



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Terézia Cabanová

Autoreferát dizertačnej práce

**Klimaticky adaptívne materiály integrované v inovatívnych
stavebných komponentoch**

na získanie akademického titulu
philosophiae doctor, PhD.

v doktorandskom študijnom programe: 3659 Technológia stavieb

v študijnom odbore: Stavebníctvo

Forma štúdia: denná

Bratislava, júl 2023

**Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre materiálového inžinierstva a fyziky
Stavebnej fakulty STU v Bratislave**

Predkladateľ: **Ing. Terézia Cabanová**

Katedra materiálového inžinierstva a fyziky
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Miroslav Čekon, PhD.**

Katedra materiálového inžinierstva a fyziky
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: **prof. Ing. Ondřej Šikula, PhD.**

Ústav technických zařízení budov
Fakulta stavební VUT v Brně
Veveří 331/95, Veverí, 60200, Brno, Česká republika

doc. RNDr. Anton Trnák, PhD.

Katedra fyziky
Fakulta prírodných vied a informatiky UKF v Nitre
Tr. A. Hlinku 1, 949 01 Nitra, Slovensko

doc. Ing. Rastislav Ingeli, PhD.

Katedra konštrukcií pozemných stavieb
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovensko

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa o h

na Katedre materiálového inžinierstva a fyziky Stavebnej fakulty STU v Bratislave,
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
dekan fakulty
Stavebná fakulta STU v Bratislave

1. Úvod do problematiky

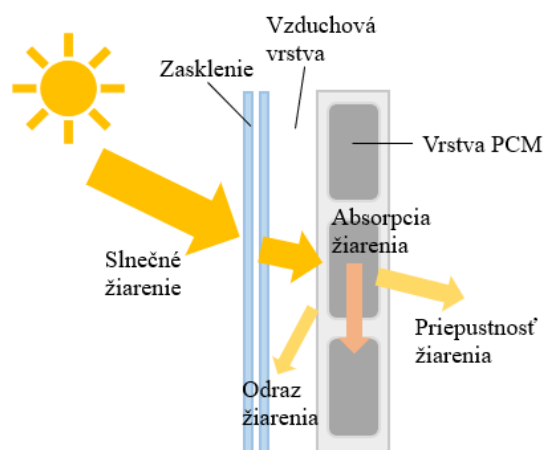
Vývoj nových technológií je v snahe hľadať riešenia pre stavebníctvo, ktoré zodpovedajú podmienkam budov s takmer nulovou potrebou energie a zároveň sa zachováva vnútorný komfort človeka. Je dôležité uplatňovať klimaticky adaptívne návrhy, ktoré spolupôsobia s vonkajšími klimatickými podmienkami a sú schopné využiť obnoviteľné zdroje energie v prospech budovy [1][2][3]. Vzhľadom na tieto požiadavky je podstatné využitie energeticky účinných technológií, inovatívnych materiálov a klimaticky adaptívnych komponentov reagujúcich vhodne na vonkajšie klimatické podmienky [4]. Obvodové plášte budov majú v tomto smere zásadný vplyv a zlepšenie ich účinnosti má veľký význam pre potrebu vykurovania a chladenia budovy. Za významnú časť solárnych ziskov a tepelných strát sú zodpovedné transparentné prvky fasády. Práve transparentné fasády, ktoré sú v dnešnej dobe nadmerne používané predovšetkým v kancelárskych budovách, kde výrazne ovplyvňujú energetickú účinnosť na vykurovanie a chladenie budovy [5]. Vzhľadom na spomínané fakty je nutné skúmať riešenia s aplikovaním nových systémov za účelom konštruovať fasádu schopnú prispôsobiť sa okolitým podmienkam. Jednou z možností je aplikácia materiálov s fázovou zmenou (PCM) schopných akumulovať a uvoľňovať tepelnú energiu, ktorými sa dlhé roky zaoberá množstvo výskumov s cieľom hľadať vhodný spôsob implementácie do komponentov budovy [7][8]. Zámerom tejto práce bolo preto skúmať vplyv materiálov s adaptívnymi vlastnosťami integrovaných do transparentných stavebných komponentov so zameraním na ich tepelné a optické vlastnosti. Tým podporiť súčasné trendy výskumu a vývoja progresívnych materiálov a technológií budov pri hľadaní nových a budúcich riešení v kontexte s konkrétnymi klimatickými podmienkami [9][10] [11][12][13].

2. Ciele, metódy a metodika práce

Táto práca sa zameriava predovšetkým na optické parametre PCM aplikovaného do transparentného prvku fasády. Hlavnou výzvou bolo charakterizovať spektrálne optické zmeny PCM v transparentnom systéme a nájsť vhodný rozsah topenia/tuhnutia materiálu pre konkrétnu oblasť aplikácie. Z dôvodu dynamických vlastností týchto materiálov bázovaných latentnou akumuláciou tepelnej energie bolo dôležité preskúmať ich premenlivosť kde sa menia nie len tepelno-fyzikálne ale aj optické vlastnosti, ktoré spolu veľmi úzko súvisia **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**[16]**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..** PCM

dokáže absorbovať a uvoľňovať tepelnú energiu počas fázovej premeny a optickými vlastnosťami ovplyvňovať prostredie v budovách. V tekutom stave je materiál úplne priehľadný, avšak v pevnom skupenstve sa mení na priesvitný až netransparentný, pričom zväčša zachováva istú mieru priepustnosti svetelného spektra. PCM môže tiež ovplyvniť spektrálne vlastnosti v jednotlivých oblastiach spektra. Tieto vlastnosti sa líšia v závislosti od použitého typu materiálu a komponentu, v ktorom je integrovaný. Pri návrhu pasívnej technológie využívajúcej PCM je dôležitých mnoho faktorov. Medzi inými, výber závisí od klimatických podmienok, miesta využitia, od funkcie budovy ale aj spôsobu zakomponovania. Podstatný je tiež cyklus opakovateľnosti, kde sa vplyvom času môžu meniť určité vlastnosti materiálu vplyvom neustáleho topenia/tuhnutia v rôznych časových intervaloch.

Hlavnou motiváciou práce bolo charakterizovať optické vlastnosti systému, ktorý zabezpečí pasívnu konštrukciu založenú na princípe Trombeho steny so schopnosťou reagovať na klimatické podnety [17][18][19]. Predpokladom navrhovaného konceptu je využitie funkcie ukladania tepla v kombinácii s pasívnym riadením priepustnosti žiarenia do interiéru budovy. Podstatou návrhu je preskúmať transparentný fasádny prvok reagujúci na vývoj pokročilých technológií, ktoré by mohli ovplyvniť tepelnú a energetickú účinnosť budov. Skúmaný koncept má ambíciu byť súčasťou budúcich konceptov Trombeho steny, s rôznymi optickými vlastnosťami jej tepelno-akumulačnej vrstvy (obr. 1) [20][21]. Vplyvom akumulácie latentnej tepelnej energie sa predpokladá taktiež zlepšenie termoregulačných vlastností oproti konvenčným systémom dvojítych fasád budov.



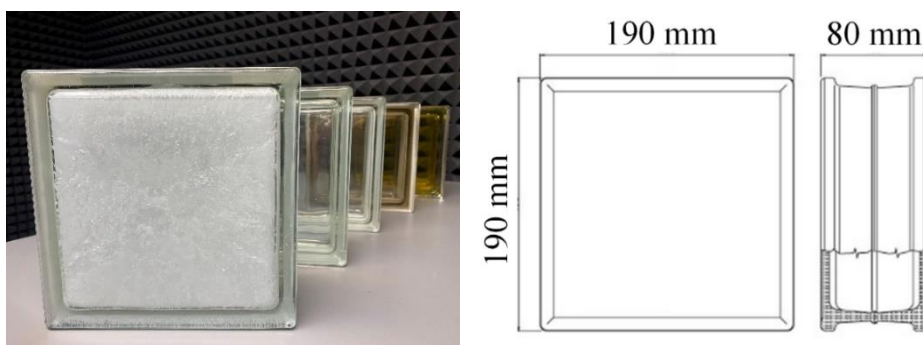
Obr. 1 Schéma skúmaného systému s PCM pre potenciálne využitie na princípe Trombeho steny

3. Merania optických vlastností

Výskumné štúdie skúmali účinky rôznych typov a konfigurácií PCM na optické vlastnosti zasklenia kde sa zistilo, že špecifické optické parametre sú ovplyvnené rôznymi okrajovými podmienkami a systémovými nastaveniami. Pri navrhovaní a výbere zasklenia s integrovaným PCM pre použitie v obvodovej konštrukcii budovy je preto dôležité charakterizovať optické vlastnosti systému, ktoré je nutné detailnejšie preskúmať. V literatúre sú opísané rôzne metódy merania týchto charakteristík a výsledky sa môžu líšiť podľa použitej metódy a všeobecne podľa povahy výskumu a konkrétnej integrácie [9][10][11][12]. V tomto výskume sa pozornosť upriamila na priepustnosť, ktorá sa skúmala pod vplyvom umelého zdroja žiarenia a tepelnú odozvu fragmentu získanú v reálnych podmienkach s vplyvom slnečného žiarenia. V týchto experimentoch sa použili meracie prístroje ako je spektrometer a pyranometer na detegovanie intenzity žiarenia v širšom rozsahu vlnových dĺžok prechádzajúceho PCM a zložkami systému sklenej tvarovky. Tieto merania mali za cieľ poskytnúť informácie o tom, ako rozličné typy PCM ovplyvňujú priepustnosť pri rôznych vlnových dĺžkach a akým spôsobom reaguje konkrétny typ PCM vo fragmente fasády pozostávajúcej zo skúmanej PCM sklenenej tvarovky.

3.1 Materiály a skúmané systémy

Ako jedna zo základných foriem skúmaných transparentných fasádnych systémov sú použité sklenené tvarovky modulovo vyrábané s rozmermi 190 x 190 x 80 mm. Dutina sklenených tvaroviek je vyplnená rôznymi druhmi organických PCM predovšetkým na báze parafrínov (RT27, RT28HC, RT35HC), doplnkovo aj s prírodnými typmi a taktiež v rôznych farbených konfiguráciách. Princíp analýzy spočíval v porovnávaní výsledných priebehov priepustnosti vzoriek s PCM a vzoriek naplnených vzduchom, alebo vodou ako referencie vzoriek v tekutom stave.



