

Integrace materiálů s fázovou změnou do systémů stropního chlazení a větrání

Ing. Jan Skovajsa, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Teze dizertační práce

Integrace materiálů s fázovou změnou do systémů stropního chlazení a větrání

Integration of Phase Change Materials in Cooling Ceiling and Ventilation Systems

Autor: **Ing. Jan Skovajsa, Ph.D.**

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

Školitel: prof. Ing. Dagmar Janáčová, CSc.
Konzultant: Ing. Martin Zálešák, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Jiří Hirš, CSc.
prof. RNDr. Milan Malcho, CSc.
prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.

Zlín, prosinec 2022

© Jan Skovajsa

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary** v roce 2022.

Klíčová slova: *Energie, komfort, PCM, stropní chlazení, TES, větrání*

Key words: *Energy, comfort, PCM, cooling ceiling, TES, ventilation*

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

ISBN 978-80-7678-143-6

ABSTRAKT

Náplní disertační práce je řešení problematiky efektivního využití energií v systémech techniky prostředí, zejména v oblasti chlazení a větrání. Práce zpracovává poznatky související se spotřebou energií v budovách, tepelnou stabilitou, akumulací tepla a aplikací moderních tepelně akumulčních materiálů, resp. materiálů se změnou fáze. Jednou z hlavních částí je vypracování technického návrhu systému stropního chlazení a větrání s aplikací tepelně-akumulačních materiálů a zpracování metodik laboratorních zkoušek. Následně je představena realizace prototypu systému a výsledky z provedených experimentů. Spolu s měřeními jsou připraveny komplexní simulační modely sledovaného prostoru. Nakonec je provedeno hodnocení vlivu aplikace na tepelný komfort a konečnou spotřebu energií s ohledem na různé stavební konstrukce i provozní podmínky.

ABSTRACT

The doctoral thesis is focused on the issue of the efficient use of energy in environmental technology systems, especially in the field of space cooling and ventilation. It describes the current state of knowledge about energy consumption in buildings, thermal stability, heat accumulation, and the application of modern heat storage materials, especially phase change materials. One of the main parts is developing the technical design of the cooling ceiling and ventilation system in combination with heat storage materials. This part also describes the preparation of laboratory test methodologies. Subsequently, the realization of the system prototype and the experiment results are presented. In addition, complex simulation models of various building structures are prepared. Finally, an evaluation of the effect of the proposed system application on thermal comfort and the final energy consumption is carried out.

OBSAH

1	ÚVOD	4
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
3	CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	7
4	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	8
4.1	Příprava laboratorního zázemí	8
4.2	Technický návrh a příprava stropních boxů	8
4.3	Metodiky laboratorních zkoušek	10
4.4	Simulační modely	12
5	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	13
5.1	Experimentální měření stropních boxů a systému	13
5.2	Stanovení vlivu na tepelný komfort a spotřebu	17
6	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	20
7	ZÁVĚR	20
8	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	22
	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	24
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	27
	SEZNAM OBRÁZKŮ	29
	SEZNAM TABULEK	29
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	30

1 ÚVOD

Odvětví budov a stavebnictví v roce 2020 představovalo 36 % konečné spotřeby energie a 37 % produkcí emisí CO₂ souvisejících s energiemi a procesy v oblasti budov [1]. Celosvětově jsou již řadu let aplikována nařízení a doporučení vedoucí ke zpomalení růstu spotřeby energií a produkcí emisí CO₂. Důraz je kladen na zvyšování energetické účinnosti technologických systémů, snižování emisí a zvyšování podílu alternativních zdrojů energie.

Změny klimatu, zvyšující se počet obyvatel, podlahová plocha a využití budov přispívají k vyšší spotřebě energií. Na druhé straně dochází ke zlepšování tepelně-izolačních parametrů stavebních konstrukcí, zvyšování efektivity energetických systémů budov a dalších spotřebičů. Celková poptávka po energii se i přesto stále zvyšuje. Tato skutečnost vede k potřebě dalšího výzkumu a vývoje s cílem snížit spotřebu energií a zvýšení efektivity technologických systémů.

Náplní předložené práce je aplikace moderních tepelně akumulčních materiálů do systému stropního chlazení a větrání. Záměrem bylo připravit návrh s následnou realizací funkčního systému, pomocí kterého by bylo možno dosáhnout snížení spotřeby energie a zvýšení tepelného komfortu vnitřního prostředí.

První část práce je orientována na kontext spotřeby energií v oblasti budov, tepelné stability a aplikace tepelně-akumulčních materiálů. Problematika je řešena z pohledu posouzení současných technických řešení a vědeckých přístupů aplikací tzv. zásobníků tepelné energie (TES - Thermal Energy Storage) a materiálů s fázovou změnou (PCM - Phase Change Material).

Další část popisuje zvolené metody zpracování. Zde je představeno zázemí laboratoře techniky prostředí a základní informace o použitém PCM. Následně je popsán návrh a postup realizace prototypu chladicího systému stropního chlazení spolu s přípravou laboratorního zázemí. Tato část dále popisuje zpracované metodiky laboratorních zkoušek a přípravu simulačních modelů.

Následující část představuje hlavní výsledky z laboratorního měření. V rámci zkoušek byly stanoveny parametry různých konfigurací prototypů stropních modulů a kompletního systému stropního chlazení. Získaná data byla využita také pro parametrizaci a validaci simulačních modelů. Výstupy ze simulací jsou uvedeny v následující části práce, kde je pozornost věnována vlivu aplikace navrženého systému s PCM jak na tepelný komfort, tak i na spotřebu energií.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V oblasti hodnocení energetické náročnosti sektoru budov se používá ukazatel stanovující spotřebu energie vztaženou na metr čtvereční podlahové plochy, tzv. intenzita spotřeby energie. Z tohoto pohledu od roku 2010 došlo k největšímu zlepšení v oblasti vytápění, kde bylo zaznamenáno více než 20 % snížení díky vlivu kvalitnějších materiálů tepelné izolace. Dále došlo k viditelnému snížení v rámci osvětlení, kde došlo k poklesu o 17 % díky aplikaci úsporných zdrojů světla. Ke snížení došlo také v oblastech přípravy teplé vody, vaření a domácích spotřebičů, celkem o cca 20 %. Na druhé straně se naopak navýšila potřeba chlazení o cca 9 %. Celkově se intenzita spotřeby energie stabilně snižuje průměrně o 1 % ročně.

Je ovšem nutné vzít v úvahu skutečnost, že rychlost snižování intenzity spotřeby je pod průměrným navýšením zastavěné plochy, které je kolem 2,5 % ročně. Spolu s tím dochází také ke zvyšování populace a klimatickým změnám. Na základě této nerovnováhy se celková spotřeba energií stále zvyšuje. Od roku 2010 do 2020 došlo k navýšení o cca 8 % (do 2019 až 9 %). Z dostupných dat lze usuzovat, že chlazení prostoru je jedním z hlavních přispěvatelů ke změně klimatu a vyšší spotřebě energie [2, 1]. V roce 2020 přispělo chlazení prostoru přibližně 1 gigatunou CO₂ a téměř 5 % celkové spotřeby světové energie. Podle Mezinárodní energetické agentury IEA (International Energy Agency) se spotřeba energie pro chlazení prostoru od roku 2000 zdvojnásobila, z 1 000 TWh na 1 945 TWh, a to zejména v důsledku teplejšího počasí, urbanizace a zvýšení počtu instalovaných klimatizačních jednotek [2, 1].

Dopad chlazení prostoru na životní prostředí lze snížit pomocí konceptu "Avoid-Improve-Shift". [1]. Část "Avoid" představuje snižování potřeby energie na chlazení zejména pomocí vhodných architektonických a konstrukčních řešení. Část "Improve" se zabývá zvyšováním účinnosti chladicích zařízení a optimalizováním provozu dostupných systémů. V rámci části "Shift" se poté řeší využívání obnovitelných zdrojů energie, volného chlazení a také akumulace energie pomocí aplikace technologií TES. Zaměření disertační práce je orientováno zejména na poslední část konceptu.

Akumulace tepla představuje jeden ze způsobů, jak úspěšně mírnit negativní

vlivy související s problematikou tepelné stability a současně zvýšit efektivitu využití energií v budově. K tomuto účelu se využívají systémy TES. Ty představují možnost dočasného skladování tepelné energie, ve formě tepla nebo chladu, pro pozdější využití [13], např. v době, kdy je jí nedostatek. Tím lze alespoň částečně vykrýt část energetického deficitu, který by byl v běžné situaci pokryt externími zdroji. Existují tři základní principy TES založené na změně teploty (citelné), fázové změně (latentní), příp. termochemickém procesu.

