

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Richard Jedinák

Autoreferát dizertačnej práce

Experimentálno-teoretické hodnotenie fotovoltického tieniaceho systému tepelne stabilizovaného materiálom s fázovou zmenou

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

V doktorandskom študijnom programe:

3659 Teória a konštrukcie pozemných stavieb

V študijnom odbore:

Stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum: v Bratislave dňa 10.05.2020

Dizertačná práca bola vypracovaná na

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb

Predkladateľ:

Ing. Richard JEDINÁK

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

Školiteľ:

prof. Ing. Jozef HRAŠKA, PhD.

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

Oponenti:

doc. Dr. techn. Ing. arch. Roman RABENSEIFER

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

prof. Ing. Dušan KATUNSKÝ, CSc.

Ústav pozemného staviteľstva, Oddelenie konštrukcií pozemných stavieb
Stavebná fakulta Technickej univerzity v Košiciach
Vysokoškolská 4
042 00 Košice

doc. Ing. Stanislav Darula, CSc.

Ústav stavebníctva a architektúry SAV
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9
845 03 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 27.08.2020 o 9:00 hodine na Katedre konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11 v seminárnej miestnosti Katedry KPS.

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty

OBSAH

1. Úvod.....	3
2. Ciele dizertačnej práce	4
3. Metódy dizertačnej práce	4
4. Pilotná simulácia výpočtového modelu FV snolamu tepelne stabilizovaného MFZ.....	5
4.1 Návrh simulovaného FV snolamu	5
5. Experimentálne meranie FV snolamu „in situ“	6
5.1 Základné prvky modelu FV snolamu tepelne stabilizovaného MFZ	6
5.1.1 Tenkovrstvové FV moduly.....	6
5.1.2 Podkladové profily a zásobníky z plexiskla.....	7
5.1.3 Materiál s fázovou zmenou	8
6. Kalibračné meranie lamiel FV snolamu.....	9
6.1 Podmienky kalibračného merania lamiel FV snolamu.....	9
6.2 Klimatické údaje v čase kalibračného merania lamiel	9
6.3 Výsledky kalibračného merania lamiel a stanovenie korekčných súčiniteľov.....	9
7. Experimentálne meranie modelu FV snolamu tepelne stabilizovaného MFZ v exteriérových podmienkach	11
7.1 Údaje z meteorologickej stanice počas experimentálneho merania FV snolamu tepelne stabilizovaného MFZ v mesiaci jún pri sklone lamiel 30°	12
7.2 Výsledky a vyhodnotenie experimentálneho merania FV snolamu tepelne stabilizovaného MFZ v mesiaci jún pri sklone lamiel 30°	12
8. Laboratórne merania – kalibrácia FV lamiel.....	14
8.1 Podmienky kalibračného merania FV lamiel	14
8.2 Priebeh kalibračného merania	15
8.3 Výsledky kalibračného merania	15
9. Laboratórne merania FV lamiel tepelne stabilizovaných MFZ	17
9.1 Priebeh laboratórnych meraní a ich hodnotenie	17
9.2 Výsledky a vyhodnotenie laboratórnych meraní	18
9.2.1 Vyhodnotenie merania pri ustálenej teplote vzduchu 18 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia	18
9.2.2 Vyhodnotenie merania pri ustálenej teplote vzduchu 12 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia	19
9.2.3 Vyhodnotenie merania pri ustálenej teplote vzduchu 6 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia	21
10. Záver dizertačnej práce	23

11.	Prínos dizertačnej práce pre vedný odbor	23
11.1	Poznatky získané analýzou údajov z meraní v reálnych klimatických podmienkach 23	
11.2	Poznatky získané analýzou údajov z meraní v laboratórnych podmienkach.....	24
12.	Prínos dizertačnej práce pre prax	25
	Vybraný zoznam použitej literatúry	26
	Publikačná činnosť autora	28

1. ÚVOD

Základnými zdrojmi svetovej energetiky aj v dnešnej dobe naďalej ostávajú fosílné zdroje energie, ktorými sú uhlie, ropa a zemný plyn. Stavebníctvo ako odvetvie a budovy ako jedna z jeho súčastí patrí medzi oblasti s najväčšou spotrebou energie v našej spoločnosti a preto je aj veľkou príležitosťou pre úsporu energie a ochranu životného prostredia (ďalej v texte označené skratkou ŽP). Možnou cestou ako vylepšiť energetickú situáciu je znižovanie spotrebu energie jej racionálnym využívaním, technickým vývojom a využívaním obnoviteľných zdrojov energie (OZE). Veľké množstvo ľudí v technicky vyspelých krajinách trávi väčšinu svojho času vo vnútornom prostredí budov (až 90 %), čo odôvodňuje naše úsilie o realizáciu budov, ktoré budú rovnako bezpečné ako aj príjemné. Smernica Európskeho parlamentu o energetickej hospodárnosti budov hovorí o zvyšovaní počtu obnovovaných budov na budovy s takmer nulovou potrebou energie a po roku 2020 o výstavbe už len takýchto energeticky úsporných budov. V snahe o napĺňanie požiadaviek sa prichádza s rôznymi alternatívnymi riešeniami tepelnej ochrany, z ktorých sa niektoré dokážu na trhu presadiť a iné zasa nie. Jedným z možných alternatívnych riešení je aplikácia systémov, ktoré využívajú materiály s fázovou zmenou (MFZ) a fotovoltiku (FV) v rámci obalových konštrukcií budov [1].

Súčasný rozvoj spoločnosti je charakterizovaný zvyšujúcimi sa nákladmi na energiu. Dosiahnuť rozumnú spotrebu energie patrí preto dnes k základným cieľom nielen energetického manažmentu, ale aj užívateľov bytov a rodinných domov [2].

Náš spôsob života stále v podstatnej miere závisí od fosílnych palív. Spotrebovaných bola však viac ako polovica týchto palív a o pár desaťročí z nich neostane takmer nič. Preto sa v dnešnej dobe do popredia dostávajú výrazy ako obnoviteľné zdroje energie (OZE), alternatívne zdroje a zelená energia. Taktiež sa v poslednom storočí zistilo, že spotreba neobnoviteľných zdrojov energie spôsobila viac škôd na ŽP ako akýkoľvek iný druh ľudskej aktivity. Spaľovanie fosílnych palív a následný zisk energie je spojený s vysokými koncentraciami škodlivých plynov, ktoré unikajú do atmosféry. To vedie k mnohým problémom, ktorým čelíme v súčasnosti a ktorými sú napríklad globálne otepľovanie, ničenie ozónovej vrstvy, kyslé dažde atď. OZE nie sú žiadnou novinkou, po stáročia sa budovy stavali tak, aby sa v nich udržiavalo slnečné teplo, kúrilo sa drevom, mlyny poháňala veterná a vodná energia, prepravu po celom svete zabezpečovali plachetnice. Samozrejme, v dávnejšej minulosti bol úplne iný a málo produktívny svet s podstatne menšou populáciou v porovnaní so súčasnosťou. OZE sa nezmenili, ale technológia sa rozhodne zmenila. To otvára nové perspektívy v oblasti využívania OZE [3].

Dizertačná práca sa zaoberá experimentálno-teoretickým hodnotením FV tieniaceho systému tepelne stabilizovaného MFZ, umiestneným v lamelách tohto systému. Lamely tohto systému sú osadené v ráme (predstavujúcom v reálnom prostredí predsadený fasádny prvok), ktorý im umožňuje náklon zodpovedajúci pozícii Slnka na oblohe vo vzťahu k najvyššej účinnosti FV modulu. Lamely pozostávajú z tenkého, ale odolného FV modulu, ktorý je umiestnený na profile vytvorenom z plexiskla (prípadne hliníka), v ktorom je umiestnený MFZ. Tento materiál (v primeranej hrúbke a taktiež s primeraným rozsahom teplôt fázovej zmeny) by mal pozitívne ovplyvňovať správanie sa FV modulu z hľadiska jeho teploty a účinnosti výroby elektrickej energie. V rámci experimentov sa merali povrchové teploty jednotlivých lamiel modelu, produkcia elektrického prúdu, elektrického napätia, elektrického výkonu a účinnosti jednotlivých lamiel.

2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom práce je zistiť, ako sa inovatívny spôsob tienenia budov bude správať z tepelnotechnického hľadiska a hľadiska produkcie elektrickej energie v reálnych klimatických podmienkach.

Čiastkovými cieľmi dizertačnej práce sú:

- prehľad o súčasnom stave riešenej problematiky, najmä v oblasti kombinácie FV a MFZ, zvládnutie práce so simulačnými výpočtovými prostrediami;
- návrh variantov simulačného modelu tieniaceho systému a ich pilotné simulácie;
- vytvorenie fotovoltického tieniaceho systému (slnolamu) stabilizovaného materiálom s fázovou zmenou a meranie jeho funkčných vlastností v reálnych klimatických podmienkach;
- meranie funkčných vlastností fotovoltických lamiel tieniaceho systému, ktoré budú tepelne stabilizované materiálmi s fázovou zmenou s rozličnou teplotou fázovej zmeny v klimatickej komore;
- zhrnutie získaných dát, ich analýza a formulovanie záverov.

3. METÓDY DIZERTAČNEJ PRÁCE

V práci sa používajú tieto vedeckovýskumné metódy:

- počítačové simulačné metódy (Energy +, DesignBuilder);
- merania tepelnotechnických vlastností fotovoltického tieniaceho systému a meranie jeho elektrických veličín;
- štatistické metódy, potrebné pre spracovanie a porovnanie výsledkov získaných prostredníctvom simulácií a experimentálnych meraní.

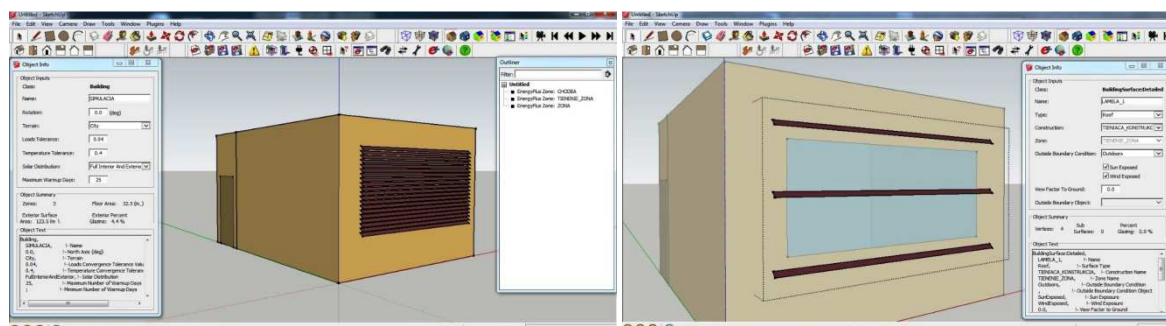
4. PILOTNÁ SIMULÁCIA VÝPOČTOVÉHO MODELU FV SlnOLAMU TEPELNE STABILIZOVANÉHO MFZ

Pilotná simulácia sa zaoberá návrhom slnolamu, ktorý pozostáva z FV modulov a MFZ umiestnenom v jeho lamelách, pre potreby teoretického overenia jeho funkčnosti. Konštrukcia bola uvažovaná ako súčasť fasády budovy z exteriérovej strany, situovaná na južnej strane fasády. Umiestnenie konštrukcie bolo uvažované na drážkach, prípadne koľajniciach, ktoré by v prípade potreby umožňovali jej pohyb. Umiestnenie lamiel konštrukcie je navrhnuté spôsobom, ktorý umožňuje jednotlivým lamelám náklon zodpovedajúci pozícii slnka na oblohe. Lamely pozostávajú z tenkého, ale odolného FV modulu, ktorý je umiestnený na profile vytvorenom z hliníkového plechu (prípadne plexiskla), v ktorom je umiestnený MFZ. Tento materiál (v primeranej hrúbke a taktiež primeranom rozhraní teplôt fázovej zmeny) by mal pozitívne ovplyvňovať správanie sa FV modulu z hľadiska jeho povrchovej teploty a účinnosti produkcie elektrickej energie. V simulácii boli hodnotené teploty dosahované na povrchoch lamiel a bol hodnotený výber vhodného MFZ určeného pre vyplnenie profilov, ako aj stanovenie jeho potrebnej hrúbky. Pri prvotnej simulácii sa uvažovalo s použitím dvoch rôznych druhov MFZ. Simulované boli teploty na hornom a dolnom povrchu lamiel umiestnených na hornom okraji, dolnom okraji a v strede modelovaného tieniaceho systému.

