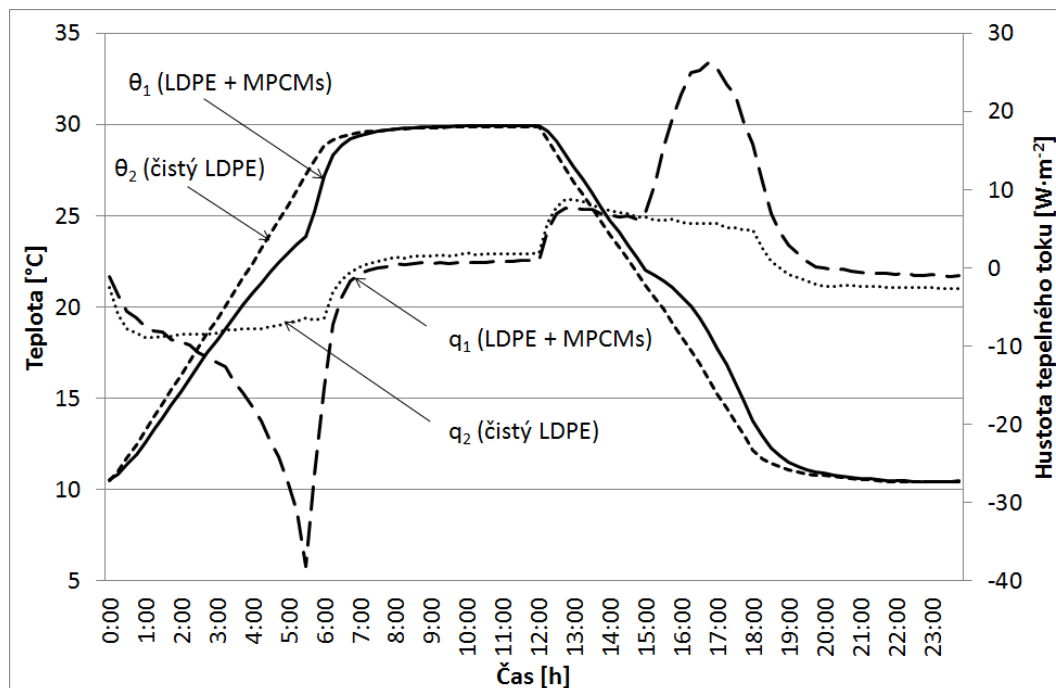
- vzestup z 15 °C na 30 °C;
- konstantní teplota 30 °C;
- pokles z 30 °C na 15 °C;
- konstantní teplota 15 °C.



Obr. 5 Porovnání průběhu hustot tepelných toků při akumulaci citelného tepla a akumulaci při změnách skupenství (archiv autora)

Na grafu na obr. 5 je patrný odlišný průběh naměřeného teplotního toku, kdy u cihly koresponduje hustota tepelného toku s rostoucí teplotou v komoře. Naproti tomu u duté desky s MPCMs je zřejmá výrazná změna tepelného toku, kdy největší záporná hodnota byla naměřena právě v oblasti změny skupenství. Po zkapalnění obsahu kapslí došlo k vyrovnání hustot tepelných toků. Při ochlazení, tuhnutí MPCMs, dochází k výrazně odlišnému průběhu uvolňování tepla v oblasti fázové přeměny v porovnání s průběhem u cihly. Při dosažení konstantní teploty v komoře a uvolnění akumulovaného tepla se obě hustoty tepelného toku vyrovnávají.

V rámci spolupráce s Ústavem polymerů Slovenské akademie věd v Bratislavě byl vyvinut prvek na bázi nízko hustotního polyetylenu (LDPE – Light Density Polyethylene), který tvoří matici pro MPCMs. Na obr. 6 jsou pak uvedeny průběhy hustot tepelných toků pro LDPE se 40% hmotnostním podílem MPCMs a pro čistý LDPE. Teplotní režim v klimatické komoře je podobný s předchozím případem s tím rozdílem, že změna teploty nastává každých šest hodin a teplotní rozsah je mezi 10 a 30 °C.



Obr. 6 Porovnání průběhu hustot tepelných toků (ozn. q) a povrchových teplot (ozn. θ) pro čistý LDPE a LDPE se 40% podílem MPCMs (archiv autora)

Je třeba zmínit, že podíl vlastní akumulční látky v LDPE je nízký, protože 40% podíl MPCMs v sobě zahrnuje nejenom akumulční látku, ale i obalový materiál tj. kapsli. I přes tuto skutečnost je zřejmý pozvolnější nárůst povrchové teploty u desky s MPCMs v důsledku tání doprovázeného zvýšenou spotřebou tepla. To je patrné z křivky q_1 , která odpovídá hustotě tepelného toku pro LDPE s MPCMs, a kdy její největší záporná hodnota odpovídá rozsahu teplot fázové změny. V případě tuhnutí pak lze spatřit odklon křivky povrchové teploty LDPE s MPCMs od křivky povrchové teploty desky LDPE, která kopíruje teplotu vzduchu v komoře. Rozdíl mezi LDPE a LDPE s MPCMs v uvolňování tepla v čase do okolí je vidět i z křivek hustot tepelných toků, kdy maximální kladná hodnota hustoty tepelného toku koresponduje právě s odlišným průběhem povrchové teploty pro LDPE s MPCMs.

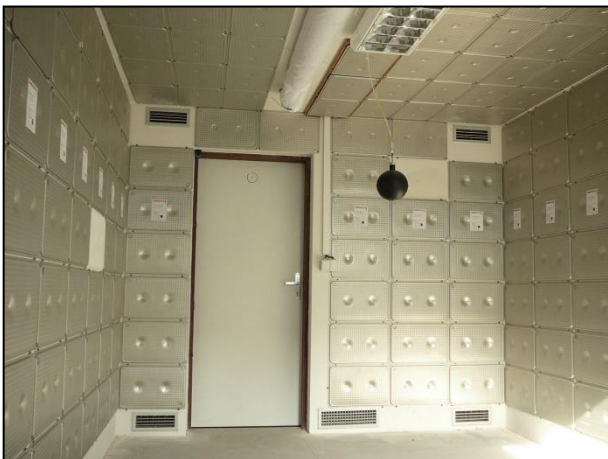
V rámci řešení projektů Grantové agentury České republiky byly zkoumány vlastnosti vybraných akumulčních látek zejména speciálně vyráběných PCMs na organické nebo anorganické bázi. Výsledky měření DSC byly následně uplatněny nejenom při samotném výběru PCMs pro pilotní instalace v testovacích místnostech, ale sloužily zejména jako vstupní údaje pro modelování fázových změn členy týmu z Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. V rámci testování se ukázalo, že naměřené hodnoty jsou závislé na nastavení DSC, zejména na průběhu teplotní rampy při vlastním měření. Důležité bylo však zjištění, že u materiálů anorganického původu dochází k výraznému přechlazení, což představuje vážný problém v případě, kdy je žádoucí rychlá odezva akumulčního systému na změnu okolních podmínek.