Obr. 2 Fotografia skúmanej zostavy vzoriek a schéma použitej základnej sklenenej tvarovky s rozmermi

3.2 Princíp a metódy merania

Princípy merania možno zjednodušene definovať ako pomer dvoch tokov a získané optické parametre sú relatívnymi charakteristikami. Odporúčané metódy na meranie najdôležitejších optických charakteristík (priepustnosť a odrazivosť), geometria merania a rádiometrická/fotometrická špecifikácia zariadení používaných na ožarovanie a detekciu sú podrobnejšie definované v technickom dokumente CIE 130-1998 [22][22]. Merania sa vykonávajú buď priamymi resp. smerovými metódami alebo pomocou integračnej gule. Smerové metódy sú založené na ožarovaní a detekcii vo vhodne nastavenej geometrii vzhľadom na vzorku tak, aby sa dosiahla smerová priepustnosť prípadne odrazivosť. Charakterizácia optických vlastností vrstvy PCM v použitom sklenenom prvku bolo potrebné overiť aj v závislosti od rôznych druhov zdroja žiarenia. Patria sem laboratórne zdroje žiarenia ako je volfrámový halogénový zdroj, solárne simulátory s rôznymi zdrojmi ale aj slnečné žiarenie, kde zdrojom je samotné Slnko. Každý z týchto typov zdrojov môže vykazovať rozdielne účinky vzhľadom na intenzitu, spektrálnu distribúciu a nestálosť v prípade slnečného žiarenia.

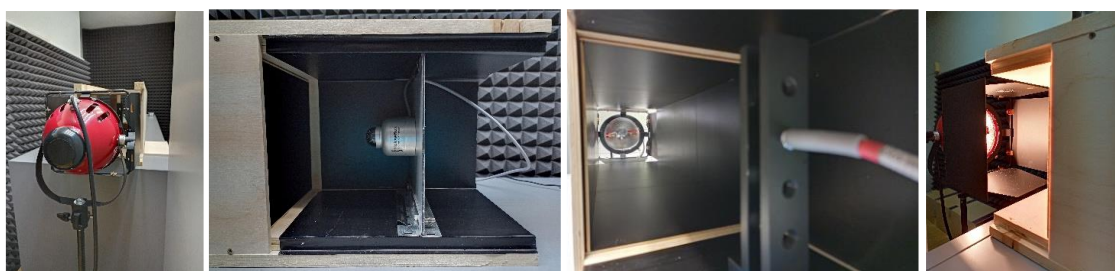
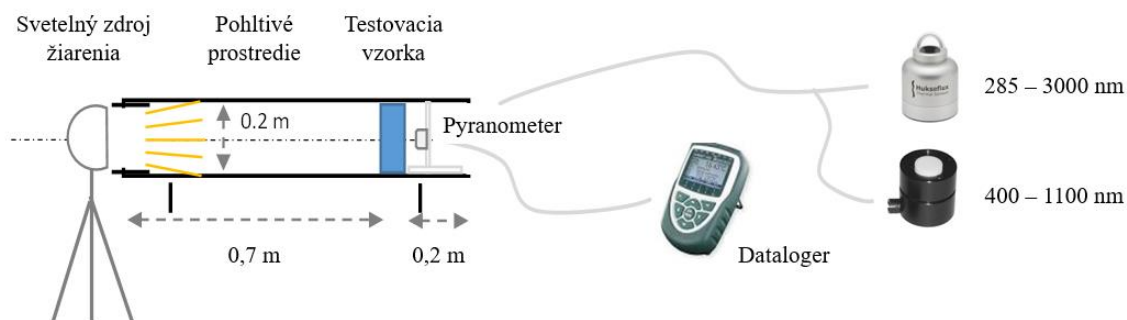
Tab. 2 Základný princíp merania optických vlastností transparentných prvkov

Zdroj žiarenia	Prirodzený zdroj žiarenia - Slnko
	Umelý zdroj žiarenia - žiarovka
Metóda	Priame/smerové
	Integračná guľa
Vzorka	Referenčný materiál - sklo
	Referenčná sklenená tvarovka plnená vzduchom/vodou
	Sklenená tvarovka plnená PCM
	Farebná sklenená tvarovka
Detektor	Pyranometer
	VIS spektrometer
	NIR spektrometer

3.3 Laboratórne merania pomocou pyranometrov

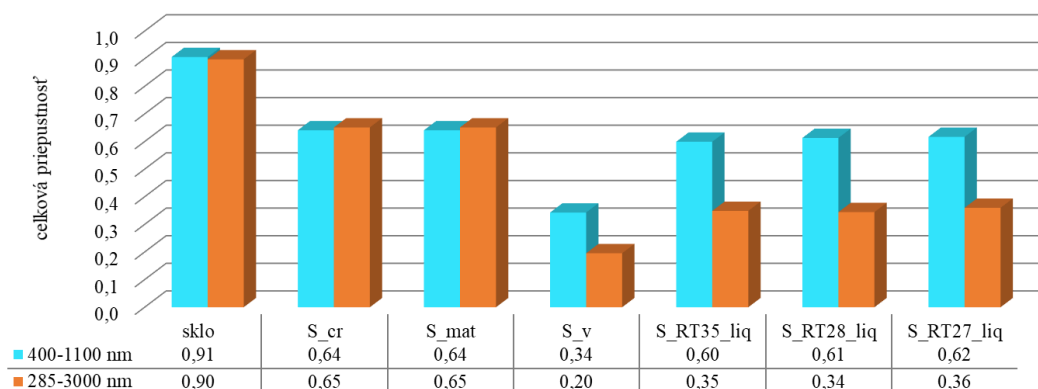
V rámci základných laboratórnych meraní sa uskutočnili merania s pyranometrami, ktoré zachytávali intenzitu zdroja žiarenia prechádzajúceho vzorkou. Boli použité pyranometre s rôznymi rozhraniami vlnových dĺžok, konkrétne 285-3000 nm a 400-1100 nm. Zdroj žiarenia BRESSER SG-800DC s halogénovou žiarovkou DXX R7 od spoločnosti Osram s príkonom

800 W bol umiestnený vo vzdialenosti 0,7 m od vzorky. Z druhej strany vzorky bol umiestnený pyranometer namontovaný na stojane na zachytávanie dopadajúceho žiarenia (obr. 3).



Obr. 3 Schéma a reálne zobrazenie meracej zostavy a metodiky merania optických vlastností pomocou pyranometrov

Halogénový zdroj žiarenia poskytol dostatočné parametre na daný účel merania. Zdroj pôsobil svojim žiarením na vzorku cez pohltivé prostredie a množstvo žiarenia prepusteného vzorkou bolo zachytávané pyranometrom umiestneným za ňou. Vzorky pozostávali v základe z troch typov parafrínov s rozdielnou teplotou topenia a to RT35, RT28 a RT27, avšak výskum bol taktiež zameraný aj na ďalšie typy PCM a tvaroviek.



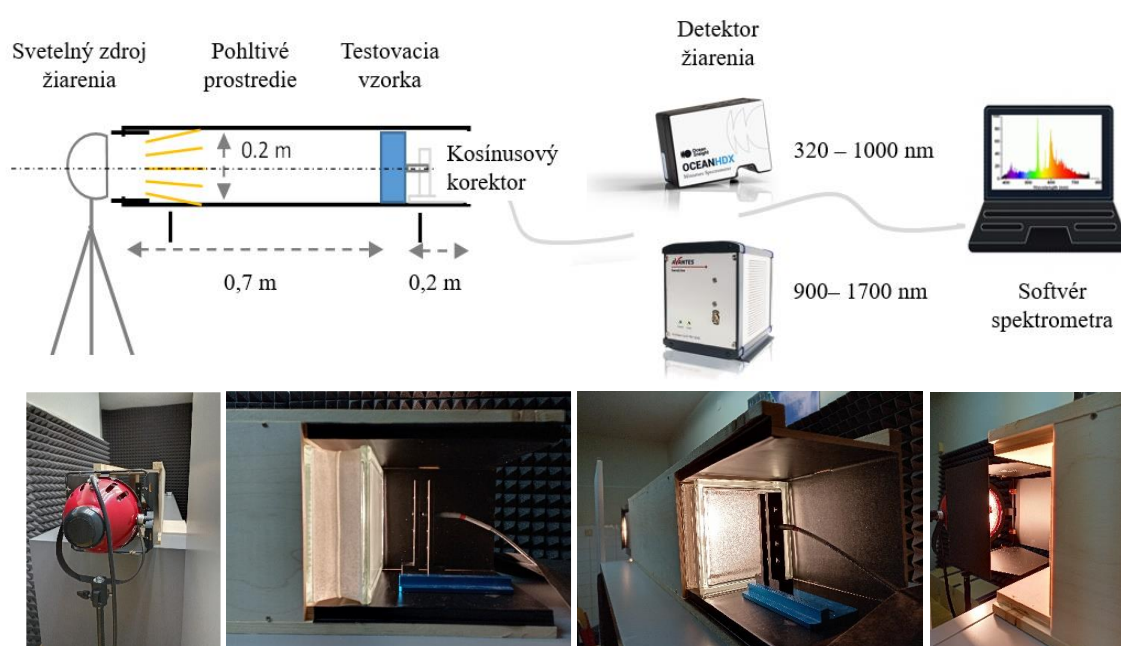
Obr. 4 Celková priepustnosť vzoriek meraná pomocou pyranometrov v spektrálnom rozsahu 285-3000 nm a 400-1100 nm.

Analýza výsledkov ukázala, že vzorky pozostávajúce z číreho skla a bežné číre sklenené tvarovky (S_cr, S_mat) vykazovali porovnateľnú celkovú priepustnosť pri hodnotení oboma

pyranometrami (obr. 4). Akonáhle bola vzorka s aplikovanou látkou v tektuom stave, pozoroval sa významný rozdiel medzi výslednými hodnotami jednotlivých pyranometrov. Parafíny aplikované do sklenených tvaroviek dosahovali celkovú priepustnosť v rozsahu 400 - 1100 nm cca 0,6, avšak v celom spektre (285 - 3000 nm) to bolo približne 0,35. Vzhľadom k tomu, že kvapaliny majú rozdielnú absorpciu a priepustnosť žiarenia pre rôzne vlnové dĺžky, integrálne hodnoty neposkytujú dostatočnú kvantifikáciu pre hodnotenie optických vlastností materiálov ako sú PCM.