U stavebních konstrukcí je akumulace citelného tepla důležitou vlastností, neboť každý materiál je schopen akumulovat určité množství tepla a následně jej emitovat do okolí. Právě tato schopnost je kritickým bodem lehkých konstrukcí, zatímco těžké konstrukční materiály jsou schopny akumulovat velké množství tepelné energie a jsou tak méně náchylné na teplotní výkyvy [10].

Metoda akumulace latentního tepla je založena na absorbování nebo uvolňování tepla během procesu změny fáze, díky čemuž je výhodná kvůli vysoké hustotě akumulační energie na jednotku hmotnosti [3].

Pro akumulaci tepelné energie jsou využívány tepelně-akumulační materiály PCM. Ty jsou významné pro svou schopnost absorbovat značné množství latentní energie během změny fáze, především v oblasti tání a tuhnutí [4]. Existuje velké množství materiálů různého chemického složení s odlišnými teplotami tání a hodnotami latentního tepla. Z pohledu budov a systémů techniky prostředí (rozsah 10 °C až 60 °C) jsou nejvhodnější parafiny a hydráty solí.

Praktické aplikace PCM představují široké spektrum možných řešení, ať už jako součást stavebních konstrukcí, tak i systémů TES. Ty lze kategorizovat jako pasivní a aktivní systémy budov. Heier a kol. [8] uvádí, že pasivní úložiště se nabíjí a vybíjí rozdílem teplot mezi úložištěm a okolím. V případě aktivního TES se využívají aktivní čerpadla nebo ventilátory. Existují také kombinace, kdy je nabíjení aktivní a vybíjení pasivní nebo naopak.

Pasivní systémy využívají zakomponování PCM do stavebních komponentů, jako jsou podlahy, stěny, střechy, stropy, transparentní prvky a stínící technika. Dále je možné začlenění ve formě sádrokartonových desek, příp. malty a omítek s příměsí PCM. Integrace PCM mění tepelně-akumulační vlastnosti stavebních konstrukcí, či jejich částí. Aplikace PCM může zvýšit přirozenou regulaci tepelné pohody snížením teplotních výkyvů [17, 9], dochází také k časovému posunu a rozložení špičkové tepelné zátěže [14]. Navíc, efektivní za-

členění PCM může vést k efektivnějšímu provozu systémů HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning) [11]. Pasivní chladicí systémy jsou efektivní zejména při výskytu větších teplotních diferencí.

Jak již bylo zmíněno, v aktivních systémech chlazení je využita dodatečná mechanická energie čerpadel nebo ventilátorů. Tyto systémy jsou tedy založeny na integraci PCM s mechanickou ventilací nebo vodním systémem. Vhodnou kombinací PCM a HVAC je možné dosáhnout optimálního tepelného komfortu i efektivnějšího provozu systémů vedoucí k úsporám energie [8].

Mnoho publikovaných výzkumů je zaměřeno na dopad integrace PCM do chladicích systémů na dynamické chování budovy a jejích technologických systémů, což je podpořeno výstupy z různých simulačních nástrojů [15, 12, 14, 7, 18] nebo experimentů [5, 6, 19, 20, 16].

Většina studií ukazuje, že chladicí stropy s PCM mohou dosáhnout vyššího tepelného komfortu a lepšího využití energie než běžné chladicí systémy. Výsledky však ukázaly i významný vliv klimatických podmínek na úspory energie.

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce je obecně zaměřena na integraci materiálů s fázovou změnou, PCM, do vybraných systémů techniky prostředí, přesněji do systému stropního chlazení a větrání. Vhodnou aplikací akumulčních materiálů ať už do stavebních konstrukcí, nebo právě do systémů techniky prostředí, je možné zajistit tepelnou stabilitu zejména v letním a přechodném období, což zajistí i vyšší úroveň tepelného komfortu. Navíc, pozdějším využitím akumulované energie může být dosaženo také snížení energetické náročnosti budovy, čímž se naplňují globální cíle v oblasti spotřeby energií v sektoru budov. Na základě zpracování současného stavu poznání byly stanoveny hlavní cíle disertační práce:

- Návrh a realizace jednotlivých prvků a komplexního systému stropního chlazení s akumulací energie.
- Příprava metodik laboratorních zkoušek.
- Provedení zkoušek a stanovení skutečných provozních parametrů.
- Příprava a parametrizace komplexních simulačních modelů.
- Stanovení vlivu aplikace systému na tepelný komfort a spotřebu energií v budově.

4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

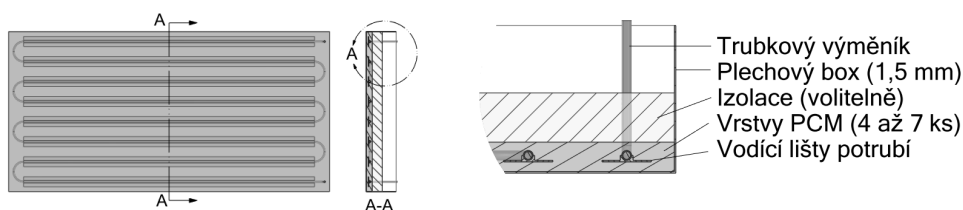
4.1 Příprava laboratorního zázemí

Praktická část práce byla realizována v laboratoři techniky prostředí (LTP), jež je součástí regionálního výzkumného centra CEBIA-Tech Fakulty aplikované informatiky (FAI UTB) ve Zlíně. Hlavní částí LTP je univerzální kompenzovaná kalorimetrická komora (KK), která je navržena jako dvouvrstvá konstrukce s kompenzací vlivu okolního prostředí. KK obsahuje dva rekondiční prostory Indoor a Outdoor, které mají jednu společnou kalibrovanou, víceúčelovou příčku. Oba prostory jsou navíc obklopeny vlastním kompenzačním prostorem.

Zahájení zkoušek bylo možné provést až po patřičných úpravách a přípravě prostorů KK. Mezi tyto úpravy patří zejména: příprava napojení na hydraulické okruhy zdrojů KK a úprava vnitřních prostor části Indoor. Ta spočívá zejména v konstrukci těsné dělicí příčky, kterou se prostor rozdělí na měřicí a zdrojovou část. Vzniklá měřicí část má po úpravě podlahovou plochu 10,75 m² a výšku 3 m. Dalším bodem bylo zajištění požadované emisivity $\geq 0,9$ vnitřních povrchů. Nakonec byl prostor vybaven plynule regulovatelnými zátěžovými figurínami, jejichž výkon a počet je dán požadavky ČSN EN 14 240.

4.2 Technický návrh a příprava stropních boxů

Technický návrh se zabýval konstrukčním řešením jednotlivých částí navrhovaného systému. Schéma na obrázku 4.1 představuje řez akumulčním chladicím stropním boxem o rozměrech 1,4 x 0,8 x 0,2 m vyrobeného z plechu o tloušťce 1,5 mm s matnou bílou povrchovou úpravou. Tento box byl následně vyplněn několika vrstvami PCM Energain ve formě panelů tloušťky cca 5 mm. Mezi nimi je poté umístěn trubkový výměník s konstrukční výškou cca 10 mm.

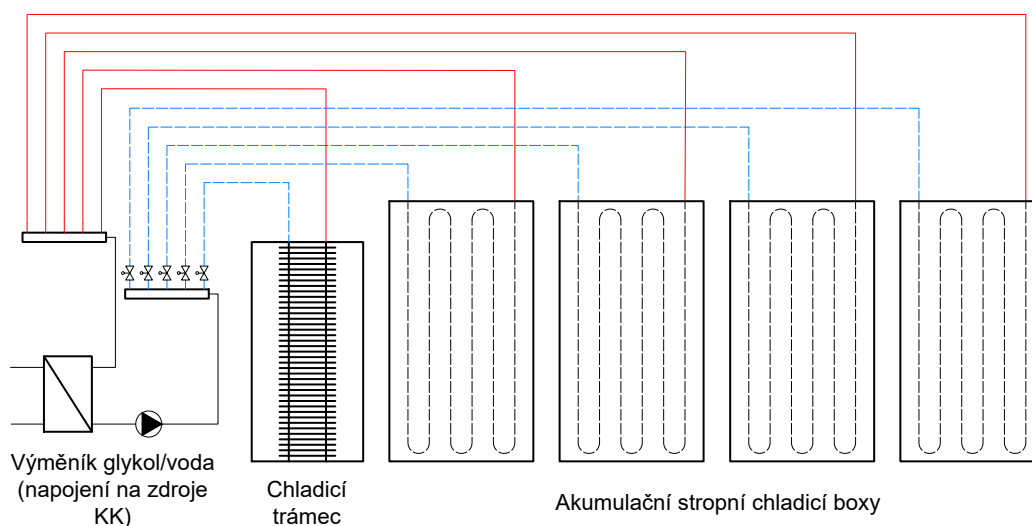


Obr. 4.1 Detail stropního boxu.

