

Ing. Nikola POKORNÝ¹⁾
 Ing. Viacheslav SHELIN¹⁾
 doc. Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D.^{1,2)}

¹⁾ ČVUT v Praze, Univerzitní
 centrum energeticky efektivních
 budov

²⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí

Recenzenti:

doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.
 doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph.D.

Modelování provozu nezasklených FVT kolektorů během noci

Modelling of Unglazed PVT Collectors Operation during the Night

Článek představuje potenciální přínos nezasklených hybridních fotovoltaicko-tepelných (FVT) kolektorů během nočního provozu, kdy může kolektor teplo předávat do okolí nejen konvekcí, ale i sáláním vůči obloze, může být tedy provozován jako zdroj chladu. Za účelem simulační analýzy byl experimentálně ověřen matematický model nezaskleného FVT kolektoru implementovaného do simulačního prostředí TRNSYS. Teoreticky stanovený chladicí zisk byl srovnán s naměřenými daty na komerčně dostupných nezasklených hybridních kolektorech. Model byl následně využit pro stanovení ročního chladicího zisku různých konstrukčních variant hybridních kolektorů v klimatických podmínkách Arabského poloostrova. Vzhledem k možnosti využití nezasklených FVT kolektorů i v evropských klimatických podmínkách je v závěru uvedeno porovnání chladicího zisku pro tři evropské lokality během letního období. Na trhu běžně dostupné hybridní kolektory mohou dosáhnout průměrného chladicího výkonu okolo 110 W/m² při konstantní teplotě chladicí vody 20 °C pro klimatické podmínky střední a severní Evropy, v jižní Evropě pro stejné provozní podmínky lze dosáhnout průměrného chladicího výkonu okolo 38 W/m².

Klíčová slova: nezasklený FVT kolektor, noční chlazení

The paper introduces potential benefit of unglazed photovoltaic-thermal collectors (PVT) during night operation, when the collector can be cooled down by convection and radiation towards the sky. Simulation analysis of the cooling gains of unglazed PVT collectors have been carried out. Mathematical model of unglazed PVT collector was experimentally validated and implemented into TRNSYS. Theoretical calculated cooling gain for commercially available unglazed PVT collectors has been compared with experimental results from testing. Developed model was used for simulation analysis of different PVT collector designs for climate conditions of Arabian Peninsula. Moreover, simulation analyses of the cooling performance for different European climate have been performed. While best of tested unglazed PVT collectors can achieve average specific cooling power around 110 W/m² at chilled water temperature 20 °C in the climate conditions of central and northern Europe, in the climate conditions of south Europe these unglazed PVT collectors achieve not more than 38 W/m² during summer season (June-August).

Keywords: unglazed PVT collector, night cooling

ÚVOD

Nezasklené hybridní fotovoltaicko-tepelné (FVT) kolektory jsou technologií původně vyvinutou za účelem zvýšení účinnosti produkce elektrické energie fotovoltaickými (FV) články. Použitím tepelného absorbéru ve funkci chladiče FV článků s dobrým tepelným kontaktem je možné prostřednictvím dostatečně chladné kapaliny udržovat provozní teplotu FV technologie na nízké úrovni. Tím je možné zvýšit jejich roční produkci elektrické energie o několik procent podle lokality, kde jsou kolektory instalovány. Z pohledu tepelných zisků mají nezasklené FVT kolektory relativně vysoké tepelné ztráty a jejich použití pro účely ohřevu je omezeno na aplikace s nízkými provozními teplotami nebo v teplejších oblastech. Nezasklené FVT kolektory jsou vhodné zejména pro aplikace, u kterých je prioritou produkce elektrické energie a využití nízkopotenciálního tepla je pouze přidanou hodnotou. Proto se většinou používají v soustavách v kombinaci s tepelnými čerpadly, kde slouží pro předehřev kapaliny v primárním okruhu výparníku. Další možnou aplikací je ohřev bazénové vody nebo předehřev studené vody. Vysoké tepelné ztráty nezasklených FVT kolektorů lze však využít během noci, kdy může kolektor ztrácet teplo vůči jasné chladnější obloze. Noční radiální chlazení hybridními FVT kolektory bylo již popsáno a použito např. pro dům postavený v rámci soutěže Solar Decathlon 2010 Univerzitou ve Stuttgartu [1]. Nezasklené hybridní kolektory vychlazovaly v tomto objektu strop obsahující prvky s materiálem se změnou skupenství.