4.1 Návrh simulovaného FV slnolamu

Pre pilotnú simuláciu bol ako okrajová podmienka zvolený testovací klimatický referenčný rok pre Bratislavu (dostupný na internetových stránkach programu EnergyPlus).

Simulácia sa robila programom EnergyPlus, s grafickou podporou programom SketchUp. Simulačný model pozostával z 3 častí: zóna, chodba a tieniaci prvok (slnolam). Výsledky simulácie boli zamerané na tieniaci prvok (slnolam) a na povrchové teploty lamiel slnolamu. Slnolam pozostával z 20 lamiel s rozmermi 100 mm (šírka) a 4 000 mm (dĺžka). Hrúbka konštrukcie lamely bola 8 mm pri simulácii samotného FV modulu a 37 mm pri kombinácii FV modulu a zásobníku s MFZ. Uvažovaný sklon bol 30°. Slnolam bol osadený na južnej fasáde pred okennou konštrukciou, ktorá je namodelovaná v časti zóna. Slnolam bol uvažovaný odsadený od fasády o 150 mm s možnosťou nastavenia polohy.



Obr. 4.1 Model simulovanej tieniacej konštrukcie a uvažovaných lamiel.

Tab. 4.1 Vstupné hodnoty simulácie pre FV modul a MFZ.

Materiál	Hrúbka d (mm)	Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ (W/(m.K)) kvapalná/pevná	Objemová hmotnosť ρ (kg/m ³) kvapalná/pevná	Merná tepelná kapacita c (J/(kg.K))
Hliník	0,002	204	2700	880
RT25	0,025	0,2	760/880	2000
HS22P	0,025	0,54/1,09	1540/1840	1850
PV modul	0,008	0,78	2 700	840

Výsledkom simulácie sú povrchové teploty jednotlivých lamiel, konkrétne teploty na hornom povrchu lamely a spodnom povrchu lamely. Pre 3 ks lamely, ktoré sú umiestnené v najvyššom bode, v strede a v najnižšom bode konštrukcie snolamu. Simulácia bola uskutočnená pre samostatný FV modul, pre modul v kombinácii so zásobníkom pre MFZ typ RT25 a MFZ typ HS22P a taktiež pre prípad, že zásobník (v ktorom je uvažovaný MFZ) je vyplnený vzduchom a teda sa správa ako uzavretá vzduchová dutina. Výstupom sú grafy porovnávajúce teploty lamiel pre jednotlivé materiálové skladby.

5. EXPERIMENTÁLNE MERANIE FV SNOLAMU „IN SITU“

Experimentálny model FV snolamu bol vytvorený zo 7 lamiel, ktoré boli rozdelené do 3 skupín, konkrétne 3 lamely s hrúbkou MFZ 20 mm (celková hrúbka lamely 26 mm), 3 lamely s hrúbkou MFZ 40 mm (celková hrúbka lamely 46 mm) a referenčná lamela s celkovou hrúbkou 3 mm (FV moduly osadené na podkladovom profile z plexiskla). V experimente sa uvažovalo s aplikáciou 2 rôznych typov MFZ, tretia skupina lamiel bola naplnená vodou. Dôvodom použitia vody pre potreby experimentálneho merania namiesto uzavretej vzduchovej dutiny (ako ďalšieho druhu materiálu k 2 druhom použitých MFZ), ktorá bola uvažovaná pri pilotnej simulácii sú jej charakteristické vlastnosti (chemické a fyzikálne). Miesto uzavretej vzduchovej dutiny bolo potrebné zvoliť médium (chladivo) kvapalnej konzistencie, ktoré by bolo možné sledovať pri prípadnom úniku zo zásobníka a taktiež v ktorom by bolo možné merať teplotu (teplota v strede zásobníka) bez skreslenia.

5.1 Základné prvky modelu FV snolamu tepelne stabilizovaného MFZ

FV časť lamely pozostáva z malých tenkovrstvových FV modulov. FV časť lamely je spojená s podkladom z plexiskla, ktorý slúži na jej spevnenie a pripojenie na zásobník z plexiskla, v ktorom je zabudovaný MFZ. Na spojenie FV modulu, podkladu a zásobníka bola použitá tenká vrstva lepidla na báze MS polymérov.



Obr. 5.1 FV lamely spojené s podkladovými profilmi z plexiskla.

5.1.1 Tenkovrstvové FV moduly

FV časť lamely je vytvorená z malých tenkovrstvových polykryštalických FV modulov s rozmermi 105 x 90 mm, ktoré je možné navzájom kombinovať do ľubovoľnej zostavy. Hrúbka FV modulu je 2 mm. V prípade experimentálneho merania je lamela zložená z 10 ks modulov spojených do série s celkovými rozmermi lamely 1 050 x 90 mm.

Špecifikácie jedného samostatného modulu sú:

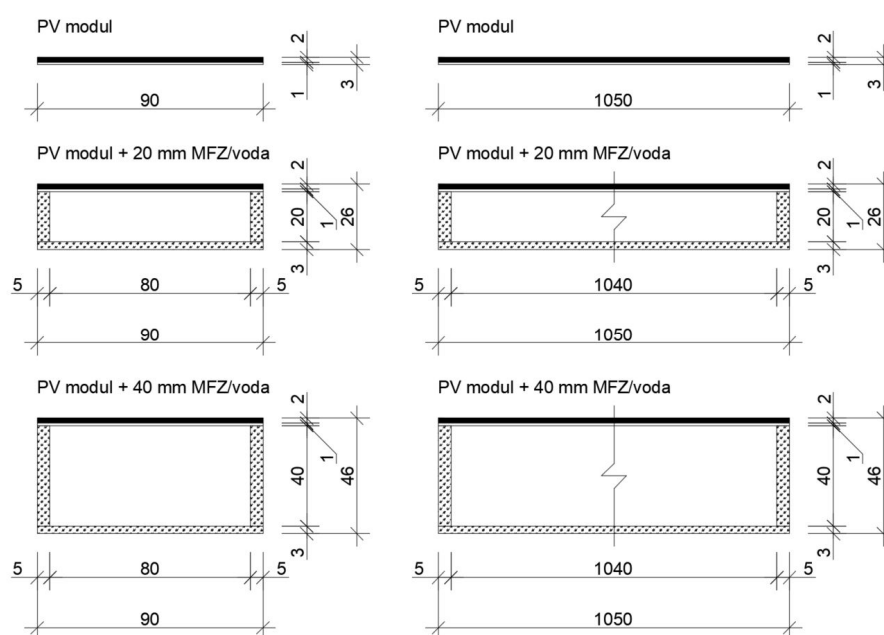
- maximálny výkon $P_{\max} = 1 \text{ W}$;
- napätie pri $P_{\max}$ ($V_{\text{mp}} = 2 \text{ V}$);
- prúd pri $P_{\max}$ ($I_{\text{mp}} = 500 \text{ mA}$).



Obr. 5.2 Tenkovrstvový FV modul a FV časť modelu tieniacej lamely.

5.1.2 Podkladové profily a zásobníky z plexiskla

FV lamela bola nalepená pomocou tenkej vrstvy lepidla na báze MS polymérov na podklad vyrobený z plexiskla hrubého 1 mm pre zabezpečenie jej väčšej odolnosti a možnosti následného spojenia so zásobníkom na MFZ, vytvoreným taktiež z plexiskla. Zásobník je vytvorený z priehľadného plexiskla, čo počas experimentu umožňuje pozorovanie zmien v MFZ. Na oboch koncoch je zásobník vybavený napúšťacími a vypúšťacími otvormi a na jednej z dlhších strán sú umiestnené 2 otvory pre osadenie teplotných senzorov. Zásobníky sú vyrobené v 2 hrúbkach, konkrétne 20 a 40 mm (vnútorný rozmer zásobníka) v celkovom počte 3 kusov pre obe hrúbky, rozmerovo sú totožné s rozmermi FV lamely. Hrúbka bočných stien zásobníka z plexiskla je 5 mm, spodná stena je hrubá 3 mm. Spojenie FV lamely umiestnenej na podkladovom profile a zásobníka na MFZ je zabezpečené prostredníctvom tenkej vrstvy lepidla na báze MS polymérov, prípadné nerovnosti boli týmto lepidlom aj vytmelené, aby sa docielil uzatvorený zásobník.



Obr. 5.3 Priechy a pozdĺžny rez FV lamelou.



Obr. 5.4 Podkladový profil pre FV lamelu a zásobníky vytvorené z plexiskla.

5.1.3 Materiál s fázovou zmenou

Pre experimentálne meranie boli zvolené 2 typy MFZ a to materiál RT20 a materiál RT27 od spoločnosti RUBITHERM, konkrétne sa jedná o organický typ MFZ.



Obr. 5.5 MFZ typ RT20 a RT27.

Tab. 5.1 Charakteristické vlastnosti MFZ RT20 a RT27 podľa ich technických listov.

Vlastnosti/Materiál	RT20	RT27
Oblasť topenia - ($^{\circ}\text{C}$) RT20: pri hlavnom vrchole $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ RT27: pri hlavnom vrchole $27\text{ }^{\circ}\text{C}$	19 - 22	25 - 28
Oblasť tuhnutia - ($^{\circ}\text{C}$) RT20: pri hlavnom vrchole $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ RT27: pri hlavnom vrchole $27\text{ }^{\circ}\text{C}$	22 - 19	28 - 25
Tepelno akumulčná kapacita - (kJ/kg) RT20 a RT27: $\pm 7,5\%$	195,00	179,00
Kombinácia latentného a citeľného tepla: (Wh/kg) RT20: teplotný rozsah $13\text{ }^{\circ}\text{C} - 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ RT27: teplotný rozsah $20\text{ }^{\circ}\text{C} - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	54,00	50,00
Merná tepelná kapacita - (kJ/kg.K)	2,00	2,00
Hustota (pevné skupenstvo) - (kg/l) RT20 a RT27: pri $15\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,88	0,88
Hustota (kvapalné skupenstvo) - (kg/l) RT20: pri $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ RT27: pri $40\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,77	0,76
Súčiniteľ tepelnej vodivosti - (W/(m.K))	0,20	0,20
Objemová rozťažnosť - (%)	12,5	12,5
Bod vzplanutia (MFZ) - ($^{\circ}\text{C}$)	140	146
Maximálna operačná teplota - ($^{\circ}\text{C}$)	50	50

6. KALIBRAČNÉ MERANIE LAMIEL FV SlnOLAMU

Nutnosť kalibračného merania samostatných lamiel FV slnolamu vyplynula z potreby zadefinovania parametrov jednotlivých lamiel tak, aby bolo možné stanoviť referenčnú lamelu a pre zvyšné lamely určiť korekčné súčinitele, ktorými boli pri experimentálnom meraní jednotlivé lamely upravované. Pred samotným meraním bola každá lamela skontrolovaná, či nedošlo k poškodeniu prostredníctvom studeného spoja, prípadne skratom.

