

Matematické modelování hybridních fotovoltaicko-tepelných kapalinových kolektorů



Mathematical Modeling Hybrid Photovoltaic-Thermal Liquid Collectors

Recenzent
 Ing. Zdeněk Lerl

Autor informuje čtenáře o matematickém modelu, který umožňuje posouzení vhodnosti konstrukce hybridních fotovoltaicko-tepelných kapalinových kolektorů (FV/T) z hlediska elektrické a tepelné účinnosti. Současně poukazuje na riziko poničení nebo omezení životnosti samotných fotovoltaických modulů při jejich integraci do pláště budovy bez možnosti účinného chlazení.

Klíčová slova: hybridní fotovoltaicko-tepelný kolektor, účinnost FV/T kolektoru, chlazení FV modulů

Author informs readers on a mathematical model, which allows to assess the suitability of hybrid photovoltaic-thermal liquid collectors (PV/T) construction with respect to electric and thermal efficiency. Concurrently, he refers to risk of damage or lifetime limitation of photovoltaic modules when integrated into building envelope without possibility of efficient cooling.

Keywords: hybrid photovoltaic-thermal collector, efficiency of PV/T collector, cooling of PV modules

ÚVOD

Využití slunečního záření jakožto řídkého zdroje energie vyžaduje rozsáhlé jižně orientované jímací plochy. Snaha o racionální využití obálky budovy pro jímání sluneční energie a přeměnu na požadovanou formu energie jednak ústí ve vývoj prvků integrujících aktivní solární zařízení do konstrukce obálky budovy a jednak se posouvá od jednoúčelových prvků k multifunkčním či hybridním uspořádáním solárních kolektorů kombinujících více účelů (produkce tepla, produkce elektrické energie, zajištění osvětlení, kapalinové, vzduchové) [1]. Jedním z takových prvků jsou hybridní solární fotovoltaicko-tepelné kolektory (FV/T kolektory), které zajišťují současnou produkci elektrické energie a tepla v jediném zařízení (solární kogenerace). Díky společné výrobě elektrické energie a tepla může být u solárních hybridních FV/T kolektorů celková produkce energie vyšší než u standardního odděleného řešení (fotovoltaické a tepelné kolektory zvláště) při stejné celkové zastavěné ploše. Příspěvek se věnuje matematickému modelování plochého solárního nezašklého hybridního FV/T kapalinového kolektoru, zjednodušeně řečeno fotovoltaického modulu zespona opatřeného kapalinovým chladičem. Na jednotlivých příkladech je ukázán vliv konstrukčních a provozních parametrů FV/T kolektoru na jeho charakteristiky elektrické a tepelné účinnosti.

HYBRIDNÍ FV/T KOLEKTORY

Standardní komerční fotovoltaické (FV) moduly nepřemění v současné době více než cca 15 % dopadlé sluneční energie na elektrickou, zbylá část se přemění na nevyužitě odpadní teplo, které částečně odchází do okolního prostředí jako tepelná ztráta a částečně ohřívá FV modul a zvyšuje jeho teplotu. Zvýšení teploty FV článku negativně ovlivňuje účinnost vlastní fotovoltaické přeměny sluneční energie na elektrickou. Změnu elektrické účinnosti fotovoltaického článku η_e s jeho teplotou t lze vyjádřit lineární závislostí ve tvaru

$$\eta_e = \eta_{e,r} [1 + \beta(t - t_r)] \quad (1)$$

kde $\eta_{e,r}$ je účinnost FV článku při referenčních podmínkách, t_r je referenční teplota FV článku (25 °C) a β je teplotní součinitel účinnosti.

V tab. 1 jsou uvedena typická rozmezí hodnot teplotního součinitele pro různé druhy FV článků.

Kromě teplotní závislosti účinnosti vykazují FV moduly také pokles účinnosti s poklesem slunečního ozáření G [W/m^2] podle přibližného vztahu [2]

$$\eta_e = \eta_{e,r} \left(1 + 0,03 \ln \frac{G}{1000} \right) \quad (2)$$

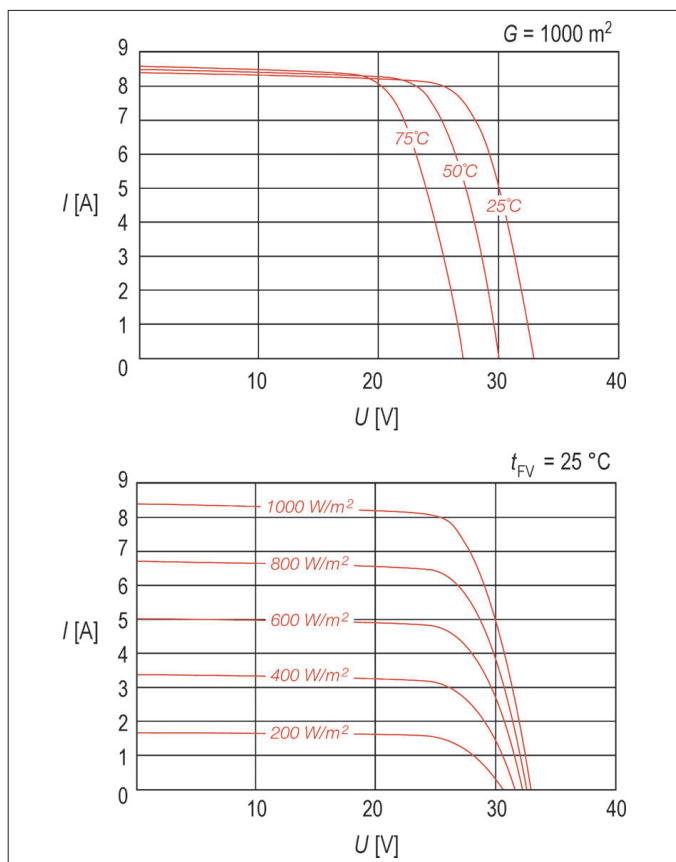
Na obr. 1 jsou zobrazeny voltampérové charakteristiky polykrystalického FV modulu pro různé teplotní úrovně a různé hladiny slunečního ozáření.

Tab. 1 Typické hodnoty teplotního součinitele pro různé druhy FV článků [2]

Typ článku	β [%/K]
Krystalické Si	-0,35 až -0,52
Amorfní Si	-0,10 až -0,30
CIS	-0,33 až -0,60
CdTe	-0,18 až -0,36

Pro zajištění vysoké elektrické účinnosti je vhodné fotovoltaické články chladit a zároveň smysluplně využívat odváděné nízkopotenciální teplo. V případě architektonicky a esteticky preferovaných instalací FV modulů integrovaných do obálky budov navíc dochází k výraznějšímu nárůstu teploty FV článku oproti modulům volně instalovaným na střechách a více vystaveným vůči účinkům větru. Fotovoltaické moduly zabudované do obálky budov trpí vysokou tepelnou zátěží vlivem omezeného přirozeného chlazení okolním proudícím vzduchem. Zadní strana FV modulu je zpravidla tepelně chráněna obálkou budovy a součinitel přestupu tepla prouděním na přední straně FV modulu zapuštěného do větší plochy vykazují výrazně nižší hodnoty než u ploch vystupujících nad povrch obálky budovy.