V rámci vývoje autonomního zařízení pro získávání vody ze vzduchu v pouštních podmínkách [2] v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Praze byly jako součást systému navrženy hybridní

nezasklené kolektory pro produkci elektrické energie, ohřev vody při nízkých provozních teplotách a pro noční chlazení (solární trigeneraci – produkce elektřiny, tepla a chladu). Kolektor protékající teplotou látkou ohřátou odpadním teplem ze systému cíleně ztrácí teplo zejména sáláním vůči jasné obloze, kdy teplota oblohy v případě pouštních oblastí může dosahovat i záporných hodnot. Jelikož noční radiální chlazení hybridními FVT kolektory není běžná aplikace, bylo nutné provést experimentální měření a simulační výpočty pro porovnání možných variant. Vzhledem k tomu, že nezasklené hybridní FVT kolektory, na rozdíl od zasklených FVT kolektorů, jsou v současné době běžně dostupné na evropském trhu, byly vybrány dva vzorky s různou konstrukcí. Navíc se parametry nezasklených hybridních kolektorů na trhu významně liší a bylo potřeba ověřit, kterou konstrukci zvolit pro nasazení v klimatických podmínkách Arabského poloostrova. V závěru bylo provedeno porovnání chladicího zisku i pro evropské lokality vzhledem k možnosti nasazení hybridních kolektorů v letním období.

MODEL NEZASKLENÉHO FVT KOLEKTORU

V aktuální knihovně simulačního prostředí TRNSYS je dostupný zjednodušený fyzikální model FVT kolektoru typu 50b [3]. Dále existuje typ 203, kde jsou vstupními parametry výsledky z normových zkoušek. Ani jeden z modelů však není vhodný z hlediska simulace nočního chladicího výkonu hybridních FVT kolektorů. Dostupné modely v prostředí TRNSYS nezohledňují rozdíl mezi teplotou okolního vzduchu a teplotou oblohy pro výpočet sálavého ztrátového výkonu (chladicího výkonu).

Proto byl vytvořen nový matematický model nezaskleného hybridního FVT kolektoru (type 233) implementovaný do simulačního prostředí TRNSYS. Model vychází z vnější a vnitřní energetické bilance. Vnější bilance řeší přestup tepla mezi okolím a absorbér, vnitřní řeší přestup tepla z absorbérů do teplotnosné kapaliny. Aby bylo možné stanovit součinitel přestupu tepla sáláním h_r [W/m².K] i v případě, kdy je teplota okolí rovna teplotě absorbér, byl využit vztah:

$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon_{\text{abs}} \cdot (T_{\text{abs}}^2 + T_o^2) \cdot (T_{\text{abs}} + T_o) \quad (1)$$

kde je:

- σ Stefan-Boltzmannova konstanta [W/m².K⁴],
- ε_{abs} emisivita povrchu FVT absorbérů [-],
- T_{abs} povrchová teplota absorbérů [K],
- T_o teplota oblohy [K].

Zároveň s přestupem tepla sáláním působí i přestup tepla konvekcí, který může v chlazení významně pomoci (v případě teploty okolního vzduchu nižší než teplota kapaliny), nebo naopak působit proti ztracení tepla sáláním (v případě teploty okolního vzduchu vyšší než teplota kapaliny). Součinitel přestupu tepla konvekcí vlivem proudění vzduchu h_k [W/m².K] mezi absorbér a okolím se stanoví podle korelace od McAdamse [4] podle vztahu:

$$h_k = 5,7 + 3,8 \cdot w \quad (2)$$

kde w je rychlost větru [m/s].