Stropní boxy byly připraveny ve čtyřech různých konfiguracích: 2-2-0, 2-2-1, 2-2-2 a 2-2-3, kde první a poslední hodnota představuje počet vrstev pod a

nad výměníkem, prostřední dvě vrstvy tvoří výplň mezi potrubím výměníku.

Celý systém je ve finální verzi napojen na společný hydraulický okruh, který se skládá z trubkového výměníku stropního boxu, žebrového výměníku trámce, oběhového čerpadla a deskového výměníku pro aktivní ohřev a chlazení pracovního média, viz obrázek 4.2.



Obr. 4.2 Hydraulické zapojení systému stropního chlazení/ohřevu.

Z principu zapojení plyne možnost nezávislé aktivace stropních boxů a trámce a to v kombinaci s přirozeným nebo strojním větráním. Obecně je možné režimy systému uvést jako: pasivní bez oběhu teplotnosného média; aktivní bez externího chlazení a ohřevu; aktivní s externím chlazením nebo ohřevem; předchozí uvedené v kombinaci s ne/aktivním prouděním vzduchu skrze trámec.

Pasivní režim představuje běžnou aplikaci PCM materiálů, tj. může snížit teplotní špičky a stabilizovat teplotu ve sledovaném prostoru v průběhu dne a noci. Lze využít pro zvýšení účinnosti pasivního (nočního) chlazení.

Aktivní režim bez externího chlazení a ohřevu využívá oběhu teplotnosného média v rámci stropních boxů a výměníku trámce, který nabízí dodatečnou teplosměnnou plochu, kterou je navíc možno doplnit nucenou konvekcí.

Aktivní režim s externími zdroji je využit v případě, kdy je akumuláční kapacita PCM vyčerpána, anebo je okamžitý požadavek na změnu teploty v prostoru. V tomto režimu je možné využít maximálního výkonu chladicího trámce a současně akumulovat chlad do PCM boxů pro pozdější využití.

Realizace prototypu vychází z technického návrhu pro čtyři konfigurace stropních boxů. Jako první byly zajištěny plechové boxy, vodní výměník v hliníkových lištách a dostatečné množství PCM panelů, viz obrázek 4.3 vlevo.

Následně došlo k rozvaze a přípravě jednotlivých kusů PCM v požadovaných rozměrech. Dle uvažovaných konfigurací byly všechny boxy vyplněny dvěma vrstvami PCM. Následujícím krokem bylo vložení vodního výměníku s následným vyplněním prostoru mezi potrubím dvěma vrstvami přesných pásů PCM. Dalším postupem bylo vkládání dodatečných vrstev PCM nad výměník s ohledem na konkrétní konfiguraci, viz 4.3 vpravo. Vzniklé mezery v okolí výměníku a jeho smyček byly vyplněny roztaveným PCM.



Obr. 4.3 Příprava: detail PCM a připravené boxy.

4.3 Metodiky laboratorních zkoušek

S ohledem na komplexnost řešené problematiky, týkající se akumulace tepelné energie, bylo nutné připravit postupy pro dílčí měření, která jsou schopna postihnout aspekty a parametry systémů s akumulací tepla. Jako první bylo nutné stanovit akumulační kapacitu jednotlivých konfigurací připravených boxů. Poté bylo možné umístit stropní boxy do Outdoor části KK, kde byly měřeny a sledovány dynamické procesy, včetně vlivu okolního prostředí, jednotlivých konfigurací. Nakonec byl v Indoor části KK instalován kompletní systém aktivního stropního chlazení a větrání, kde byl podroben statickým i dynamickým zkouškám pro stanovení reálných parametrů při různých režimech provozu.

Metodika měření akumulační kapacity stropních boxů spočívá v řízeném cyklickém nabíjení a vybíjení (ohřevu a chlazení) stropních boxů bez vlivu okolního prostředí. Tato zkouška může být provedena v prostoru KK i mimo něj. Základním předpokladem je však dosažení co nejlepšího odizolování stropních boxů od okolního prostředí, aby bylo zamezeno ztrátám do okolí.

Metodika měření dynamického chování s vlivem okolního prostředí spočívá ve sledování průběhu parametrů jednotlivých konfigurací stropních boxů při proměnných podmínkách vodního okruhu, anebo okolního prostředí. V rámci

zkoušek lze provést čtyři různá měření: aktivní ohřev/chlazení změnou teploty vstupní vody a pasivní ohřev/chlazení změnou teploty okolního prostředí.

Tato měření je nutno provádět v prostoru, ve kterém je možné nezávisle upravovat a udržovat požadované parametry vodního okruhu i okolního prostředí. Zde bylo využito vnitřních prostor Outdoor části KK, kde bylo k dispozici připojení na výměňkovou stanici (vyvedeno z Indoor) i funkce rekondiční jednotky pro úpravu parametrů okolního vzduchu.

Měření výkonových parametrů kompletního systému stropního chlazení vychází z postupů uvedených v technických normách ČSN EN 14240, ČSN EN 14518 a ČSN EN 15116, které se zabývají měřením chladicích výkonů chladicích krytů a pasivních a aktivních stropních trámců. Navržený systém stropního chlazení s akumulací tepla v kombinaci s aktivním trámcem není možné testovat pouze dle uvedených norem, které sledují výkonové parametry při stabilních podmínkách, ale bylo potřeba metodiky upravit a rozšířit o postupy zaznamenávající také dynamické změny, zejména náběh a doběh při referenčních podmínkách.

Měření lze provést pouze v prostoru, který odpovídá požadavkům uvedených norem, jež definují jeho rozměry prostoru, parametry použitých materiálů, instalaci stropních prvků, emisivitu povrchů a dále také rozmístění a parametry zátěžových figurín pro vyrovnání chladicího výkonu. Měření bylo prováděno v připraveném měřicím prostoru Indoor části KK, viz obrázek 4.4, který vyhovuje požadavkům dotčených norem.

V rámci jednotlivých zkoušek je možné stanovit celkový a specifický chladicí výkon při normovaných podmínkách v jednotlivých provozních režimech, od pasivního po plně aktivní. Dále pak je možné sledovat náběh a doběh chladicího výkonu systému v pasivním režimu se stálou či proměnnou zátěží, příp. doběh systému s cirkulací vody skrze stropní trámec.



Obr. 4.4 Měření systému stropního chlazení v Indoor části KK.

4.4 Simulační modely

Práce obsahuje několik dílčí simulační a experimentální postupy, které byly vhodně kombinovány k dosažení realizace systému stropního chlazení s PCM a stanovení celkového vlivu jeho aplikací na spotřebu energií a tepelnou pohodu.

V rámci práce byl využit zejména simulační SW TRNSYS, který lze využít např. pro analýzy a simulace tepelných vlastností budov, energetických toků, spotřeby elektrické energie, atd. Předpokladem dosažení relevantních a dále využitelných výsledků jsou vhodně zvolená vstupní data, zejména parametry zájmového prostoru, konstrukcí a klimatických podmínek.

Nejdříve byl vytvořeny a parametrizovány simulační modely odpovídající navrženým experimentům, jež sloužili pro validaci s reálnými měřeními, čímž bylo možné ověřit správné parametrizace dílčích částí modelů. Jakmile bylo dosaženo odpovídající kvality, bylo možné parametrizované moduly využít v komplexnějších simulacích.

Konečnou částí simulačních postupů byl návrh a příprava komplexních simulací, které zahrnují aplikace navrženého systému stropního chlazení a větrání za podmínek odpovídající reálnému prostředí.

V rámci práce byly připraveny čtyři sady komplexních simulačních modelů pro rozdílné prostory, kterými jsou obývací místnost v rodinném domě (RD) a velkoplošná kancelář. U RD byly řešeny také různé stavební konstrukce, přesněji tedy lehká (dřevostavba), středně těžká (Ytong) a těžká (Porotherm).

Každá jednotlivá sada obsahuje simulační modely pro referenční prostor a prostor s navrženým systémem stropního chlazení s PCM. Cílem je sledovat vliv aplikace PCM a to navíc také s ohledem na kombinace různých poměrů aktivní plochy chladicích stropů, intenzity výměny vzduchu (ACH) a provozních režimů. Kompletní sada ve finále obsahuje desítky simulačních modelů s rozdílným nastavením požadovaných parametrů. Plány obsazenosti a vnitřní tepelné zisky byly implementovány jako denní profily v souladu s ČSN EN ISO 52016-1 a ČSN EN 16798-1.