3.4 LEHKÉ TEPELNĚ AKUMULAČNÍ KONSTRUKCE VYUŽÍVAJÍCÍ AKUMULACI PŘI ZMĚNÁCH SKUPENSTVÍ

Vzhledem k zjevnému nárůstu výstavby budov z lehkých stavebních hmot se začíná do popředí dostávat potřeba zajištění tepelné stability v letním období, protože se ukazuje, že spotřeba tepla na chlazení může u těchto budov přesáhnout spotřebu energie na vytápění. Také zajištění energetické flexibility u těchto staveb je vhodné řešit jiným způsobem než u tradiční výstavby s masivními obvodovými a vnitřními konstrukcemi, protože tepelně akumuláční kapacita konstrukcí z lehkých stavebních hmot je nízká. Pro výzkum a vývoj prvků zabudovatelných do lehkých stavebních konstrukcí za účelem zvýšení tepelné stability a energetické flexibility byly v půdním prostoru budovy D Ústavu pozemního stavitelství zřízeny testovací místnosti. Jejich obalové konstrukce s výjimkou podlahy jsou provedeny jako sendvičové opláštěné sádkartonovými deskami s vláknitou tepelnou izolací v tl. 200 mm. Podlahová plocha každé testovací místnosti je 16,5 m² a každá místnost je prosvětlena střešním oknem. Vzduchotechnická jednotka umožňuje řízené větrání obou místností. Jedna místnost vždy slouží jako referenční, druhá je pak určena pro instalaci prvků s PCMs.

V letech 2008 až 2012 byly práce zaměřeny na vliv hliníkových panelů s PCMs a dvojitých tepelně akumuláčních stěn instalovaných na vnitřním líci obalových konstrukcí na tepelné mikroklima. U tohoto konstrukčního uspořádání se vycházelo z předpokladu, že aktivace tepelně akumuláční vrstvy, tzn. odvod naakumulované energie, je realizován přirozenou výměnou tepla mezi akumuláčními panely a vnitřním prostředím. Následně po instalaci vzduchotechnické jednotky byla aktivace akumuláčních panelů (obr. 7) zajišťována pomocí řízeného větrání. Jako efektivní se ukázalo větrání s vysokou intenzitou v nočních hodinách, kdy byl přívodní vzduch ochlazován v instalované jednotce. Tento princip však není možné využívat v případě, pokud by dané prostory byly využívány osobami i v nočních hodinách.

Dvojitě tepelně akumuláční stěny (obr. 8) pak umožňovaly oddělit větrací okruh pro aktivaci PCMs v dutinkových deskách od vnitřního prostředí. Ukázalo se však, že se jedná o komplikovaný systém, jehož efekt na vnitřní prostředí byl malý. Další variantou byl provětrávaný stropní podhled, kdy tepelně akumuláční vrstva byla tvořena hliníkovými kontejnery naplněnými PCMs. Toto řešení bylo technicky jednodušší, avšak efektivita nebyla dostatečná pro udržení požadovaného stavu vnitřního prostředí.



Obr. 7 Instalace akumuláčních panelů (autor)



Obr. 8 Instalace akumuláčních stěn (autor)

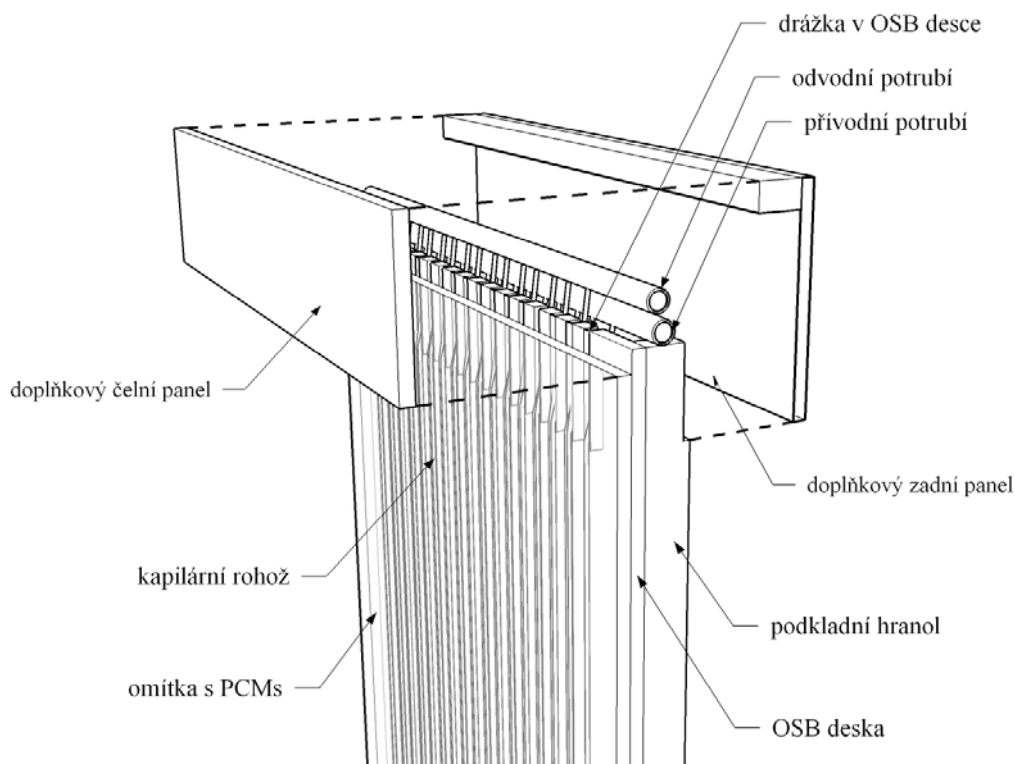
Všechna provedená měření prokázala, že pro zajištění spolehlivosti systému k udržení vnitřní tepelné stability v letním období je zapotřebí umožnit periodickou aktivaci akumuláčních panelů a akumulované teplo odvést v nočních hodinách.

3.5 TEPELNĚ AKUMULAČNÍ MODUL

Zkušenosti s výše popsaným řešením vedly k vývoji systému, který by byl vhodný právě pro energeticky flexibilní budovy a měl by využít nejen v případě chlazení, ale i vytápění budov. Jedno z možných řešení, jak využít akumulčních vlastností stavebních konstrukcí, nabízí tepelná aktivace, kdy je v konstrukci pomocí hydraulického okruhu akumulováno teplo nebo chlad. V případě hmotných konstrukcí jsou tato řešení již delší dobu používána. Pro lehké konstrukce bylo navrženo a testováno řešení založené na tenké tepelně akumulční vrstvě, kdy pro aktivaci slouží soustava kapilárních rohoží naplněných nemrznoucí kapalinou. Obdobné řešení lze nalézt i v literatuře [19], kdy se pro přenos chladu navíc využívalo tzv. ice slurries. Jednalo se o instalaci chlazeného stropního podhledu, kde však nebylo možné provádět komparativní měření realizovaná následně v testovacích místnostech na FAST VUT v Brně.

V první fázi byly v experimentální místnosti umístěny na stěnách a stropu panely, u kterých byly na podkladní vrstvě nalepeny desky z pěnového polystyrenu sloužící pro izolování tepelně aktivované vrstvy. Ta byla tvořena vrstvou sádrové omítky s příměsí 30 hm.% tepelně akumulčních kapslí Micronal PCM[®]DS5008 X. Jako zdroj chladu pro letní období sloužila upravená klimatizační jednotka vzduch–vzduch opatřená výměníkem pro okruh chladicí kapaliny. Zásadní podmínkou pro fungování tohoto systému je potřeba kontaktu vnitřního prostředí s tepelně aktivovanou vrstvou, tzn. je optimální, aby při instalaci stěnových prvků byla již jasná představa o budoucím uspořádání interiéru. Umístění na stropu je v tomto případě nejméně problematické.