Vztah je platný pro rychlost větru menší než 5 m/s. Dále model zohledňuje vlastnosti absorbérů účinnostním činitelem kolektoru F' [-]. Přenosový součinitel kolektoru F_R [-] odvozený v [5], díky kterému lze výkon vztáhnout ke vstupní teplotě do kolektoru, se stanoví podle vztahu:

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c}{A_k \cdot U} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_k \cdot U \cdot F'}{\dot{m} \cdot c}\right) \right] \quad (3)$$

kde je:

- A_k plocha kolektoru [m²],
- \dot{m} hmotnostní průtok kolektorem [kg/s],
- U celkový součinitel prostupu tepla kolektoru [W/m².K].

Chladicí výkon během noci lze stanovit na základě bilance tepelných toků pro plně smáčený absorbér. Aby bylo možné zohlednit i vlastnosti absorbérů, byl pro stanovení chladicího výkonu upraven vztah pro stanovení výkonu kolektoru během dne popsáný v [5]. Ve vztahu pro chladicí výkon bylo nahrazeno dopadlé sluneční záření za sálavý výkon vyzařovaný vůči obloze během noci. Obdobný postup pro stanovení chladicího výkonu byl použit například v [6]. Chladicí výkon kolektoru \dot{Q}_{ch} [W] během noci se pak stanoví podle vztahu:

$$\dot{Q}_{\text{ch}} = F_R \cdot A_k \left[-\sigma \cdot \varepsilon_{\text{abs}} \cdot (T_{\text{abs}}^4 - T_o^4) - U \cdot (T_{\text{kl}} - T_e) \right] \quad (4)$$

kde je:

- T_{kl} teplota kapaliny na vstupu do kolektoru [K],
- T_e teplota venkovního vzduchu [K].

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Matematický model nezaskleného FVT kolektoru byl porovnán se čtyřmi testovanými variantami kolektorů. Byla zvolena jedna referenční varianta (REF), nezasklený tepelný solární kolektor, tvořený dvěma sériově zapojenými plně smáčenými absorbéry bez FV článků s černým povlakem

s emisivitou 0,925, viz obr. 1. Materiál kolektoru je ocel s tepelnou vodivostí okolo 70 W/m.K. Konstrukce referenčního kolektoru tak vykazuje velmi dobrý přestup tepla. Celková plocha referenčního kolektoru je 1,44 m².

Dále byl testován hybridní FVT kolektor (VAR2), který se vyznačuje také plně smáčeným absorbér, avšak z polypropylenu o tepelné vodivosti přibližně 0,22 W/m.K. Absorbér má 165 kanálků o vnitřním průměru 3,5 mm. Celková plocha kolektoru je 1,65 m².

Jako poslední varianta byl testován FVT kolektor (VAR1), jehož výměník je tvořen hliníkovým plechem, na který je laserově přivařen měděný trubkový registr. Trubkový registr se skládá z osmi trubek o vnitřním průměru 7 mm ve vzdálenosti 13 cm od sebe. Celková plocha kolektoru je 1,65 m². Byla testována varianta bez použití izolace a s použitím izolace (IVAR1), aby bylo možné zhodnotit také přínos aplikace tepelné izolace na noční chladicí výkon (viz obr. 3).

Kolektory byly měřeny v solární laboratoři na střeše Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze. Byly měřeny teploty na vstupu a výstupu z kolektoru, dále průtok kolektorem a meteorologické veličiny (teplota venkovního vzduchu, atmosférický tlak, relativní vlhkost, rychlost větru, radiační tepelný tok). Schéma zapojení měřicí tratě je znázorněno na obr. 4. Průtok kolektory byl ve všech případech udržován 40 kg/h.m².