Ze získaných dat bylo možné stanovit vliv proměnných parametrů na konečnou spotřebu energií na chlazení, příp. vytápění a průběh operativní teploty, příp. také ukazatele tepelného komfortu PMV (předpověď středního tepelného pocitu) a PPD (předpovídané procento nespokojených). Profil počasí byl získán z meteostanice na FAI UTB ve Zlíně (průměrné hodnoty 2017 až 2020).

5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

5.1 Experimentální měření stropních boxů a systému

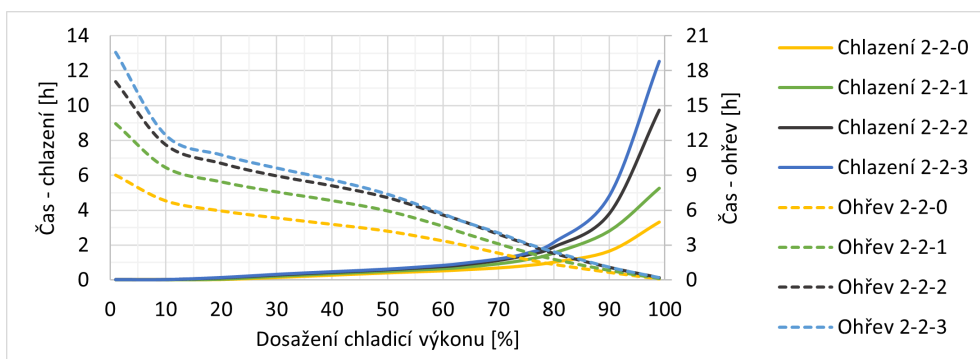
První zkouškou bylo stanovení akumulční kapacity jednotlivých konfigurací stropních boxů. Využito bylo cyklické nabíjení a vybíjení s minimalizací vlivu okolního prostředí. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tab. 5.1 Experimentálně zjištěné parametry tepelné kapacity.

Skladba vrstev PCM	[ks]	2-2-0	2-2-1	2-2-2	2-2-3
Celková hmotnost	[kg]	50,7	56,4	62,2	67,3
Akumulační kapacita	[kJ]	2 906	3 597	4 294	4 860
Akumulační kapacita	[Wh]	807	999	1 193	1 350
Měrná kapacita	[kJ·m ⁻²]	1 596	1 976	2 358	2 670

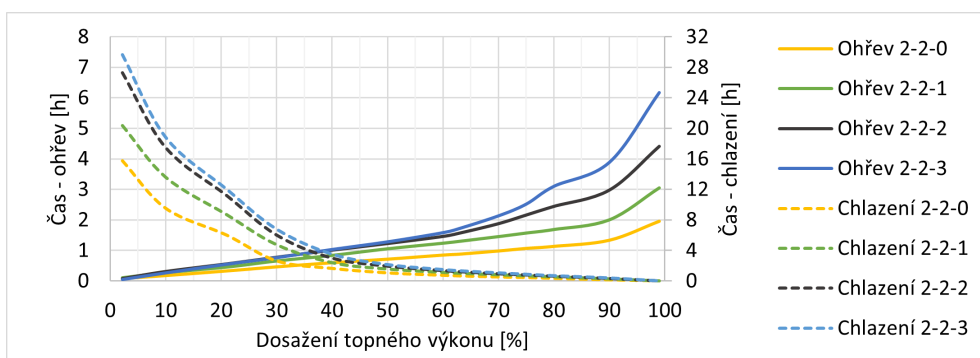
Ze získaných výsledků bylo také pozorováno, že průběhy teplot byly nerovnoměrné a vždy byla znatelná změna v rychlosti ohřevu i chlazení v rozmezí teplot 18 °C až 24 °C, což je dáno teplotní rozsahem změny fáze PCM. Dále bylo vidět, že celkový proces ohřevu probíhá rychleji než chlazení. Tento fakt je dán rozdílnou hodnotou součinitele tepelné vodivosti v kapalném a tuhém stavu. Ochlazení PCM z 30 °C na 18 °C je průměrně o 25 % rychlejší, než ohřev z 12 °C na 24 °C. Zde je ohřev pomalejší, protože proces ohřevu začíná s PCM v tuhém stavu, které má nižší součinitel tepelné vodivosti. Jakmile dojde k překročení mezních teplot změny fáze, dochází k opačnému efektu a kompletní vychlazení je nakonec až o 40 % delší, než ohřátí.

Následně byly provedeny dynamické zkoušky při proměnných podmínkách vstupní vody, příp. okolního prostředí. Jako první bylo testováno aktivní vodní chlazení a zpětný pasivní ohřev vzduchem, při stabilních podmínkách okolního prostředí. Graf 5.1 představuje náběh a doběh chladicího výkonu v aktivním a pasivním režimu. Na ose x je procentuální hodnota dosaženého výkonu (absolutní hodnoty jsou specifické pro každou konfiguraci). Z výsledků je vidět, že již během hodiny jsou jednotlivé konfigurace schopny dosáhnout 65 % až 80 % svého maximálního výkonu. Při pasivní ohřevu lze například vyčíslit, že konfigurace 2-2-2 a 2-2-3 mají po 6 hodinách kolem 57 % výkonu, zatímco verze 2-2-1 a 2-2-0 už mají pod 50 % a 20 %.



Obr. 5.1 Aktivní chlazení a pasivní ohřev - průběh výkonu.

Další zkouškou byl aktivní vodní ohřev a zpětně pasivní chlazení. Náběh a doběh topného výkonu je možné vidět na grafu 5.2. V tomto případě jsou jednotlivé konfigurace během hodiny schopny dosáhnout cca 40 % až 70 % maximální výkonu. Při pasivní chladnutí je viditelné rychlé vybíjení, kdy mají konfigurace 2-2-2 a 2-2-3 po 6 hodinách cca 30 % výkonu a verze 2-2-1 a 2-2-0 mají pod 27 % a 21 %.



Obr. 5.2 Aktivní ohřev a pasivní chlazení - průběh výkonu.

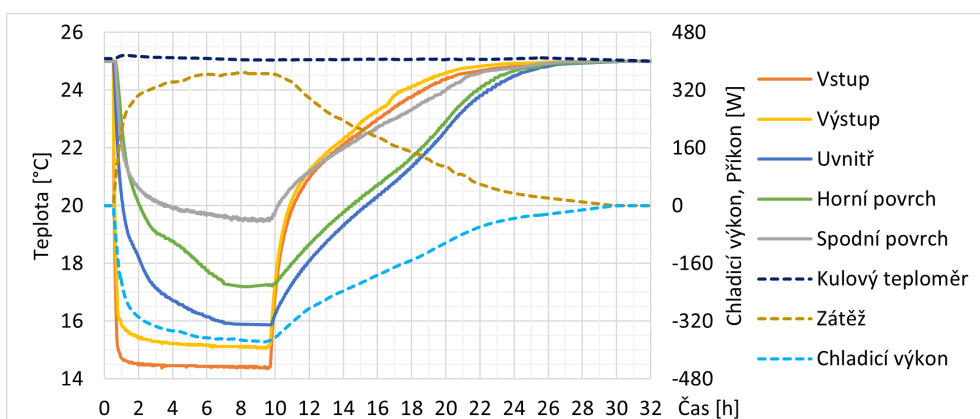
Všechny další zkoušky byly provedeny již pro systém složený ze čtyř stropních boxů v konfiguraci 2-2-2 s celkovou kapacitou cca 4,8 kWh. Systém byl doplněn také o aktivní stropní trámec s ventilátorem.

Následnou sadou zkoušek bylo měření celkového a specifického chladicího výkonu systému. Tyto byly provedeny pro tři provozní režimy: pouze stropní boxy (režim 1), boxy a pasivní trámec (režim 2) a plně aktivní (režim 3).

Tab. 5.2 Normované výsledky chladicího výkonu pro $\Delta\theta = 8\text{ K}$.