6.1 Podmienky kalibračného merania lamiel FV slnolamu

Kalibračné meranie FV lamiel prebiehalo za reálnych klimatických podmienok v exteriérovom prostredí na streche budovy A bloku stavebnej fakulty v Bratislave. Merané lamely boli osadené v horizontálnej polohe na podkladovom profile vytvorenom z drevených hranolov a polystyrénových tabúl. Na ich povrchu bola na každej z lamiel v jednom bode meraná povrchová teplota prostredníctvom teplotných senzorov pt100 pripevnených k povrchu lamely pomocou teplovodivého tmelu a transparentnej lepiacej pásky. Meraných bolo celkovo 9 teplôt, jedna na povrchu každej z lamiel a dve teploty okolitého vzduchu. Celkové komplexné klimatické údaje boli merané pomocou meteorologickej stanice.



Obr. 6.1 Umiestnenie lamiel a teplotných snímačov počas kalibračného merania.

6.2 Klimatické údaje v čase kalibračného merania lamiel

Počas kalibračného merania boli prostredníctvom meteorologickej stanice osadenej v blízkosti miesta kde bolo meranie realizované zaznamenávané komplexné klimatické podmienky, ktoré mali vplyv na priebeh merania.

Celkový priebeh merania trval od 06.11.2015 v čase od 12:00 do 09.11.2015 do 12:00. Vybraný úsek prebiehal od 07.11.2015 v čase od 7:00 do 07.11.2015 do 15:38.

Tab. 6.1 Priemerné hodnoty zaznamenávaných údajov z meteorologickej stanice pri kalibračnom meraní v exteriérových podmienkach.

	Slnéčné žiarenie I_g (W/m ²)	Teplota vzduchu θ_v (°C)	Rýchlosť vzduchu v (m/s)	Vlhkosť vzduchu Φ (%)
Celkový priebeh	66,20	11,04	3,74	85,48
Vybraný úsek	100,35	8,86	2,26	86,59

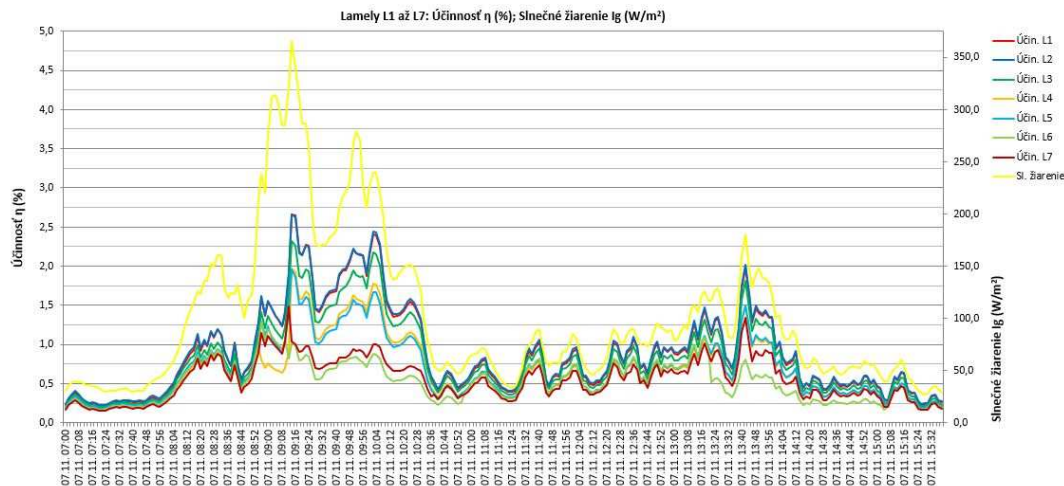
6.3 Výsledky kalibračného merania lamiel a stanovenie korekčných súčiniteľov

Počas kalibračného merania lamiel FV slnolamu v exteriérových podmienkach sa meralo elektrické napätie a elektrický prúd, s ktorých boli vyjadrené hodnoty pre elektrický výkon jednotlivých lamiel a ich účinnosť v závislosti od dopadajúceho slnečného žiarenia. Na lamelách boli taktiež zaznamenávané aj ich povrchové teploty.

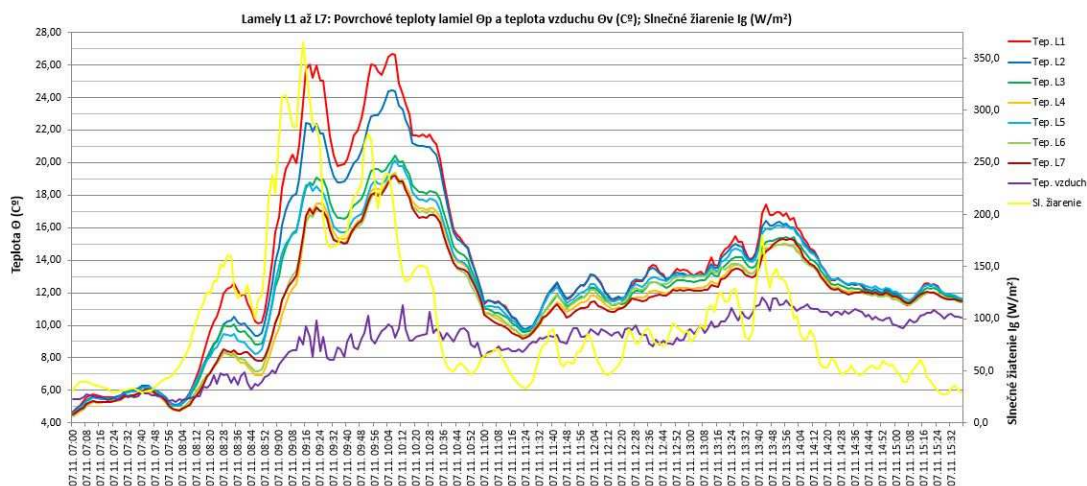
Na základe kalibračného merania jednotlivých FV lamiel boli stanovené korekčné súčinitele. Korekčné súčinitele boli stanovené na základe účinnosti jednotlivých lamiel

dosiahnutej počas doby vybraného úseku, ktorý bol hodnotený a ktorý prebiehal od 07.11.2015 v čase od 7:00 do 07.11.2015 do 15:38.

Na základe tohto pomeru bola stanovená najúčinnnejšia z lamiel, ktorej bola priradená hodnota 1 (v percentuálnom vyjadrení 100 %). Táto lamela bola počas reálneho experimentálneho merania uvažovaná ako referenčná lamela a ostatným lamelám bola priradená pomerná hodnota vzhľadom na hodnotu tejto referenčnej lamely.



Obr. 6.2 Účinnosť jednotlivých lamiel FV snolamu pri kalib. meraní pre vybraný hodnotený úsek.



Obr. 6.3 Povrchové teploty jednotlivých lamiel FV snolamu pri kalib. meraní pre vybraný hodnotený úsek.

Tab. 6.2 Stanovenie korekčných súčiniteľov na základe kalibračného merania FV lamiel pre vybraný hodnotený úsek (stanovené na základe účinnosti lamiel).

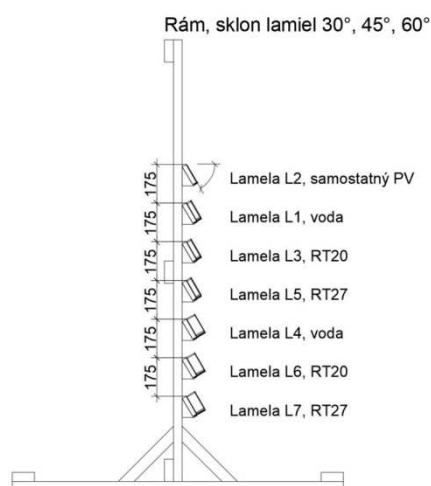
Lamely	Slnečné žiarenie I_g (W/m^2)	Tep. vzduchu θ_v ($^{\circ}C$)	Povrchové teploty lamiel θ_{HP} ($^{\circ}C$)	Elektrický prúd I (A)	Elektrické napätie U (V)	Elektrický výkon P (W)	Účinnosť η (%)	Korekčný súčiniteľ
L1	100,35	8,86	13,63	0,045	1,860	0,118	0,886	1,020
L2			13,12	0,045	1,866	0,120	0,904	1
L3			12,25	0,042	1,769	0,105	0,800	1,130
L4			11,56	0,039	1,595	0,085	0,662	1,366
L5			12,29	0,039	1,626	0,088	0,679	1,331
L6			11,65	0,034	1,415	0,063	0,522	1,732
L7			11,52	0,034	1,504	0,068	0,554	1,632

Z nameraných hodnôt a realizovaných výpočtov bola ako najúčinnnejšia stanovená lamela označená ako L2, ktorá bola v nasledujúcom experimentálnom meraní uvažovaná ako referenčná lamela (meraná bez spojenia s boxom naplneným MFZ alebo vodou).

Z kalibračného merania a stanovenia korekčných súčiniteľov vyplynulo, že medzi jednotlivými lamelami je značný rozdiel v ich celkovej účinnosti. Rozdiel je pravdepodobne spôsobený nehomogénnosťou FV modulov použitých na vytvorenie FV lamiel, výrobca modulov však uvádza pre moduly rovnaké parametrické hodnoty.

Rozdiel v účinnosti jednotlivých lamiel môže byť taktiež zapríčinený stratami spôsobenými pri spájaní jednotlivých modulov, prípadne stratami spôsobenými káblovým napojením na meráciu ústredňu.

Vzhľadom na namerané údaje a z nich vypočítané účinnosti jednotlivých lamiel bolo pre ďalšie experimentálne meranie stanovené rozdelenie lamiel pre jednotlivé boxy.



Obr. 6.4 Reálne rozmiestnenie lamiel na meracom ráme pri experimentálnom meraní.

7. EXPERIMENTÁLNE MERANIE MODELU FV SLNOLAMU TEPELNE STABILIZOVANÉHO MFZ V EXTERIÉROVÝCH PODMIENKACH

Zámerom bolo realizovať experimentálne meranie modelu FV slnolamu tepelne stabilizovaného MFZ v exteriérových podmienkach v mesiaci máj. Bolo zamýšľané meranie realizovať pri 3 rôznych sklonoch FV lamiel a to 30°, 45°, 60°. Každé meranie malo trvať po dobu 3 dní (respektíve 72 hodín). Počas prvej etapy merania pri sklone FV lamiel 30° však došlo k neočakávaným problémom so samotnými FV lamelami. Po odstránení problémov prebehlo meranie v mesiaci jún.



Obr. 7.1 Meranie v mesiaci jún, pri sklone lamiel 30°, prvý merací deň: 10.06.2016.

7.1 Údaje z meteorologickej stanice počas experimentálneho merania FV snolamu tepelne stabilizovaného MFZ v mesiaci jún pri sklone lamiel 30°

Počas experimentálneho merania boli prostredníctvom meteorologickej stanice osadenej v blízkosti miesta kde bolo meranie realizované zaznamenávané komplexné klimatické podmienky, ktoré mali vplyv na priebeh merania.

Celkový priebeh merania trval od 10.06.2016 v čase od 08:19 do 13.06.2016 do 08:19. Vybratý úsek prebiehal od 11.06.2016 v čase od 5:54 do 11.06.2016 do 19:09.

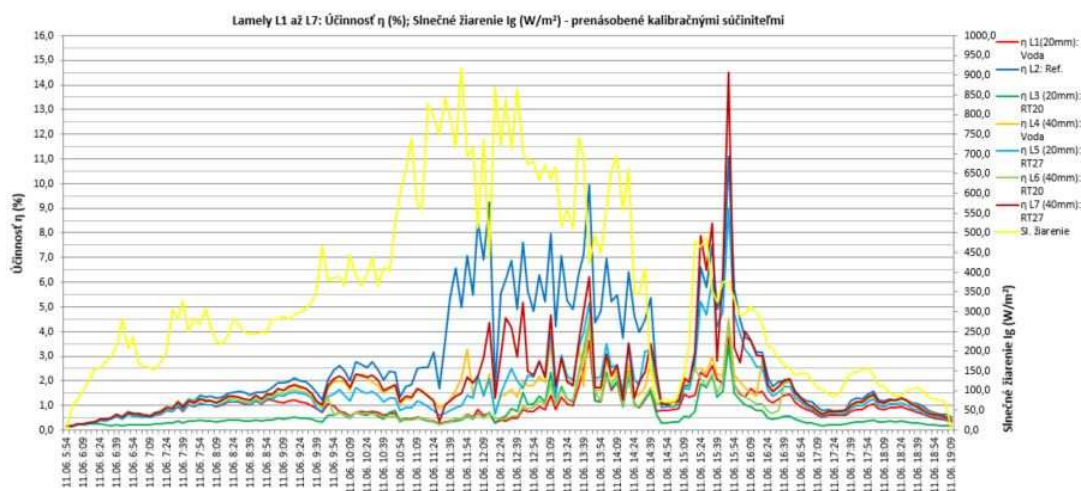
Tab. 7.1 Priemerné hodnoty zaznamenávaných údajov z meteorologickej stanice pri experimentálnom meraní v exteriérových podmienkach.