Naměřená data byla porovnána s teoreticky stanoveným simulačním modelem za stejných podmínek. Na obr. 5 a 6 je vyneseno porovná-



Obr. 1 Referenční nezasklený kolektor

Fig. 1 Reference unglazed collector



Obr. 2 Nezasklený FVT kolektor VAR2

Fig. 2 Unglazed PVT Collector VAR2



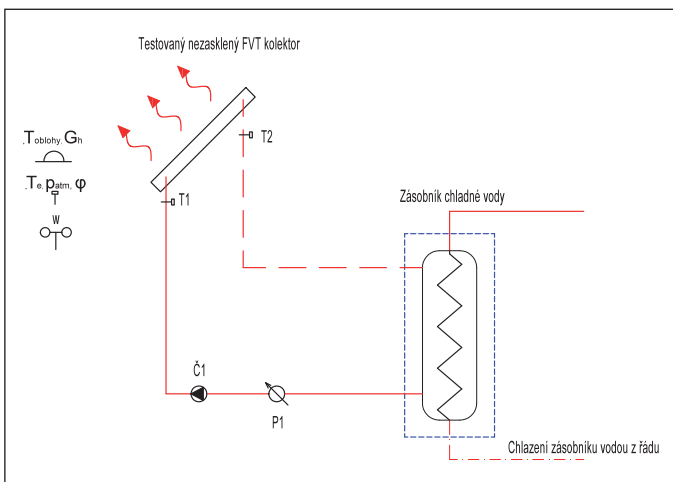
Obr. 3 Nezasklený FVT kolektor VAR1(vlevo) a IVAR (vpravo)

Fig. 3 Unglazed PVT collector VAR1 (left) and IVAR (right)



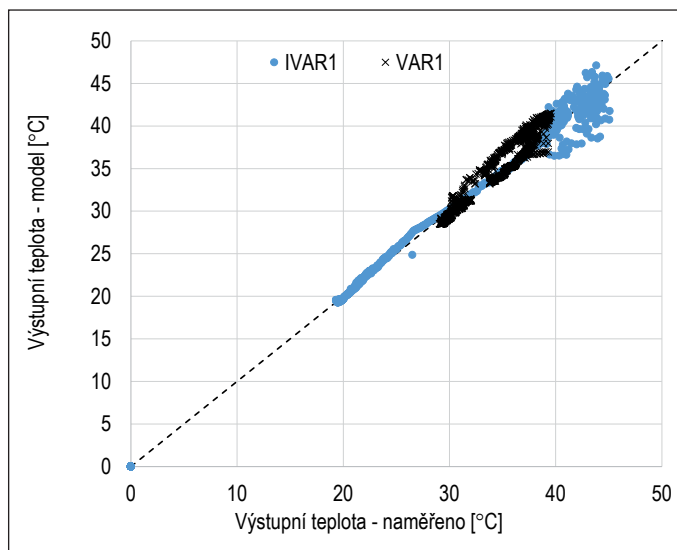
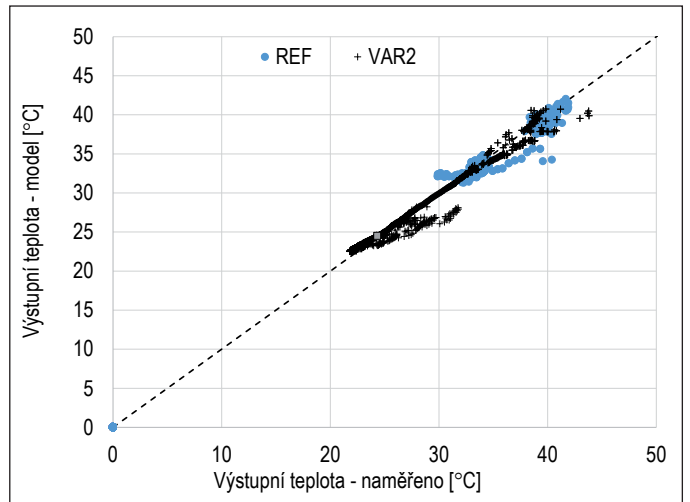
Obr. 4 Schéma zapojení měřicí tratě