3.4 Návrh zostavy merania pomocou spektrometra priamou metódou

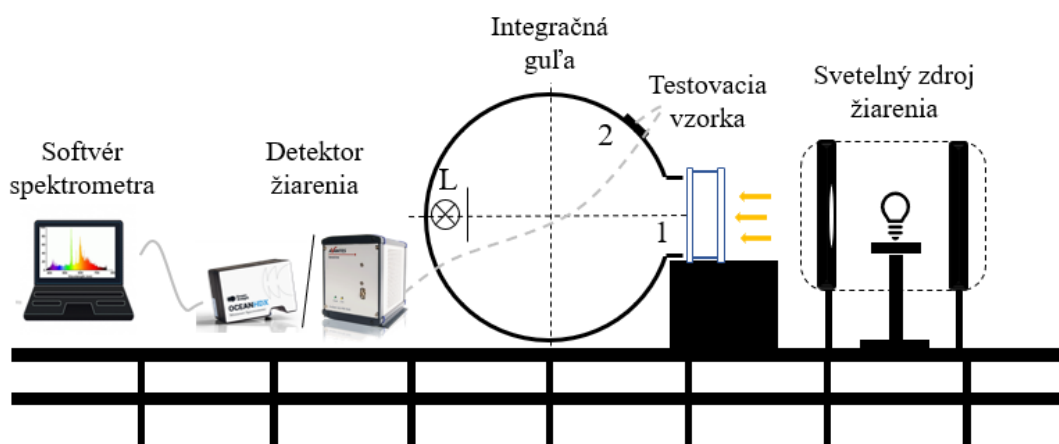
Bola navrhnutá meracia zostava s využitím VIS spektrometra FLAME-S-XR1-ES a NIR spektrometra AvaSpec-NIR256/512-1.7-HSC-EVO od výrobcu Avantes so spektrálnym rozsahom 900-1700 nm, ktorý pokrýval požadované vlnové dĺžky v NIR spektre. Pričom zdroj žiarenia sa nemení, je použitý BRESSER SG-800DC s halogénovou žiarovkou DXX R7 ako pri meraní pomocou pyranometrov. Meracia zostava obsahuje na jednej strane sústredený zdroj žiarenia a na druhej detektor s optickým vláknom ukončeným kosínusovým korektorom (obr. 5). Spoločné merania optických parametrov vyžadujú tmavé pohltivé prostredie, ktoré minimalizuje vplyv odrazivosti alebo priepustnosti na skúmané charakteristiky. Ide o analýzu priameho prenosu žiarenia cez merané vzorky.



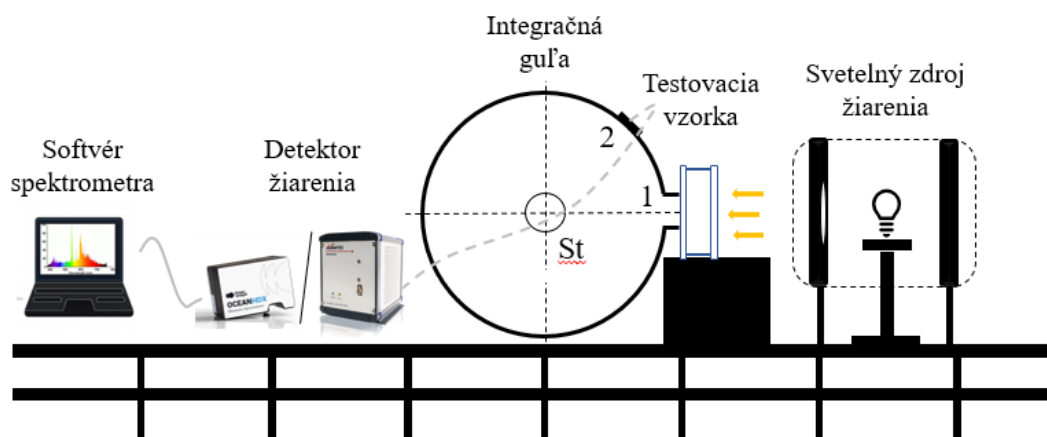
Obr. 5 Schéma a reálne zobrazenie meracej zostavy a metodiky merania optických vlastností priamou metódou pomocou spektrometrov

3.5 Metodika merania absolútnej priepustnosti pomocou integračnej gule

Integračná guľa bola použitá podľa postupov uvedených v dokumente CIE na meranie absolútnej priepustnosti žiarenia. Tento špecializovaný prvok zachytáva všetko rozptýlené žiarenie prechádzajúce cez vzorku. Hlavným použitým zdrojom žiarenia bola 1000W halogénová žiarovka. Intenzita ožiarovania bola upravená pomocou clony, aby sa zachovali optimálne podmienky merania. Postup merania s použitím integračnej gule sa menil v závislosti od veľkosti otvoru vzorky na guli. Použili sa dva prístupy: 1. s väčším otvorom (obr. 6) a 2. s menším otvorom (obr. 7) pre vzorky v súlade s postupom merania priepustnosti pre smerovo dopadajúce žiarenie.



Obr. 6 Schéma merania priepustnosti pomocou integračnej gule v konfigurácii 1 s väčším otvorom $d \leq 0,5 D$ a pomocným zdrojom žiarenia L



Obr. 7 Schéma merania priepustnosti pomocou integračnej gule v konfigurácii 2 s menším otvorom $d_1 \leq 0,1 D$ a štandardizovaným otvorom St

3.6 Návrh a zostavenie merania v reálnych podmienkach

Pri experimentálnom meraní v reálnych podmienkach boli vyhodnotené tepelné vlastnosti vstavaných transparentných konštrukcií v porovnaní s nainštalovanou modelovou konštrukciou zostavenou z čírych sklenených tvaroviek s PCM. Meranie prebiehalo na dvojitej prevetrávanej fasáde v teplom letnom a prechodnom období počas mesiacov august a september. Fasáda výškovej budovy Stavebnej fakulty STU v Bratislave je orientovaná na juhozápad (obr. 8), čo predstavuje vhodnú pozíciu pre daný účel experimentálneho overovania. Účelom bolo pozorovať dynamické správanie sústavy sklenených tvaroviek umiestnených do dvojitej fasády, kde boli monitorované hlavne teplotné profily a tepelné toky cez testované fragmenty.



Obr. 8 a) Fotografia juhozápadnej dvojitej prevetrávanej fasády, b) experimentálna zostava sklenených tvaroviek s PCM (vľavo) kombinovaná s polovičnými tvarovkami plnenými vzduchom a konvenčné okno fasády (vpravo)

Experimentálne meranie tepelných vlastností PCM integrovaného do transparentných prvkov v dvojitej vetranej fasáde sa monitorovalo pomocou snímačov tepelného toku, teplotných senzorov, termočlánkov a anemometrov. V úrovni otvárateľného okna bola zhotovená konštrukcia, ktorá pozostávala zo sklenených tvaroviek naplnených PCM typu RT27 vystavených skutočným klimatickým podmienkam. Použitý parafín RT27 a jeho teplota topenia približne dosahuje úroveň maximálnej prípustnej teploty pre vnútorné prostredie. Porovnávacím prvkom bolo vedľajšie okno s konvenčným izolačným dvojsklom ($U_g=1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$) tej istej fasády. Obe sústavy boli napojené na meráciu ústredňu.

4. Experimentálne merania spektrálnych optických vlastností

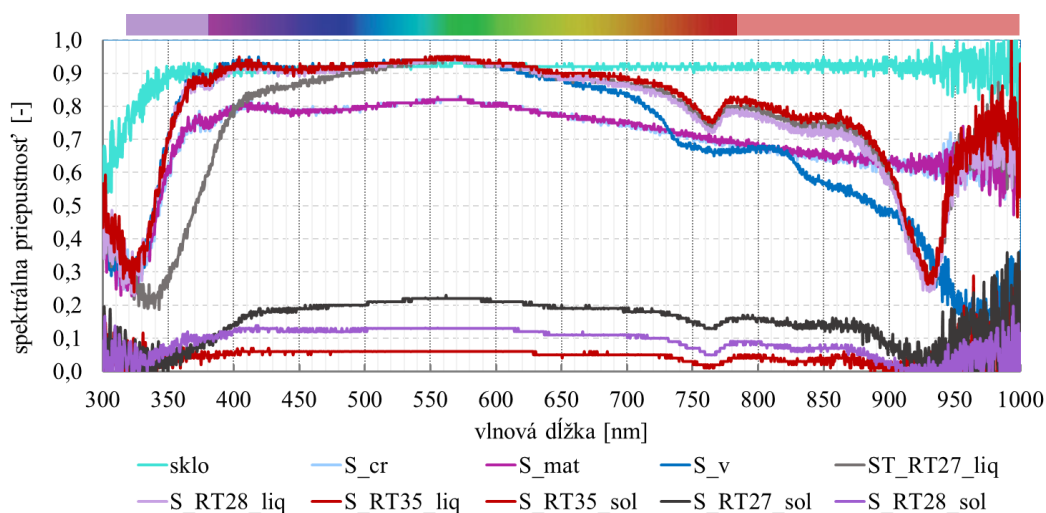
Primárna časť meraní bola venovaná analýze VIS priepustnosti PCM na báze parafínu, ktorá sa vzhľadom na komplexnosť problematiky rozšírila aj o analýzu priepustnosti v NIR spektre. Na porovnanie sa ako referenčná vzorka komerčne dostupného transparentného prvku použilo jednoduché sklo s hrúbkou 3 mm a bezfarebné sklenené tvarovky naplnené vzduchom (číra, matná).

4.1 Výsledky merania pomocou spektrometra priamou metódou

Ako je možné vidieť z obrázka 9, priepustnosť číreho skla dosahuje približne 90 % v rozsahu viditeľného spektra od 300 do 800 nm. Výsledné priepustnosti čírych a matných tvaroviek plnených vzduchom (S_{cr} a S_{mat}) mali takmer identický priebeh, kde priepustnosť v rozmedzí od 400 do 600 nm bola približne 80 % a následne prevládal klesajúci trend až po 60 %. Bola tiež testovaná vzorka vody aplikovanej do sklenenej tvarovky S_v s podobnými vlastnosťami ako parafín v tekutom stave. Krivka priepustnosti S_v bola do úrovne vlnovej dĺžky 730 nm vyššie ako konvenčné vzorky S_{cr} a S_{mat} . V rozsahu VIS spektra možno pozorovať podobné hodnoty ako pri vzorkách s PCM ($S_{RT27_{liq}}$, $S_{RT28_{liq}}$ a $S_{RT35_{liq}}$), avšak od zhruba 650 nm nastáva výraznejší pokles. Rozdiely v priepustnosti sú pravdepodobne spôsobené väčším podielom vnútorných odrazov v prázdnej dutine vzorky a naopak menším uhlom lomu svetla v prípade aplikovanej tekutiny (voda, PCM) v dutine vzorky.