To vše má za následek významný pokles účinnosti FV článku a tepelnou zátěž vnitřního prostoru tepelným tokem v závislosti na stupni tepelné izolace dané obálky budovy (zvýšení potřeby chlazení v letním období). Může dojít i k poškození FV modulů vlivem extrémního tepelného zatížení (teplota FV modulu integrovaného do obálky budovy může za letního dne při bezvětří dosáhnout až 100 °C, zatímco běžně uváděná maximální dovolená teplota je okolo 85 °C).

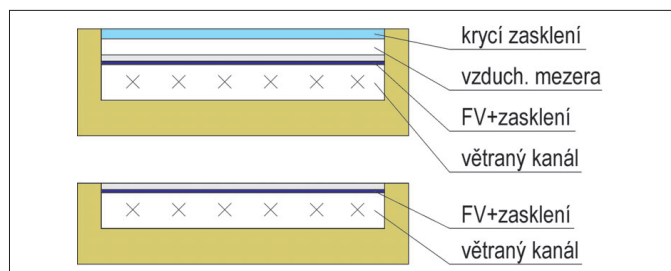


Obr. 1 Voltampérové charakteristiky FV modulu při různých teplotách (nahore) a různých hladinách slunečního ozáření (dole)

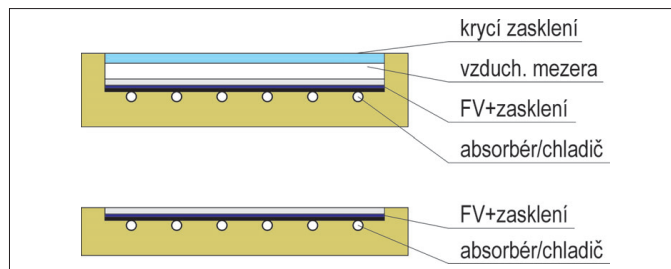
Použití aktivního chlazení fotovoltaického článku vede ke konceptu hybridního solárního fotovoltaicko-tepelného kolektoru (FV/T kolektor), který poskytuje nízkopotenciální teplo a elektrickou energii, kdy produkce tepla může být několikanásobně vyšší než produkce elektrické energie. Hybridní FV/T kolektory mohou být realizovány v několika základních variantách, jednak jako zasklené nebo nezasklené, ploché nebo koncentrační a podle typu teplosnosné látky odvádějící teplo, vzduchové nebo kapalinové [3], [4].

Hybridní FV/T vzduchové systémy (obr. 2) se začaly prosazovat především jako fasádní a střešní FV prvky se vzduchovými kanály na zadní straně FV modulů (nezasklené) či jako FV moduly umístěné ve větrané dutině dvojitých fasád (zasklené) a byly zevrubně zkoumány na mnoha demonstračních instalacích. Jelikož systémy s přirozeným prouděním obecně neumožňují dostatečné chlazení FV modulu, řada hybridních FV/T vzduchových systémů využívá nucené cirkulace. Velké průtoky potřebné k odvodu tepla vzhledem k nízké objemové tepelné kapacitě vzduchu vedou k velkým rozměrům potrubí, které je obtížné jednoduše integrovat do konstrukce budovy (obálky, vnitřního prostoru). V případě FV/T systémů s nuceným prouděním vzduchu je nutné navíc dbát na udržení nízké spotřeby elektrické energie nutné k pohonu ventilátorů tak, aby se významně nepotlačil vlastní zisk elektrické energie vlivem chlazení FV článků. Odvedené teplo z FV modulů může být využito pro předehřev větracího vzduchu, pro cirkulační teplovzdušné vytápění či hypokaustické sálavé vytápění.

Vzduchový FV/T systém je vhodný především pro chladné klimatické oblasti s dostatečně nízkou teplotou vzduchu pro chlazení i v letním období. V případě teplejšího klimatu, kdy vysoké teploty venkovního vzduchu omezují možnost účinného chlazení FV modulu a využitelnost ohřátého vzduchu je nízká nebo v případě integrace FV/T kolektorů do obálky budovy (vyšší teploty článků, omezený prostor pro instalaci VZT potrubí) je výhodnější uvažovat o kapalinou chlazených FV modulech.



Obr. 2 Typické konfigurace geometrie plochého FV/T vzduchového kolektoru (zasklený, nezasklený); křížky označují prostor, kterým proudí vzduch



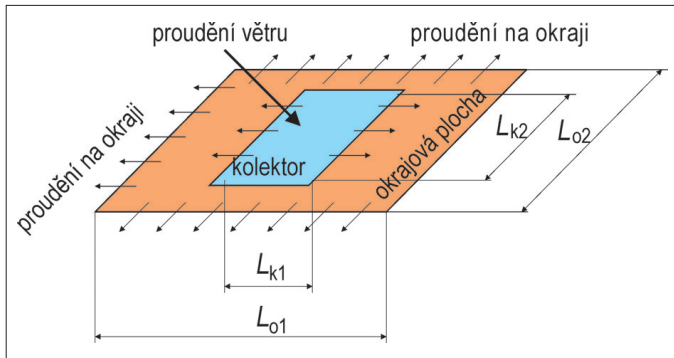
Obr. 3 Typické konfigurace geometrie plochého FV/T kapalinového kolektoru (zasklený, nezasklený)

Kapalinou chlazené FV systémy jsou založeny především na principu výměníku lamela-trubka (podobně jako u plochých tepelných kolektorů) aplikovaného na zadní stranu fotovoltaického článku či modulu s kvalitním tepelně vodivým kontaktem pro zajištění dobrého odvodu tepla z FV článku (obr. 3). Nezasklená konstrukce je vhodná především tam, kde elektrický výkon je hlavní prioritou a využití odpadního tepla je sekundární [4]. Oblast použití plochých nezasklených hybridních FV/T kolektorů leží především v nízkoteplotních systémech s provozní teplotou do 30 °C. Jde o předehřev studené vody pro přípravu teplé vody v budovách (celoročně stálá teplota v rozvedech je 10 až 20 °C), ohřev bazénové vody či jako nízkopotenciální zdroj tepla pro tepelná čerpadla (absorpční FV/T stěny či střechy). Na rozdíl od vzduchových FV/T systémů aplikovaných na mnoha budovách, instalací kapalinových FV/T systémů je dosud v provozu velmi omezené množství.