Fig. 4 Schematic diagram of the measuring track



Obr. 6 Porovnání naměřené a modelované teploty na výstupu z kolektoru pro REF a VAR2

Fig. 6 Comparison of measured and modelled temperature at the collector outlet for REF a VAR2



Obr. 5 Porovnání naměřené a modelované teploty na výstupu z kolektoru pro VAR1 a IVAR1

Fig. 5 Comparison of measured and modelled temperature at the collector outlet for VAR1 and IVAR1

ní naměřené a modelované výstupní teploty. Model vykazoval dobrou shodu ve všech čtyřech variantách konstrukce kolektorů. V některých případech model vykazuje větší odchylky z důvodu neuvažování tepelné setrvačnosti kolektoru. Ověřený model byl následně využit pro simulace v prostředí TRNSYS.

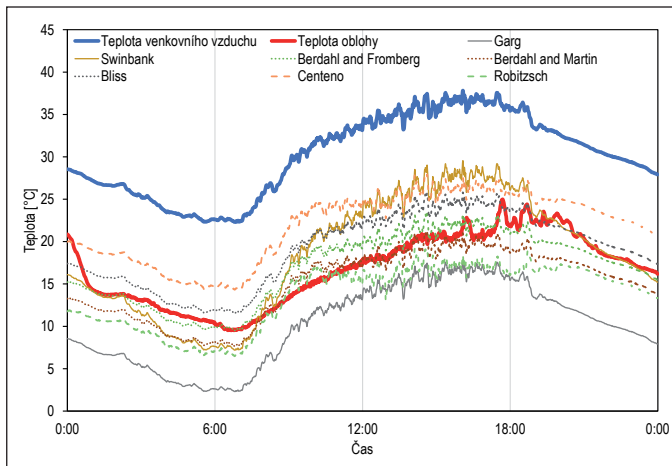
TEPLOTA OBLOHY

Radiační chlazení oblohy lze chápat jako ztrátu tepla dlouhovlnným zářením vůči obloze. Existuje řada modelů a korelací pro stanovení teploty oblohy. Aby bylo možné porovnat teoreticky stanovenou teplotu oblohy s naměřenou, byla teplota stanovena na základě tepelného toku sáláním \dot{Q}_o [W/m²] vůči obloze měřeného pyrgeometrem. Teplota oblohy se pak stanoví podle vztahu:

$$T_o = \left(\frac{\dot{Q}_o}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

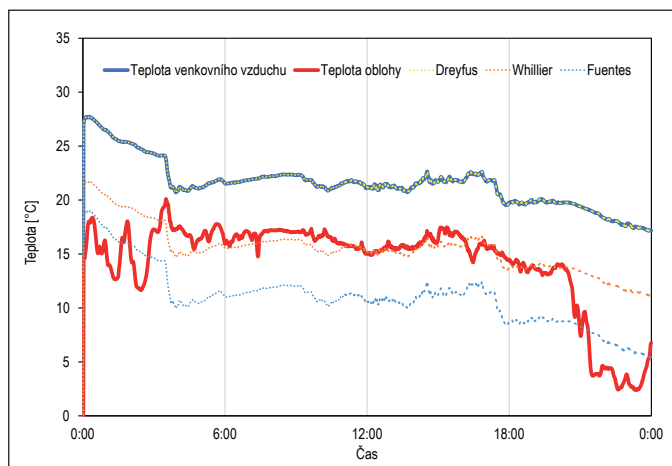
Bylo nutné vyhodnotit, které korelace je výhodnější do budoucna použít pro roční simulace FVT kolektorů za účelem nočního radičního chlazení. Použité korelace byly převzaty z [7]. Korelace pro teplotu oblohy lze rozdělit na přímé a nepřímé modely. Přímé modely uvažují pouze závislost na okolní teplotě. Nepřímé modely uvažují závislost na teplotě rosného bodu nebo parciálním tlaku vodní páry během jasného dne, v případě oblačných dnů je navíc uvažován poměr jasné oblohy ku oblačné obloze. Na obr. 7 je vyneseno srovnání korelací a naměřené teploty oblohy. Čárkované čáry představují korelace, které jsou závislé na parciálním tlaku vodní páry. Tečkované čáry jsou závislosti teploty oblohy na teplotě rosného bodu. Vzhledem k silné závislosti teploty oblohy na vzdušné vlhkosti vykazují nepřímé korelace daleko lepší shodu oproti přímým.