V ďalšej fáze sa analýza zameriavala na pevné skupenstvo skúmaných druhov parafínov. Účelom bolo doplniť prvotný experiment s využitím voľfrámového halogénového zdroja žiarenia, kedy sa nezískali relevantné údaje o priepustnosti sklenenej tvarovky v pevnom stave ako aj v stavoch tuhnutia/topenia pre získanie dynamických a časovo závislých vlastností systému. V prípade PCM v pevnom stave sú priebehy priepustnosti výrazne nižšie. To je spôsobené odlišnými optickými vlastnosťami, kde sa PCM po poklese teploty pod bod topenia mení na pevný takmer nepriesvitný materiál (obr. 9). Ako možno vidieť na obrázku 16, v tomto prípade sú výraznejšie rozdiely priebehu kriviek, kde hodnoty pre $S_{RT35_{sol}}$ nedosahujú ani 10%, zatiaľ čo priepustnosť $S_{RT27_{sol}}$ pri viditeľnej oblasti spektra dosahuje 20%. Čo sa týka vzorky $S_{RT28_{sol}}$ je priebeh priepustnosti približne medzi $S_{27_{sol}}$ a $S_{RT35_{sol}}$. Na pohľad bol značný vizuálny rozdiel v priehľadnosti daných parafínov, kde parafín $S_{RT35_{sol}}$

v pevnom stave pôsobil ako nepriehľadný bielo sfarbený materiál s menšou priepustnosťou na rozdiel od S_RT27_sol, ktorý mal výrazne sklovitý vzhľad. Tento je spôsobený rozdielnym chemickým zložením a fyzikálnymi vlastnosťami, ktoré ovplyvňujú optické parametre tohto transparentného systému. Voľba PCM do transparentných prvkov závisí teda aj od požadovaného prieniku svetelného žiarenia počas pevného stavu látky.

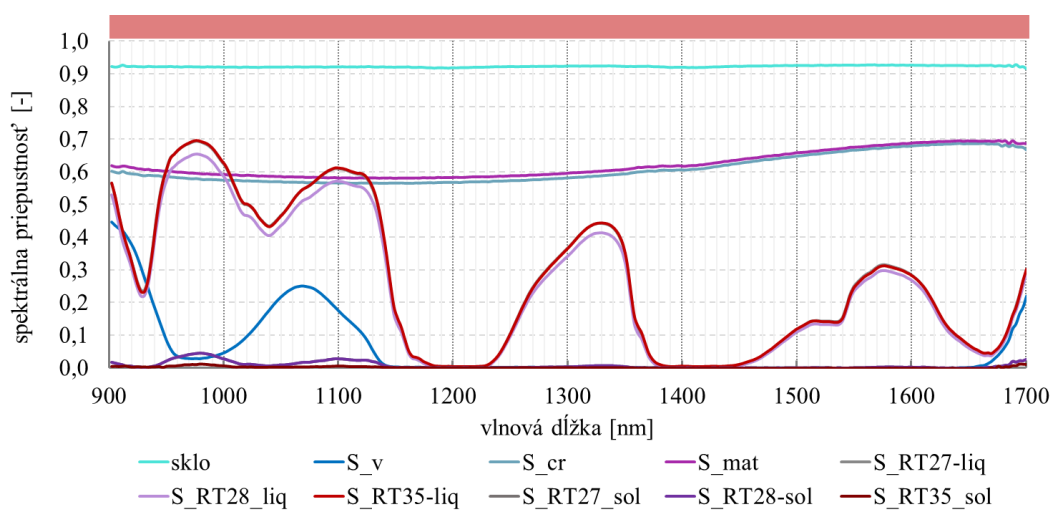


Obr. 9 Porovnanie spektrálnej priepustnosti žiarenia priamej metódy v oblasti viditeľného spektra vzoriek s parafrínmi typu RT27, RT28 a RT35 v pevnom a tekutom stave

Výsledky z meraní NIR spektrometrom prakticky plynule nadväzujú na priebehy priepustnosti vo VIS spektre. Priepustnosť jednoduchého skla má lineárny priebeh a po celej dĺžke spektra sa pohybuje na úrovni 90%. Vzorky referenčných tvaroviek S_cr a S_mat sú aj v tomto prípade totožné a priamo nadväzujú na krivky z VIS spektra. Hodnoty ich priepustností mali pri 1000 nm okolo 60%, pričom postupným nárastom dosiahli pri 1700 nm zhruba 70% (obr. 10). Značné odlišnosti vo výsledných priebehoch priepustnosti NIR spektra sa prejavujú pri vzorkách s vodou S_v a parafrínmi v tekutom stave. V prípade S_v je zaznamenaný výrazný pokles takmer na nulové hodnoty v rozmedzí 900 - 1000 nm s jedným charakteristickým nárastom na zhruba 25%, po ktorom nastáva v celom ďalšom priebehu útlm priepustnosti až na nulu. Voda v tekutom stave má takmer nepriepustný charakter pre žiarenie v celom rozsahu spektra, pričom v tomto prípade má na tieto vlastnosti zjavný vplyv sklenená tvarovka v ktorej je voda aplikovaná. V prípade parafrínov dosahujú krivky nepravidelný charakter, kde v oblasti spektra 1200, 1400 a 1660 nm materiál žiarenie neprepúšťa. Rozdiely medzi jednotlivými vzorkami s parafrínmi (S_RT27_liq, S_RT28_liq, S_RT35_liq) sú zanedbateľné. Oblasť NIR je obzvlášť zaujímavá kvôli schopnosti eliminovať prenikanie blízkej infračervenej zložky

solárneho spektra. Z výsledkov vyplýva, že prvky s PCM majú schopnosť výrazne tlmiť priepustnosť a tepelnú energiu zo slnečného žiarenia.

Na základe toho celkom očakávane hodnoty priepustnosti sklenených tvaroviek s parafínmi v pevnom stave vykazujú takmer nulové hodnoty v celom rozsahu. Vzorka S_RT27_sol dosahuje minimálne priepustnosti (do 5%) v rozmedzí od 900 - 1100 nm (obr.10). Možno konštatovať, že žiarenie v podobe tepla neprechádza cez parafínovú vrstvu v pevnom stave. Keďže dominantou vlastnosťou PCM je vo všeobecnosti schopnosť akumulovať teplo v pevnom stave, výsledkom je, že vzorkou môže prechádzať len veľmi málo žiarenia v NIR spektre, čo vedie k takmer nulovej priepustnosti. Taktiež hrúbka vzorky ako aj ďalšie optické a termo-fyzikálne aspekty ovplyvňujú priepustnosť NIR žiarenia. Čo sa týka jednotlivých PCM, rozdiel bol v kvapalnom stave zanedbateľný. Všetky parafíny sa v kvapalnom stave javia ako vysoko transparentné systémy so schopnosťou akumulácie tepelnej energie. Avšak, približne na hranici medzi VIS a NIR spektrom (780 nm) nastáva výraznejší pokles priepustnosti, v okolí 900 nm až na zhruba 25%.

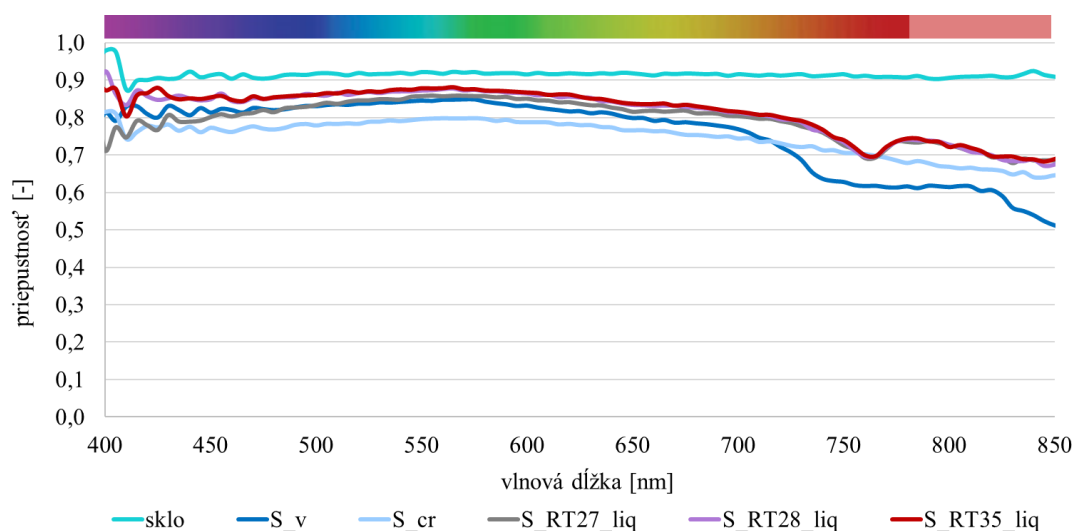


Obr. 10 Porovnanie spektrálnej priepustnosti žiarenia priamej metódy v oblasti blízkeho infračerveného spektra vzoriek s parafínmi typu RT27, RT28 a RT35 v pevnom a tekutom stave

4.2 Výsledky merania pomocou integračnej gule

Overovanie experimentálneho merania sa uskutočnilo pomocou dvoch spomínaných metód merania priepustnosti s použitím integračnej gule (v konfigurácii 1 s otvorom $d \leq 0,5 D$ a v konfigurácii 2 s otvorom $d_1 \leq 0,1 D$). V 1. konfigurácii sa vyhodnotili priepustnosti vzoriek s aplikovanými parafínmi na hodnotách blížiacich sa 100%. Samotná integračná guľa s jej špecifickým nastavením môže pri takýchto typoch materiálov spôsobiť určité odchýlky v

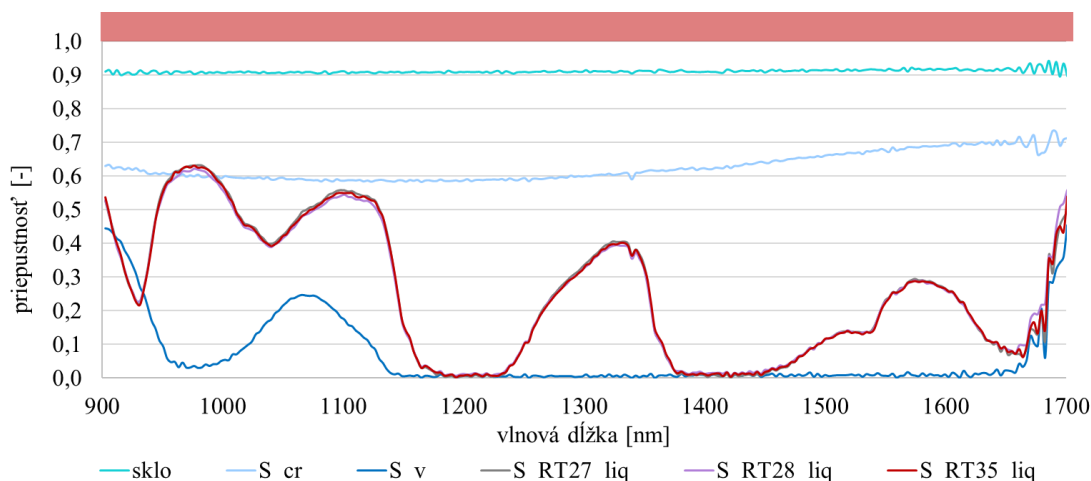
nameraných hodnotách priepustnosti, preto sa v ďalšej fáze meranie musela konfigurácia upraviť a integračná guľa použiť v konfigurácii 2. Výsledné namerané hodnoty sú znázornené na obrázku 11, kde je možné pozorovať priebehy podobné priepustnosti získané priamymi resp. smerovými metódami merania.