	Slnčné žiarenie I_g (W/m ²)	Teplota vzduchu Θ_v (°C)	Rýchlosť vzduchu v (m/s)	Vlhkosť vzduchu Φ (%)
Celkový priebeh	278,30	19,65	5,18	68,68
Vybratý úsek	347,48	20,93	15,59	66,20

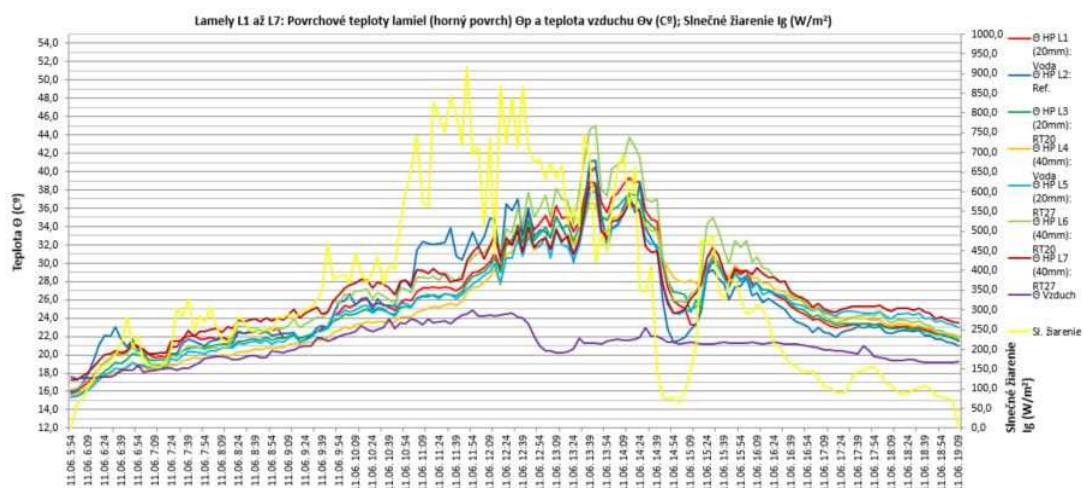
7.2 Výsledky a vyhodnotenie experimentálneho merania FV snolamu tepelne stabilizovaného MFZ v mesiaci jún pri sklone lamiel 30°

Zaznamenávané boli hodnoty pre produkciu elektrického napätia a produkciu elektrického prúdu, z ktorých boli vyjadrené hodnoty pre elektrický výkon jednotlivých lamiel a ich účinnosť v závislosti od dopadajúceho slnečného žiarenia. Zaznamenávané boli aj ich povrchové teploty v dvoch úrovniach lamiel a to na hornom povrchu lamely a v strede lamely (stred boxu s MFZ/vodou).

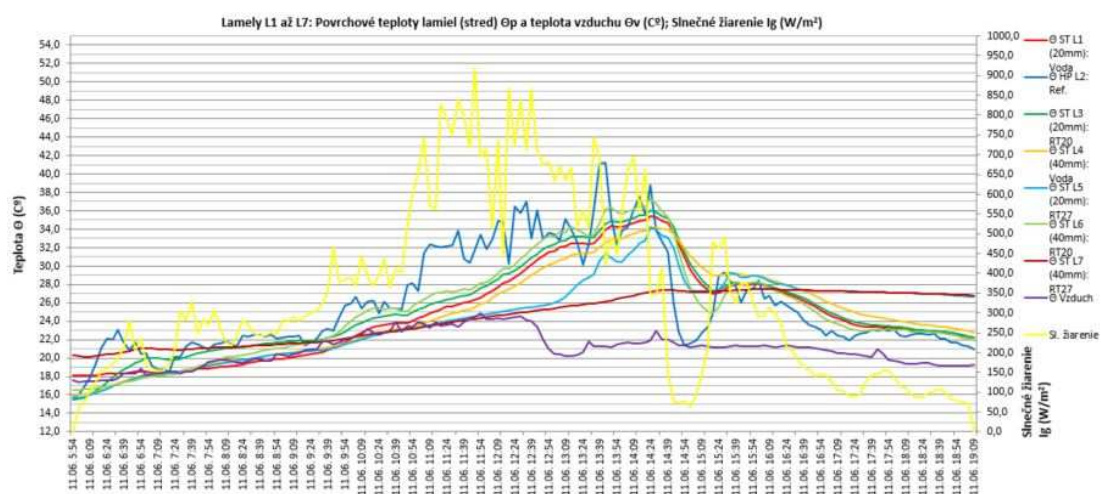
Na základe údajov získaných prostredníctvom experimentálneho merania boli vyhodnotené účinnosti jednotlivých lamiel. Účinnosti lamiel boli vyhodnotené pre vybraný úsek, ktorý bol hodnotený a prebiehal od 11.06.2016 v čase od 5:54 do 11.06.2016 do 19:09.



Obr. 7.2 Účinnosť jednotlivých lamiel FV snolamu pri experimentálnom meraní v exteriérovom prostredí (hodnoty účinnosti upravené korekčnými súčiniteľmi).



Obr. 7.3 Povrchové teploty jednotlivých lamiel FV snolamu pri experimentálnom meraní v exteriérovom prostredí (teploty na hornom povrchu lamiel).



Obr. 7.3 Povrchové teploty jednotlivých lamiel FV snolamu pri experimentálnom meraní v exteriérovom prostredí (teploty v strede boxu na MFZ).

Tab. 7.2 Priemerné hodnoty údajov z meracej ústredne (vybraný úsek, ktorý bol hodnotený) – účinnosti lamiel prenášané korekčnými súčiniteľmi.

Lamely	Žiarenie I_g (W/m^2)	Teplota vzduchu Θ_v ($^{\circ}C$)	Teplota lamely HP Θ_{LHP} ($^{\circ}C$)	Teplota lamely ST Θ_{LST} ($^{\circ}C$)	Elektrické napätie U (V)	Elektrický prúd I (A)	Elektrický výkon P (W)	Účinnosť lamiel η (%)
L1 (hr. 20 mm, voda)	347,48	20,93	26,04	24,78	0,078	3,265	0,309	0,950
L2 Referenčná			25,99	-	0,142	5,858	1,221	2,753
L3 (hr. 20 mm, RT20)			25,57	25,44	0,063	2,653	0,240	0,668
L4 (hr. 40 mm, voda)			25,12	24,75	0,088	3,649	0,401	1,472
L5 (hr. 20 mm, RT27)			25,30	24,50	0,089	3,725	0,440	1,557
L6 (hr. 40 mm, RT20)			27,18	25,26	0,063	2,632	0,200	1,069
L7 (hr. 40 mm, RT27)			26,78	24,47	0,087	3,833	0,453	1,894

Porovnanie účinností jednotlivých lamiel L1 po prenasobení korekčnými súčiniteľmi a účinnosti referenčnej lamely L2 je vyhodnotené v percentuálnom vyjadrení a spracované v tabuľkovej podobe.

Tab. 7.3 Vyhodnotenie účinnosti lamiel, (vybraný úsek, ktorý bol hodnotený) – účinnosti lamiel L1, L3, L4, L5, L6 a L7 prenasobené korekčnými súčiniteľmi.

Lamela	Účinnosť η (%)	Pomer lamely k referenčnej lamele (%)
L1 (hr. 20 mm, voda)	0,950	Účinnosť lamely L1 k L2 nižšia o 65,492 %
L2 Referenčná	2,753	-
L3 (hr. 20 mm, RT20)	0,668	Účinnosť lamely L3 k L2 nižšia o 75,736 %
L4 (hr. 40 mm, voda)	1,472	Účinnosť lamely L4 k L2 nižšia o 46,531 %
L5 (hr. 20 mm, RT27)	1,557	Účinnosť lamely L5 k L2 nižšia o 43,444 %
L6 (hr. 40 mm, RT20)	1,069	Účinnosť lamely L6 k L2 nižšia o 61,170 %
L7 (hr. 40 mm, RT27)	1,894	Účinnosť lamely L7 k L2 nižšia o 31,202 %

Meranie malo pokračovať pre sklon 45°, no už počas prvého meracieho dňa so sklonom lamiel 45° sa začali opäť prejavovať problémy, ktoré znemožnili realizovať meranie v mesiaci máj. MFZ začal unikať cez spoje FV lamely a zásobníka z plexiskla v značnej miere. Počas druhého dňa merania však došlo k značnému poškodeniu oboch zásobníkov hrúbky 40 mm v ktorých bol umiestnený MFZ RT20 a RT27. Došlo k popraskaniu boxov mimo miesta spojenia a veľkému úniku MFZ. Na zásobníkoch hrúbky 20 mm, ktoré boli naplnené MFZ RT20 a RT27, sa začali vo väčšej miere objavovať netesnosti a MFZ začal unikať. Aj napriek snahe o utesnenie zásobníkov hrúbky 20 mm sa únik nepodarilo zastaviť.

Z tohto dôvodu bolo experimentálne meranie pre sklon 45° zastavené počas druhého meracieho dňa, výsledky z tohto merania by nemali výpovednú hodnotu.

8. LABORATÓRNE MERANIA – KALIBRÁCIA FV LAMIEL

Účelom meraní v klimatickej komore bolo zistiť vlastnosti FV lamiel tepelne stabilizovaných MFZ v kontrolovaných laboratórnych podmienkach. Zásobníky MFZ sa vyrobili z hliníka. Z dôvodu zmeny vlastností FV lamiel a ich spojenia s hliníkovými zásobníkmi MFZ bolo potrebné premerať ich funkčné vlastnosti.

8.1 Podmienky kalibračného merania FV lamiel

Potreba opätovného kalibračného merania lamiel FV slnolamu bola spôsobená tým, že počas rozoberania lamiel spojených so zásobníkmi na MFZ z plexiskla došlo k poškodeniu niektorých FV modulov, z ktorých pozostávali FV lamely. Každá z lamiel bola následne podrobne skontrolovaná a chybné moduly boli vymenené. Nakoľko výmena FV modulov mohla mať vplyv na charakteristické hodnoty samotnej FV lamely, bolo potrebné kalibračné meranie zopakovať v laboratórnych podmienkach klimatickej komory.

Kalibračnému meraniu bolo celkovo podrobených 6 ks FV lamiel. Počas kalibračného merania bol do klimatickej komory osadený merací rám, ktorý sa používal aj pri experimentálnom meraní v exteriérových podmienkach.

Každá z FV lamiel bola meraná samostatne po dobu 60 minút pri vystavení rovnakým okrajovým podmienkam nastaveným v klimatickej komore.



Obr. 8.1 Osadenie meracieho rámu a FV lamiel v klimatickej komore.

8.2 Priebeh kalibračného merania

Počas kalibračného merania lamiel FV snolamu v laboratórnych podmienkach boli prostredníctvom meracej ústredne zaznamenávané okrajové podmienky v klimatickej komore, ktoré mali vplyv na priebeh merania.

Tab. 8.1 Priemerné hodnoty zaznamenávaných údajov z meracej ústredne pri kalibračnom meraní v laboratórnych podmienkach.