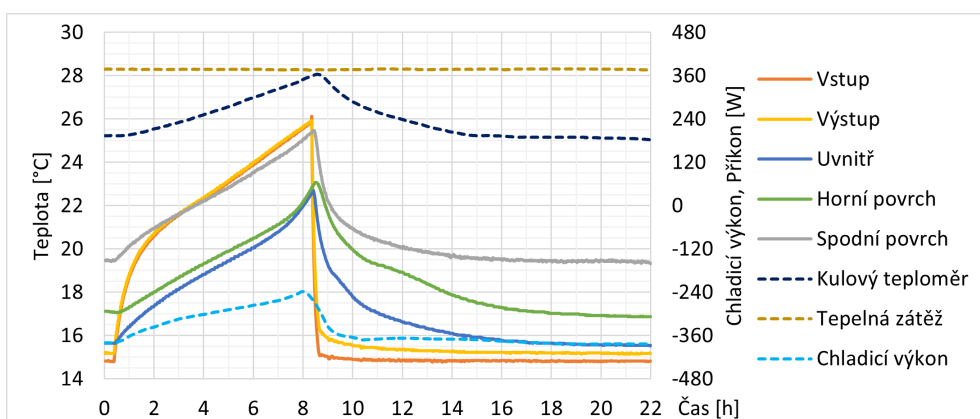
	Režim1	Režim2	Režim3
$P_a = k \cdot \Delta\theta^n$			
Celkový výkon P [W]	301	340	713
Specifický výkon P_a [Wm^{-2}]	73,5	83,0	174,3
Koeficient k [-]	10,951	12,037	37,188
Exponent n [-]	0,916	0,929	0,743

Poslední sadou zkoušek bylo testování náběhu a doběhu výkonu systému pro stanovení vlivu dodatečné akumulace. Jako první byl testován aktivní náběh a pasivní doběh výkonu s proměnnou zátěží, tj. stálou teplotou vzduchu. Průběh parametrů je vyneseno v grafu 5.3, kde je možné vidět při aktivním chlazení bylo již po jedné hodině dosaženo 75 %, po 3 hodinách přes 90 % a po necelých 8 hodinách maximálního výkonu. V případě doběhu byl průběh pozvolný bez výraznějších výkyvů. Po 3 hodinách byl výkon stále kolem 75 %, po sedmi kolem 50 % a k úplnému vyčerpání chladu pak došlo až po cca 20 hodinách.



Obr. 5.3 Náběh a doběh; stropní boxy; proměnná zátěž.

Jako druhé bylo provedeno testování doběhu a náběhu výkonu se stálou zátěží, tj. s proměnnou teplotou vzduchu. Během zkoušky bylo sledováno, za jak dlouho vzroste teplota vzduchu o 3 K a následně zase vrátí na počáteční podmínky. Průběh zkoušky je možné vidět na grafu 5.4.

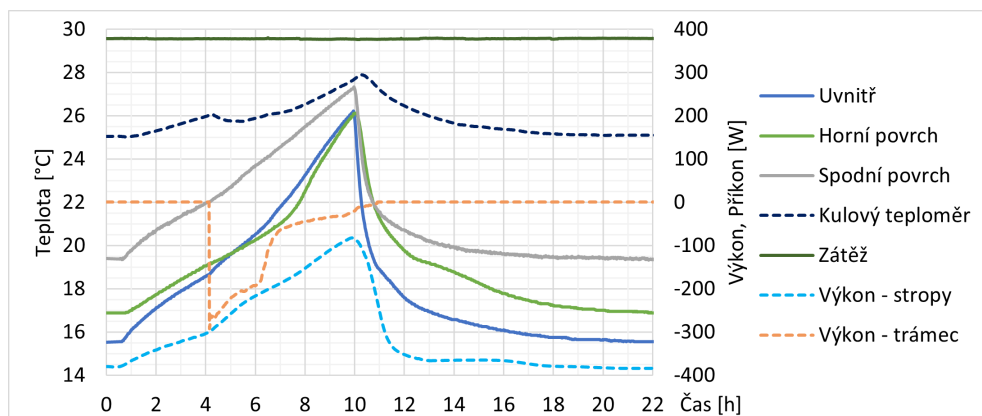


Obr. 5.4 Doběh a náběh; stropní boxy; stálá zátěž.

K nárůstu teploty o 3 K došlo po zhruba 8 hodinách při poklesu chladičového výkonu o cca 37 %. Po zpětné aktivaci chlazení došlo k rychlému nárůstu

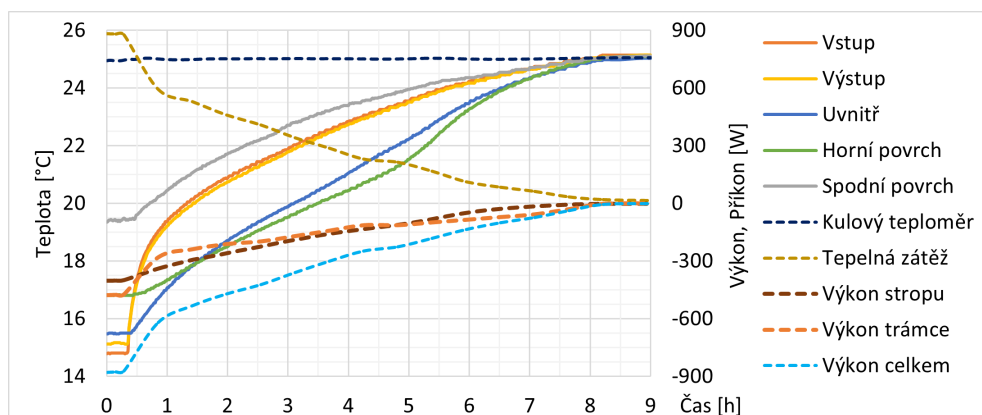
výkonu a po chvíli také k poklesu teploty. Po 2 hodinách chlazení bylo dosaženo 95 % výkonu a snížení na 26 °C. Návrat na počáteční podmínky trval 10 hodin.

Třetí zkouška byla obdobná předchozí, pouze s rozdílem, že při zvýšení teploty o 1 K, po cca 3,5 hodinách, byla spuštěna cirkulace vody v systému, včetně okruhu trámce. Tím došlo k odvádění chladu z boxů a navýšení chladicího výkonu. Mezní zvýšení teploty o 3 K nastalo po cca 10 hodinách. Zpětné chlazení poté trvalo necelých 11 hodin. Průběh zkoušky je uveden na grafu 5.5.



Obr. 5.5 Doběh a náběh; stropní boxy s trámec; stálá zátěž.

Poslední zkouškou byl doběh systému z plně aktivního režimu. Průběhy zkoušky je vyneseno v grafu 5.6. Po cca 2 hodinách byl chladicí výkon kolem 420 W, tj. 50 % maximálního výkonu a po 5 hodinách již kolem 20 %. Kompletní vyčerpání chladu bylo dosaženo za necelých 9 hodin.



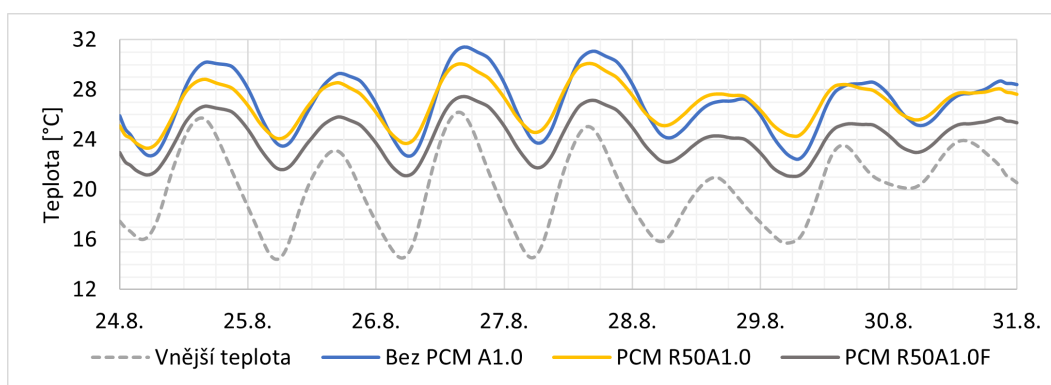
Obr. 5.6 Doběh; plně aktivní režim; stálá zátěž.

Data získaná z měření lze využít v komplexních simulacích systémů techniky prostředí a tepelně-energetických procesů v budovách.

5.2 Stanovení vlivu na tepelný komfort a spotřebu

Z extrahovaných výsledků komplexních simulací byl následně stanoven vliv aplikace navrženého systému chlazení na tepelný komfort a spotřebu energií.

Tepelný komfort vnitřního prostředí je definován zejména operativní teplotou, příp. indexy PMV a PPD. Na grafu 5.7 je pro názornou ukázkou zobrazeno srovnání průběhů operativních teplot referenčního prostoru lehké konstrukce RD a prostor s aplikovaným systémem stropního chlazení v pasivním i aktivním režimu.



Obr. 5.7 Průběh operativní teploty s PCM - lehká konstrukce.