Na základě pozitivních výsledků z měření byl navržen nový energeticky flexibilní systém, který je založen na sestavě tepelně akumulčních modulů s uvažovanou instalací na lehké stěny, stropy, příp. na podlahy. Schéma stěnového panelu je uvedeno na obr. 9. Každý tepelně akumulční modul sestává z podkladní desky typu OSB vyztužené dřevěnými hranoly, na které je provedena sádrová omítka tl. 15 mm s 30% hm. podílem tepelně akumulčních kapslí na bázi parafínu. V tomto případě se jedná se o výrobek Micronal PCM[®]DS5040 X od firmy BASF. Jeho vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1. V omítce je zabudována kapilární rohož pro přívod topné nebo chladicí vody. Tepelně akumulční modul je určen pro suchou montáž, zejména ve dřevostavbách.



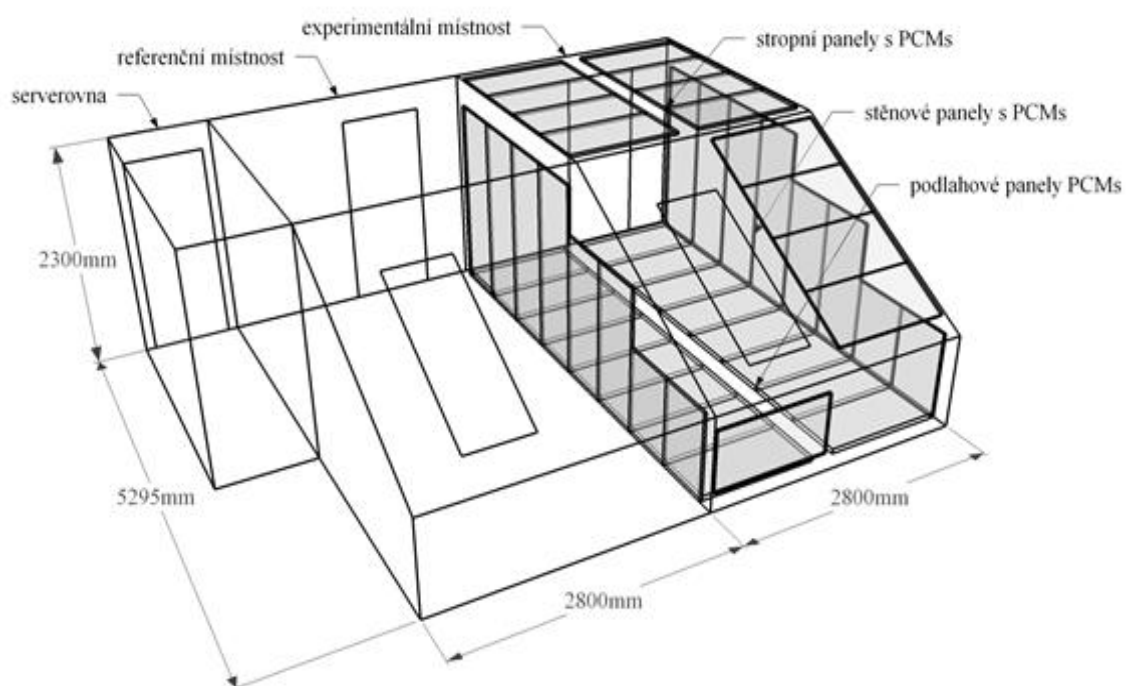
Obr. 9 Tepelně akumulční modul (archiv autora)

Tab. 1 Naměřené charakteristické vlastnosti pro Micronal PCM®DS5040 X

Latentní teplo [J/g]		Onsetová teplota [°C]	
ohřev	chlazení	ohřev	chlazení
92	94	19	22

Předností modulu je jeho povrchová úprava ze sádrové omítky s MPCMs, která slouží jako standardní podklad pro další finální úpravy, jako jsou malování nebo tapetování. V horní části modulu je prostor pro přívodní a odvodní potrubí. Tento prostor je kryt sádrokartonovou deskou tl. 15 mm. Spáry mezi moduly se zapravují stejným způsobem jako u běžných sádrokartonových desek. Ztužující hranoly vytváří instalační meziprostor pro rozvody elektřiny, vody a kanalizace.

Jako zdroj topné/chladičí kapaliny bylo instalováno tepelné čerpadlo vzduch–voda, jehož provoz lze řídit podle teploty v interiéru experimentální místnosti nebo podle teploty vody na výstupu z tepelného čerpadla.



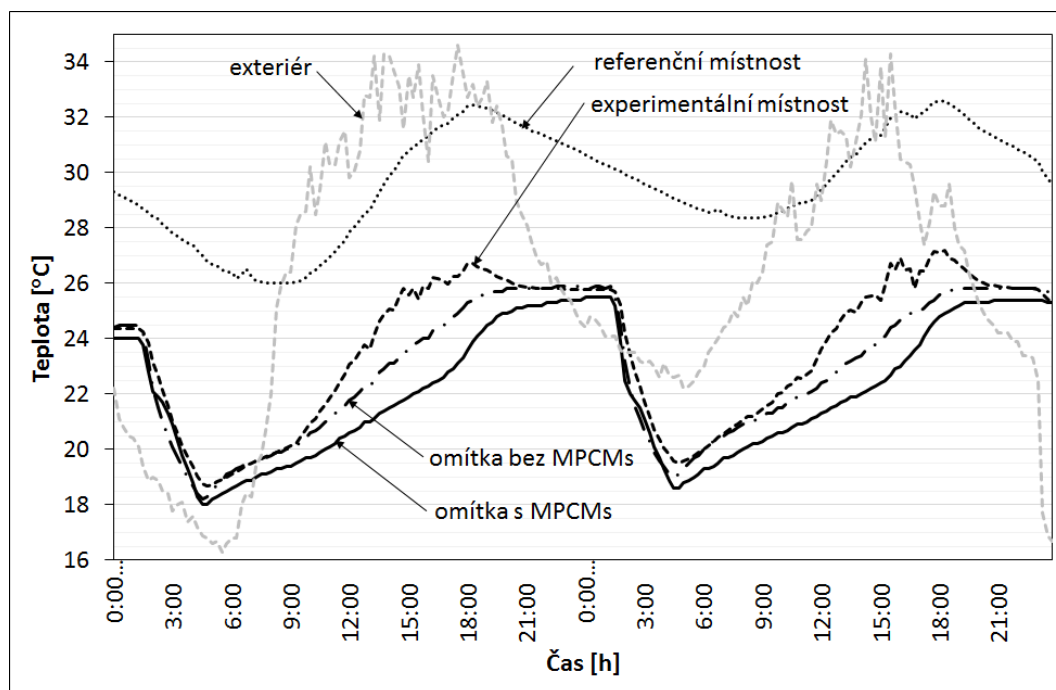
Obr. 10 Pilotní instalace pro komparativní měření v testovacích místnostech (archiv autora)

Příklad režimu, který by bylo možné využít pro energeticky flexibilní budovy v případě využívání mimošpičkové elektřiny, je znázorněn na obr. 11. Nastavení technických systémů v testovacích místnostech bylo následující:

- tepelné čerpadlo chladí hydraulický okruh kapilárních rohoží v experimentální místnosti pouze v době mezi 1:00 a 4:00, pokud teplota vzduchu překročí 17 °C;
- klimatizační jednotka v referenční místnosti je celodenně vypnuta;
- větrání je zajišťováno pouze otevřenými okny.