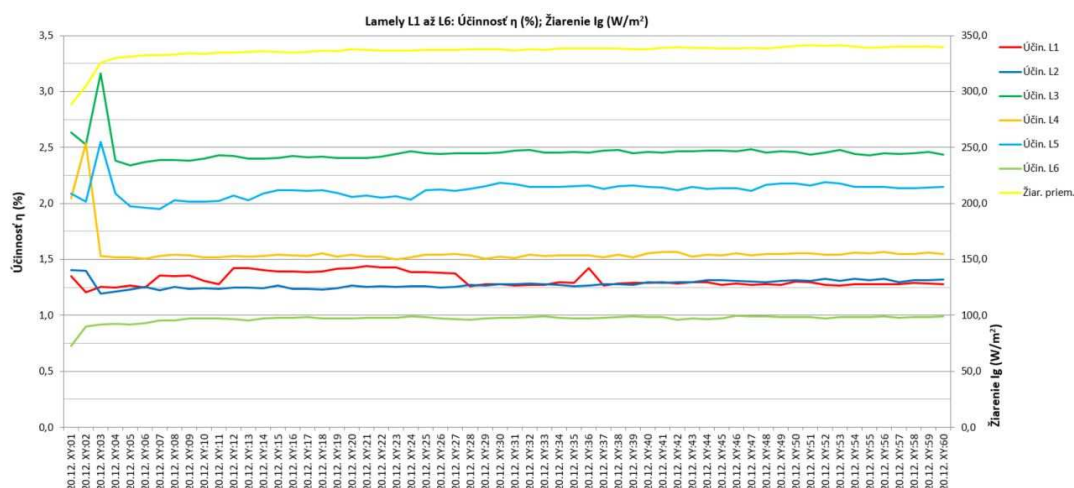
	Žiarenie I_g (W/m ²)	Teplota vzduchu θ_v (°C)	Rýchlosť vzduchu v (m/s)	Vlhkosť vzduchu Φ (%)
Celkový priebeh	335,78	19,26	1,99	37,77

8.3 Výsledky kalibračného merania

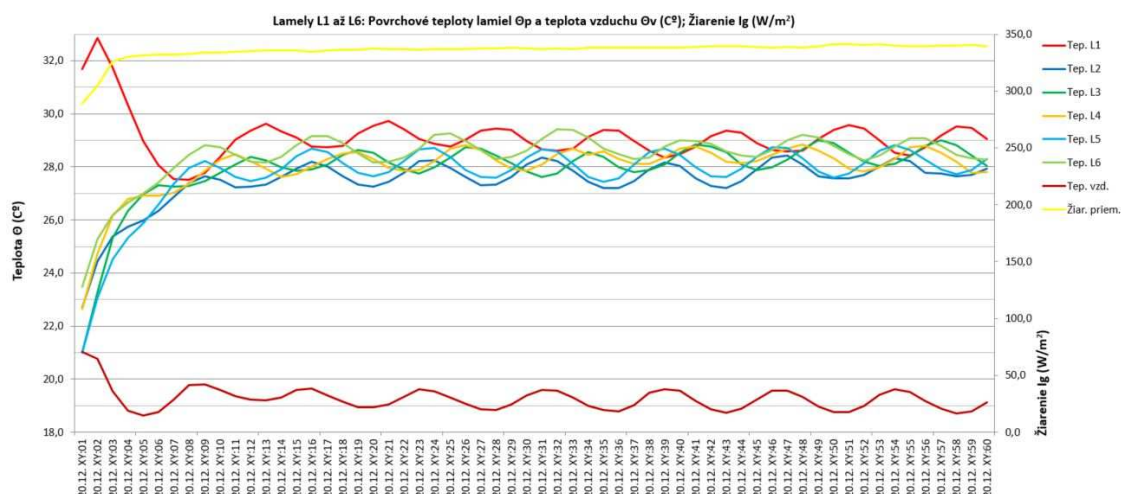
Počas kalibračného merania lamiel FV snolamu v laboratórnych podmienkach boli zaznamenávané ich hodnoty pre produkciu elektrického napätia a elektrického prúdu, s ktorých boli vyjadrené hodnoty pre elektrický výkon jednotlivých lamiel a ich účinnosť v závislosti od dopadajúceho žiarenia. Na lamelách boli taktiež zaznamenávané aj ich povrchové teploty.

Korekčné súčinitele boli stanovené na základe pomeru účinnosti jednotlivých lamiel dosiahnutej počas doby merania, ktorá trvala 60 minút, pričom každá FV lamela bola meraná samostatne.

Na základe tohto pomeru bola stanovená lamela, ktorej bola priradená hodnota 1 (v percentuálnom vyjadrení 100 %). Táto lamela bola počas experimentálneho merania v laboratórnych podmienkach uvažovaná ako referenčná lamela. Okrem referenčnej lamely boli zvolené ďalšie 2 lamely, ktoré sa najviac približovali hodnotám účinnosti referenčnej lamely. Týmto lamelám bola priradená pomerná hodnota vzhľadom na hodnotu referenčnej lamely pri experimentálnom meraní v laboratórnych podmienkach.



Obr. 8.2 Účinnosť jednotlivých lamiel FV snolamu pri kalibračnom meraní v laboratórnom prostredí.



Obr. 8.3 Povrchové teploty jednotlivých lamiel FV snolamu pri kalibračnom meraní v laboratórnom prostredí.

Tab. 8.2 Stanovenie korekčných súčiniteľov na základe kalibračného merania FV lamiel (stanovený na základe účinnosti lamiel).

Lamely	Žiarenie I_g (W/m ²)	Teplota vzduchu θ_v (°C)	Povrchová teplota lamiel θ_{HP} (°C)	Elektrický prúd I (A)	Elektrické napätie U (V)	Elektrický výkon P (W)	Účinnosť η (%)	Korekčný súčiniteľ
L1	335,78	19,26	29,12	0,101	4,056	0,409	1,318	1,185
L2			27,46	0,100	4,037	0,405	1,278	1,222
L3			27,91	0,139	5,618	0,782	2,454	nie je uvažovaná
L4			27,98	0,111	4,483	0,500	1,562	1
L5			27,72	0,129	5,203	0,673	2,118	nie je uvažovaná
L6			28,42	0,088	3,526	0,309	0,968	nie je uvažovaná

Na základe údajov získaných kalibračným meraním boli zo 6 ks meraných FV lamiel vybrané 3 ks, ktoré boli následne použité pri experimentálnom meraní v laboratórnom prostredí. Konkrétne boli vybrané FV lamely označené ako L1, L2 a L4.

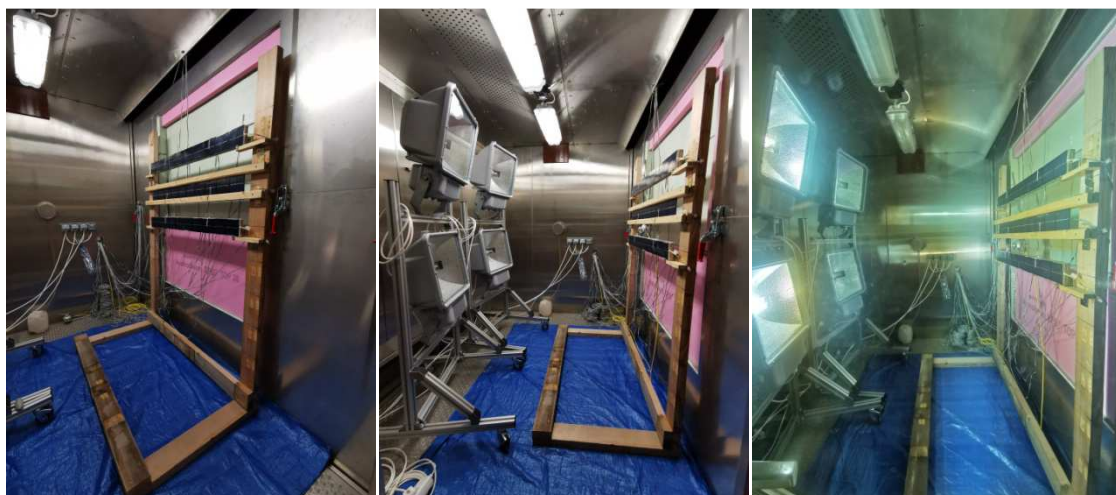
Dôvodom výberu týchto 3 konkrétnych lamiel boli ich dosiahnuté hodnoty účinnosti, ktoré sa k sebe najviac približovali.

FV lamela L4 bola použitá ako referenčná lamela (bez spojenia so zásobníkom na MFZ z hliníka) a lamely L1 a L2 boli osadené na zásobníky s MFZ. Konkrétne FV lamela označená ako L1 na zásobník, ktorý obsahoval materiál RT20 a FV lamela označená ako L2 na zásobník, ktorý obsahoval materiál RT27.

9. LABORATÓRNE MERANIA FV LAMIEL TEPELNE STABILIZOVANÝCH MFZ

Laboratórne merania vlastností FV lamiel sa uskutočnili v klimatickej komore Stavebnej fakulty STU v Bratislave. Experimentálne meranie v laboratórnych podmienkach bolo zadefinované ako:

- meranie pri ustálenej teplote vzduchu 18 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia;
- meranie pri ustálenej teplote vzduchu 12 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia;
- meranie pri ustálenej teplote vzduchu 6 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia.



Obr. 9.1 Osadenie meracieho rámu a lamiel FV slnolamu v priestore klimatickej komory.

9.1 Priebeh laboratórnych meraní a ich hodnotenie

Počas experimentálneho merania FV slnolamu tepelne stabilizovaného MFZ v laboratórnych podmienkach boli meracou ústredňou zaznamenávané podmienky v klimatickej komore.

Tab. 9.1 Priemerné hodnoty údajov pri ustálenej teplote vzduchu 18 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia.

	Žiarenie I_g (W/m ²)	Teplota vzduchu θ_v (°C)	Rýchlosť vzduchu v (m/s)	Vlhkosť vzduchu Φ (%)
Celkový priebeh	262,95	17,31	1,49	38,81
1.fáza merania	120,09	17,86	1,50	37,57
2.fáza merania	263,34	17,51	1,49	38,06
3.fáza merania	520,58	16,57	1,49	38,23
4.fáza merania	280,09	17,05	1,49	39,83
5.fáza merania	127,41	17,59	1,49	40,34

Tab. 9.2 Priemerné hodnoty údajov pri ustálenej teplote vzduchu 12 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia.

	Žiarenie I_g (W/m ²)	Teplota vzduchu θ_v (°C)	Rýchlosť vzduchu v (m/s)	Vlhkosť vzduchu Φ (%)
Celkový priebeh	268,75	11,40	1,49	52,36
1.fáza merania	124,16	11,81	1,49	50,45
2.fáza merania	273,40	11,58	1,48	51,72
3.fáza merania	536,81	10,78	1,47	47,87
4.fáza merania	285,86	11,13	1,51	54,58
5.fáza merania	131,93	11,69	1,49	57,02

Tab. 9.3 Priemerné hodnoty údajov pri ustálenej teplote vzduchu 6 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia.

	Žiarenie I_g (W/m ²)	Teplota vzduchu θ_v (°C)	Rýchlosť vzduchu v (m/s)	Vlhkosť vzduchu Φ (%)
Celkový priebeh	269,65	5,58	1,50	65,86
1.fáza merania	131,32	5,94	1,50	77,12
2.fáza merania	282,91	5,70	1,50	68,10
3.fáza merania	552,58	5,10	1,48	48,88
4.fáza merania	290,48	5,33	1,49	59,93
5.fáza merania	129,34	5,77	1,51	73,49

9.2 Výsledky a vyhodnotenie laboratórnych meraní

Na základe údajov získaných prostredníctvom laboratórneho merania FV snolamu tepelne stabilizovaného MFZ boli vyhodnotené účinnosti jednotlivých lamiel, pre celkový priebeh merania a pre jednotlivé fázy merania (pre všetky 3 samostatné meracie dni).