Následující souhrnné tabulky s výsledky představují, pro možnou prezentaci posouzení, pouze jednu vybranou úroveň intenzity výměny vzduchu, a to $ACH\ 1,0\ h^{-1}$. Současně jsou vyneseny hodnoty pro řešené konstrukce a různé poměry aktivní plochy (R30 % až R75 %).

Jako první jsou v tabulce 5.3 uvedeny hodnoty maximálních operativních teplot. Jak je možné vidět, u RD při daném ACH bylo dosaženo snížení teplotních špiček v průměru o $0,8\ ^\circ C$ až $1,8\ ^\circ C$ v pasivním režimu, resp. o $2,9\ ^\circ C$ až $4,5\ ^\circ C$ v případě využití chladu z okolního prostředí. U kancelářských prostor byly hodnoty snížení kolem $2,5\ ^\circ C$, resp. $4,5\ ^\circ C$.

Tab. 5.3 Maximální operativní teploty pro $ACH\ 1,0\ h^{-1}$.

Konstrukce	Bez PCM		Pasivní režim			Aktivní režim		
	-	AC	R30	R50	R75	R30F	R50F	R75F
Lehká	31,4	27,5	30,5	30,1	29,7	28,2	27,4	26,8
Střední	31,1	26,9	30,2	29,9	29,5	27,9	27,2	26,7
Těžká	29,7	26,6	28,9	28,4	27,8	26,8	26,1	25,5
Kancelář	30,0	25,6	27,7	27,5	27,3	25,6	25,6	25,5

Kromě operativní teploty je důležitým ukazatelem hodnota PPD, která přímo udává úroveň tepelného komfortu řešeného prostoru. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.4.

Tab. 5.4 Průměrná hodnota PPD pro ACH 1,0 h⁻¹.

Konstrukce	Bez PCM		Pasivní režim			Aktivní režim		
	-	AC	R30	R50	R75	R30F	R50F	R75F
Lehká	22,7	8,3	18,9	18,2	17,5	9,9	8,4	7,4
Střední	23,9	8,0	20,3	19,5	19,7	9,7	8,1	7,3
Těžká	17,4	7,8	14,3	12,8	11,3	7,8	6,8	6,2
Kancelář	11,7	8,2	8,2	8,0	8,1	8,3	8,1	7,8

Z výsledků lze vyčíst, že pasivní režim byl schopen snížit hodnoty PPD v rámci jednotek procent. Ovšem v případě využití okolního chladu bylo možné dosáhnout výrazného zlepšení. U lehké a středně těžké konstrukce RD s 50 % poměrem aktivní plochy bylo dosaženo stejných hodnot, jako v případě strojního chlazení. U těžké konstrukce RD a kancelářských prostor by pro dosažení podobného efektu postačil již cca 30 % poměr.

Následující tabulky 5.5 a 5.6 prezentují zjištěné roční úspory energií na chlazení a vytápění. Z dat je zřejmé, že největší poměrné úspory bylo dosahováno právě v oblasti chlazení prostoru. U RD bylo dosaženo snížení o 82 % až 98 % a u kanceláře o 69 % až 81 %.

Tab. 5.5 Roční spotřeba energií na chlazení pro ACH 1,0 h⁻¹.

Konstrukce	Ref.	Aktivní s AC [kWh]			Úspora energie [%]		
	[kWh]	R30F	R50F	R75F	R30F	R50F	R75F
Lehká	217	40	24	15	82	89	93
Střední	192	31	19	11	84	90	94
Těžká	130	13	6	2	90	96	98
Kancelář	263	83	63	49	69	76	81

V rámci vytápění, které není primární funkcí navrženého systému, je možné také dosažení nezanedbatelných úspor. Jedná se zejména o vlastnost dodatečné akumulární hmoty v daném prostoru. Z výsledků bylo zjištěno, že u RD došlo ke snížení spotřeby tepla o 11 % až 23 %, přičemž největších úspor je dosaženo u lehčích konstrukcí, které nemají vlastní dostatečnou akumulární kapacitu. U prostor kanceláře bylo poté dosaženo 12 % až 15 % úspor.

Tab. 5.6 Roční spotřeba energií na vytápění pro ACH 1,0 h⁻¹.

Konstrukce	Ref. [kWh]	Aktivní s AC [kWh]			Úspora energie [%]		
		R30F	R50F	R75F	R30F	R50F	R75F
Lehká	884	771	721	681	13	18	23
Střední	812	716	680	636	12	16	22
Těžká	917	818	787	755	11	14	18
Kancelář	7682	6745	6662	6558	12	13	15

V reálném užití budov je v zimním období snaha snížit potřebu tepla na vytápění. Což lze prakticky zajistit pouze snížením ztrát větráním, tj. redukcí hodnoty ACH. Co se týče letního období, je možné potřebu energie na chlazení snížit po většinu času naopak zvýšením ACH. Uvedený postup může být v rozporu s požadavky norem a vyhlášek z hlediska normativů na výměnu vzduchu ve vztahu ke vzniku škodlivin a to zejména v zimním období. Realita je ovšem taková, že ať už v případě RD, tak i kanceláří, dochází k upřednostňování snížení potřeby energií, před normativními požadavky.

Následující tabulka 5.7 představuje celkové reálné úspory energií. Výsledné hodnoty jsou vztaženy na případy, kdy je hodnota ACH v letním období zvýšena na 2,0 h⁻¹ a v zimním snížena na 0,5 h⁻¹.

Tab. 5.7 Celková úspora energií - přehled.

Konstrukce	Úspora energie [W]			Úspora energie [%]		
	R30F	R50F	R75F	R30F	R50F	R75F
Lehká	221	280	326	22	28	32
Střední	189	232	279	21	25	30
Těžká	168	203	237	17	20	24
Kancelář	1043	1136	1246	13	15	16

Z výsledků je možné stanovit, že aplikace navrženého systému s využitím PCM nachází nejlepší uplatnění u lehkých konstrukcí jak s ohledem na úspory energií, tak tepelný komfort. Každopádně u ostatních konstrukcí se pak jedná také o značné zvýšení tepelného komfortu při současném snížení spotřeby energií. V případě velkoplošné kanceláře je procentuální úspora sice nižší než u RD, ovšem celková hodnota dosahuje násobně vyšších hodnot. Celkově je tedy možné usuzovat, že navržený systém stropního chlazení a větrání s PCM nachází uplatnění ve všech konstrukcích.

6 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Představená práce a dosažené výsledky mohou být prospěšné pro různé oblasti technických věd. Teoretická část zpracovává současný stav poznání aplikací TES a PCM zejména s ohledem na problematiku tepelné stability a související možnosti chlazení prostoru. Jedná se tedy o zaměření na specifickou oblast, která je z hlediska spotřeby energie kritická. V praktické části přináší disertační práce komplexní řešení problematiky aplikace PCM, neboť bylo postupováno od samotného technického návrhu, přes přípravu prototypů v různých konfiguracích, realizaci a instalaci kompletního kombinovaného systému stropního chlazení a větrání, testování dle připravených metodik až po přípravu a vyhodnocení komplexních simulací. Z dostupných vědeckých a výzkumných článků je možné pozorovat, že značný přínos v oblasti vědy lze nalézt mimo jiné v kombinaci modulárního systému stropního chlazení a větrání, s možností vzájemné kooperace, který nebyl doposud ve zkušební konfiguraci realizován ani laboratorně testován. Prezentované postupy a zkušební metodiky je možné uplatnit i na další typy stropních systémů, které by byly provozovány s dodatečnou akumulací kapacity.

Přínos disertační práce pro běžnou praxi se nachází zejména ve skutečnosti, že došlo k návrhu a realizaci funkčního systému, který je možné aplikovat do nových i stávajících objektů. Zásadním přínosem je také stanovení provozních parametrů navrženého systému s následnou parametrizací komplexních simulačních modelů odpovídající reálným prostorům. Výsledky simulací představují důležité skutečnosti, zejména, že aplikace navrženého systému se velmi pozitivně projevuje nejen na úpravě vnitřního prostředí, tj. tepelném komfortu, ale také na konečné spotřebě energií na chlazení a vytápění. Výsledky práce dávají navíc představu o přínosu aplikací různých konfigurací v odlišných typech stavebních konstrukcí a při rozličných provozních režimech.

7 ZÁVĚR

Náplní předložené práce je řešení systému stropního chlazení a větrání s využitím tepelně-akumulačních materiálů typu PCM. Nejdříve je uvedeno zasažení výzkumného záměru do kontextu celosvětových trendů snižování spotřeby

energií, problematiky tepelné stability budov a aplikací akumulčních materiálů. Zde se dostává do pole zájmu využití akumulace tepla.