Na obr. 8. je vyneseno porovnání korelací a naměřené teploty oblohy pro oblačný den. Pro oblačný den bylo provedeno srovnání s přímými korelacemi. Některé nepřímé korelace vyžadují jako vstup podíl oblačné plochy na obloze. Tato hodnota však během měření nebyla vyhodnocována. Přesto je z průběhu patrné, že pro oblačnou noc je průběh nepřímé korelace v relativně dobré shodě s naměřenými daty. Pro jasný den vykazovala korelace od Berdahla a Fromberga nejmenší odchylku od naměřené hodnoty. V případě oblačné noci vykazovala nejmenší odchylku korelace od Whilliera.



Obr. 7 Porovnání naměřené teploty oblohy a teploty stanovené na základě korelace pro jasnou noc

Fig. 7 Comparison of measured sky temperature and temperature determined on the basis of the clear night correlation



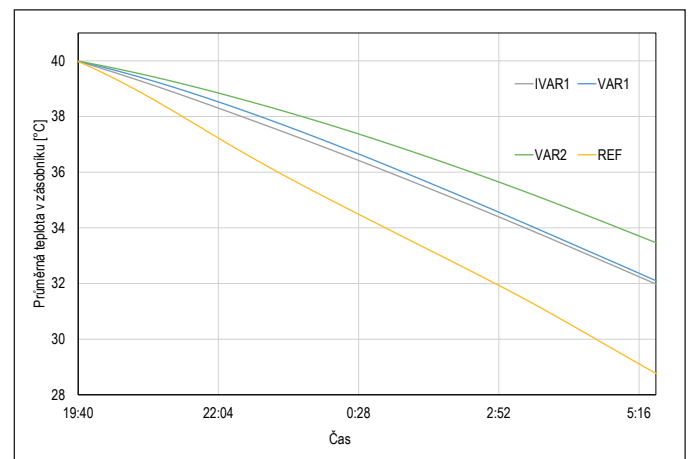
Obr. 8 Porovnání naměřené teploty oblohy a teploty stanovené na základě korelace pro oblačnou noc

Fig. 8 Comparison of measured sky temperature and temperature determined on the basis of the cloudy night correlation