Na tomto příkladu je vidět, že tepelná aktivace, tj. vychlazení MPCMs během 3 hodin s možností využití mimošpičkové elektřiny, zajistí výslednou denní teplotu kulového teploměru pod 27 °C. V porovnání se situací v referenční místnosti, kdy teplota není ovlivňována žádným technickým zařízením, se jedná o rozdíl mezi teplotami kulového teploměru 5 °C. Je také patrný rozdíl v průběhu povrchových teplot na panelech s omítkou s MPCMs a běžnou sádrovou omítkou. Jak při ohřevu, tak při chlazení je na křivce patrná oblast fázové změny.

Dále byla zkoušena celá řada režimů provozování experimentální i referenční místnosti za účelem zajištění co nejmenších provozních nákladů na aktivaci tepelně akumulční vrstvy.



Obr. 11 Průběhy teplot kulového teploměru v testovacích místnostech a povrchové teploty sádrové omítky a omítky s MPCMs (archiv autora)

System může být rovněž provozován tak, že lze využít přeměny elektřiny v denních hodinách z fotovoltaických panelů instalovaných na budově pro chlazení pomocí kapilárních rohoží v omítce. Díky rozptýleným MPCMs v sádrové omítce by pak bylo možné udržovat požadovaný stav vnitřního prostředí např. u obytných budov i v nočních hodinách v případě vysokých venkovních nočních teplot a vyhnout se tak spotřebě elektřiny ze sítě pro chlazení budovy. System je možno upravit, aby byl připraven na komunikaci s řídicím signálem, jak je popsáno v kap. 3.1. Obdobně lze využít elektřinu z fotovoltaických panelů pro vytápění v zimním nebo přechodném období.

V rámci komparativního měření v testovacích místnostech byla sledována i celková provozní energetická náročnost zařízení pro zajištění tepelné pohody v letním období. Pro porovnání sloužila právě referenční místnost s instalovanou běžně používanou klimatizační jednotkou. Bohužel se ukázalo, že na instalaci v jedné místnosti není možné dostatečně prokázat úsporu provozních nákladů vzhledem k velikosti použitého tepelného čerpadla. Jasný potenciál energetické flexibility však prokázán byl a system je provozován již několik let a nadále slouží pro potřeby optimalizace a ověřování jeho funkčnosti v reálných podmínkách.

Výše popsané technické řešení je ochráněno českým patentem č. 303841s názvem „Tepelně akumulční modul se systémem kapilárních rohoží a sestava z těchto modulů“. Návrh sestavy tepelně akumulčních panelů do podoby, která by byla vhodná pro komercializaci, patentová ochrana a fáze komercializace byly podpořeny projektem „VUT Energetické zdroje“. Výsledné řešení bylo pro potřeby komercializace nazváno „Chytrá stěna“. Tento produkt byl vybrán mezi finalisty v kategorii Inovační nápad v soutěži Česká inovace 2014. Dále obdržel prestižní ocenění „Zlatá medaile IBF 2015“. Výrobek je chráněn průmyslovým vzorem č. 36168 s názvem „Tepelně akumulční modul se systémem kapilárních rohoží“.

4 AKTUÁLNĚ ŘEŠENÁ TÉMATA

V současné době se autor jako řešitel věnuje spolu s kolegy z Fakulty stavební, Fakulty strojního inženýrství a Fakulty chemické VUT v Brně projektu Grantové agentury České republiky č. 19-20943S „Kompatibilita plastů a kovů s materiály pro akumulaci tepla při změnách skupenství pro aplikaci v budovách“. Projekt je zaměřen na problematiku materiálové kompatibility PCMs s materiály, které lze využít pro vytvoření jejich zásobníku nebo tepelného výměníku. Kromě toho je uvažováno s výzkumem potenciálu aktuálně průmyslově vyráběných a na spolupracujících pracovištích vyvinutých PCMs pro případné využití u energeticky flexibilních budov. U vybraných PCMs budou navíc prováděny testy zaměřené zejména na jejich hustotu skladované energie a stabilitu tepelně technických vlastností při cyklickém zatěžování. Další oblastí, na kterou je projekt zaměřen, je zefektivnění přenosu tepla v zásobnících tepla a hodnocení environmentálních dopadů akumulace tepla při použití PCMs.

4.1 KOMPATIBILITA AKUMULAČNÍCH LÁTEK S OBALOVÝMI MATERIÁLY

V kapitole 3.4 byly zmíněny instalace hliníkových panelů s PCMs v experimentální místnosti. Během řešení předchozích grantových úloh bylo pořízeno několik dalších typů průmyslově vyráběných PCMs pro přímou instalaci do stavebních konstrukcí nebo do zásobníků tepla. Jednalo se např. o plastové kontejnery, polštářky, válcové prvky nebo speciální bublinkové fólie s PCMs. Bohužel u některých výrobců se po čase začaly projevovat netěsnosti a průsaky akumulační látky. Právě to je důvodem, proč je třeba se kompatibilitou PCMs s obalovými materiály zabývat. V současné době jsou k dispozici výsledky pro kombinaci čtyř vybraných PCMs a třech typů plastů, které se ve stavební praxi běžně používají. Přehled vlastností vybraných PCMs je uveden v tab. 2. Ze skupiny anorganických látek byly vybrány Rubitherm SP22 a Rubitherm SP25. Organické PCMs jsou zastoupeny výrobky firmy Sasol, konkrétně se jedná o Linpar 17 a Linpar 1820. Všechny PCMs jsou vzhledem k rozsahu teplot tání a velikosti skupenského tepla tání vhodné pro integraci do stavebních konstrukcí. Jako obalový materiál byly v testech uvažovány polypropylén (PP-H), vysokohustotní polyetylén (HDPE) a polyvinylchlorid (PVC-U).

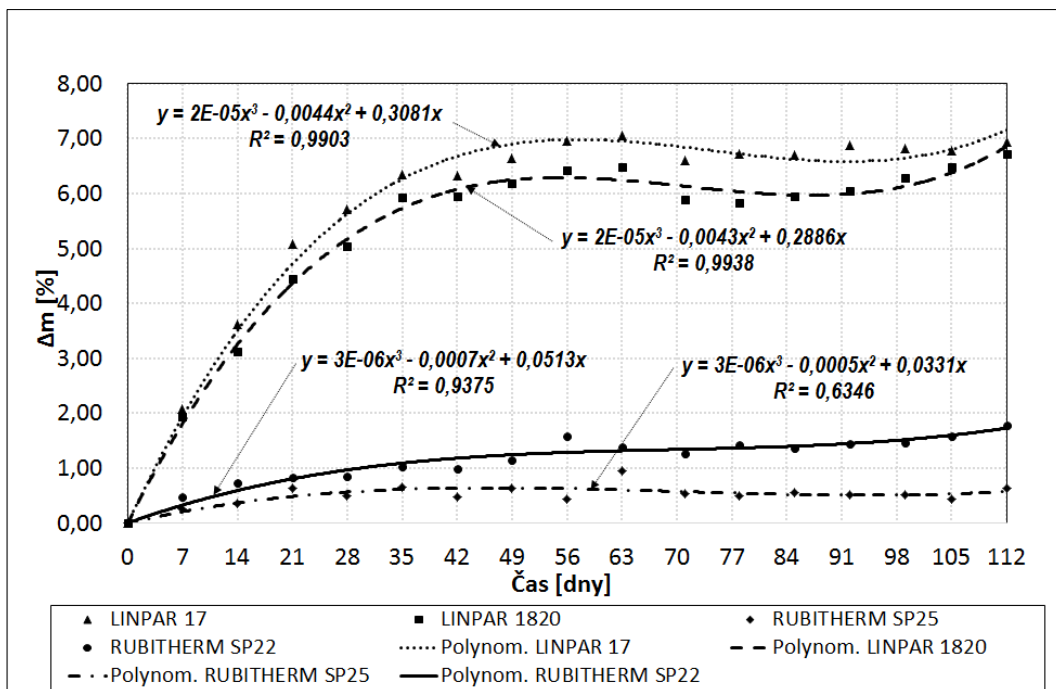
Tab. 2 Charakteristické vlastnosti vybraných PCMs