MATEMATICKÝ MODEL

Na základě analytických vztahů pro teoretický popis energetické bilance solárních tepelných kolektorů a výpočet využitelných tepelných zisků [5], rozšířený o přeměnu části dopadlé sluneční energie na elektrickou energii [6] a s pomocí dalších úprav byl vytvořen detailní matematický model plochého solárního hybridního nezaskleného FV/T kapalinového kolektoru s označením PVT-NEZ [7]. Vstupními parametry modelu jsou tepelně-fyzikální, optické, elektrické a geometrické vlastnosti jednotlivých částí kolektoru (např. **FV článek**: elektrická účinnost při referenčních podmínkách $\eta_{e,r}$, teplotní součinitel β , odrazivost slunečního záření ρ , emisivita ε ; **absorbér/chladič**: materiál teplosměnných lamel a trubek, tepelná vodivost a geometrie spoje FV absorbér-trubka, rozteč trubek W = šířka teplosměnné lamely), dále klimatické podmínky (sluneční ozáření G , teplota okolí t_e , rychlost větru w) a provozní podmínky (teplota kapaliny na vstupu do FV/T absorbéru/chladiče t_{k1} , průtok kapaliny FV/T absorbérem/chladičem \dot{m}). Výstupy modelu jsou především využitelný elektrický výkon Q_e (spolu s elektrickou účinností η_e), využitelný tepelný výkon Q_t (spolu s tepelnou účinností η_t) a teplota teplosnosné kapaliny na výstupu z kolektoru t_{k2} .

Matematický model hybridního FV/T kapalinového kolektoru se skládá z vnější energetické bilance FV/T absorbéru (přenos tepla z povrchu FV/T absorbéru, tedy fotovoltaického článku vodivě spojeném s chladičí lame-



4 Obtékání solárního kolektoru integrovaného do obálky budovy

lou, do okolí) a z vnitřní energetické bilance FV/T absorberu (přenos tepla z povrchu FV článku do teplotnosné kapaliny), schématicky zobrazených na obr. 4 a 5.

Vnější energetická bilance absorberu

V rámci vnější energetické bilance se na základě dané teploty FV/T absorberu t_{abs} (v prvním kroku odhadnuta, v dalších je výsledkem vnitřní bilance) řeší přestup tepla prouděním a sáláním z přední strany FV/T absorberu a ze zadní strany FV/T absorberu do okolí, resp. do budovy, a výsledkem je určení teplotně závislého součinitele prostupu tepla nezaskleného kolektoru U (výrazně závislý na rychlosti větru).

Pro určení přestupu tepla prouděním z FV/T absorberu do okolí vlivem proudění okolního vzduchu (větru) existuje v literatuře velké množství korelací, které jsou shrnuty např. v [8, 9]. Model kapalinového FV/T kolektoru využívá McAdamsův vztah [10], který je nejpoužívanějším v oboru solární tepelné techniky pro jednoduché vyjádření součinitele přestupu tepla prouděním v závislosti na rychlosti větru w

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

V případě volně stojícího FV/T kolektoru se součinitel přestupu tepla prouděním stanoví pro přední i zadní stranu. Integrací kapalinového FV/T kolektoru do pláště budovy dochází ke snížení součinitele přestupu tepla na přední straně oproti volně stojící instalaci, neboť oblast vyšších rychlostí obtékajícího proudu větru se vyskytuje na okrajích obtékaného předmětu (kolektor, budova), zatímco v jeho centrální části jsou rychlosti velmi nízké (obr. 4). Pokud je plocha pláště okolo integrovaného kolektoru dostatečně velká, může tak dojít ke snížení h_p až na poloviční hodnotu. Pro stanovení součinitele přestupu tepla $h_{p,int}$ na vnějším povrchu FV/T absorberu integrovaném do obálky budovy lze využít korelací [11]

$$h_{p,int} = h_p \sqrt{\frac{L_k}{L_o}} \quad (4)$$

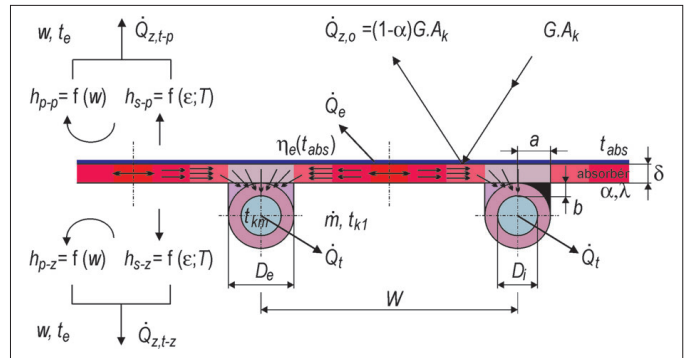
kde

L_k a L_o jsou charakteristické rozměry kolektoru (k) a obálky budovy (o), do které je kolektor integrován. Charakteristické rozměry jsou obecně stanoveny podle vztahu

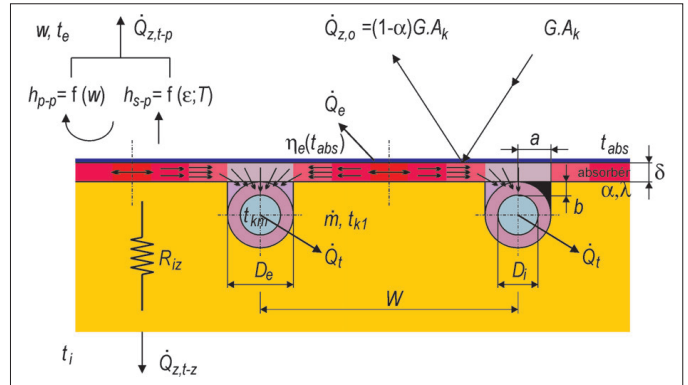
$$L = \frac{2 \cdot L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (5)$$

Pro integraci do obálky budovy se na zadní straně FV/T kolektoru uvažuje vrstva konstrukce obálky budovy a součinitel přestupu tepla prouděním se neuvažuje.