SIMULAČNÍ ANALÝZA

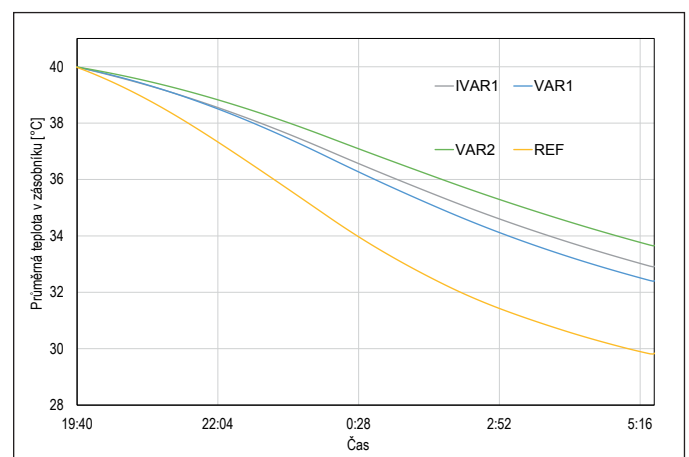
V rámci analýzy provozního chování autonomního zařízení pro získávání vody ze vzduchu v pouštních podmínkách byla provedena zjednodušená simulační analýza pro jeden konkrétní letní den v Dubaji a Rijádu. Byl uvažován akumulční zásobník o objemu 100 l homogenně ohřátý na teplotu 40 °C, který je během noci vybíjen kolektory o ploše 2 m². Průtok kapaliny kolektorem byl nastaven na 30 l/h.m². Byl sledován pokles průměrné teploty v zásobníku, resp. na jakou teplotu jsou kolektory schopné během noci zásobník vychladit. Na obr. 9 a 10 lze vidět průběh snížení teploty v zásobníku během noci pro klimatické podmínky v Dubaji a Rijádu. Z výsledků je patrné, že v obou variantách vykazuje nejmenší teplotu v zásobníku dosaženou za noc komerčně dostupný nezasklený FVT kolektor s trubkovým registrem na zadní straně. Naopak hybridní kolektor s plastovým absorberem vychladil zásobník nejméně.

Další simulační analýzou bylo sledování měrného ročního chladicího zisku pro klimatické podmínky v Dubaji a Rijádu. Pro zjednodušení byla uvažována konstantní provozní teplota během roku. V tab. 1 a 2 je uveden souhrn výsledků pro všechny testované nezasklené FVT kolektory. Pro obě klimatické oblasti vychází jako nejvhodnější varianta hybridní kolektor VAR1 s trubkovým registrem. Varianta s izolací na zadní straně kolektoru vykazuje srovnatelný chladicí výkon jako varianta bez izolace. Referenční varianta dává pochopitelně nejvyšší zisk, zatímco hybridní kolektory v obou klimatických podmínkách vykazují chladicí zisky nižší.



Obr. 9 Noční vychlazování zásobníku (Rijád)

Fig. 9 Night cooling of the storage (Riyadh)



Obr. 10 Noční vychlazování zásobníku (Dubaj)

Fig. 10 Night cooling of the storage (Dubai)

Tab. 1 Měrný roční chladicí zisk pro klimatické podmínky v okolí Dubaje

Tab. 1 Specific annual cooling gain for climatic conditions in the vicinity of Dubai

Roční provozní teplota [°C]	REF	VAR1	IVAR1	VAR2
	Měrný roční chladicí zisk [kWh/m ² .rok]			
20	41	26	23	19
30	329	211	175	152
40	981	632	500	452

Tab. 2 Měrný chladicí zisk pro klimatické podmínky v Rijádu

Tab. 2 Specific annual cooling gain for climatic conditions of Riyadh

Roční provozní teplota [°C]	REF	VAR1	IVAR1	VAR2
	Měrný roční chladicí zisk [kWh/m ² .rok]			
20	150	83	72	61
30	539	322	261	235
40	1250	766	602	556

SIMULAČNÍ ANALÝZA PRO EVROPSKÉ PODMÍNKY

Dále byla provedena analýza pro evropské klimatické podmínky. Simulace byly provedeny pro typický meteorologický rok (TMY) pro Prahu, Madrid a Stockholm. Bylo analyzováno období od 1. června do 31. srpna, protože z hlediska celoročního provozu by průměrný chladicí výkon nebyl reprezentativní. Chladicí výkon by během zimního období byl velmi vysoký díky nízké teplotě okolního vzduchu (chlazení zejména konvekci), ale jeho využitelnost by byla velmi omezená (minimální tepelná zátěž v budovách v zimním období). Pro první analýzu byl zvolen systém o ploše 80 m², který vychlazoval zásobník o objemu 2000 l. Bylo uvažováno, že každou noc se začal vychlazovat zásobník z teploty 40 °C. Hmotnostní průtok kolektorem byl uvažován 40 l/h.m². Chladicí zisk během letního období je uveden v tab. 3. Z výsledků je patrné, že nejvyšší chladicí zisk vykazuje referenční varianta, nicméně rozdíly mezi jednotlivými variantami jsou od 11 % do 25 %.