Skupina PCM	Obchodní název	Skupenské teplo tání [J/g]	Teplota píku při tání [°C]
anorganické	Rubitherm SP22	145	25
anorganické	Rubitherm SP25	122	28
organické	Linpar 17	152	22
organické	Linpar 1820	141	27

Vzorky plastů o rozměrech 100 x 10 x 1,5 mm byly umístěny do plastových nádobek a zality příslušným PCM. Celkem tedy byly použity 4 nádobky s PCMs, v každé bylo 64 vzorků od každého druhu plastu. Pro testování bylo tedy zapotřebí 576 vzorků. Nádobky se vzorky byly následně podrobovány periodickému zahřívání a ochlazování po dobu 16 týdnů, aby se na vzorcích projevil účinek PCMs. Každý týden byly vytaženy 3 vzorky od každého druhu plastu a PCM, celkem tedy 36 vzorků. Hodnocení kompatibility bylo prováděno pomocí gravimetrické metody [20]. Do vyhodnocení pak z důvodu přesnosti metody dle [21] vstupovaly hodnoty mediánu vypočítané změny hmotnosti pro příslušný typ plastu, PCM a hodnocený týden.

Na základě dosavadních výsledků lze konstatovat, že u PP-H a HDPE je patrný rozdíl mezi ponořením v organických nebo anorganických PCMs. V případě ponoření do organických PCMs docházelo v prvních čtyřech týdnech k rychlému nárůstu hmotnosti, v následujících týdnech

pak byly změny hmotnosti už velmi malé. V průběhu testu však celková změna hmotnosti nepřesáhla hodnotu 7 %. U PVC-U nebyly zaznamenány téměř žádné změny hmotnosti při kontaktu s organickými i anorganickými PCMs. U všech testovaných plastů byla prokázána dobrá kompatibilita s anorganickými PCMs, protože byly naměřeny minimální hmotnostní přírůstky nepřesahující 1,8 % v případě PP-H při ponoření do PCM SP22. V dalším kroku bude zkoumán i vliv penetrace PCMs na mechanické vlastnosti plastů.



Obr. 12 Změna hmotnosti PP-H v kontaktu s organickými a anorganickými PCMs (archiv autora)

4.2 STABILITA AKUMULAČNÍCH LÁTEK V ČASE

Druhým tématem výše zmíněného projektu je testování stability vlastností vybraných PCMs při dlouhodobém cyklickém ohřevu a ochlazování. V tab. 3 jsou uvedeny výsledky z dosavadních testů, na které budou navazovat nová měření. Vzorky byly podrobeny periodickému ohřevu a ochlazování, přičemž délka jedné periody je 8 hodin, aby došlo k roztavení a krystalizaci v celém objemu. Charakteristiky uvedené v tab. 3 jsou získané měřením DSC. Testované PCMs organického původu vykazují v čase minimální změny svých vlastností.

Tab. 3 Veličiny charakterizující testované PCMs před a po cyklickém zatěžování

PCMs	Před cyklováním				Po 1300 cyklech			
	Latentní teplo [J/g]		Onsetová teplota [°C]		Latentní teplo [J/g]		Onsetová teplota [°C]	
	ohřev	chlazení	ohřev	chlazení	ohřev	chlazení	ohřev	chlazení
Linpar 17	152	153	21	21	152	147	20	21
Linpar 1820	141	140	25	27	140	139	25	27
DS5040X	92	94	19	22	94	96	19	22

Cílem plánovaných nových testů je podrobení PCMs minimálně 10 000 cyklů a ověření jejich vlastností pro dlouhodobou instalaci ve stavbách. Zároveň bude navýšen počet vzorků PCMs, aby se pokryla větší oblast použití v budovách.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Název v originále	Překlad
ADR	Active Demand Desponse	aktivní reakce na potřebu energie
DSC	Differntial Scanning Calorimetry	diferenční skenovací kalorimetrie
DSF	Demand-Side Flexibility	flexibilita na straně poptávky
DSM	Demand Side Management	řízení poptávky v místě
HDPE	High density polyethylene	vysoko hustotní polyetylén
HVAC	Heating, Ventilating, Air-Conditioning	vytápění, větrání a klimatizace
IEA	International Energy Agency	Mezinárodní energetická agentura
LDPE	Light Density Polyethylene	nízko hustotní polyetylén
MPCMs	Microencapsulated Phase Change Materials	mikrokasples s materiálem se změnou skupenství
PCMs	Phase Change Materials	materiály se změnou skupenství
PP-H	Polypropylene	polypropylén
PS	Penalty Signal	řídící signál
PSC	Power Shifting Capability	schopnost posunu výkonu v čase
PVC	Polyvinylchloride	polyvinylchlorid
RES	Renewable Energy Sources	obnovitelné zdroje energie

6 POUŽITÁ LITERATURA

1. Vonka, M.a kol. *Metodika SBToolCZ. Manuál hodnocení administrativních budov ve fázi návrhu*. Praha: CIDEAS, 2011. 286 s.
2. Share of energy from renewable sources. [Online] 2019. [Citace: 1.3.2019] http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_ind_ren&lang=en
3. Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/844 ze dne 30. května 2018, kterou se mění směrnice 2010/31/EU o energetické náročnosti budov a směrnice 2012/27/EU o energetické účinnosti. [Online] 2018. [Citace: 10.3.2019] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex:32018L0844>
4. Reynders, G., Nuytten, T., Saelens, D. Potential of structural mass for demand –side management in dwellings. *Building and Environment*, 2013, sv. 63, s. 187-199.
5. Jensen, S. Ø., Marszal-Pomianowska, A., Lollini, R., Pasut, W., Knotzer, A., Engelmann, P., Stafford, A., Reynders, G. IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buidnings, *Energy and Buildings* 155 (2017), s. 25-34.
6. Dréau J. Le, Heiselberg, P. Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass. *Energy*, 2016 sv. 111, s. 991-1002.
7. Alva, G., Lin, Y., Fang, G. An overview of thermal energy stoarge systems. *Energy*, 2018, sv. 144, s. 341-378.