Výpočet součinitele přestupu tepla sáláním z povrchu FV/T absorberu je založen na znalosti teploty oblohy t_o . Podobně jako u součinitele přestupu tepla prouděním vlivem větru existuje i pro teplotu oblohy v literatuře řada korelací, které jsou shrnuty např. v [8]. Pro potřeby modelu FV/T kolektoru



5 Schéma energetické bilance volně stojícího FV/T kolektoru



6 Schéma energetické bilance FV/T kolektoru integrovaného do obálky budovy

byl použit vztah pro stanovení teploty oblohy na základě teploty okolního vzduchu t_e podle Swinbanka [12] pro jasnou oblohu

$$T_o = 0,0552 \cdot T_e^{1,5} \quad (6)$$

Součinitel přestupu tepla sáláním z přední strany (p) vůči obloze se potom stanoví ze vztahu

$$h_{s,p} = \varepsilon_{abs,p} \sigma \frac{T_{abs}^4 - T_o^4}{T_{abs} - T_e} \quad (7)$$

kde $\varepsilon_{abs,p}$ je emisivita předního povrchu FV/T absorberu (krycí vrstvy FV článku). Obdobným vztahem se stanoví součinitel přestupu tepla sáláním zadní strany (z) FV absorberu vůči okolním povrchům (střeše)

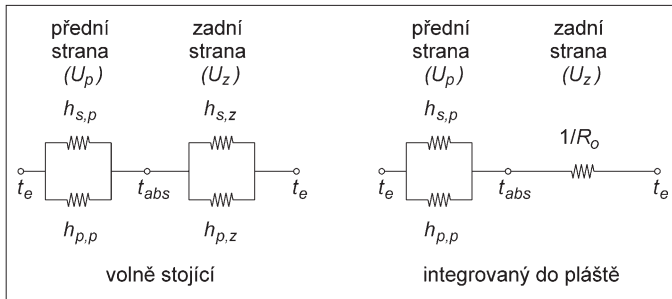
$$h_{s,z} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{abs,z}} + \frac{1}{\varepsilon_s} - 1} \cdot \frac{T_{abs}^4 - T_s^4}{T_{abs} - T_e} \quad (8)$$

kde $\varepsilon_{abs,z}$ je emisivita zadní strany FV/T absorberu (teplosměnná lamela), ε_s je emisivita okolních ploch (střešky) a T_s [K] je teplota střešky. V případě integrace do obálky budovy se na zadní straně FV/T kolektoru uvažuje vrstva konstrukce obálky budovy a součinitel přestupu tepla sáláním ze zadní strany kolektoru se neuvažuje.

Na obr. 7 jsou zobrazeny modely vnější energetické bilance pro volně stojící FV/T kolektor a kolektor integrovaný do pláště budovy. V případě integrace FV/T kolektoru do obálky budovy jsou součinitele přestupu tepla na zadní straně absorberu nahrazeny převrácenou hodnotou tepelného odporu konstrukce pláště budovy R_o a součinitele přestupu tepla na vnitřním povrchu konstrukce pláště budovy jsou zanedbány.

Výsledkem vnější energetické bilance je stanovení celkového součinitele prostupu tepla U [W/m².K] hybridního FV/T kolektoru

$$U = (h_{s,p} + h_{p,p}) + (h_{s,z} + h_{p,z}) \quad (9)$$



Obr. 7 Schématické tepelné modely vnější energetické bilance

$$U = (h_{s,p} + h_{p,p}) + \frac{1}{R_0} \quad (10)$$

a dále korigovaného součinitele prostupu tepla \tilde{U} o člen vyjadřující tok slunečního záření odvedený FV článkem jako elektrický výkon podle vztahu

$$\tilde{U} = U - G\eta_{e,r}\beta \quad (11)$$

kde G [W/m²] je sluneční ozáření (hustota slunečního zářivého toku) FV/T kolektoru.

Vnitřní energetická bilance absorberu

Vnitřní energetická bilance spočívá v iteračním řešení přenosu tepla z povrchu FV/T absorberu do kapaliny (vedení tepla teplosměnnou lamelou s dopadem slunečního záření a přeměnou části dopadlé energie na elektrickou). Iterační cyklus je nutný vzhledem k závislosti vlastností teplosměnné kapaliny na její střední teplotě, která na počátku výpočtu není známa a je nutné ji nejprve odhadnout na základě teploty kapaliny na vstupu do kolektoru t_{k1} . Ve vnitřní bilanci se stanoví účinnost teplosměnné chladicí lamely F podle

$$F = \frac{\tanh[m \cdot (W - 2a) / 2]}{m \cdot (W - 2a) / 2} \quad (12)$$

kde

$$m = \sqrt{\frac{\tilde{U}}{\lambda\delta}} \quad (13)$$

kde W [m] je šířka chladicí lamely absorberu FV/T kolektoru, a [m] je polovina šířky spoje lamela-trubka (v obr. 5 a 6 je hodnota $2a$ uvažována jako rovná vnějšímu průměru trubek absorberu D_e , nicméně u běžných spojů je obecně menší), λ [W/m.K] je tepelná vodivost materiálu FV/T absorberu a δ [m] je tloušťka absorberu.

Upravený účinnostní součinitel kolektoru zohledňující hybridní FV/T uspořádání kolektoru se stanoví jako

$$\tilde{F}' = \frac{1/\tilde{U}}{W \left[\frac{1}{\tilde{U}[2a + (W - 2a)F]} + \frac{1}{C_s} + \frac{1}{h_i\pi D_i} \right]} \quad (14)$$

kde C_s [W/m.K] je tepelná propustnost spoje FV/T absorber-trubka, h_i [W/m².K] je součinitel přestupu tepla z vnitřní stěny trubky absorberu do teplosměnné kapaliny a D_i [m] je vnitřní průměr trubky. Pro typ spoje FV/T absorber-trubka uvedený na obr. 5 a 6 lze jeho tepelnou propustnost stanovit ze vztahu

$$C_s = \frac{\lambda_s a}{b} \quad (15)$$

kde λ_s [W/m.K] je tepelná vodivost spoje, a a b [m] jsou rozměry spoje absorber-trubka (šířka, tloušťka). Součinitel přestupu tepla z vnitřní stěny trubky do teplosměnné látky se stanoví jako

$$h_i = Nu_D \frac{\lambda_f}{D_i} \quad (16)$$

kde λ_f [W/m.K] je tepelná vodivost teplosměnné kapaliny a Nusseltovo číslo Nu_D se stanoví z korelace [13]

$$Nu_D = \begin{cases} 1,953 \cdot x'^{-1/3} & x' \leq 0,03 \\ 4,364 + \frac{0,0722}{x'} & x' > 0,03 \end{cases} \quad (17)$$

Z Reynoldsova čísla Re_D a Prandtlova čísla Pr se jako převrácená hodnota Graetzova čísla Gz stanoví bezrozměrný délkový parametr

$$x' = Gz^{-1} = \frac{x/D_i}{Re_D \cdot Pr} \quad (18)$$

Tepelný přenosový součinitel \tilde{F}_R solárního FV/T kolektoru se stanoví ze vztahu

$$\tilde{F}_R = \frac{\dot{m}c}{A_k \tilde{U}} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_k \tilde{U} \tilde{F}'}{\dot{m}c}\right) \right] \quad (19)$$

kde \dot{m} [kg/s] je hmotnostní průtok teplosměnné kapaliny FV/T absorberem, c [J/kg.K] je měrná tepelná kapacita teplosměnné kapaliny a A_k [m²] je plocha kolektoru (FV/T absorberu).