Obr. 11 Porovnanie spektrálnej priepustnosti s integračnou guľou v konfigurácii 2 pre oblasť viditeľného spektra vzoriek s parafínmi typu RT27, RT28 a RT35 v tekutom stave

Vzorky S_RT27_liq, S_RT28_liq, S_RT35_liq ako aj S_v majú o niečo nižšiu priepustnosť, avšak sklo a S_cr sa javia ako totožné s meraním priamou metódou. Využitie integračnej gule v konfigurácii 2 s malým otvorom umožnilo spoľahlivé merania a riešenie obmedzení a nepresností spojených s konfiguráciou 1. Je dôležité vziať do úvahy, že stále môžu existovať určité mierne odchýlky alebo nezrovnalosti v dôsledku faktorov, ako sú umiestnenie vzorky, experimentálne podmienky alebo neistoty merania pri oboch metódach merania.

Výsledné hodnoty meraní v NIR spektre sú porovnané v nasledujúcich grafoch. Pri meraní pomocou priamej metódy aj pomocou integračnej gule možno pozorovať rovnaké hodnoty priepustnosti pre všetky vzorky v tomto spektrálnom rozsahu. Pri priamej metóde boli priebehy priepustnosti v ustálenom charaktere pre všetky merané vzorky. V prípade merania s použitím integračnej gule (obr. 12) dosahujú identický charakter. Mierne nerovnosti v zachytených priebehoch priepustnosti môžu byť spôsobené špecifickou konfiguráciou a nastavením integračnej gule pre meranie v NIR oblasti. Postup merania môže spôsobiť určité odchýlky a skreslenia v nameraných hodnotách priepustnosti. Aj napriek týmto odchýlkam v krivkách priepustnosti zostali hodnoty priepustnosti pre jednotlivé vzorky zachované a rovnaké pri všetkých metódach merania. To naznačuje, že integračná guľa a priama metóda vykazujú oboje porovnateľné resp. zjavne identické výsledky.

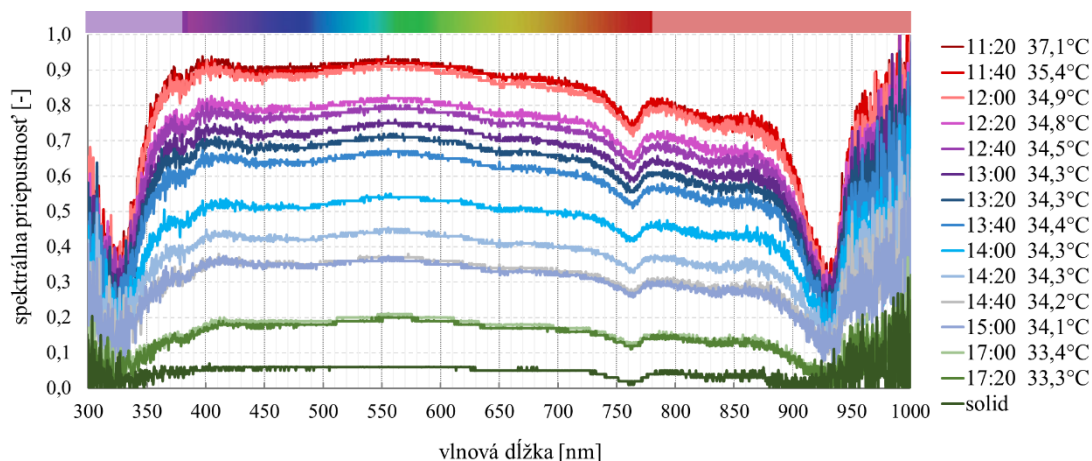


Obr. 12 Porovnanie spektrálnej priepustnosti žiarenia pomocou menšieho otvoru integračnej guli v oblasti blízkeho infračerveného spektra vzoriek s parafínmi typu RT27, RT28 a RT35 v tekutom stave

4.3 Dynamická spektrálna tepelno-optická odozva

Aby sa objasnila meniaci sa priepustnosť z časového hľadiska pri zmene PCM z kvapalného skupenstva na pevné, uskutočnila sa dynamická tepelno-optická analýza, pričom sa zvolil materiál na báze parafínu RT35. Experiment sa uskutočnil v rovnakej zostave ako meranie priamej metódy vo VIS spektre, kde bola sklenená tvarovka s PCM ožiarená halogénovým zdrojom žiarenia. Meranie sa odohrávalo v laboratórnom prostredí pri teplote cca. 24°C, kde sa v časových intervaloch 20 min. zachytávala priepustnosť žiarenia počas fázovej premeny. Do parafínovej vrstvy RT35 bol aplikovaný tepelný senzor, ktorý počas celého merania zaznamenával jej meniacu sa teplotu. Ako možno pozorovať na obrázku 13 počiatočná teplota materiálu v začiatku merania (11:20) dosahovala 37,1°C, ktorá po pomerne krátkom časovom intervale klesla o necelé 2°C. Vzorka počas prvých troch meraní vykazovala len malé rozdiely v priepustnosti, ktorá dosahovala približne 90%. Výraznejší pokles nastal po hodine v čase 12:20, kedy teplota materiálu dosahovala 34,8°C a priepustnosť žiarenia klesla o cca 10%. Od tohto bodu bol pokles čoraz intenzívnejší po každom ďalšom časovom intervale a bola viditeľná výrazná zmena priehľadnosti v parafínovej vrstve vzorky (obr. 13). V štádiu, kedy RT35 dosiahol na pohľad úplnú kryštalizáciu sa priepustnosť výraznejšie nemenila a to od merania v čase 14:20 – 15:00. Z toho dôvodu sa ďalšie meranie uskutočnilo po dlhšom časovom úseku o 17:00, kedy priepustnosť dosahovala v najvyššom bode cca 20%. Ďalšie zaznamenanie prebehlo až po úplnom dosiahnutí pevného skupenstva,

kde je z predošlých meraní priepustností vzoriek s parafrinmi v tekutom stave známe, že priepustnosť dosiahla minimálne hodnoty (cca 5%).

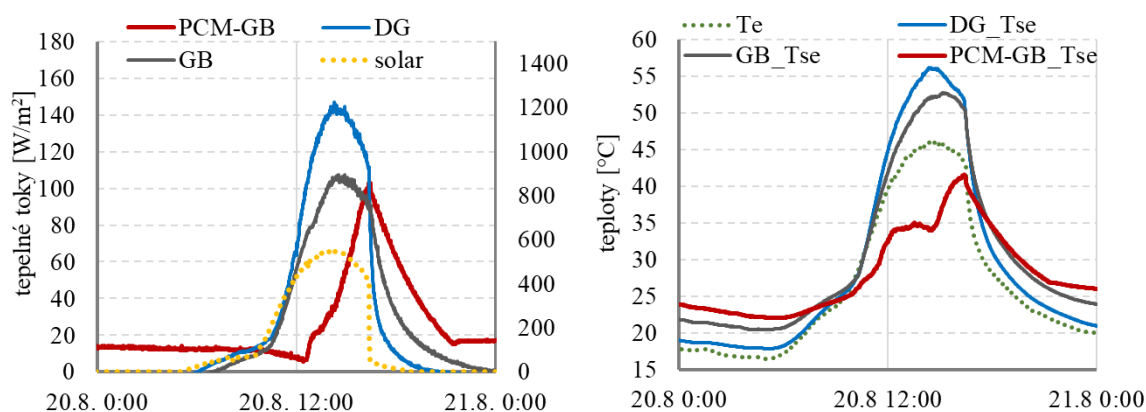


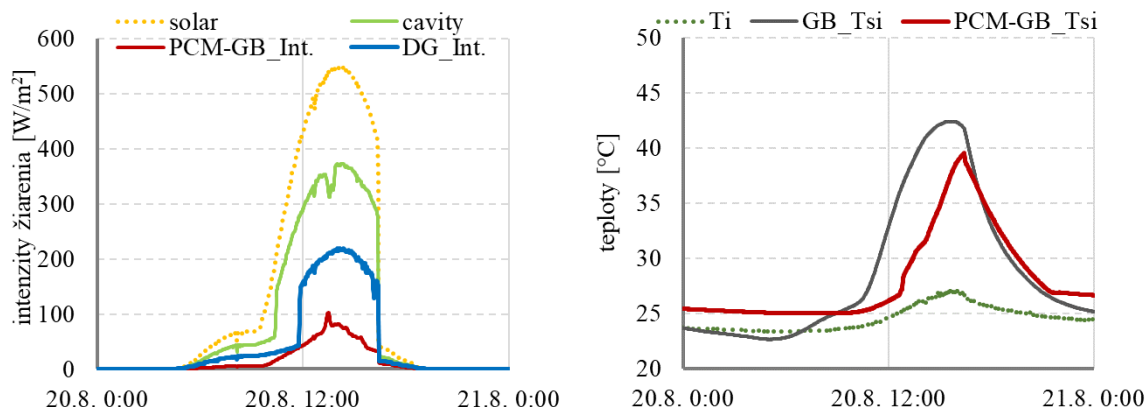
Obr. 13 Dynamický spektrálny priebeh tepelno-optických zmien sklenenej tvarovky s parafrinom RT35 v priebehu času