8. Junker, R. G., Azar, A. G., Lopes, R. A., Lindberg, K. B., Reynders, G., Relan, R., Madsen, H. Characterizing the energy flexibility of buildings and districts. *Applied Energy*, 2018, sv. 225, s. 175-182.
9. Reynders, G., Lopes, R. A., Marszal-Pomianowska, A., Aelenei, D., Martins, J., Saelens, D. Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage. *Energy and Buildings*, 2018, sv. 166, s. 372-390.
10. Lopes, R. A., Chambel, A., Neves, J., Aelenei, D., Martins, J. A literature review on methodologies used to assess the energy flexibility of buildings. *Energy Procedia*, 2016, sv. 91, s. 1053-1058.
11. Kim, Y-J., Fuentes, E., Norford L.K. Experimental Study of Grid Frequency Regulation Ancillary Service of a Variable Speed Heat Pump. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, sv. 31, s. 3090-3099.
12. Reynders, G., Diriken, J., Saelens, D. Generic characterization method for energy flexibility: Applied to structural thermal storage in residential buildings. *Applied Energy*, 2017, sv. 198, s. 192-202.
13. Jensen, S.O. *et al.* Annex 67: Energy Flexible Buildings. Energy Flexibility as a key asset a smart building future. Contribution of Annex 67 to the European Smart Building Initiatives.[Online] 2017. [Citace: 10.3.2019] <http://annex67.org/media/1470/position-paper-energy-flexibility-as-a-key-asset-i-a-smart-building-future.pdf>
14. Li, R., Dane, G., Finck, C., Zeiler, W. Are buildings prepared for energy flexible buildings? – A large-scale survey in the Netherlands. *Applied Energy*, 2017, sv. 203, s. 623-634.
15. Salukhe, P.B.; Shembekar, P.S. A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, sv. 16, s. 5603-5616.
16. Fleischer, A.S. *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials. Fundamentals and Applications*. Springer International Publishing AG Switzerland, 2015, 94 s.
17. 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 s.
18. Mehling, H., Hiebler, S., Günther, E. New method to evaluate the heat storage density in latent heat storage for arbitrary temperature ranges. *Applied Thermal Engineering*, 2010, sv. 30, s. 2652-2657.
19. Haussmann, T., Schossig, P., 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, s. 145-154.
20. 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*, 2011, sv. 35, s. 765-771.
21. ISO 175:2010 *Plastics - Methods of test for the determination of the effect of immersion in liquid chemicals*. 3rd ed.; ISO: Geneva, Switzerland, 2010. 20 s.

7 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA

Články v periodických s impakt faktorem (J_{imp}) s uvedením citací ke dni 11. 3. 2019:

1. Voelker, C.; Kornadt, O.; Ostrý, M. Temperature reduction due to the application of phase change materials. *Energy and Buildings*. 2008, roč. 40, č.5, s. 937-944. ISSN 0378-7788 (IF = 1,590) – 85 citací
2. Ostrá, M.; Beklová, M.; Stoupalová, M.; Ostrý, M. Ecotoxicity evaluation in municipal and food industry wastewaters. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, roč. 18, č. 9a, s. 1674-1680. ISSN: 1018- 4619. (IF=0,531) – 4 citace
3. Klimeš, L.; Charvát, P.; Ostrý, M. Challenges in Computer Modeling of Phase Change Materials. *Materiali in tehnologije*, 2012, roč. 46, č. 4, s. 335-338. ISSN: 1580- 2949. (IF=0,571) –11 citací
4. Charvát, P.; Mauder, T.; Ostrý, M. Simulation of latent-heat thermal storage integrated with room structures. *Materiali in tehnologije*, 2012, roč. 46, č. 3, s. 239-242. ISSN: 1580-2949. (IF=0,571) – 9 citací
5. Ostrý, M.; Příkryl, R.; Charvát, P.; Mlčoch, T.; Bakajová, B. Laboratory assessment of microencapsulated phase change materials. *Materiali in tehnologije*, 2012, roč. 46, č. 5, s. 531-534. ISSN: 1580-2949. (IF =0,571) – 3 citace
6. Ostrý, M.; Příkryl, R.; Charvát, P. Characterization of selected phase- change materials for proposed use in building applications. *Materiali in tehnologije*, 2013, roč. 47, č. 2, s. 185-188. ISSN: 1580- 2949. (IF=0,555)
7. Mauder, T.; Charvát, P.; Ostrý, M. Experimental and numerical investigation of an air-pcm heat- storage unit. *Materiali in tehnologije*, 2013, roč. 47, č. 3, s. 391-394. ISSN: 1580-2949. (IF=0,555)
8. Charvát, P.; Klimeš, L.; Ostrý, M. Numerical and experimental investigation of a PCM-based thermal storage unit for solar air systems. *Energy and Buildings*, 2014, roč. 68A, č. 1, s. 488-497. ISSN: 0378- 7788. (IF=2,884) – 48 citací
9. Charvát, P.; Klimeš, L.; Štětina, J.; Ostrý, M. Thermal storage as a way to attenuate fluid temperature fluctuations - sensible vs. latent heat storage materials. *Materiali in tehnologije*, 2014, roč. 48, č. 3, s. 423-427. ISSN: 1580- 2949.(IF =0,548) – 1 citace
10. Ostrý, M.; Dostálová, D.; Klubal, T.; Příkryl, R.; Charvát, P. Microencapsulated phase change materials for latent heat storage: thermal characteristics and building application. *Materiali in tehnologije*, 2015, roč. 49, č. 5, s. 813-816. ISSN: 1580- 2949. (IF=0,439) – 1citace
11. Konuklu, Y.; Ostrý, M.; Paksoy, H.O.; Charvát, P. Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications. *Energy and Buildings*, 2015, roč. 106, č. SI, s. 134-155. ISSN: 0378- 7788. (IF=2,973) – 72 citací
12. Stritih, U.; Charvát, P.; Koželj, R.; Klimeš, L.; Osterman, E.; OSTRÝ, M.; Butala, V. PCM thermal energy storage in solar heating of ventilation air - Experimental and numerical investigations. *Sustainable Cities and Society*, 2018, roč. 37, č. 1, s. 104-115. ISSN: 2210-6707. (IF=1,777) – 6 citací
13. Ostrý, M.; Bantová, S.; Struhala, K. Tests on Material Compatibility of Phase Change Materials and Selected Plastics. *Molecules*, 2019, roč. roč. 24, č.7, s. 1398. ISSN: 1420-3049. (IF=3,098)

Další publikace vedené v databázi Web of Science s uvedením citací ke dni 11.3.2019:

1. Ostrý, M.; Bečkovský, D. Influence of Panels with Phase Change Materials on the Thermal Stability of Attic Spaces. In *8th IIR Conference on Phase Change Materials and Shurries for Refrigeration and Air Conditioning*. Int Inst Refrigeration, 177 Blvd Malesherbes, F-75017 Paris, France, 2009, s. 163-169. ISBN 978-2-913149-69-4. – 3 citace