Z vnitřní bilance lze potom stanovit tepelný výkon FV/T kolektoru

$$\dot{Q}_t = A_k \tilde{F}_R [\tilde{S} - \tilde{U}(t_{k1} - t_e)] \quad (20)$$

kde \tilde{S} [W/m²] je část výkonu dopadlého slunečního záření přeměněného na teplo a stanoví se jako

$$\tilde{S} = G\alpha \left(1 - \frac{\eta_{e,e}}{\alpha} \right) \quad (21)$$

kde α je pohltivost slunečního záření FV/T absorberem a $\eta_{e,e}$ je účinnost FV článku při teplotě okolí t_e stanovená podle vztahu (1). Pohltivost α je dána obecně odrazivostí povrchu FV článku a pohybuje se zpravidla okolo hodnoty 0,96.

Celková tepelná účinnost FV/T kolektoru je potom

$$\eta_{t,k} = \frac{\dot{Q}_t}{GA_k} \quad (22)$$

Elektrický výkon FV/T kolektoru se potom stanoví ze vztahu

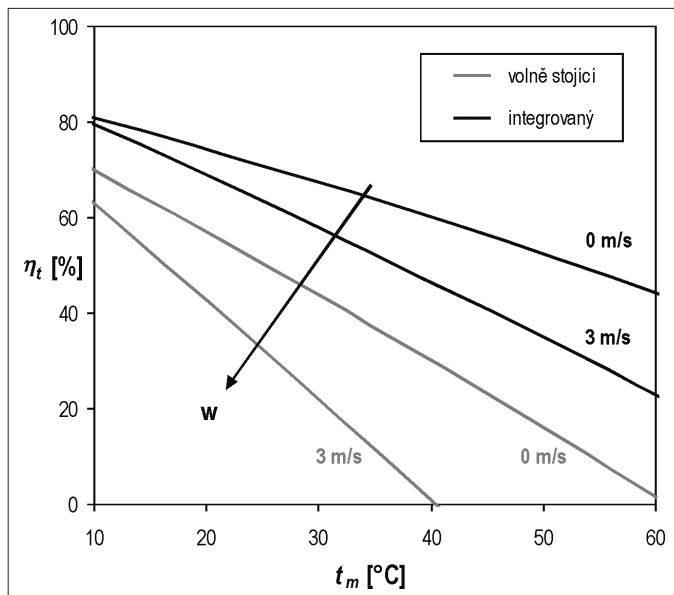
$$\dot{Q}_e = A_k G \eta_{e,e} \left\{ 1 - \frac{\eta_{e,r}\beta}{\eta_{e,e}} \left[\tilde{F}_R (t_{k1} - t_e) + \frac{\tilde{S}}{\tilde{U}} (1 - \tilde{F}_R) \right] \right\} \quad (23)$$

Celková elektrická účinnost FV/T kolektoru je potom

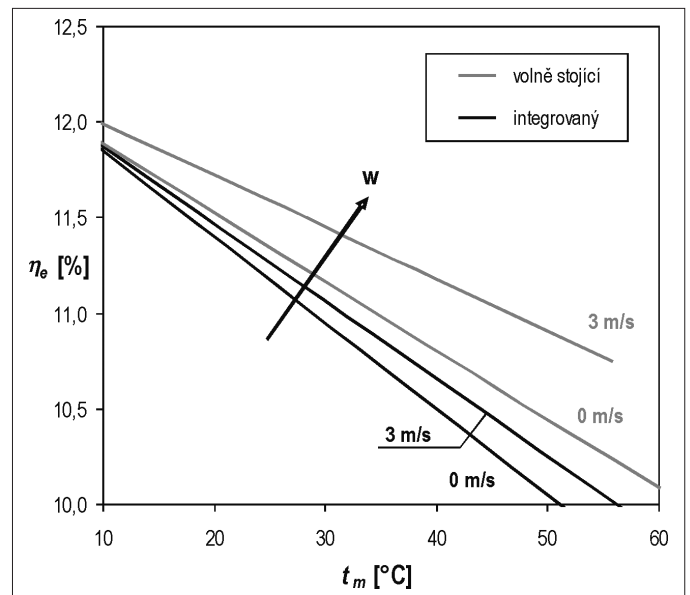
$$\eta_{e,k} = \frac{\dot{Q}_e}{GA_k} \quad (24)$$

Střední teplotu povrchu FV/T absorberu t_{abs} (FV článku) a střední teplotu kapaliny v kolektoru t_m je možné určit na základě teploty kapaliny t_{k1} na vstupu do kolektoru ze vztahů

$$t_{abs} = t_{k1} + \frac{\dot{Q}_t / A_k}{\tilde{F}_R \tilde{U}} (1 - \tilde{F}_R) \quad (25)$$



Obr. 8 Charakteristiky tepelné účinnosti FV/T kolektoru



Obr. 9 Charakteristiky elektrické účinnosti FV/T kolektoru

$$t_m = t_{k1} + \frac{\dot{Q}_t / A_k}{\tilde{F}_R \tilde{U}} \left(1 - \frac{\tilde{F}_R}{\tilde{F}'} \right) \quad (26)$$

Teplota na výstupu z kolektoru je potom

$$t_{k2} = 2 \cdot t_m - t_{k1} \quad (27)$$

Jelikož obě energetické bilance (vnitřní, vnější) jsou navzájem propojené a na sobě závislé, nadřazený iterační cyklus předává výsledky vnější bilance do vnitřní (součinitel prostupu tepla U , resp. U) a výsledky vnitřní bilance do vnější (teplota FV/T absorběru t_{abs}).

CHARAKTERISTIKY FV/T KOLEKTORU

Matematický model PVT-NEZ umožňuje na základě detailních konstrukčních a provozních parametrů plochého solárního nezaskleného hybridního FV/T kolektoru analyzovat a optimalizovat navržená konstrukční řešení pro zvolené aplikace. Pro dané provozní a klimatické podmínky je možné vyhodnocovat elektrický a tepelný výkon, resp. účinnost hybridního nezaskleného FV/T kolektoru, tepelný výkon nezaskleného solárního čistě tepelného kolektoru (při podmínce účinnosti $\eta_{e,r} = 0 \%$) nebo elektrický výkon čistě fotovoltaického modulu (průtok FV/T absorbérem $\dot{m} = 0 \text{ kg/s}$) s vlivem teploty FV článku $t_{FV} = t_{abs}$ na jeho elektrickou účinnost.