Počas laboratórneho merania lamiel FV snolamu boli zaznamenávané ich hodnoty pre produkciu elektrického napätia a elektrického prúdu, s ktorých boli vyjadrené hodnoty pre elektrický výkon jednotlivých lamiel a ich účinnosť v závislosti od dopadajúceho žiarenia. Na lamelách boli taktiež zaznamenávané aj ich povrchové teploty.

9.2.1 Vyhodnotenie merania pri ustálenej teplote vzduchu 18 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia

Meranie pri ustálenej teplote vzduchu 18 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia prebiehalo 29.01.2020 v čase od 10:04 do 16:04, teda 6 meracích hodín. Vyhodnotených bolo prvých 5 fáz merania, posledná 6 fáza merania slúžila na vyhotovenie fotografií termovíznou kamerou.

Tab. 9.4 Vyhodnotenie účinnosti lamiel, meranie pri 18 °C a premenlivom žiarení.

Lamely	Účinnosť η (%)	Pomer lamely k referenčnej lamele (%)
Celkový priebeh		
L1 (hr. 20 mm, RT20)	0,711	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 44,016 %
L2 (hr. 20 mm, RT27)	1,347	Účinnosť lamely L2 k L4 nižšia o 5,716 %
L4 Referenčná	1,270	-
1. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	0,312	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 50,160 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	0,998	Účinnosť lamely L2 k L4 vyššia o 37,275 %
L4 Referenčná	0,626	-
2. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	0,722	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 35,993 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,441	Účinnosť lamely L2 k L4 vyššia o 21,721 %
L4 Referenčná	1,128	-
3. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	1,407	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 47,947 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,884	Účinnosť lamely L2 k L4 vyššia o 30,230 %
L4 Referenčná	2,703	-
4. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	0,775	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 35,791 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,371	Účinnosť lamely L2 k L4 nižšia o 11,962 %
L4 Referenčná	1,207	-
5. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	0,331	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 49,848 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,037	Účinnosť lamely L2 k L4 nižšia o 36,355 %
L4 Referenčná	0,660	-

Účinnosť lamely L1 (hr. 20 mm, RT20) je v rámci celkového priebehu merania a aj v rámci jednotlivých fáz merania nižšia ako účinnosť referenčnej lamely L4. V rámci celkového

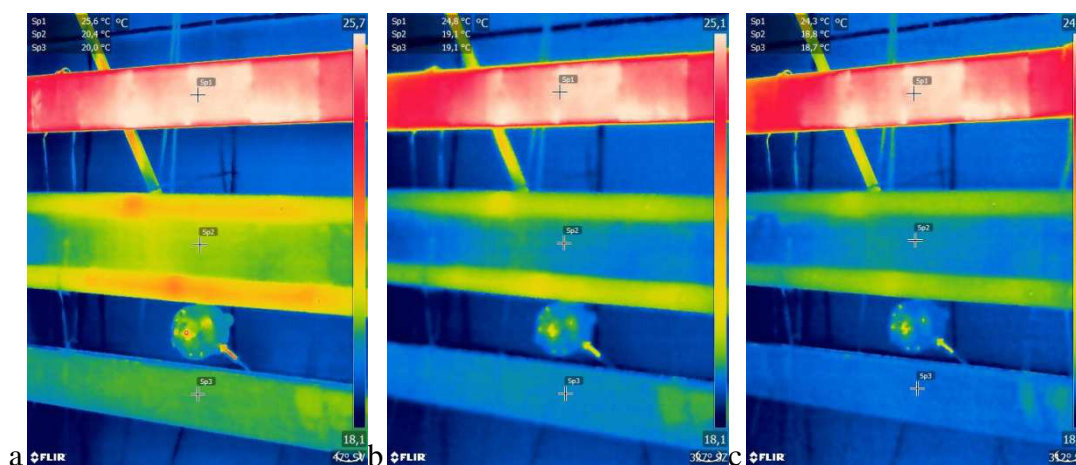
priebehu merania pre lamelu L1 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4 44,016 %.

V rámci jednotlivých meracích fáz pre lamelu L1 predstavujú rozdiely účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 50,160 % pri 1. fáze; 35,993 % pri 2. fáze; 47,947 % pri 3. fáze; 35,791 % pri 4. fáze; 49,848 % pri 5. fáze.

Účinnosť lamely L2 (hr. 20, RT27) je v rámci celkového priebehu merania vyššia ako účinnosť referenčnej lamely L4. V rámci celkového priebehu merania pre lamelu L2 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4 5,716 %.

Účinnosť lamely L2 je vyššia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fázach, pri ktorých dochádza k nábegu (fázy 1 a 2) a vo fázach, pri ktorých dochádza k vybíjaniu (fázy 4 a 5). Tieto fázy merania prebiehajú pri nižšej intenzite žiarenia (teplota v klimatickej komore je konštantná). V rámci týchto meracích fáz pre lamelu L2 predstavujú rozdiely účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 37,275 % pri 1. fáze; 21,721 % pri 2. fáze; 11,962 % pri 4. fáze; 36,355 % pri 5. fáze.

Účinnosť lamely L2 je nižšia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fáze, pri ktorej dochádza k maximálnemu zaťaženiu lamiel (fáza 3) z hľadiska dopadajúcej intenzity žiarenia (teplota v klimatickej komore je konštantná). V rámci tejto meracej fázy pre lamelu L2 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 30,230 % pri 3. fáze.



Obr. 9.2 Fotografie z termovíznej kamery po vypnutí reflektorov, meranie pri 18 °C a premenlivom žiarení (hore lamela L2, uprostred lamela L4, dole lamela L1): a) po 15 minútach; b) po 30 minútach; c) po 45 minútach.

9.2.2 Vyhodnotenie merania pri ustálenej teplote vzduchu 12 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia

Meranie pri ustálenej teplote vzduchu 12 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia prebiehalo 31.01.2020 v čase od 10:04 do 16:04, teda 6 meracích hodín. Vyhodnotených bolo prvých 5 fáz merania, posledná 6 fáza merania slúžila na vyhotovenie fotografií termovíznou kamerou.

Tab. 9.5 Vyhodnotenie účinnosti lamiel, meranie pri 12 °C a premenlivom žiarení.

Lamely	Účinnosť η (%)	Pomer lamely k referenčnej lamele (%)
Celkový priebeh		
L1 (hr. 20 mm, RT20)	0,917	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 30,266 %
L2 (hr. 20 mm, RT27)	1,457	Účinnosť lamely L2 k L4 nižšia o 9,746 %
L4 Referenčná	1,315	-
1. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	0,493	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 24,502 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,132	Účinnosť lamely L2 k L4 vyššia o 42,314 %
L4 Referenčná	0,653	-
2. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	1,262	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 5,309 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,547	Účinnosť lamely L2 k L4 vyššia o 22,753 %
L4 Referenčná	1,195	-
3. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	1,546	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 45,887 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	2,019	Účinnosť lamely L2 k L4 vyššia o 29,331 %
L4 Referenčná	2,857	-
4. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	0,840	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 33,121 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,474	Účinnosť lamely L2 k L4 nižšia o 14,790 %
L4 Referenčná	1,256	-
5. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	0,427	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 39,087 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,114	Účinnosť lamely L2 k L4 nižšia o 37,074 %
L4 Referenčná	0,701	-

Účinnosť lamely L1 (hr. 20 mm, RT20) je v rámci celkového priebehu merania nižšia ako účinnosť referenčnej lamely L4. V rámci celkového priebehu merania pre lamelu L1 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4 30,266 %.

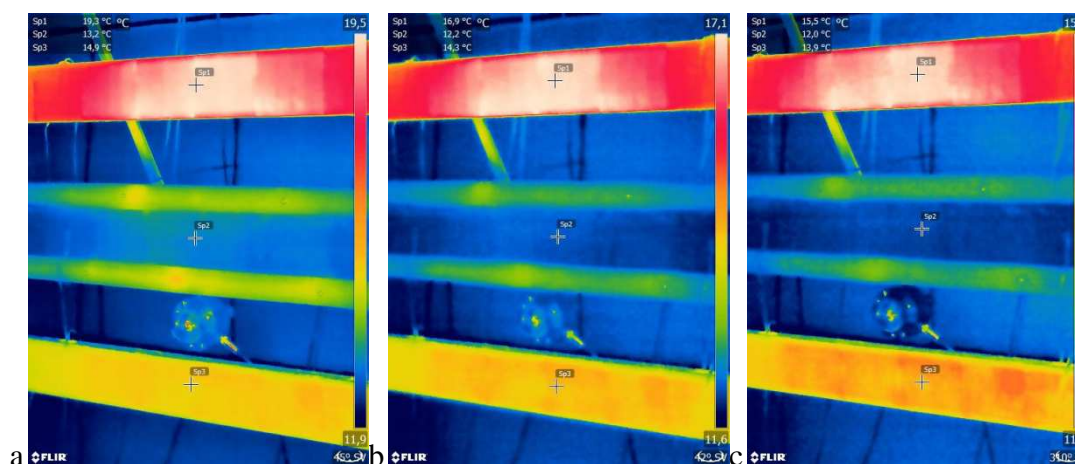
Účinnosť lamely L1 je vyššia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fáze 2, ktorá je v poradí druhá z nábehových fáz. Táto fáza merania prebieha pri nižšej intenzite žiarenia, teplota v klimatickej komore je konštantná. V rámci tejto meracej fázy pre lamelu L1 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 5,309 % pri 2. fáze.

Účinnosť lamely L1 je nižšia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fáze 1, ktorá je v poradí prvá z nábehových fáz. Taktiež vo fáze 3, pri ktorej dochádza k maximálnemu zaťaženiu lamiel z hľadiska dopadajúcej intenzity žiarenia (teplota v klimatickej komore je konštantná) a pri oboch fázach (fázy 4 a 5), pri ktorých dochádza k vybíjaniu. V rámci týchto meracích fáz pre lamelu L1 predstavujú rozdiely účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 24,502 % pri 1. fáze; 45,887 % pri 3. fáze; 33,121 % pri 4. fáze; 39,087 % pri 5. fáze.

Účinnosť lamely L2 (hr. 20, RT27) je v rámci celkového priebehu merania vyššia ako účinnosť referenčnej lamely L4. V rámci celkového priebehu merania pre lamelu L2 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4 9,746 %.

Účinnosť lamely L2 je vyššia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fázach, pri ktorých dochádza k nábehu (fázy 1 a 2) a vo fázach, pri ktorých dochádza k vybíjaniu (fázy 4 a 5). Tieto fázy merania prebiehajú pri nižšej intenzite žiarenia (teplota v klimatickej komore je konštantná). V rámci týchto meracích fáz pre lamelu L2 predstavujú rozdiely účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 42,314 % pri 1. fáze; 22,753 % pri 2. fáze; 14,790 % pri 4. fáze; 37,074 % pri 5. fáze.

Účinnosť lamely L2 je nižšia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fáze, pri ktorej dochádza k maximálnemu zaťaženiu lamiel (fáza 3) z hľadiska dopadajúcej intenzity žiarenia (teplota v klimatickej komore je konštantná). V rámci tejto meracej fázy pre lamelu L2 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 29,331 % pri 3. fáze.



Obr. 9.3 Fotografie z termovíznej kamery po vypnutí reflektorov, meranie pri 12 °C a premenlivom žiarení (hore lamela L2, uprostred lamela L4, dole lamela L1): a) po 15 minútach; b) po 30 minútach; c) po 45 minútach.

9.2.3 Vyhodnotenie merania pri ustálenej teplote vzduchu 6 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia

Meranie pri ustálenej teplote vzduchu 6 °C a meniacej sa intenzite simulovaného slnečného žiarenia prebiehalo 03.02.2020 v čase od 12:14 do 18:14, teda 6 meracích hodín. Vyhodnotených bolo prvých 5 fáz merania, posledná 6 fáza merania slúžila na vyhotovenie fotografií termovíznou kamerou.