Tab. 3 Porovnání letního chladicího zisku (2000 l, 80 m²)

Tab. 3 Comparison of summer cooling gain (2000 l, 80 m²)

	REF	VAR1	IVAR1	VAR2
	Měrný chladicí zisk [kWh/m ² .sezóna]			
Stockholm	84	75	68	62
Praha	82	75	71	65
Madrid	72	64	62	56

Tab. 4 Porovnání letního chladicího zisku pro konstantní provozní teplotu 20 °C

Tab. 4 Comparison of summer cooling gain for a constant operating temperature of 20 °C

	REF	VAR1	IVAR1	VAR2
	Měrný chladicí zisk [kWh/m ² .sezóna]			
Stockholm	232	79	56	55
Praha	226	77	55	52
Madrid	76	27	25	19

Další simulace byly provedeny pro konstantní teplotu do kolektoru během letního období (bez zapojení na zásobník), která byla uvažována 20 °C. Porovnání je uvedeno v tab. 4. Testované hybridní kolektory mohou dosáhnout průměrného chladicího výkonu okolo 110 W/m² při konstantní provozní teplotě 20 °C pro klimatické podmínky střední a severní Evropy; v jižní Evropě pro stejné provozní podmínky lze dosáhnout průměrného chladicího výkonu okolo 38 W/m². Referenční kolektor vykazuje průměrný chladicí výkon pro střední a severní Evropu 325 W/m² za sezónu. Je tedy velký potenciál pro možné úpravy konstrukce nezasklených hybridních kolektorů za účelem zvýšení chladicího výkonu.

ZÁVĚR

Byl vytvořen a experimentálně validován model nezaskleného FVT kolektoru upraveného pro možnost stanovení nočního chladicího výkonu. Model hybridního kolektoru byl implementován do simulačního prostředí TRNSYS. Z výsledků porovnání jednotlivých variant hybridních kolektorů je patrné, že hybridní kolektor VAR2, přestože má plně smáčený absorbér, vykazuje nízký chladicí zisk. Jedním z možných důvodů je nízká tepelná vodivost polypropylenového absorbéru. Hybridní kolektor s trubkovým registrem vykazuje vyšší chladicí výkon, avšak ve srovnání s referenčním kolektorem byl výrazně nižší. Existuje tedy značný prostor pro inovace konstrukcí hybridních kolektorů z hlediska navýšení chladicího výkonu.

Kontakt na autora: nikola.pokorny@fs.cvut.cz

Poděkování: Tento příspěvek vznikl za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. LO1605 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov – Fáze udržitelnosti a projektu

Použité zdroje:

- [1] EICER, U., DALIBARD, A. Photovoltaic-thermal collectors for night radiative cooling of buildings. *Solar Energy*. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.015>
- [2] MATUŠKA, T., ZMRHAL, V., ŠOUREK, B. Development of Solar Assisted Sorption Unit for Extraction of Water from Ambient Air in the Desert Climate, In: *ISES EuroSun 2018 Conference – 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry*. Rapperswil: 2018, s. 659–664. ISBN 978-3-9820408-0-6.
- [3] Transient System Simulation Tool – TRNSYS 17.1 [software]. The University of Wisconsin, Madison. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- [4] MCADAMS, W. H. Heat Transmission, 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 1954. pp. 249.
- [5] DUFFIE, J. A., BECKMAN, A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3.vyd. New York: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 13-978-0-471-69867-8.
- [6] ERELL, E., ETZION, Y., Radiative cooling of buildings with flat-plate solar collectors. *Building and Environment*. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00019-0)
- [7] AIGARNI, S., NUTTER, D. Survey of sky effective temperature models applicable to building envelope radiant heat transfer. In: *ASHRAE Transactions*, 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4212.5526>