V grafech na obr. 8 až 10 jsou pro orientaci znázorněny různé typy charakteristik FV/T kolektoru, které je možné získat matematickým modelováním s využitím modelu PVT-NEZ. Uvedené charakteristiky jsou stanoveny pro klimatické a provozní podmínky a parametry FV článku a absorběru-chladiče uvedené v tab. 2.

V případě integrace FV/T kolektoru do obálky budovy je uvažován její tepelný odpor $R_0 = 6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Poměr charakteristických rozměrů kolektoru L_k a obálky budovy L_0 byl zvolen 0,36 (poměr ploch $A_k/A_0 = 0,12$), odpovídající snížení součinitele přestupu tepla prouděním na 60 % hodnoty určené pro variantu volně vystavenou účinkům větru.

Z grafů na obr. 8 a 9 lze vyvodit protikladné požadavky na provozní podmínky FV/T kolektoru (rychlost větru, případně venkovní teplota) z hlediska produkce tepla a elektrické energie. Zatímco s vyšší rychlostí větru stoupá elektrická účinnost (vlivem většího ochlazování FV článku), tepelná účinnost klesá vlivem nárůstu tepelných ztrát FV/T kolektoru. Podobně i-

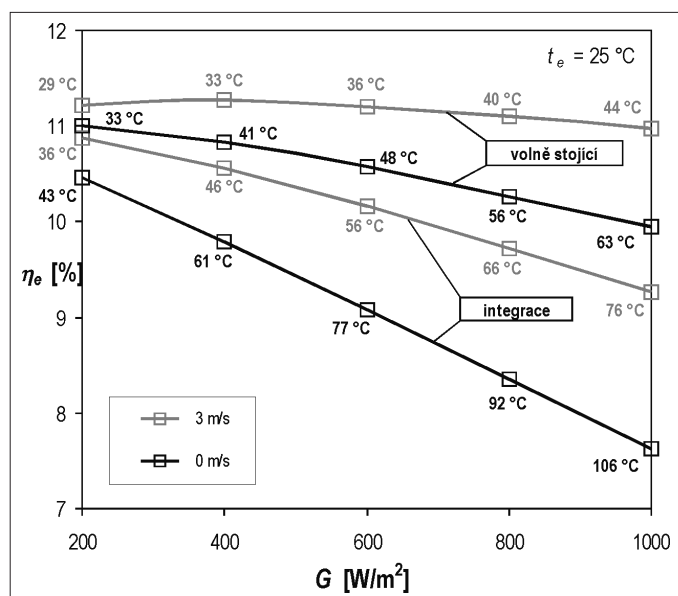
Tab. 2 Okrajové podmínky uvedených charakteristik FV/T kolektoru

Klimatické podmínky	
sluneční ozáření	$G = 1000 \text{ W/m}^2$
venkovní teplota	$t_e = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
rychlost větru	$w = 0$ nebo 3 m/s
FV článek	
teplotní souč. účinnosti	$\beta = -0,45 \text{ } \%/ \text{K}$
referenční účinnost	$\eta_{e,r} = 12 \text{ } \%$
referenční teplota	$t_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
Absorbér – chladič	
průtok kapaliny (voda)	$\dot{m} = 0,02 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$
rozteč trubek	$W = 100 \text{ mm}$
průměr trubek	$D_e/D_i = 10/8 \text{ mm}$
tloušťka absorběru	$\delta = 0,3 \text{ mm}$
materiál absorběru	měď
tepelná propustnost spoje	$C_S = 250 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

tegraci FV/T kolektoru do budovy sice zvýšíme tepelnou účinnost (významné snížení ochlazování zadní strany) a produkci tepla, nicméně na úkor elektrické účinnosti.

Na obr. 10 jsou uvedeny modelované charakteristiky účinnosti nechlazeného FV článku (nulový průtok absorbérem-chladičem) při různé hladině slunečního ozáření (při venkovní teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$) pro případ FV modulu integrovaného do obálky budovy a FV modulu volně vystaveného větru (např. nad střechou budovy) při různé rychlosti okolního větru. Z grafu na obr. 10 je zřejmé, že integrace FV modulů do obálky budovy znamená významnou tepelnou zátěž FV článků a za extrémních letních podmínek může způsobit problémy s teplotní odolností článků. Dosahované teploty FV článku překračují maximální dovolené teploty (běžně $85 \text{ }^\circ\text{C}$), což vede k degradaci, případně poničení článků vlivem tepelného namáhání.

Z grafu na obr. 10 lze také usuzovat na charakteristický trend, kdy s vyšší hladinou slunečního ozáření FV článku dochází ke zvýšení jeho teploty (podle uvažované rychlosti větru). Tento jev nemusí mít vždy za následek snížení elektrické účinnosti článku, vzhledem ke skutečnosti, že s rostoucí



Obr. 10 Elektrická účinnost a teplota FV článků bez odvodu tepla při různých úrovních slunečního záření a rychlostech proudění okolního vzduchu

hladinou slunečního ozáření účinnost FV článku na druhé straně roste. Ne vždy pokles účinnosti vlivem zvýšení teploty tento nárůst potlačí. Na obr. 10 je z křivky závislosti účinnosti FV článku na slunečním ozáření pro volně stojící instalaci při rychlosti větru 3 m/s, že účinnost FV článku v rozmezí G od 200 do 400 W/m^2 roste.

ANALÝZA KONSTRUKCE

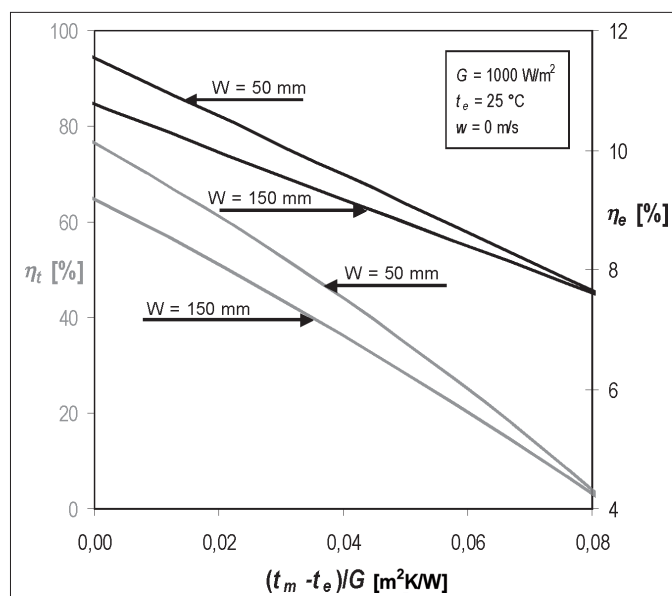
Z hlediska návrhu konstrukce FV/T kolektoru matematický model PVT-NEZ umožňuje sledovat vliv změny konstrukčních parametrů FV/T absorberu na upravený účinnosti součinitel F' a následně na tepelné a elektrické charakteristiky FV/T kolektoru a konstrukci absorberu optimalizovat. Následující analýza se věnuje pouze FV/T kolektorům integrovaným do obálky budovy jako potenciálně nejvhodnější aplikaci kapalinou chlazených hybridních kolektorů. Základní referenční parametry FV článku a absorberu jsou převzaty z tab. 2. Srovnávané hodnoty analyzovaného parametru jsou v každém případě uvedeny. Jako okrajové klimatické podmínky jsou uvažovány letní extrémní hodnoty pro zvýraznění vlivu srovnávaných hodnot analyzovaných konstrukčních parametrů (sluneční ozáření 1000 W/m^2 , venkovní teplota 25 °C, rychlost větru 0 m/s).