2. Ostrý, M.; Charvát, P. Improving of the thermal storage properties of light- weight building structures. In *10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Selected papers. Vilnius Univ, Dept Polymer Chemistry, Naugarduko 24, Vilnius, LT-03225, Lithuania, 2010, s. 223-227. ISBN 978-9955-28-593- 9.
3. Ostrý, M.; Charvát, P. The influence of passive cooling on energy saving. In *Central Europe towards Sustainable Building*, June, 2010. Czech Technical Univ Prague, Zikova 4, Prague 6 166 35, Czech Republic, s. 327-330. ISBN 978-80-247-3624-2.
4. Ostrý, M.; Charvát, P. Thermal comfort in the rooms with integrated phase change materials. In *23rd IIR International Congress of Refrigeration. Book series: Congres International du Froid - International Congres of Refrigeration. vol. 23*. Int Inst Refrigeration, 177 Blvd Malesherbes, F-75017 Paris, France, 2011. s. 548-552. ISBN: 978-2-913149-89- 2.
5. Ostrý, M.; Charvát, P. Materials for Advanced Heat Storage in Buildings. In *Modern Building Materials, Structures and Techniques, Book series: Procedia Engineering*, vol. 57. Elsevier Science Bv, Sara Burgerhartstraat 25, PO BOX 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, 2013, s. 837-843. ISSN: 1877- 7058. - 6 citací
6. Ostrý, M.; Klubal, T.; Brzoň, R. Challenges in the latent heat storage technology for building applications. In *Sustainable Building and Refurbishment for next Generations*. Czech Technical Univ Prague, Zikova 4, Prague 6 166 35, Czech Republic, 2013. s. 433-436. ISBN: 978-80-247-5015- 6.
7. Charvát, P.; Štětina, J.; Pech, O.; Klimeš, L.; Ostrý, M. Experimental investigation of stabilization of flowing water temperature with a water- PCM heat exchanger. In *EFM13- Experimental Fluid Mechanics 213. Book series: EPJ Web of Conferences*, vol.67. E D P Sciences, 17 Ave du Hoggar Parc D Activites Coutaboeuf BP 112, F-91944 CEDEX A, France, 2014. s. 02046-1 – 02046-4. ISBN: 978-80-260-5375- 0. ISSN: 2100-014X. – 1 citace.
8. Ostrý, M.; Klubal, T.; Brzoň, R. Thermally activated heat storage structures combined with heat pump for the use in low energy buildings. In *9th International Conference Environmental Engineering (ICEE)*. Vilnius Gediminas Technical Univ Press, Technika, Sauletekio A1. 11, Vilnius-40, LT-10233, Lithuania, 2014. s. 1-6. ISBN: 978-609-457-640-9.
9. Šteffek, L.; Ostrý, M.; Kalánek, J. Analysis and Quantification of the Influence of Thermal Properties of Building Envelope on the Energy Balance. In *Envibuild 2014. Book series: Advanced Materials Research*, vol. 1041. Trans Tech Publications Ltd, Laubstrutistr 24, CH-8717 Stafa-Zurich, Switzerland, 2014. s. 146-149. ISBN: 978-3-03835-280-8. ISSN: 1022-6680.
10. Kalánek, J.; Šteffek, L.; Ostrý, M. Evaluation of the Thermal Resistance of Structure with Reflective Insulation: Measurement under Non-Stationary Boundary Conditions. In *Envibuild 2014. Book series: Advanced Materials Research*, vol. 1041. Trans Tech Publications Ltd, Laubstrutistr 24, CH-8717 Stafa-Zurich, Switzerland, 2014. s. 150-153. ISBN: 978-3-03835-280-8. ISSN: 1022-6680.
11. Klubal, T.; Ostrý, M. Integration of PCMs and Capillary Radiant Cooling/Heating to Ensure Thermal Comfort. In *Envibuild 2014. Book series: Advanced Materials Research*, vol. 1041. Trans Tech Publications Ltd, Laubstrutistr 24, CH-8717 Stafa-Zurich, Switzerland, 2014. s. 350-353. ISBN: 978-3-03835-280-8. ISSN: 1022-6680.
12. Charvát, P.; Klimeš, L.; Ostrý, M.; Štětina, J. A validated trnsys model of thermally activated layer with phase change material. In *ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 8A: Heat Transfer and Thermal Engineering. Houston, Texas*. ASME, 2015. s. 1-4. ISBN: 978-0-7918-5749- 6.

13. Ostrý, M.; Charvát, P.; Klubal, T. Thermally activated structures using latent heat storage technique. In *11th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning*. Karlsruhe. INT INST Refrigeration, 177 BLVD Malesherbes, F-75017 Paris, France, 2016. s. 94-100. ISBN: 978-2-36215-015- 9.
14. Valentová, K.; Pecháčková, K.; Příkryl, R.; Ostrý, M.; Zmeškal, O. Study of the thermal properties of selected PCMs for latent heat storage in buildings. In *THERMOPHYSICS 2017: 22nd International Meeting of Thermophysics 2017 and 4th Meeting of EnRe 2017*. Melville, New York. American Institute of Physics, 2017. s. 040042-1 - 040042-6. ISBN: 978-0-7354-1546-1.

Publikace v časopisu kategorie J_{rec}

1. Ostrý, M. Snížení tepelné zátěže interiéru budov s využitím akumulace latentního tepla. *Vytápění, větrání, instalace*, 2009, roč. 18, č. 5, s. 231-235. ISSN: 1210- 1389.
2. Fišarová, Z.; Ostrý, M.; Odehnal, A. Snížení přenosu vibrací a kročejového hluku pomocí podestavových bloků. *Časopis stavebnictví*, 2010, roč. IV, č. 09, s. 55-58. ISSN: 1802- 2030.
3. Sedlák, J.; Ostrý, M. Klimatická hodinová data pro posuzování energetické potřeby pro vytápění a chlazení. *Vytápění, větrání, instalace*, 2010, roč. 19, č. 3, s. 148-152. ISSN 1210-1389
4. Ostrý, M.; Novotný, M. Kvalita obalových konstrukcí podstřešních prostor v praxi. *Časopis stavebnictví*, 2010, roč. IV, č. 03/ 2010, s. 28-32. ISSN: 1802- 2030.
5. Ostrý, M. Funkčnost větraných obvodových plášťů. *Tepelná ochrana budov*, 2010, roč. 13, č. 5, s. 3-7. ISSN: 1213- 0907.
6. Fišarová, Z.; Ostrý, M.; Odehnal, A. Landing block to reduce transmission of vibration and impact noise from staircases and elevators in buildings. *Akustika*, 2010, roč. 14, č. 09, s. 23-31. ISSN: 1801- 9064.
7. Brzoň, R.; Ostrý, M. Porovnání nejběžněji dostupných značek ISO- nosníků na českém trhu. *Časopis stavebnictví*, 2011, roč. 5, č. 9, s. 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, roč. 11, č. 2, s. 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. ISSN: 1801- 4399.
10. Brzoň, R.; Ostrý, M.; Klubal, T. Tepelně technické posouzení ISO- nosníků. *Stavební obzor*, 2012, roč. 21, č. 3, s. 72-77. ISSN: 1210 - 4027.
11. Klubal, T.; Ostrý, M.; Brzoň, R. Vliv sálavého chlazení a vytápění s PCMs na vnitřní mikroklima a spotřebu energie. *TZB- info*, roč. 2014. ISSN: 1801- 4399
12. Klubal, T.; Ostrý, M.; Brzoň, R. Použití tepelně aktivovaných panelů se sádrovou omítkou s PCMs. *Stavební obzor*, roč. 2014, č. 3- 4. ISSN: 1210- 4027
13. Šteffek, L.; Kalánek, J.; Ostrý, M. Srovnání výsledků energetických simulací budovy s reálným provozem. *Tepelná ochrana budov*, 2015, roč. 18, č. 5, s. 14-17. ISSN: 1213- 0907.
14. Ostrý, M. Současný stav vývoje krátkodobé akumulace tepla při změnách skupenství. *Tepelná ochrana budov*, 2015, roč. 18, č. 6, s. 7-13. ISSN: 1213- 0907.
15. Kalánek, J.; Ostrý, M.; Šteffek, L. Způsoby stanovení tepelně izolačních vlastností konstrukcí s reflexní izolací a možnosti využití výsledků ve stavební praxi. *Tepelná ochrana budov*, 2016, roč. 19, č. 4, s. 47-51. ISSN: 1213-0907.
16. Ostrý, M.; Bantová, S.; Klubal, T.; Příkryl, R. Zkušenosti s využitím akumulace tepla při změnách skupenství. *Tepelná ochrana budov*, 2017, roč. 20, č. 5-6, s. 3-8. ISSN: 1213- 0907.