5. Experimentálne merania tepelnej odozvy v reálnych podmienkach

Výsledky uvedené v tejto časti demonštrujú reálny účinok integrácie PCM materiálu v sklenených tvarovkách a fasádom fragmente. Na obrázku 14 je znázornený jeden vybraný deň, kedy možno povedať, že PCM dosahoval pre skúmaný koncept optimálny účinok. Možno pozorovať hodnoty vonkajšej povrchovej teploty konvenčného zasklenia (DG), ktorá dosiahla v časovom intervale približne od 14:00 – 16:00 h. viac ako 55 °C. To sa premieta aj na zvýšenej tepelnej záťaži vstupujúcej do vnútorného prostredia na tepelných tokoch (obr. 14 vľavo hore) v dvojplášťovej vetranej fasáde. Z pohľadu účinku na vnútorné povrchové teploty (obr. 14 vpravo dole), zaznamenaný je taktiež veľmi významný rozdiel v hodnotách povrchových teplôt PCM-GB a GB, kde na experimentálnej strane možno pozorovať účinok akumulácie latentného tepla parafrinovej vrstvy, nižší maximálny teplotný priebeh a taktiež teplotný posun v rozmedzí 2 až 2,5 h. Popoludní klesli povrchové teploty DG a GB pod úroveň PCM-GB, čo bolo spôsobené nahromadenou tepelnou energiou. Graf ukazuje aj teplotný priebeh interiérovej teploty v blízkosti fasády, ktorý počas dňa vystúpi k hodnotám okolo 27°C. Dôležitým aspektom, ktorý vyplynul z meraní, je menšie kolísanie povrchových teplôt na strane s integrovaným materiálom s fázovou zmenou.

V experimentálnej kampani na skúmanie tepelnej odozvy PCM materiálov v reálnych podmienkach bola sledovaná aj intenzita slnečného žiarenia vstupujúceho do dvojplášťovej fasády ako aj zložky prechádzajúce cez jednotlivé komponenty (obr. 14 vľavo dole). Meraním dopadajúceho slnečného žiarenia sa vyhodnotil vplyv PCM na priepustnosť slnečnej energie v rámci systému. Je treba zdôrazniť, že použité boli pyranometer pre intenzitu žiarenia vstupujúcu do medzipriestoru fasády (označené v grafoch ako solar a spektrálny rozsah 285 až 3000 nm) a radiačné senzory pre prechádzajúce zložky žiarenia (PCM-GB_Int a DG_Int), avšak pre spektrálny rozsah od 400 do 1100 nm. Takýto senzor je použitý aj doplnkovo vo fasádnej vzduchovej vrstve. Vzhľadom na intenzitu žiarenia na interiérovej strane skúmaného systému sa zistilo, že sklenené tvarovky s PCM vykazujú výrazne nižšie hodnoty v porovnaní s intenzitami žiarenia vo vzduchovej dutine dvojplášťovej fasády, konkrétne na exteriérovej strane vzoriek s PCM. Tento jav má pozitívny vplyv na eliminovanie tepelného zisku a prehrievania vnútorného prostredia. Vďaka prítomnosti PCM materiálu sa intenzita prechádzajúceho žiarenia značne znižuje, čo môže pomôcť udržiavať pohodlnú a vyváženú teplotu v interiéri. Nízke hodnoty intenzity žiarenia na interiérovej strane skúmaného systému sú dosahované vďaka schopnosti PCM materiálu absorbovať a uchovávať tepelnú energiu vo svojej pevnej fáze. Tým sa minimalizuje prenos tepla a intenzity žiarenia, ktoré preniká do interiéru. Nižšia intenzita žiarenia môže zabezpečiť, že vnútorné prostredie nie je nadmieru oslnené a priame prehrievanie sa môže značne eliminovať, čo môže prispievať taktiež k energetickej účinnosti a komfortu vnútorného prostredia.





Obr. 14 Grafické znázornenie priebehov tepelných tokov (vľavo hore), vonkajších povrchových teplôt (vpravo hore), intenzity prechádzajúceho žiarenia cez skúmaný transparentný systém (vľavo dole) a vnútorných povrchových teplôt (vpravo dole) v reálnych podmienkach vo vybranom dni

Jedným z hlavných pozorovaní je teda schopnosť PCM znižovať povrchové teploty počas väčšiny dní. Tento efekt bol obzvlášť výrazný v obdobiach vysokého slnečného žiarenia a zvýšených teplôt v okrajových podmienkach na oboch stranách. Akumulovaním tepelnej energie PCM účinne zmiernuje zvýšenie povrchovej teploty, čo vedie k zníženiu tepelnej záťaže na vnútorné prostredie. Okrem toho PCM preukázal svoju schopnosť oddialiť a znížiť tepelné špičky počas najteplejšej časti dňa. Tým, že PCM prešiel procesom zmeny fázy, aktívne absorboval tepelnú energiu a uľahčil jej postupné uvoľňovanie, čím zmiernil kolísanie teploty v systéme. Tento aspekt môže mať kľúčovú úlohu pri udržiavaní stabilnejšej a pohodlnejšej vnútornej klímy pri využití transparentného systému s PCM.

6. Analýza výsledkov, nameraných údajov a diskusia

Celkovo je v literatúre dostupná značná rôznorodosť informácií o spektrálnych vlastnostiach transparentných systémov s PCM. V literatúre sú opísané rôzne metódy merania týchto charakteristík a výsledky sa zväčša líšia v závislosti od rôznych faktorov[8][9] [11][12]. V tejto práci sú analyzované optické a tepelné vlastnosti predovšetkým parafínov integrovaných do transparentnej fasádnej tvarovky v laboratórnych a reálnych podmienkach. Využíva sa niekoľko metód merania priepustnosti skúmaných materiálov integrovaných do sklenených tvaroviek tak, aby sa zistil súlad medzi týmito meraniami. Bolo to vyvolané najmä faktom z počiatočných fáz výskumu, kedy tvarovky s PCM vykazovali vysoké priepustnosti a výskum vyžadoval overenie týchto výsledkov relevantnými metódami. Týmto spôsobom sa poskytla konfrontácia výsledkov meraní získaných štandardizovaným spôsobom a priamou (smerovou)

metódou merania navrhnutou v tejto práci pre účely spoľahlivej charakterizácie optických vlastností skúmaných tvaroviek.

6.1. Laboratórne merania

V laboratórnych podmienkach sa analyzovali optické vlastnosti rôznych druhov PCM (organických na báze parafínov ako aj doplnkovo na biologickej báze ako kokosový olej, med, tuk, odpadný a nový kuchynský olej). Vo všeobecnosti parametre ovplyvňujúce tieto charakteristiky a príslušné princípy merania sú vykonávané z hľadiska spektrálnych alebo vážených integrálnych charakteristík. Priepustnosť PCM integrovaných do sklenených tvaroviek bola meraná radiometricky pomocou pyranometrov a spektrálne s využitím spektrometrov.

Použité laboratórne metódy boli zvolené v postupnosti od jednoduchých po zložitejšie, pričom na seba postupne nadväzovali. Na vykonávanie predbežných meraní používali pyranometre, ktoré poskytovali rýchle a jednoduché meranie priepustnosti zaznamenávaním intenzity žiarenia prechádzajúceho cez vzorky. Tieto merania poskytli prvotné zistenia a na podrobnejšie skúmanie sa uskutočňoval výskum spektrálnych vlastností v celom rozsahu analyzovaných vlnových dĺžok. Z toho dôvodu bola zvolená priama metóda pomocou spektrometrov a metóda s integračnou guľou vo VIS a NIR spektre.

Vzorky sklenených tvaroviek s PCM boli porovnané s meraniami získanými z referenčného skla, referenčnej sklenenej tvarovky so vzduchom a sklenenej tvarovky naplnenej vodou ako základným porovnávacím materiálom na báze tekutín (Tab. 1). Výsledky meraní ukázali, že priepustnosť PCM v kvapalnom stave bola vyššia v porovnaní s referenčnou sklenenou tvarovkou a tvarovkou naplnenou vodou. Je zrejmé, že vyššia priepustnosť pozorovaná v tvarovkách s tekutým PCM môže byť spôsobená kombináciou viacerých faktorov, ako je nižší pomer odrazu a nižší lom svetla v porovnaní s referenčnou sklenenou tvarovkou. Keď žiarenie prechádza cez materiál s vyšším indexom lomu, ako je sklo, časť svetla sa odráža na povrchu v dôsledku rozdielu v indexoch lomu medzi materiálom a okolitým prostredím. To môže viesť k zníženiu priepustnosti. Na druhej strane, keď žiarenie prechádza materiálom s nižším indexom lomu, ako je tekutý PCM, dochádza k menšiemu odrazu na povrchu a materiálom môže prechádzať vyššie percento svetla. Okrem toho rozptyl a absorpcia svetla materiálom PCM v sklenenej tvarovke môže tiež ovplyvniť priepustnosť. Ak sa rozptyl a absorpcia minimalizujú, môže to viesť k vyššej priepustnosti. Je dôležité poznamenať, že

presné faktory, ktoré ovplyvňujú priepustnosť, závisia od konkrétnych materiálov a použitých meracích techník. Preto je dôležité pri porovnávaní výsledkov z rôznych štúdií starostlivo zvážiť všetky tieto faktory. Avšak podstatným poznatkom pri meraní priamou metódou je, že PCM materiály na báze parafínov dosahujú v tekutom stave vo VIS spektre vysoké priepustnosti až 90% a zvyšujú teda prenos žiarenia konvenčnej sklenenej tvarovky vyplnenej vzduchom, ktorá je pod 80%. Tabuľka prezentuje aj ostatné merané materiály, ktoré sú súčasťou tejto práce.