Rozteč trubek absorberu

Rozteč trubek absorberu vymezuje šířku teplosměnné lamely absorberu a tedy délkový rozměr, který spolu s tepelnou vodivostí materiálu lamely absorberu a její tloušťkou udává tepelný odpor vůči vedení tepla z povrchu absorberu do místa tepelného spoje absorber-trubka (viz obr. 5 a 6). Pro lamelu absorberu je zde zjednodušeně uvažován ideální (velmi vodivý) kontakt mezi článkem a chladičem, což v reálném provedení FV/T kolektoru nemusí být vždy zajištěno. Jaký vliv může mít šířka teplosměnné lamely na účinnost FV/T kolektoru ukazuje graf na obr. 11, kde jsou porovnány charakteristiky účinnosti (tepelné, elektrické) pro hodnoty šířky $W = 50$ mm a 150 mm při použití měděné teplosměnné lamely (350 $W/m.K$) o tloušťce 0,3 mm v závislosti na redukovaném teplotním spádu $(t_m - t_e)/G$. Obecně platí, čím menší rozteč, tím lepší odvod tepla (menší odpor vůči vedení), nicméně tím vyšší hustota trubek a spotřeba materiálu. Model umožňuje optimalizovat rozteč v závislosti na materiálu lamel a trubek pro zajištění dostatečného chlazení FV článků.

Materiál a tloušťka lamely

V souvislosti se snahou použít levnější materiály pro výrobu absorberu, které se však vyznačují nižší tepelnou vodivostí, se naskytá otázka jaký



Obr. 11 Vliv šířky lamely absorberu (rozteče trubek) na tepelnou a elektrickou účinnost FV/T kolektoru

dopad bude mít přechod z měděného absorberu/chladiče ($\lambda = 350$ $W/m.K$) na hliníkový ($\lambda = 250$ $W/m.K$), případně na ocelový ($\lambda = 100$ $W/m.K$) a na celkovou účinnost FV/T kolektoru. Na obr. 12 jsou uvedeny křivky tepelné a elektrické účinnosti při dané tloušťce absorberu $\delta = 0,3$ mm a šířce lamely $W = 100$ mm pro uvedené materiály. Z grafu je patrné, že mezi použitím měděných nebo hliníkových lamel není výrazný rozdíl, zatímco při použití ocelových lamel klesají účinnosti již výrazněji. Nižší tepelnou vodivost je však možné kompenzovat větší tloušťkou lamely. Pro zajištění stejné křivky tepelné a elektrické účinnosti jako v případě měděného absorberu je nutná tloušťka hliníkové lamely 0,4 mm a ocelové lamely 1 mm.

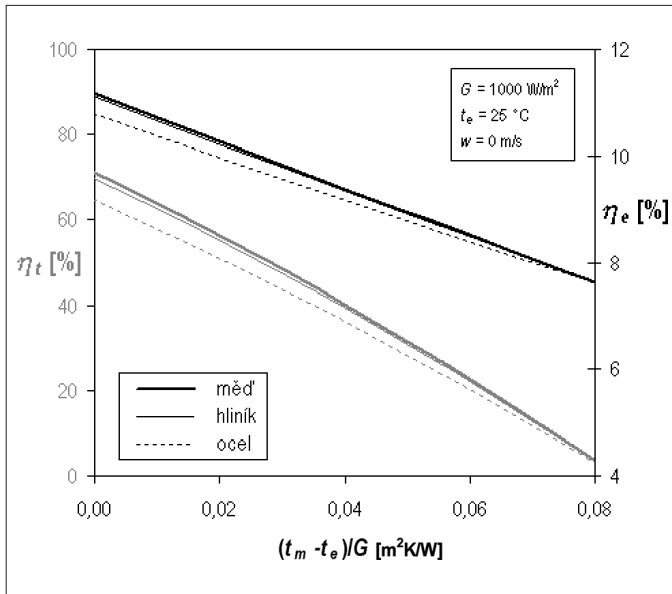
Tepelná propustnost spoje absorber-trubka

Tepelný odpor spoje mezi teplosměnnou lamelou a trubkou s teplosnosnou kapalinou může hrát důležitou roli v efektivitě odvodu tepla z FV/T absorberu. Podobně jako u plochých solárních tepelných kolektorů příliš nezáleží zda spoj je pájený nebo ultrazvukově svařovaný, důležitý je dostatečně vodivý kontakt vytvořený pevným nerozebíratelným spojením materiálů lamely a trubky (tepelná propustnost zhruba mezi 100 až 250 $W/m.K$). Výrazné snížení účinnostních parametrů přináší až velmi nekvalitní provedení spoje, např. naklapnuté lamely na trubce (bodový kontakt) či pouze přiložené (přítlačené) trubky k absorberu, vyznačující s tepelnou propustností spoje řádově v jednotkách $W/m.K$.

ZÁVĚR

Matematický model PVT_NEZ s iteračním výpočtem elektrických a tepelných charakteristik plochého solárního nezaskleného hybridního FV/T kapalinového kolektoru na základě detailních konstrukčních parametrů jednotlivých částí byl vyvinut pro analýzy a optimalizaci návrhu konstrukce FV/T kolektoru.

Analýza vlivu integrace fotovoltaických modulů do tepelně-izolované obálky budovy poukázala na problematiku souvisejících vysokých provozních teplot nechlazených FV článků (až 100 °C), kdy může dojít k jejich degradaci či destrukci, zatímco v případě hybridního FV/T kolektoru s nízkoteplotním chlazením lze zvýšit produkci elektrické energie a ještě navíc využít významnou část tepelných zisků. Zásadní podmínkou účinného provozu solárních hybridních FV/T kolektorů je udržení nízké teploty protékající kapaliny 10 až 25 °C (vysoká tepelná i elektrická účinnost), což v reálných aplikacích může být problematické z hlediska využitelnosti takto získaného nízkopotenciálního tepla. Vhodné jsou proto především aplikace pracu-



Obr. 12 Vliv materiálu lamely absorberu na tepelnou a elektrickou účinnost FV/T kolektoru

jičí se stálou nízkou teplotou jako přehřívání studené vody před vstupem do centrální přípravy teplé vody či primární okruhu tepelných čerpadel.