ZÁVĚR

Autor se v rámci své výzkumné a vývojové činnosti věnuje především stavební tepelné technice a problematice efektivní akumulace tepla při změnách skupenství za účelem zvýšení energetické flexibility budov. Ta se uplatňuje zejména v situaci, kdy je třeba řešit časovou neshodu mezi dodávkou energie z nestabilních obnovitelných zdrojů energie a potřebou energie v budovách. Toto téma je aktuální a úzce souvisí s dlouhodobým cílem Evropské Unie vytvořit do roku 2050 udržitelný, konkurenceschopný, bezpečný a dekarbonizovaný energetický systém. Právě rozvoj akumulace tepla resp. akumulace energie v obecném slova smyslu hraje významnou roli při plnění tohoto cíle. V současné době se pro akumulaci tepla v budovách a jejím blízkém okolí využívá obvykle akumulace citelného tepla do stavebních konstrukcí, zásobníků tepla nebo podloží budovy. Akumulace při změnách skupenství na bázi PCMs nabízí v případech, kdy jsme limitováni prostorem nebo hmotností zásobníku, významně vyšší hustotu akumulované energie v rámci úzkého teplotního intervalu. Pokud chceme zajistit energetickou flexibilitu budovy prostřednictvím akumulace tepla nebo chladu ve stavebních konstrukcích, jsou PCMs vhodným řešením. Nevýhodou tohoto řešení je však potřeba zajistit dokonalé obalení těchto materiálů, aby nedocházelo k interakci s okolním prostředím, a v současné době vyšší cena v porovnání se standardním přístupem využívajícím akumulaci citelného tepla.

V uplynulých letech byla výzkumná a vývojová činnost v rámci autorem řešených projektů zaměřena na stanovování vlastností vybraných tepelně akumulčních materiálů použitelných ve stavebních konstrukcích z lehkých stavebních hmot pro zvýšení jejich tepelně akumulční kapacity. Vybrané tepelně akumulční látky byly podrobeny cyklickému zahřívání a ochlazování za účelem zjištění případného úbytku akumulčních vlastností. Dále byly navrženy a testovány různé přístupy ke zvýšení akumulční kapacity obalových konstrukcí z lehkých stavebních materiálů pro snížení provozních nákladů na chlazení, příp. vytápění. Výsledkem byl návrh a pilotní realizace sestavy tepelně akumulčních panelů v testovací místnosti. Vývoj, patentová ochrana a komercializace byly podpořeny projektem „VUT Energetické zdroje“. Výsledný produkt pod označením „Chytrá stěna“ obdržel prestižní ocenění „Zlatá medaile IBF 2015“.

V současné době se autor věnuje se svým týmem řešení projektu Grantové agentury České republiky č. 19-20943S „Kompatibilita plastů a kovů s materiály pro akumulaci tepla při změnách skupenství pro aplikaci v budovách“. Mezi hlavní cíle projektu patří dlouhodobé testování a vyhodnocování kompatibility PCMs s materiály kontejnerů nebo tepelných výměníků, modelování přenosu tepla v akumulčních materiálech a hodnocení environmentálních dopadů akumulace. Další odborná činnost autora je zaměřena na diagnostiku stavebních konstrukcí metodou infračervené termografie, hodnocení energetické náročnosti budov, trvale udržitelnou výstavbu a multikriteriální hodnocení budov. Právě téma udržitelnosti staveb a multikriteriálního hodnocení se podařilo autorovi v minulosti zařadit do studijních plánů třech navazujících magisterských studijních programů.

V rámci své pedagogické činnosti autor dlouhodobě usiluje o implementaci výsledků výzkumu a vývoje do výuky na FAST VUT v Brně. Vzhledem k aktuálním výzvám v oblasti snižování energetické náročnosti a zvyšování kvality vnitřního prostředí budov vznikla pod vedením autora pracovní skupina, která si vytkla za cíl připravit a zavést do výuky nové studijní programy reflektující také aktuální požadavky stavební praxe. V rámci řešení projektu „MOST - Moderní a otevřené studium techniky“ se v roce 2018 podařilo připravit akreditační spis pro bakalářský a navazující magisterský studijní program s jednotným názvem Environmentálně vyspělé budovy (EVB), které budou vyučovány od akademického roku 2019/2020. Bakalářský studijní program je zaměřen na návrh a hodnocení budov s téměř nulovou potřebou energie a tvorbu zdravého vnitřního prostředí. Navazující magisterský studijní program pak cílí především na efektivní provozování budov, problematiku inteligentních budov a jejich environmentální hodnocení. V akreditačních spisech u obou studijních programů je autor uveden jako jejich garant.

ABSTRACT

The author is focusing on thermal engineering in his scientific career. Especially he researches the ways to increase energy flexibility of buildings through effective latent heat storage. Energy flexibility is an important issue when there is the need to overcome time mismatch between energy supply (through renewable sources) and demand. This topical issue is closely related with long-term EU plan for creation of sustainable, competitive, secure and carbon-free energy supply system by 2050. The development in the field of heat storage plays important role in meeting this goal. Current practise focuses on sensible heat storage in buildings and their surroundings: building structures, heat storage tanks or subsoil. Further improvements of energy flexibility through heat storage in building structures could be achieved with Phase Change Materials (PCMs). Utilization of latent heat storage offers significantly higher density of stored energy within a narrow temperature range. This is advantageous especially in confined spaces or when the weight of the storage tank is limited. The disadvantage of the PCMs application is the need for perfect encapsulation that would prevent interaction with surrounding environment. Higher price in comparison with standard approach (sensible heat storage) is another factor that currently limits wider application of PCMs.

Author's recent scientific activities and projects focused on determination of properties of selected heat storage materials applicable in light-weight building structures (to increase their heat storage capacity). Samples of selected materials were subjected to cyclic heating and cooling to assess the possible loss of heat storage capacity. Furthermore, various approaches to increase heat storage capacity of light-weight envelope structures were developed and tested. The aim of this development was reduction of operational costs related with heating and cooling. The results were implemented during a pilot project in construction of experimental heat storage panel assembly in a test room at FCE BUT. The development, patent protection and commercialization were supported by "BUT Energy Resources" project. The resulting "Clever wall" product received the prestigious "IBF 2015 Golden Medal" award.

The author and his team are currently working on a project of the Czech Science Foundation no. 19-20943S "Compatibility of plastics and metals with latent heat storage media for integration in buildings". The project focuses on long-term testing and evaluation of compatibility of various PCMs and materials of containers or heat exchangers. Other aims include modelling of heat transfer in the storage materials or evaluation of the environmental impacts of heat storage.

Author's other professional activities include: infrared thermography of building structures, assessment of energy performance of buildings, sustainable building and multi-criteria assessment of buildings. The author even succeeded in implementation of the two lastly mentioned issues in three Master study programmes at FCE BUT.

As part of his pedagogical activities, the author has long been striving to implement the results of latest research and development in teaching at FCE BUT. Therefore the author accepted active role in initiative set up at FCE BUT that aims for introduction of new study programmes reflecting contemporary challenges such as improving indoor climate in buildings or reducing energy consumption in the construction sector. The initiative resulted in submission of accreditation files for new Bachelor study programme and follow-up Master study programme at FCE BUT in 2018. The shared title of both programmes is "Environmentally Efficient Buildings". The Bachelor study programme focuses on design of Nearly-Zero Energy Buildings with healthy indoor environment. The follow-up Master study programme focuses on specific issues such as sustainable construction, efficient facility management and smart buildings. Both study programmes will be launched in academic year 2019/2020. The author is listed as programme guarantor in accreditation files of both study programmes.