Tab. 1 Vážené hodnoty priepustnosti podľa ASTM G173-03 jednotlivých vzoriek s PCM

Vzorka	$\tau_{\lambda \text{ SRS VIS}}$	$\tau_{\lambda \text{ SRS NIR}}$	$\tau_{\lambda \text{ SRS VIS+NIR}}$
	0,38 – 0,78 μm	0,78 – 1,7 μm	0,38 – 1,7 μm
sklo	0,92	0,92	0,92
S_cr	0,78	0,61	0,71
S_mat	0,78	0,62	0,72
S_v	0,88	0,25	0,62
S_RT28liq.	0,89	0,45	0,71
S_RT27liq.	0,88	0,47	0,71
S_RT35liq.	0,91	0,48	0,73
S_med	0,39	0,27	0,34
S_coco	0,82	0,46	0,67
S_oljn	0,39	0,41	0,40
S_oljs	0,43	0,44	0,44
S_tuk	0,63	0,45	0,56
S_RT28sol.	0,12	0,03	0,08
S_SP29sol.	0,06	0,01	0,04
S_SP29liq.	0,31	0,15	0,24

Metóda s integračnou guľou slúžila na overenie výsledkov priamej metódy, kde odchýlky síce presiahli pri PCM viac ako 5%, ale výsledné hodnoty možno považovať za platné (Tab. 2). Rozdiel vo výsledkoch možno pripisovať aj faktu, že pri priamej metóde je ožiarená celá vzorka 20 x 20 cm, zatiaľ čo pri použití integračnej gule, prechádza svetelný tok cez stred tvarovky v priemere okolo 5 cm. Z tohto dôvodu sú výsledky mierne nadhodnotené a okraj tvaroviek zvyšuje celkové namerané výsledky vo viditeľnej oblasti. Tieto zistenia potvrdzujú spoľahlivosť meraní vykonaných pomocou oboch techník. Navyše výsledky referenčných materiálov dosahujú takmer úplnú zhodu pri jednoduchom skle a tvarovke so vzduchom. Pokiaľ ide o NIR spektrum, priama metóda aj metóda s integračnou guľou poskytli identické výsledky priepustnosti. Veľmi dôležitým zistením je na základe výsledkov, že vzorky

obsahujúce tekutý PCM vykazujú značnú nepriepustnosť žiarenia v niektorých vlnových pásmach v rámci NIR spektra. Toto správanie naznačuje, že interakcia medzi PCM a dopadajúcim žiarením v rozsahu NIR sa výrazne líši od interakcie pre spektrálny rozsah VIS.

Tab. 2 Vážené hodnoty priepustnosti vybraných vzoriek porovnané použitými metódami

Vzorka	Integračná guľa Konfigurácia 1	Integračná guľa Konfigurácia 2	Priama metóda
sklo	0,90	0,92	0,92
S_cr	0,76	0,77	0,78
S_v	0,81	0,79	0,88
S_RT28liq.	n/a	0,84	0,89
S_RT27liq.	0,93	0,81	0,88
S_RT35liq.	0,94	0,84	0,91

Použitím kombinácie laboratórnych metód bolo v práci možné vyhodnotiť spektrálne vlastnosti sklenených tvaroviek obsahujúcich rôzne druhy PCM ako aj vzorky s rôznou farebnosťou. Nadväzný prístup, počnúc jednoduchšími technikami a postupujúcim smerom k pokročilejším metódam, zabezpečil dôkladnú analýzu optického správania vzoriek a poskytol poznatky o ich potenciálnych aplikáciách v energeticky účinných fasádach budov.

6.2. Modelové experimentálne merania v podmienkach in-situ

V reálnych podmienkach boli sklenené tvarovky na báze parafínu inštalované do dvojplášťovej fasády a monitorovaná ich tepelná odozva počas dvoch letných mesiacov pre analýzu účinku skúmaných materiálov vo fragmente fasády. Cieľom bolo porovnať tepelné vlastnosti dvoch typov konštrukcií pri rovnakých podmienkach prostredia. Namerané údaje z vybraného reprezentatívneho dňa ukázali, že fragment pozostávajúci zo štrnástich sklenených tvaroviek naplnených PCM na báze parafínu RT27 bol schopný udržať stabilnejšiu povrchovú teplotu v porovnaní so štandardným izolačným dvojsklom v systéme dvojitej fasády. Výsledky taktiež demonštrujú, že PCM v transparentných systémoch ovplyvňuje posun a zníženie tepelných tokov v perióde denného cyklu. Okrem toho zo zaznamenaných údajov intenzít žiarenia fragment na báze parafínu vykazoval nižší celkový prienik solárnych tepelných ziskov, čo naznačuje, že je schopný pasívne blokovať vstup väčšieho množstva slnečného žiarenia do budovy.

Dôležitým zistením experimentálneho merania v reálnych podmienkach bolo, že aplikácia PCM do transparentných prvkov výrazne ovplyvňuje posun a zníženie teplotnej špičky počas dňa. Zakomponovaním PCM do transparentných fasádnych komponentov fasády je možné znížiť tepelnú záťaž, čo môže viesť k úsporám energie a ovplyvniť stav tepelnej pohody. Tepelné a optické vlastnosti PCM z neho robia sľubný materiál pre použitie v transparentných fasádach budov. Materiál má schopnosť znižovať nadmerné slnečné zisky, akumulovať tepelnú energiu počas teplotných špičiek počas dňa a v noci ju späť uvoľňovať do fasády a exteriéru, čo môže znížiť potrebu chladenia v lete. Napriek výraznému pokroku dosiahnutému vo výskume tohto pasívneho solárneho systému je stále potrebné ďalšie skúmanie vzhľadom na jeho zložitosť a dynamiku. Fázová premena materiálu úzko súvisí s okolitými podmienkami, ako sú teplota a klimatické podmienky, vďaka ktorým je systém zložitejší na správne navrhovanie a reálne použitie. Preto je kľúčové preskúmať tepelno-optické vlastnosti transparentného systému s PCM z dlhodobého hľadiska pre efektívne praktické využitie. Budúci výskum by sa mal zamerať na optimalizáciu výberu PCM, návrh transparentných fasádnych komponentov a integráciu systému do budov. Okrem toho by sa mal podrobne preštudovať vplyv rôznych podmienok prostredia na účinnosť systému, aby sa zabezpečila jeho praktická použiteľnosť. Integrácia parafínov do transparentných fasádnych prvkov má potenciál výrazne zlepšiť energetickú účinnosť a tepelnú hospodárnosť budov. Je však treba zdôrazniť, že takýto systém a prvok nemôže v predmetných aplikáciách slúžiť ako hlavný osvetľovací prvok, ale ako jeho doplnok prípadne náhrada za netransparentnú časť fasády.

7. Závery

Skúmanie optických vlastností, konkrétne priepustnosti, v transparentom systéme s materiálom s fázovou zmenou poskytuje nové poznatky tak pre praktické aplikácie ako aj súčasný vedecký pokrok. Pochopenie a analýza týchto vlastností prispieva k ďalšiemu uvažovaniu o vývoji energeticky efektívnych stavebných systémov. V tejto práci sa hlavná pozornosť zameriavala na štúdium optických vlastností a prehĺbenia vedeckých poznatkov, vhodnej identifikácie parametrov pre PCM aplikácie a oblasť navrhovania systémov s materiálmi na báze PCM. Z práce vyplývajú tieto hlavné pozorovania:

- *Využitie slnečného žiarenia ako obnoviteľného zdroja energie v transparentných stavebných prvkoch môže ovplyvniť celkovú energetickú bilanciu budovy a spotrebu energie na vykurovanie a chladenie.*
- *Hlavnou výzvou je spoľahlivo charakterizovať spektrálne optické zmeny PCM v transparentom systéme a nájsť vhodný typ materiálu pre oblasť použitia.*
- *Kvapalný PCM a voda výrazne menia optické vlastnosti skúmaných sklenených tvaroviek, ktoré umožňujú absorbovať značné množstvo blízkeho infračerveného (NIR) žiarenia a zároveň prepúšťa veľkú časť viditeľného svetla (VIS).*
- *Zlepšenie tepelnej regulácie a vlastností transparentného prvku s PCM v porovnaní s konvenčnými systémami je vďaka akumulácii a využitiu latentnej tepelnej energie.*
- *Je potrebné preskúmať podrobnejšie schopnosť PCM dynamicky meniť svoje tepelno-optické správanie, akumulovať/uvolňovať tepelnú energiu prijatú slnečným žiarením a ďalšie sprevádzajúce aspekty celoročne a dlhodobo.*
- *V ďalšom výskume je potrebná analýza vplyvu transparentného systému s PCM na uhlové/smerové charakteristiky a ukazovatele s ohľadom na ovplyvňovanie denného osvetlenia*

7.1 Prínosy dizertačnej práce pre prax

Skúmaním optických vlastností transparentného systému s integrovaným PCM sa získava prehľad o tom, ako môže táto inovatívna technológia ovplyvniť energetickú/tepelnú účinnosť v budovách. Zakomponovanie PCM významne ovplyvňuje optické vlastnosti takéhoto systému, čo môže umožniť pasívnym spôsobom riadenie solárnych a tepelných tokov, zmierniť prehrievanie interiéru a redukovať oslnenie počas období špičkových teplôt. Tieto znalosti umožňujú architektom, inžinierom a stavebným odborníkom navrhovať a uvažovať s riešeniami transparentných systémov s dynamickými vlastnosťami.

Optické vlastnosti systému zohrávajú kľúčovú úlohu pri poskytovaní svetelného komfortu v budovách. To, ako PCM ovplyvňuje priepustnosť solárneho žiarenia v stave premeny materiálu od pevnej, cez kašovitú až po kvapalnú fázu, poskytuje relevanté informácie pre možný návrh transparentných systémov so zohľadnením týchto dynamických zmien. Na druhej strane tieto poznatky umožňujú opísať na akú úroveň pasívnych solárnych ziskov je možné tieto materiály nastaviť pre sekundárne zabezpečenie vhodnej úrovne tienenia a kontroly prieniku slnečného žiarenia do interiérov budovy pasívnym spôsobom. Tieto znalosti

prispievajú k vytvoreniu prostredia pre užívateľov budov so zohľadnením znalostí o termo-optických vlastnostiach PCM integrovaných do transparentných konštrukcií. Integrácia PCM do zasklenia môže ovplyvniť nielen energetickú účinnosť a svetelný komfort, ale aj celkovú účinnosť systémov budov. Štúdiom optických vlastností zasklenia s integrovaným PCM sa môže optimalizovať návrh a konfigurácia transparentných systémov pre špecifické aplikácie a požadované parametre ich tepelnej, optickej a energetickej účinnosti. Tieto znalosti pomáhajú pri dosahovaní požadovanej úrovne úspor energie, vnútorného komfortu a cieľov udržateľnosti, čo v konečnom dôsledku zlepšuje celkovú účinnosť budov.

Vedecké poznatky optických vlastností zasklenia s PCM tiež môžu poskytnúť údaje pre stanovenie smerníc a noriem pre návrh. Generovaním empirických údajov a vykonávaním analýz sa výskumom prispieva k implementácii do predpisov a noriem, ktoré usmerňujú odborníkov pri výbere a navrhovaní PCM v transparentných systémoch. Tieto usmernenia môžu zlepšiť postupy a zabezpečiť budúcu úspešnú integráciu inovatívnej technológie do stavebných projektov.