Tab. 9.6 Vyhodnotenie účinnosti lamiel, meranie pri 6 °C a premenlivom žiarení.

Lamela	Účinnosť η (%)	Pomer lamely k referenčnej lamele (%)
Celkový priebeh		
L1 (hr. 20 mm, RT20)	1,122	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 16,766 %
L2 (hr. 20 mm, RT27)	1,630	Účinnosť lamely L2 k L4 nižšia o 17,301 %
L4 Referenčná	1,348	-
1. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	0,541	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 24,757 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,242	Účinnosť lamely L2 k L4 vyššia o 42,110 %
L4 Referenčná	0,719	-
2. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	1,323	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 4,233 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,753	Účinnosť lamely L2 k L4 vyššia o 27,724 %
L4 Referenčná	1,267	-
3. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	2,085	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 30,500 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	2,491	Účinnosť lamely L2 k L4 vyššia o 16,967 %
L4 Referenčná	3,000	-
4. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	1,337	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 5,684 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,609	Účinnosť lamely L2 k L4 nižšia o 21,628 %
L4 Referenčná	1,261	-
5. fáza merania		
L1 (hr. 20mm, RT20)	0,503	Účinnosť lamely L1 k L4 nižšia o 25,481 %
L2 (hr. 20mm, RT27)	1,181	Účinnosť lamely L2 k L4 nižšia o 42,845 %
L4 Referenčná	0,675	-

Účinnosť lamely L1 (hr. 20 mm, RT20) je v rámci celkového priebehu merania nižšia ako účinnosť referenčnej lamely L4. V rámci celkového priebehu merania pre lamelu L1 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4 16,766 %.

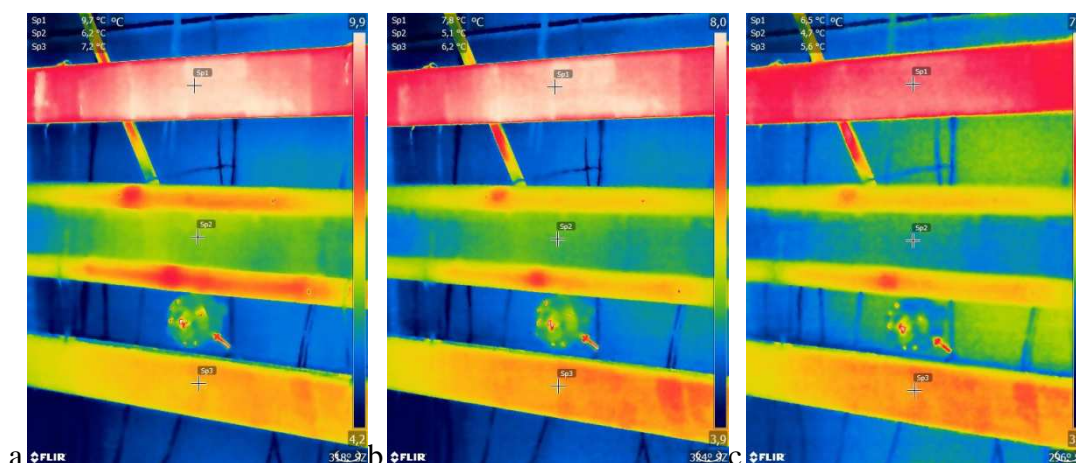
Účinnosť lamely L1 je vyššia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fáze 2, ktorá je v poradí druhá z nábehových fáz a vo fáze 4, ktorá je v poradí prvá z fáz pri ktorých dochádza k vybíjaniu. Tieto fázy merania prebiehajú pri nižšej intenzite žiarenia (teplota v klimatickej komore je konštantná). V rámci týchto meracích fáz pre lamelu L1 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 4,233 % pri 2. fáze; 5,684 % pri 4. fáze.

Účinnosť lamely L1 je nižšia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fáze 1, ktorá je v poradí prvá z nábehových fáz. Taktiež vo fáze 3, pri ktorej dochádza k maximálnemu zaťaženiu lamiel z hľadiska dopadajúcej intenzity žiarenia (teplota v klimatickej komore je konštantná) a pri fáze 5, ktorá je v poradí druhou z fáz pri ktorých dochádza k vybíjaniu. V rámci týchto meracích fáz pre lamelu L1 predstavujú rozdiely účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 24,757 % pri 1. fáze; 30,500 % pri 3. fáze; 25,481 % pri 5. fáze.

Účinnosť lamely L2 (hr. 20, RT27) je v rámci celkového priebehu merania vyššia ako účinnosť referenčnej lamely L4. V rámci celkového priebehu merania pre lamelu L2 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4 17,301 %.

Účinnosť lamely L2 je vyššia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fázach, pri ktorých dochádza k nábehu (fázy 1 a 2) a vo fázach, pri ktorých dochádza k vybíjaniu (fázy 4 a 5). Tieto fázy merania prebiehajú pri nižšej intenzite žiarenia (teplota v klimatickej komore je konštantná). V rámci týchto meracích fáz pre lamelu L2 predstavujú rozdiely účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 42,110 % pri 1. fáze; 27,724 % pri 2. fáze; 21,628 % pri 4. fáze; 42,845 % pri 5. fáze.

Účinnosť lamely L2 je nižšia ako účinnosť referenčnej lamely L4 vo fáze, pri ktorej dochádza k maximálnemu zaťaženiu lamiel (fáza 3) z hľadiska dopadajúcej intenzity žiarenia (teplota v klimatickej komore je konštantná). V rámci tejto meracej fázy pre lamelu L2 predstavuje rozdiel účinnosti oproti referenčnej lamele L4: 16,967 % pri 3. fáze.



Obr. 9.4 Fotografie z termovíznej kamery po vypnutí reflektorov, meranie pri 6 °C a premenlivom žiarení (hore lamela L2, uprostred lamela L4, dole lamela L1): a) po 15 minútach; b) po 30 minútach; c) po 45 minútach.

10. ZÁVER DIZERTAČNEJ PRÁCE

Predmet dizertačnej práce spočíva v návrhu fotovoltického tieniaceho systému (slnolamu) tepelne stabilizovaného materiálom s fázovou zmenou. V rámci riešenia témy dizertačnej práce sa:

- urobili variantné návrhy fotovoltického tieniaceho systému, v ktorých sa variovali geometrické parametre tieniacich lamiel a druhu materiálov s fázovou zmenou;
- súčasťou návrhu fotovoltického tieniaceho systému boli jeho pilotné simulácie, ktorých cieľom bola optimalizácia množstva a druhu materiálu s fázovou zmenou z hľadiska teploty fázovej zmeny (skupenskej premeny);
- zrealizoval sa funkčný model fotovoltického systému, v ktorom sa uplatnili výsledky pilotných simulácií, pričom sa navrhlo niekoľko variantov tieniacich lamiel, predovšetkým z hľadiska množstva a druhu MFZ ;
- fyzikálno-technické vlastnosti zrealizovaného fotovoltického tieniaceho systému sa merali „in situ“ v reálnych klimatických podmienkach, pričom sa po určitom čase začali prejavovať poruchy systému, ktoré spôsobovala najmä vysoká teplotná rozťažnosť aplikovaného materiálu s fázovou zmenou;
- zrealizovala sa konštrukčná úprava lamiel, keď sa namiesto plastových zásobníkov MFZ použili hliníkové, pričom sa použilo aj iné lepidlo na spojenie fotovoltických prvkov s hliníkovými zásobníkmi MFZ;
- fyzikálno-technické vlastnosti nového konštrukčného riešenia fotovoltických tieniacich lamiel sa zisťovali laboratórnym meraním v klimatickej komore Stavebnej fakulty STU v Bratislave; merali sa teploty fotovoltických lamiel bez tepelnej stabilizácie a s tepelnou stabilizáciou pri dvoch rozličných teplotách fázovej zmeny a to v meniacich sa podmienkach teploty vzduchu a intenzity simulovaného slnečného žiarenia, zároveň sa merali elektrické parametre fotovoltických lamiel v meniacich sa podmienkach ich teplôt a ožiareností;
- výsledky experimentov sa analyzovali a vyhodnocovali štatistickými metódami.

11. PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE PRE VEDNÝ ODBOR

Prínosom pre rozvoj vedného odboru je samotný návrh tepelnej stabilizácie fotovoltických lamiel tieniaceho systému materiálom s fázovou zmenou. Cieľom takéhoto riešenia je znížiť najmä špičkové teploty tieniaceho systému. Zníženie teploty FV tieniaceho systému čiastočne zvyšuje jeho elektrickú účinnosť, významnejšie sú však tepelnotechnické efekty.

11.1 Poznatky získané analýzou údajov z meraní v reálnych klimatických podmienkach

Pri experimentálnych meraniach uskutočnených v reálnych klimatických podmienkach boli skúmané povrchové teploty a účinnosť fotovoltických lamiel.

Z obmedzeného rozsahu meraní, ktoré sa podarilo realizovať v reálnych klimatických podmienkach pred výskytom porúch lamiel, možno generovať niekoľko poznatkov:

- vplyv tepelnej stabilizácie fotovoltických lamiel materiálmi s fázovou zmenou sa v čase neustále dynamicky mení, pričom pri intenzívnom slnečnom žiarení dopadajúcim na tieniace zariadenie je pozitívny vplyv MFZ na zníženie teplôt FV najväčší;
- po výraznejšom znížení intenzity slnečného žiarenia, prípadne aj sprevádzanom znížením teploty okolitého vzduchu alebo zvýšením rýchlosti jeho prúdenia klesá

teplota lamely bez MFZ rýchlejšie ako teplota tepelne stabilizovaných lamiel, teplotný rozdiel závisí od kombinácie procesu ovplyvňujúcich klimatických faktorov a času ich pôsobenia, bežné rozdiely sú 5 – 6 K;

- lamely tepelne stabilizované RT20 sa v porovnaní s RT27 vplyvom slnečného žiarenia ohrievajú menej z dôvodu vyššej tepelnoakumulačnej kapacity MFZ RT20, pod vyššie uvedenými podmienkami v prípade vrstiev MFZ hrubých 40 mm sa dosahuje rozdiel teplôt 2 K, ak je hrúbka MFZ 20 mm teplotný rozdiel sa zníži na 1 K;
- teploty fotovoltických lamiel tepelne stabilizovaných MFZ si počas intenzívneho slnečného žiarenia (okolo 800 W/m^2) udržujú v porovnaní s referenčnou, tepelne nestabilizovanou lamelou, teplotu nižšiu o 4 až 5 K pri teplote okolitého vzduchu 22°C ;
- tepelná stabilizácia FV lamiel vplyvom fázovej zmeny nie je významná, lebo prebieha iba pri určitých teplotách a vzhľadom na množstvo MFZ trvá pomerne krátko (čas zmeny závisí od dynamiky zmien klimatických činiteľov, vo všeobecnosti aj v prípade 40 mm hrubého MFZ je trvanie fázovej zmeny kratšie ako 1 hodina).

Pri experimentálnych meraniach elektrických vlastností navrhnutého fotovoltického tieniaceho systému, ktoré sa uskutočnili v reálnych klimatických podmienkach, sa prejavili viaceré problémy vyplývajúce z pospájania komerčných vzoriek fotovoltických modulov do lamiel. Napriek uvedenému problému môžeme konštatovať, že:

- účinnosť konverzie slnečného žiarenia na elektrinu fotovoltickými lamelami stabilizovanými MFZ bola pri nižších intenzitách slnečného žiarenia vyššia ako účinnosť referenčnej lamely, pri vysokej intenzite slnečného žiarenia došlo k výraznému nárastu účinnosti referenčnej lamely, ktorá sa dokonca mierne zvyšovala s nárastom teploty.