Navazující část popisuje způsoby akumulace tepelné energie pomocí PCM. V této části jsou popsány běžně používané materiály, jejich základní vlastnosti, výhody a nevýhody. Dále jsou také popsány způsoby zakomponování těchto materiálů do stavebních konstrukcí. V této části se nacházejí informace získané z rozsáhlého počtu nejnovějších publikovaných výsledků světových výzkumů, aby byla zajištěna aktuálnost výzkumného záměru disertační práce.

Následná praktická část naplňuje všechny vytyčené cíle. První částí je charakteristika metod řešení, která v sobě zahrnuje také samotnou praktickou realizaci jednotlivých částí, resp. celého systému. Nejdříve je představeno využití zázemí laboratoře techniky prostředí a základní informace o použitém PCM. Následně je popsán technický návrh systému stropního chlazení včetně stanovení předpokládaných parametrů. Dále jsou prezentovány praktické postupy a jednotlivé kroky z realizace prototypů chladících stropních boxů, přičemž spolu s jejich přípravou jsou uvedeny také patřičné úpravy laboratorního zázemí. V rámci části metod jsou popsány také zpracované metodiky jednotlivých laboratorních zkoušek a příprava komplexních simulačních modelů.

Poslední, velmi důležitá část práce, již představuje hlavní výsledky, které byly získány zejména laboratorním měřením v souladu s představenými metodikami. V rámci zkoušek byly nejdříve testovány a stanoveny parametry různých konfigurací prototypů stropních boxů, kde došlo ke stanovení jejich akumulčních kapacit a srovnání dynamického chování při různých podmínkách. Na základě získaných dat byla vybrána jedna konfigurace, která byla využita jako vzor pro realizaci kompletního kombinovaného systému stropního chlazení a větrání. Ten byl následně podroben připraveným laboratorním zkouškám ke stanovení výkonových parametrů. Získaná data byla využita také pro parametrizaci a validaci simulačních modelů. Cílem simulací bylo posoudit vliv aplikace navrženého systému na tepelný komfort a spotřebu energií s ohledem na různé stavební konstrukce.

Dosažené výsledky ukazují, že aplikace navrženého, příp. i podobného systému, má pozitivní vliv na tepelný komfort i spotřebu energií, a to nejen s ohledem na chlazení, ale také vytápění.

8 ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

JMÉNO A PŘÍJMENÍ: Ing. Jan Skovajsa, Ph.D.
DATUM NAROZENÍ: 26.8.1991
ADRESA: U Pekárny 186, 763 14, Zlín
TELEFON: +420 777 260 809
PRACOVNÍ E-MAIL: jskovajsa@utb.cz

Vzdělání

2015 – 2022 Doktorské studium, FAI UTB ve Zlíně
obor: Automatické řízení a informatika
2013 - 2015 Magisterské studium, FAI UTB ve Zlíně
obor: Integrované systémy v budovách
2010 - 2013 Bakalářské studium, FAI UTB ve Zlíně
obor: Bezpečnostní technologie, systémy a management

Zaměstnání

od **2018 Výzkumný projektový pracovník** *CEBIA-Tech, UTB ve Zlíně*
od **2016 Lektor/vyučující** *FAI UTB ve Zlíně*
2009 – 2018 Montér - elektro *Vašík, s.r.o., Zlín*
2014 Správa databáze *iNELS ELKO EP, Holešov*
2009 - 2015 Zástupce vedoucí RZ *Barum Czech Rally Zlín*
2007 - 2008 Lisař, operátor *EFFBE - CZ, s.r.o., Velíková*

Absolvovaná školení

2021 Expertní kurz navrhování pasivních a nulových domů
2017 Certifikační kurz: KNX Certification Basic Course
2017 Školení: IR termografie pro termodiagnostiku budov
2014 Školení: iNELS BUS System, RF Control a Multimedia
2012 Certifikační kurz: Cisco CCNA Exploration

Vyučované předměty

- Systémy techniky prostředí, Vybrané parametry budov, Technologie budov, Facility management, Databázové systémy

Jazyky

- Angličtina (B2)

Aktivity

- Spoluřešitel projektů: NFP304011Y280: Interreg (od 2020), FAI2A/2020-21: MSM - IPUTB (od 2020), RVO/CEBIA/2021/001: MSM - RVO excellent (2021), RVO/CEBIA/2018/001 (2018), RVO/CEBIA/2019/001 (2019), OP VVV, č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_054/0014623 (2020-2021), OP VVV, č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002204 (2021) a NPU I. č. LO1303 (2015-2021).
- Hlavní řešitel a spoluřešitel interních projektů IGA 2016 až 2020.
- Spoluřešitel smluvního výzkumu (od 2017) se spol. RECUTECH s.r.o., ETELAB s.r.o., 2VV s.r.o., TnG-Air.CZ s.r.o., TROX TECH-TRADE s.r.o., Air Technology s.r.o., Petr Nejedlý (tepi), NOSRETI velkoobchod s.r.o., ATREA s.r.o., ITC, a. s., REVEL, s.r.o.

Další aktivity

- Člen Akademického senátu UTB ve Zlíně. 2020-2022.
- Člen Stipendijní komise FAI UTB ve Zlíně. Od 2020.
- Spolupráce s akreditovanou laboratoří ETELAB s.r.o. Od 2020
- Spolupráce na přípravě akreditace Laboratoře techniky prostředí organizací TŮV SŮD. Od 2021.
- Spolupráce na přípravě akreditace Laboratoře techniky prostředí zkušební, certifikační, kalibrační a inspekční společností ITC (Institut pro testování a certifikaci, a.s.). Od 2021.
- Spolupráce na přípravě a realizaci systému testování těsnosti zařízení technicky prostředí. 2020-2021.
- Spolupráce na přípravě a realizaci měřicí trati pro měření rekuperační výměníků a jednotek. 2019-2021.
- Příprava metodik a vytvoření komplexního systému měření velkoplošných chladicích a vytápěcích systémů v kalorimetrické komoře v Laboratoři techniky prostředí. 2020-2022.
- Spolupráce na přípravě a realizaci laboratoře světelné techniky. 2016-2017.

LITERATURA

- [1] *2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, 2021.
- [2] *Tracking Buildings 2021* [online]. International Energy Agency - IEA.
- [3] ALI, S. and DESHMUKH, S. An overview: Applications of thermal energy storage using phase change materials. *Materials Today: Proceedings*. 2020, 26, pp. 1231 – 1237. ISSN 2214-7853. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.247. 10th International Conference of Materials Processing and Characterization.
- [4] ALI, S. and DESHMUKH, S. An overview: Applications of thermal energy storage using phase change materials. *Materials Today: Proceedings*. 2020. ISSN 2214-7853. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.247.
- [5] BOGATU, D.-I., KAZANCI, O. B. and OLESEN, B. W. An experimental study of the active cooling performance of a novel radiant ceiling panel containing phase change material (PCM). *Energy and Buildings*. 2021, 243, pp. 110981. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110981.
- [6] BOGATU, DRAGOS-IOAN, BOURDAKIS, ELEFThERIOS, KAZANCI, ONGUN BERK and OLESEN, BJARNE W. Experimental Comparison of Radiant Ceiling Panels and Ceiling Panels Containing Phase Change material (PCM). *E3S Web Conf.* 2019, 111, pp. 01072. doi: 10.1051/e3sconf/201911101072.
- [7] GALLARDO, A. and BERARDI, U. Analysis of the energy and thermal performance of a radiant cooling panel system with integrated phase change materials in very hot and humid conditions. oct 2019, 609, pp. 052025. doi: 10.1088/1757-899x/609/5/052025.
- [8] HEIER, J., BALES, C. and MARTIN, V. Combining thermal energy storage with buildings – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 42, pp. 1305–1325. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2014.11.031.