7.2. Prínosy dizertačnej práce pre vedný odbor

Skúmanie optických vlastností systému s PCM prispieva k vedeckému poznaniu toho, ako elektromagnetické žiarenie interaguje s týmito materiálmi. Vykonaním spektrálnych analýz a experimentálnym výskumom sa získal prehľad o spektrálnych charakteristikách optických vlastností systémov so zohľadnením viditeľnej a blízkej infračervenej oblasti žiarenia. Tieto rozširujú poznanie o základných princípoch, ktorými sa riadi interakcia žiarenia a hmoty a poskytujú poznatky pre ďalšie vedecké výskumy. V práci bola navrhnutá a overená metodika merania optických vlastností materiálov s vysokou latentnou tepelnou kapacitou. Výsledky dosiahnuté smerovými metódami merania pre skúmané komponenty dobre korešpondujú s meraniami použitím špecifických optických sústav s integračnými guľami.

Skúmanie optických vlastností zasklenia pomocou PCM pomáha pri rozvoji samotnej aplikácie PCM. Komplexnou analýzou účinkov rôznych typov a konfigurácií PCM na optické parametre transparentného systému môže výskum zaoberajúci sa týmito materiálmi prispieť k charakterizácii optickej účinnosti. To prispieva k vývoju efektívnejších a spoľahlivejších riešení transparentných systémov na báze PCM, čím sa podporuje inovácia v oblasti energeticky účinných stavebných systémov. Výsledky výskumu môžu prispieť k lepšiemu pochopeniu optických vlastností a tepelného správania materiálov na báze PCM v praktických

aplikáciách, a uľahčiť tak ich návrh a integráciu do energeticky efektívnych transparentných systémov.

Zoznam vybranej literatúry

- [1] WILDE, P. - COLEY, D.: *The implications of a changing climate for buildings*, Building and Environment 55, 2012, 1-7.
- [2] *International Energy Agency: Analysis, data and statistics* [online]. IEA: ©2021.
Dostupné na: <https://www.iea.org/>
- [3] CHEL, A. - KAUSHIK, G.: *Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building*, Alexandria Engineering Journal, 57 (2), 2018, 655-669.
- [4] ATTIA, S. a kol.: *Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems*, Energy and Buildings 179 (2018) 165-182.
- [5] FAVOINO, F. a kol.: *Towards an Ideal Adaptive Glazed Façade for Office Buildings*, Energy Procedia 62, 2014, 289-298.
- [6] SAYED, M. A. - MOHAMED FIKRY, A.: *Impact of glass facades on internal environment of buildings in hot arid zone*. Alexandria Engineering Journal 59(3), 2019, 1063-1075.
- [7] GOIA, F. a kol.: *Experimental analysis of the energy performance of a full-scale PCM glazing prototype*. Solar Energy 100, 2014, 217-233.
- [8] HEIM, D. a kol.: *Dynamics of Melting Process in Phase Change Material Windows Determined Based on Direct Light Transmission*. Energies, 14, 2021, 721.
- [9] GOIA, F. a kol.: *Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit*. Energy and Buildings 87, 2015, 302-312.
- [10] LI, D. a kol.: *Optical properties of a liquid paraffin-filled double glazing unit*. Energy and Buildings 108, 2015, 381-386.
- [11] GOIA, F. a kol.: *Characterization of the optical properties of a PCM glazing system*. Energy Procedia 30, 2012, 428-437.
- [12] ISMAIL, K.A.R. - HENRÍQUEZ, J.R.: *Parametric study on composite and PCM glass systems*. Energy Conversion and Management 43(7), 2002, 973-993,
- [13] GRACIA, A. a kol.: *Solar Absorption in a Ventilated Facade with PCM. Experimental Results*. Energy Procedia 30, 2012, 986-994,
- [14] KARA, Y.A. - KURNUÇ, A.: *Performance of coupled novel triple glass and phase change material wall in the heating season: An experimental study*. Solar Energy 86(9) 2012 2432-2442.
- [15] ISMAIL, K.A.R. a kol.: *Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows*. Energy and Buildings 40(5), 2008, 710-719.
- [16] GOWREESUNKER, B.L. a kol.: *Experimental and numerical investigations of the optical and thermal aspects of a PCM-glazed unit*. Energy and Buildings 61, 2013, 239-249.
- [17] MEDICI, P.: *The Trombe Wall during the 1970s: technological device or architectural space? Critical inquiry on the Trombe Wall in Europe and the role of architectural magazines* 4 (2).

- [18] SAADATIAN, O.: *Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2012, 6340–6351.
- [19] WATTEZ, Y. a kol.: *Renewed Trombe wall passively reduces energy consumption*. Passive and Low Energy Architecture, 2017.
- [20] *A System for Adjustable Translucent Thermal Mass*. Delft University of Technology & Eindhoven University of Technology [online]. Dostupné na: <https://www.4tu.nl/bouw/en/Lighthouse/doubleface/>
- [21] *View of Double Face 2.0: A lightweight translucent adaptable Trombe wall*. SPOOL [online]. Dostupné na: <https://journals.open.tudelft.nl/spool/article/view/2090/2442>
- [22] CIE 130-1998. International Commission on Illumination.
- [23] ASTM G173-03(2020). Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. Dostupné na: <https://www.astm.org/g0173-03r20.html>

Zoznam publikačnej činnosti

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 - Mánik, Marek -- Kuruc, Michal -- Cabanová, Terézia -- Medved', Igor. Diffusion coefficient of expanded polystyrene in environments with varying relative humidity. In TRNÍK, A. -- SUCHORAB, Z. *Proceedings of the 3rd Central European Symposium on Thermophysics (CEST 2021)*. Melville, NY: AIP Publishing, 2021, ISBN 978-0-7354-4139-2. DOI (10.1063/5.0070125), SCOPUS (2-s2.0-85118917142), WOS (000794165900028).
- AFC02 - Cabanová, Terézia -- Čurpek, Jakub -- Čekon, Miroslav. Research challenges and opportunities in transparent PCM-incorporated systems. In TRNÍK, A. -- MEDVEĎ, I. *Proceedings of the 2nd Central European Symposium on Thermophysics(CEST 2020)*. Melville, NY: AIP Publishing, 2020, ISBN 978-0-7354-4005-0. DOI (10.1063/5.0025743), SCOPUS (2-s2.0-85093650619)
- AFC03 - Hellová, Katarína Eva -- Cabanová, Terézia. Skúmanie tepelnoizolačných materiálov pri zmene relatívnej vlhkosti počas experimentálnej simulácie v klimatickej komore. In ŠUHAJDOVÁ, E. -- NOVÁKOVÁ, J. -- VELIKOVSKÁ, K. -- MORAVČÍKOVÁ, S. -- KURUC, M. -- NOSEK, J. *Juniorstav 2021*. Brno: ECON publishing, 2021, s. 584--589. ISBN 978-80-86433-75-2.
- AFC04 - Cabanová, Terézia -- Kuruc, Michal -- Čekon, Miroslav -- Čurpek, Jakub. Thermo-optical challenges of building envelope systems with phase change materials: Pathways to reliable performance characterization. In *CEES 2021*. Coimbra: Itecons, 2021, ISBN 978-989-54499-1-0.
- AFC05 - Cabanová, Terézia -- Kuruc, Michal -- Čurpek, Jakub -- Čekon, Miroslav -- Urbán, Daniel Thermo-optical reaction changes of a PCM filled glass system. In *8th International Building Physics Conference (IBPC 2021)*. Bristol: IOP Publishing, 2021. DOI (10.1088/1742-6596/2069/1/012195).
- AFC06 - Cabanová, Terézia -- Čekon, Miroslav -- Bevilacqua, Piero --Čurpek, Jakub. Spectral transmittance changes in a PCM glass block affected by an artificial radiation source. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (2023)*. DOI 10.1088/1755-1315/1196/1/012065
- AFC07 - Čekon, Miroslav -- Cabanová, Terézia -- Čurpek, Jakub -- Slávik, Richard. Bio-based PCM glass component integrated in a semi-transparent building envelope system: Preliminary spectral optical tests. In *CEES 2023*. Funchal - Portugal: Itecons, 2023,

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01- Cabanová, Terézia. Experimentálna analýza termo-optických charakteristík transparentných fasádnych systémov s integrovaným PCM. In BISTÁK, A. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2021, s. 63--67. ISBN 978-80-227-5150-6.
- AFD02 - Cabanová, Terézia. Prehľad súčasného výskumu v oblasti materiálov s fázovou zmenou integrovaných v transparentných fasádach. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2020, s. 90--96. ISBN 978-80-227-5052-3.
- AFD03- Cabanová, Terézia. Skúmanie vybraných fyzikálno-mechanických vlastností pri použití plniva na báze recyklovaných plastov v štiepko-cementových

kompozitoch. In *CTM 2019 - Construction Technology and Management*. Brno: Tribun EU, 2019, s. 33--40. ISBN 978-80-263-1549-0.

AFD04 - Cabanová, Terézia. Spektrálna analýza termo-optických parametrov transparentných fasádnych prvkov s aplikovaným PCM. In BISTÁK, A. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava: Spektrum STU, 2022, s. 62--68. ISBN 978-80-227-5251-0.

AFD05 - Cabanová, Terézia -- Kuruc, Michal -- Čekon, Miroslav -- Čurpek, Jakub Thermo-optical challenges of building envelope systems with phase change materials: Pathways to reliable performance characterization. In *CEES 2021*. Coimbra: Itecons, 2021, ISBN 978-989-54499-1-0.

ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

ADF01 - Hellová, Katarína Eva -- Unčík, Stanislav -- Cabanová, Terézia. Sorpčné charakteristiky tepelnoizolačných materiálov na báze ľanu a konope. *Mladá veda*, 8. s. 92--100.

ADN Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

ADN01 - Hellová, Katarína Eva -- Unčík, Stanislav -- Cabanová, Terézia. Sorption Properties of Thermal Insulation Composed of Flax or Hemp Fibers. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 28. s. 47--52. DOI (10.2478/sjce-2020-0023), WOS (000580598300007).

ADN02 - Fiľarská, Diana - Unčík, Stanislav - Cabanová, Terézia. Specification of the properties and effects of additives and admixtures on a mixture suitable for 3D printing of buildings. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 28. s. 38--44. DOI (10.2478/sjce-2020 0029), WOS (000607644300006).

ADN03 - Cabanová, Terézia. Preparation and modification of wooden chip-cement composites based on recycled plastics. *Slovak Journal of Civil Engineering*. Vo vydání.