11.2 Poznatky získané analýzou údajov z meraní v laboratórnych podmienkach

Pri experimentálnych meraniach uskutočnených v klimatickej komore sa zisťovali povrchové teploty a účinnosť fotovoltických lamiel stabilizovaných MFZ a bez ich tepelnej stabilizácie (referenčná lamela). Merania sa robili na inovovaných lamelách, v ktorých bol MFZ zapuzdrený v hliníkových prvkoch a menilo sa aj spájanie jednotlivých fotovoltických modulov v rámci lamiel.

Namerané priebehy teplôt na fotovoltických lamelách:

- najväčší vplyv na zníženie teplôt FV lamiel tepelne stabilizovaných MFZ oproti referenčnej lamele bez tepelnej stabilizácie počas meraní (meranie pri teplote 18°C , 12°C a 6°C) je zaznamenávaný pri vyššej intenzite dopadajúceho žiarenia (okolo 550 W/m^2), pri použití materiálu RT 20 je to v rozmedzí priemerne 11 až 16 K, pri použití materiálu RT 27 v rozmedzí priemerne 7 až 10 K;
- pri nižšej intenzite dopadajúceho žiarenia (v rozmedzí od 120 do 300 W/m^2) počas meraní je vplyv na zníženie teplôt FV lamiel tepelne stabilizovaných MFZ oproti referenčnej lamele bez tepelnej stabilizácie výrazne nižší, pri použití materiálu RT 20 je to v rozmedzí priemerne 2 až 8 K, pri použití materiálu RT 27 v rozmedzí priemerne 1 až 5 K;
- počas posledného meracieho úseku jednotlivých meraní pri nižšej intenzite dopadajúceho žiarenia (okolo 130 W/m^2), bola teplota FV lamely tepelne stabilizovanej MFZ RT27 vyššia ako teplota referenčnej lamely bez tepelnej stabilizácie z dôvodu tepelnoakumulačnej kapacity MFZ RT27 a to v rozmedzí 0,5 až 2 K.

Z hľadiska elektrických parametrov vyplýva, že:

- účinnosť fotovoltickej lamely tepelne stabilizovanej MFZ RT27 bola v rámci celkového priebehu a pri nižších intenzitách slnečného žiarenia (v rozmedzí od 120 do 300 W/m²) vyššia ako účinnosť referenčnej lamely v rámci jednotlivých meraní (meranie pri teplote 18 °C, 12 °C a 6 °C), pri vyššej intenzite slnečného žiarenia (okolo 550 W/m²) došlo k výraznému nárastu účinnosti referenčnej lamely, ktorá sa dokonca mierne zvyšovala s nárastom teploty;
- účinnosť fotovoltickej lamely tepelne stabilizovanej MFZ RT20 bola počas merania pri 18 °C v rámci celkového priebehu merania aj pri jednotlivých intenzitách žiarenia nižšia ako účinnosť referenčnej lamely;
- počas merania pri 12 °C a 6 °C bola účinnosť fotovoltickej lamely tepelne stabilizovanej MFZ RT20 vyššia ako účinnosť referenčnej lamely pri nižších intenzitách slnečného žiarenia (v rozmedzí od 120 do 300 W/m²), pri vyššej intenzite slnečného žiarenia (okolo 550 W/m²) došlo k výraznému nárastu účinnosti referenčnej lamely, ktorá sa dokonca mierne zvyšovala s nárastom teploty.

12. PRÍOS DIZERTAČNEJ PRÁCE PRE PRAX

V dizertačnej práci sa navrhol inovatívny fotovoltický tieniaci systém, ktorý využíva materiál s fázovou zmenou na stabilizáciu teplôt. Jeho praktické aplikácie možno odporúčať najmä tam, kde zníženie teplôt tieniaceho zariadenia má priaznivý efekt na energetickú bilanciu budovy a tiež na tepelnú pohodu ľudí. Ako príklady vhodných aplikácií navrhnutého tieniaceho systému možno uviesť:

- posuvné tieniace slnolamy (tzv. paravány) tieniace lodžie, kde sa jeho nižšie teploty v čase dopadu intenzívneho slnečného žiarenia pozitívne prejavujú na tepelnej pohode ľudí zdržiavajúcich sa v lodžii v dôsledku menšieho tepelného sálania paravánom;
- posuvné tienidlo pred oknami, ktoré v dôsledku jeho nižších teplôt zníži tepelné zisky sálaním oknom; z hľadiska letnej tepelnej ochrany pred prehrievaním je pri aplikácii navrhnutého tieniaceho systému významné najmä zníženie tepelného príkonu pri vetraní v čase, keď na tieniace zariadenie dopadá slnečné žiarenie a z tepelne stabilizovaného tienidla prúdi do miestnosti vzduch s nižšou teplotou v porovnaní s fotovoltickým tieniacim zariadením bez tepelnej stabilizácie.

Okrem pozitívnych tepelnotechnických vlastností inovatívneho fotovoltického tieniaceho systému je jeho prednosťou aj zvýšená účinnosť produkcie elektrickej energie v závislosti od použitého typu materiálu s fázovou zmenou a intenzity dopadajúceho slnečného žiarenia, aj keď uskutočnené experimenty ukázali iba malé zlepšenie tohto parametra.

Pri praktickom použití navrhnutého fotovoltického tieniaceho systému je potrebné konfrontovať jeho prednosti s jeho vyššou cenou v porovnaní s variantom bez tepelnej stabilizácie. Seriózne možno túto otázku riešiť iba v konkrétnych súvislostiach riešenia konkrétnej budovy.

VYBRANÝ ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Smernica č. 2012/27/EÚ Európskeho parlamentu a Rady z 25. októbra 2012 o energetickej efektívnosti, ktorou sa menia a dopĺňajú smernice 2009/125/ES a 2010/30/EÚ a ktorou sa rušia smernice 2004/8/ES a 2006/32/ES.
- [2] Dubeň, M.: *Návrh energetickej úspornej polyfunkčnej budovy s alternatívnymi zdrojmi energie*. Študentská odborná činnosť. Žilina: ZU SF, 2011
- [3] Boleman, T., Fiala, J.: *Obnoviteľné zdroje energie*. APVV, Trnava, 2009
- [4] Halúzová, D.: *Termodynamika obvodových stien z pórobetónových tvaroviek s využitím skupenského tepla*. Dizertačná práca. Bratislava: STU SvF, 2013
- [5] Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A.: *Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review*. In: *Energy and Buildings* 42, 2010, p. 1361 – 1368
- [6] Ponechal, R.: *Experimentálny výskum a numerické simulácie vplyvu materiálu s fázovou zmenou na tepelný stav vnútorného prostredia administratívnych priestorov*. Dizertačná práca. Bratislava: STU SvF, 2007
- [7] Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D.: *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, p. 318 – 345
- [8] Sunliang, C.: *State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings*. Master's Thesis. University of Jyväskylä, 2010
- [9] Schossig, P., Henning, H.M., Gschwander, S., Haussmann, T.: *Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials*. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, p. 297 – 306
- [10] Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., Di, H.: *Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State – of – the – art and outlook*. In: *Building and Environment* 42, 2007, p. 2197 – 2209
- [11] Socaciu, L.G.: *Thermal Energy Storage with Phase Change Material*. In: *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 2012, p. 75 – 98
- [12] Ahmad, M. et al.: *Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material*. In: *Energy and Buildings* 38, 2006, p. 357 – 366
- [13] Jaworski, M., Abeid, S.: *Thermal conductivity of gypsum with incorporated phase change material (PCM) for building applications*. In: *Journal of Power Technologies* 91, 2011, p. 49 – 53
- [14] Behzadi, S., Farid, M.M.: *Experimental and numerical investigations on the effect of using phase change materials for energy conservation in residential buildings*. In: *HVAC and Research* 17, 2011, p. 366 – 376

- [15] Zhang, Ch. et al.: *Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures*. In: Energy and Buildings 43, 2012, p. 3514 – 3520
- [16] Skoplaki, E., Palyvos, J.A.: *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/ power correlations*. In Solar Energy 83, 2009, p. 614 – 624
- [17] Huang, M.J., Eames, P.C., Norton, B.: *Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials*. In: International Journal of Heat and Mass Transfer 47, 2004, p. 2715 – 2733
- [18] Jungwoo, P., Taeyeon, K., Seung-bok, L.: *Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-building-added photovoltaics considering the annual weather conditions*. In: Solar Energy 105, 2014, p. 561 – 574
- [19] Hasan, A., McCormack, S.J., Huang, M.J., Norton, B.: *Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics*. In: Solar Energy 84, 2010, p. 1601 – 1612
- [20] Huang, M.J., Eames, P.C., Norton, B.: *Experimental performance of phase change materials for limiting temperature rise building integrated photovoltaics*. In: Journal of Solar Energy 80, 2006

PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA

Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

JEDINAK, R., 2016. Preliminary proposal of a shading system composed of photovoltaic modules and phase change material. *In Applied Mechanics and Materials: Advanced Architectural Design and Construction. Vol. 820, pp. 218–223. ISSN 1660-9336.*

Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

JEDINAK, R., 2014. Energy efficiency of building envelopes. *In Advanced Materials Research [electronic source] Advanced Building Construction and Materials II, Special topic volume with invited peer reviewed papers only. Vol. 1057, CD-ROM, pp. 39–42. ISSN 1662-8985.*

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

JEDINAK, R. and HRAŠKA, J., 2013. Buildings envelopes with near – zero energy consumption. *In ATF 2013 [electronic source]: e-book of reviewed papers. 2nd Conference on Acoustics, Light and Thermal Physics in Architecture and Building Structures, Leuven, Belgium, 2.–3.5.2013. 1. vol. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2013, CD-ROM, pp. 181–184. ISBN 978-90-8649-637-2.*

JEDINAK, R. and HRAŠKA, J., 2014. Photovoltaic modules in building envelopes with phase change materials. *In ATF 2014 [electronic source]: e-book of reviewed papers. 3rd Conference on Building Physics and Applied Technology in Architecture and Building Structures, Vienna, Austria, 6.–7.5.2014. 1. vol. Viedeň: TGM – Federal Institute of Technology, 2014, CD-ROM, pp. 170–174. ISBN 978-3-200-03644-4.*

JEDINAK, R., 2015. Preparation of experimental measurements of shading system using photovoltaic modules and phase change materials. *In Advanced Building Construction and Materials 2015 (ABCM 2015) [electronic source]: Proceedings of the scientific conference with international participation. Strážnice, ČR, 25.–27.6.2015. 1. vol. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering, 2015, CD-ROM, pp. 127–134. ISBN 978-80-248-3860-1.*

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

JEDINAK, R. and HRAŠKA, J. and DOLOEŽEL, M., 2013. *In enviBUILD Buildings and environment 2013 [elektronický zdroj]: Zborník z medzinárodnej vedeckej konferencie, 17.10.2013, Bratislava. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013, pp. 107-111. ISBN 978-80-227-4070-8.*

JEDINAK, R., 2013. Obalové konštrukcie budov s nízkou spotrebou energií. *In Advances in architectural, civil and environmental engineering [electronic source]: 23rd Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics. Bratislava, SR, 30.10.2013. 1. vol. Bratislava:*

Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013, CD-ROM, pp. 556–561. ISBN 978-80-227-4102-6.

JEDINAK, R., 2014. Predbežný návrh tieniaceho systému využívajúceho fotovoltické moduly a materiál s fázovou zmenou. *In Advances in architectural, civil and environmental engineering [electronic source]: 24th Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics. 1. vol. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013, CD-ROM, pp. 667–675. ISBN 978-80-227-4301-3.*

JEDINAK, R., 2015. Príprava experimentálneho merania tieniacej lamely využívajúcej fotovoltické moduly a materiál s fázovou zmenou. *In Advances in architectural, civil and environmental engineering [electronic source]: 25th Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics. Bratislava, SR, 28.10.2015. 1. vol. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015, CD-ROM, pp. 601–608. ISBN 978-80-227-4514-7.*