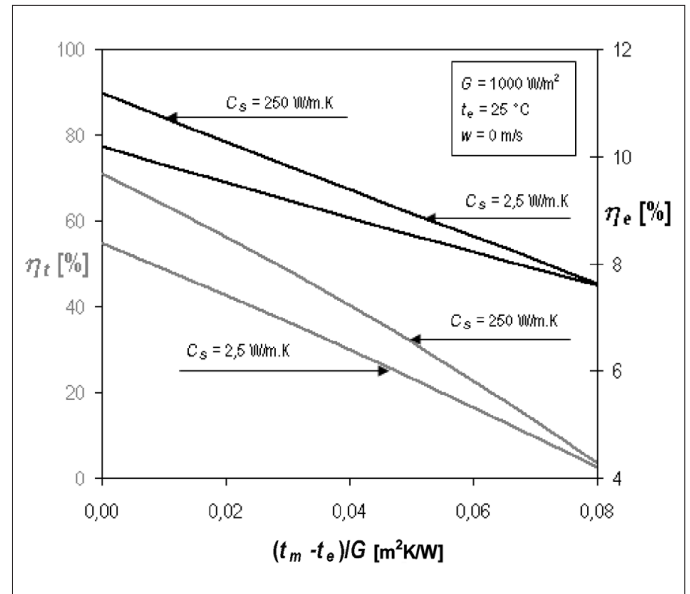
Provedené analýzy ukázaly vliv rozteče trubek registru absorberu W (šířka chladicího žebra), materiálu a tloušťky absorberu-chladiče a kvality provedení spoje lamely s trubkou. Konstrukce FV/T kolektorů musí pro účinné chlazení FV článku zajistit především malou rozteč trubek W (pod 100 mm) a průměrně vodivý spoj (dostatečná propustnost nad 50 až 100 W/m.K). Na materiálu teplosměnné lamely záleží méně (není podstatný rozdíl mezi hliníkem a mědí), nižší tepelnou vodivost je možné kompenzovat zvýšením tloušťky lamely chladiče (absorbéru).

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného záměru MSM 684077011 „Technika prostředí“, financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR.

Použité zdroje:

- [1] Matuska, T. Advanced solar collectors for building integration. Proceedings of WREC X, pp. 1547-1552, Glasgow (Great Britain), 2008.
- [2] Planning and Installing Photovoltaic Systems. A guide for installers, architects and engineers. 2nd edition. Earthscan London 2008. ISBN-13:978-1-84407-442-6
- [3] Charalambous, P. G. a kol. Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review. Applied Thermal Engineering 27, pp. 275-286. 2007.
- [4] Tripanagnostopoulos, Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. Solar Energy 81, 1117-1131. 2007.
- [5] Duffie, J. A., Beckman, W. A. Solar engineering of thermal processes. 3. vydání. Wiley 2006, ISBN 13-978-0-471-69867-8.
- [6] Florschuetz, L. W. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. Solar Energy, vol. 22, pp. 361-366, 1979.
- [7] Matuška, T.: Nezasklený hybridní solární fotovoltaicko-termální kolektor PVT_NEZ, Autorizovaný software. ČVUT FSI, 2007.
- [8] Matuška, T. Transparentní tepelné izolace a jejich využití v solární technice. Doktorská práce, ČVUT v Praze, 2003.
- [9] Sartori, E. Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces. Solar Energy, vol. 80, pp. 1063-1071, 2006.
- [10] McAdams, W. H. Heat Transmission, 3rd edition. McGraw-Hill, New York. pp. 249. 1954.
- [11] Sparrow, E. M., Lau, S. C. Effect of adiabatic co-planar extension surfaces on wind-related solar collector heat transfer coefficients. ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 268-271, 1981.



Obr. 13 Vliv tepelné propustnosti spoje absorber-trubka na tepelnou a elektrickou účinnost FV/T kolektoru

[12] Swinbank, W., C. Long-wave radiation from clear skies. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society 89, pp. 339-348, 1963.

[13] Matuška, T.: Vliv konstrukčních a provozních parametrů na účinnost hybridního fotovoltaicko-tepelného kapalinového kolektoru. 3. česká fotovoltaická konference, Brno 2008, s. 37-45. ISBN 978-80-254-3528-1. ■

* Význam Cách roste

Cáchy jsou nyní na nejlepší cestě stát se hlavním městem výzkumu větrací techniky. Dochází zde k výstavbě dvou nezávislých výzkumných a vývojových center.

Pro rok 2009 připravuje Caverion GmbH novostavbu centra, obsahujícího zkušebnu o ploše 800 m² a výšce 14 m, s prostorem 200 m² uloženém na pružinách, s klimatizačními komorami, se zkušební stanicí chladících stropů, stropních chladících trámů a indukčních jednotek, dále zkušební stanicí fasádních přístrojů, vč. simulační komory vnějšího prostředí a měřicího prostoru ke zkoumání vnitřního proudění. Kromě toho mají zde být zkoušeny i vysoce účinné filtry.

Vzestup výzkumu v oblasti větrací techniky v Cáchách zaznamenává též Vysoká škola technická. V dubnu 2008 nezávisle na plánech Caverionu byl zahájen výkop pro výstavbu E.ON energetického výzkumného centra za 40 mil. Euro, které má být dokončeno v roce 2009.

Kromě zmíněných dvou center jsou v Cáchách modernizovány nebo nově budovány výzkumné a zkušební laboratoře větrání a klimatizace řady významných firem jako Imtech, LTG, TROX, Kampmann, Ziehl-Abegg, Emco, Schaco aj.

CCI 13/2008

(Ku)

* Nové chladivo pro automobily je nebezpečné

Podle informace, Německý svaz automobilů oznámil, že nové chladivo pro automobily fy. Honeywell 1234yf (tetrafluorpropen), nebude již v Německu používáno. Toto chladivo je nebezpečné nejen pro zápalnost v případě nehody, ale zejména pro údajně smrtelné účinky produktů jeho rozpadu po spálení. Výrobce hrozí zkušební DÚH žalobou za zveřejnění negativních výsledků testů. Němečtí výrobci automobilů dají výsledky DÚH přezkoušet a došlo se ke stejným závěrům.

CCI 13/2008

(Ku)