- [9] JELLE, B. and KALNÆS, S. Chapter 3 - Phase Change Materials for Application in Energy-Efficient Buildings. 2017, pp. 57–118. doi: 10.1016/B978-0-08-101128-7.00003-4.
- [10] KNAACK, U. and KOENDERS, E. *Building Physics of the Envelope*. Birkhäuser, 2018. ISBN 978-3-0356-0949-3.
- [11] MADAD, A., MOUHIB, T. and MOUHSEN, A. Phase Change Materials for Building Applications: A Thorough Review and New Perspectives. *Buildings*. 2018, 8, 5. ISSN 2075-5309. doi: 10.3390/buildings8050063.
- [12] NIELSEN, L. F., BOURDAKIS, E., KAZANCI, O. B. and OLESEN, B. W. The influence of a radiant panel system with integrated phase change material on energy use and thermal indoor environment. In *Proceedings of the ASHRAE Winter Conference*, 2018.
- [13] NKWETTA, D. N. and HAGHIGHAT, F. Thermal energy storage with phase change material—A state-of-the art review. *Sustainable Cities and Society*. 2014, 10, pp. 87 – 100. ISSN 2210-6707. doi: 10.1016/j.scs.2013.05.007.
- [14] QUESADA ALLERHAND, JOSÉ, BERK KAZANCI, ONGUN and OLESEN, BJARNE W. Energy and thermal comfort performance evaluation of PCM ceiling panels for cooling a renovated office room. *E3S Web Conf*. 2019, 111, pp. 03020. doi: 10.1051/e3sconf/201911103020.
- [15] RUCEVSKIS, S., AKISHIN, P. and KORJAKINS, A. Performance Evaluation of an Active PCM Thermal Energy Storage System for Space Cooling in Residential Buildings. *Environmental and Climate Technologies*. 2019, 23, 2, pp. 74–89. doi: doi:10.2478/rtuect-2019-0056.
- [16] SKOVAJSA, J., DRABEK, P., SEHNALEK, S. and ZALESK, M. Design and experimental evaluation of phase change material based cooling ceiling system. *Applied Thermal Engineering*. 2022, 205, pp. 118011. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.118011.
- [17] SONG, M., NIU, F., MAO, N., HU, Y. and DENG, S. Review on building energy performance improvement using phase change materials. *Energy*

and Buildings. 2018, 158, pp. 776–793. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.066.

- [18] STEFANSEN, C., FARHAN, H., BOURDAKIS, E., KAZANCI, O. B. and OLESEN, B. W. Simulation Study of Performance of Active Ceilings with Phase Change Material in Office Buildings under Extreme Climate Conditions. In *ASHRAE 2018 Winter Conference*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2018.
- [19] WEINLÄDER, H., KLINKER, F. and YASIN, M. PCM cooling ceilings in the Energy Efficiency Center—passive cooling potential of two different system designs. *Energy and Buildings*. 2016, 119, pp. 93–100. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.031.
- [20] WEINLÄDER, H., KLINKER, F. and YASIN, M. PCM cooling ceilings in the Energy Efficiency Center – Regeneration behaviour of two different system designs. *Energy and Buildings*. 2017, 156, pp. 70–77. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.010.

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

Článek v periodiku

- [1] SKOVAJSA, J., DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S. AND ZÁLEŠÁK, M. Design and Experimental Evaluation of Phase Change Material Based Cooling Ceiling System. *Applied Thermal Engineering*, 2021, Volume 205, pp 118011, ISSN 1359-4311.
- [2] SKOVAJSA, J. AND ZÁLEŠÁK, M. The use of the photovoltaic system in combination with a thermal energy storage for heating and thermoelectric cooling. *Applied Sciences-Basel*, 2018, Volume 8, ISSN 2076-3417.
- [3] SKOVAJSA, J. AND ZÁLEŠÁK, M. Optimization and economic assessment of renewable energy sources and their combinations. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 2018, Volume 14, pp 575-583, ISSN 1790-5079.
- [4] SKOVAJSA, J. AND ZÁLEŠÁK, M. PCM akumulární zařízení v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie a termoelektrických chlazením. *Vytápění, větrání, instalac*, 2018, Volume 62, pp 18-25, ISSN 1210-1389.
- [5] SKOVAJSA, J., KOLÁČEK, M. AND ZÁLEŠÁK, M. Phase Change Material Based Accumulation Panels in Combination with Renewable Energy Sources and Thermoelectric Cooling. *Energies*, 2017, Volume 10, pp 1-18, ISSN 1996-1073.
- [6] SKOVAJSA, J., KOLÁČEK, M. AND ZÁLEŠÁK, M. Možnost akumulace energie ve formě tepla a chladu do akumulárních panelů. In *TZB Haustechnik CZ*, 2016, Volume 9, pp 24-27, ISSN 1803-4802.

Článek ve sborníku

- [7] SKOVAJSA, J., SEHNÁLEK, S., AND ZÁLEŠÁK, M. Optimization and economic assessment of renewable energy sources and their

combinations for Central Europe. In *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019, ISSN 2261-236X.

- [8] SKOVAJSA, J., DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S., AND ZÁLEŠÁK, M. Měření v univerzální kompenzované kalorimetrické komoře. In *Sborník přednášek 23. konference Klimatizace a větrání*. Společnost pro techniku prostředí, Odborná sekce Klimatizace a větrání, 2019, ISBN 978-80-02-02870-3.
- [9] SKOVAJSA, J. AND ZÁLEŠÁK, M. Economic assessment and optimizing of the solar water heating system. In *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2018, ISSN 2261-236X.
- [10] SKOVAJSA, J. AND ZÁLEŠÁK, M. Thermoelectric cooling in combination with photovoltaics and thermal energy storage. In *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017, ISSN 2261-236X.
- [11] CHROBÁK, P., SKOVAJSA, J. AND ZÁLEŠÁK, M. Effect of cloudiness on the production of electricity by photovoltaic panels. In *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2016, ISSN 2261-236X.
- [12] SKOVAJSA, J., KOLÁČEK, M. AND ZÁLEŠÁK, M. Možnost akumulace energie ve formě tepla a chladu do akumulčních panelů. In *Sborník příspěvků z konference AZE 2016*. Společnost pro techniku prostředí, 2016, pp 165-172, ISBN 978-80-02-02666-2.
- [13] SKOVAJSA, J., KOLÁČEK, M. AND ZÁLEŠÁK, M. Thermal energy storage in the form of heat or cold with using of the PCM-based accumulation panels. In *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2016, ISSN 2261-236X.

Výzkumné zprávy

- [14] SKOVAJSA, J., ZÁLEŠÁK, M., DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S. Výzkumné zprávy (celkem 39) pro RECUTECH s.r.o., ETELAB s.r.o., 2VV s.r.o., TnG-Air.CZ s.r.o., TROX TECH-TRADE s.r.o., Air Technology s.r.o., Petr Nejedlý (tepi), NOSRETI velkoobchod s.r.o., ATREA s.r.o., ITC, a. s., REVEL, s.r.o.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1	Detail stropního boxu.	8
Obr. 4.2	Hydraulické zapojení systému stropního chlazení/ohřevu.	9
Obr. 4.3	Příprava: detail PCM a připravené boxy.	10
Obr. 4.4	Měření systému stropního chlazení v Indoor části KK.	11
Obr. 5.1	Aktivní chlazení a pasivní ohřev - průběh výkonu.	14
Obr. 5.2	Aktivní ohřev a pasivní chlazení - průběh výkonu.	14
Obr. 5.3	Náběh a doběh; stropní boxy; proměnná zátěž.	15
Obr. 5.4	Doběh a náběh; stropní boxy; stálá zátěž.	15
Obr. 5.5	Doběh a náběh; stropní boxy s trámeč; stálá zátěž.	16
Obr. 5.6	Doběh; plně aktivní režim; stálá zátěž.	16
Obr. 5.7	Průběh operativní teploty s PCM - lehká konstrukce.	17

SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1	Experimentálně zjištěné parametry tepelné kapacity.	13
Tab. 5.2	Normované výsledky chladicího výkonu pro $\Delta\theta = 8$ K.	14
Tab. 5.3	Maximální operativní teploty pro ACH $1,0$ h ⁻¹	17
Tab. 5.4	Průměrná hodnota PPD pro ACH $1,0$ h ⁻¹	18
Tab. 5.5	Roční spotřeba energií na chlazení pro ACH $1,0$ h ⁻¹	18
Tab. 5.6	Roční spotřeba energií na vytápění pro ACH $1,0$ h ⁻¹	19
Tab. 5.7	Celková úspora energií - přehled.	19

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRA- TEK

AC	Air-Conditioning, Strojní chlazení
ACH	Intenzita výměny vzduchu
CO ₂	Oxid uhličitý
FAI	Fakulta aplikované informatiky
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
IEA	International Energy Agency
KK	Univerzální kompenzované kalorimetrická komora
LTP	Laboratoř techniky prostředí
PCM	Phase Change Material
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
RD	Rodinný dům
TES	Thermal Energy Storage
UTB	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Ing. Jan Skovajsa, Ph.D.

**Integrace materiálů s fázovou změnou do systémů
stropního chlazení a větrání**

Integration of Phase Change Materials in Cooling Ceiling and Ventilation
Systems

Teze dizertační práce

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

První vydání

Náklad: vydáno elektronicky

Sazba: Jan Skovajsa

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2022

ISBN 978-80-7678-143-6

