

**České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical  
Engineering**

Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.

**Optické a tepelné charakteristiky solárních kolektorů**

**Optical and thermal characteristics of solar collectors**

## Summary

A radical growth of solar thermal collector installations in the residential building sector has been shown in last decade in the context of all-European emphasis on energy intensity decrease and increase of renewables share in heat and electricity demand coverage.

Fast-growing European solar market brings also an issue of solar collectors quality evaluation both from the point of durability (how long will collector survive at the building) and from the point of energetic quality (how much energy will collector save). Unified European standards for qualification tests at extreme operation conditions and for particular optical and thermal performance characteristics tests are available today. However, optical and thermal characteristics alone evaluated at reference laboratory conditions don't have sufficient predicative capability and discussion proceeds to find a way how to evaluate energy quality of solar collector by only one complex parameter or characteristic to compare it with others.

Habilitation lecture presents the basic characteristics of solar thermal collector: reference collector area, efficiency curve and incidence angle modifier curve. Influence of several design parameters on efficiency of solar collector (flat-plate, vacuum tube) and on its thermal performance for different construction arrangements has been shown by mathematical modelling and experimental testing in given examples.

Coupling the efficiency curve with optical characteristic for beam and diffuse radiation allows to describe the real performance of different solar collector designs and to simulate their thermal power throughout the year on the basis of operation and climate conditions.

Finally, a calculation method for complex evaluation of solar collector performance resulting from optical and thermal characteristics has been presented. Method allows to compare the theoretical specific annual heat gains for different solar collectors designs with various optical and thermal characteristics at same operation conditions or for given solar collector at various operation conditions. Comparison has shown a large performance variability especially for vacuum tube Sydney collectors, which can be much better but also much worse than standard flat-plate solar collectors.

## Souhrn

V souvislosti s celoevropským důrazem na snižování energetické náročnosti a zvyšování podílu obnovitelných zdrojů energie na krytí potřeb tepla a elektrické energie v budovách lze vysledovat v posledním desetiletí prudký nárůst instalací solárních tepelných kolektorů, zvláště v obytných budovách.

Rychle se rozvíjející evropský trh však přináší i otázky hodnocení kvality solárních kolektorů a to jak z hlediska životnosti konstrukce (jak dlouho kolektor na střeše vydrží) tak z hlediska energetického (kolik energie kolektor uspoří). V současné době jsou v evropské normalizaci k dispozici jednotné normy pro zkoušení spolehlivosti kolektorů při zatížení simulujícím extrémní provozní podmínky a pro zkoušení dílčích optických a tepelných charakteristik solárních kolektorů. Optické a tepelné charakteristiky stanovené za referenčních laboratorních podmínek však samy o sobě nemají dostatečnou vypovídající schopnost a v současné době probíhá diskuze jakým způsobem je možné zhodnotit energetickou kvalitu solárního kolektoru pouze jediným parametrem či charakteristikou pro účely porovnání s jiným kolektorem odlišné konstrukce.

Habilitační přednáška představuje základní charakteristiky solárního tepelného kolektoru: vztaznou plochu kolektoru, křivku účinnosti a křivku modifikátoru úhlu dopadu. Na řadě konkrétních příkladů je matematickými modely i experimentálními zkouškami ukázán vliv některých konstrukčních parametrů na účinnost solárních kolektorů (plochých, trubkových) a na reálný přínos některých konstrukčních uspořádání, který není na první pohled patrný. Doplněním křivky účinnosti optickými charakteristikami pro přímé a difúzní záření lze výpočtově postihnout reálné chování různých konstrukcí solárních kolektorů a simulovat jeho tepelný výkon během roku na základě provozních a klimatických podmínek.

V závěru přednášky je představena výpočtová metoda komplexního hodnocení výkonnosti solárního kolektoru vycházející z optických a tepelných charakteristik. Metoda umožňuje porovnat teoretický měrný roční zisk konstrukčně odlišných kolektorů s různými optickými i tepelnými charakteristikami za stejných provozních podmínek nebo stejného kolektoru za odlišných provozních podmínek. Porovnání ukázalo na velkou variabilitu výkonnosti především u trubkových vakuových Sydney kolektorů, které mohou být výrazně lepší, ale také výrazně horší než běžné ploché solární kolektory.

**Klíčová slova:**

sluneční energie, solární kolektor, tepelný výkon, účinnost, optické charakteristiky, matematické modelování, experimentální zkoušení

**Keywords:**

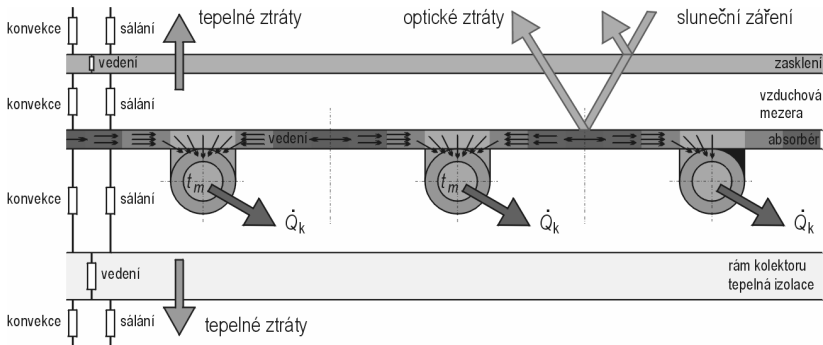
solar energy, solar collector, thermal performance, efficiency, optical characteristics, mathematical modeling, experimental testing

## Obsah

1.	Úvod.....	6
2.	Optické a tepelné charakteristiky solárního kolektoru.....	7
2.1.	Vztažná plocha kolektoru.....	7
2.2.	Výkon a účinnost solárního kolektoru.....	8
2.3.	Modifikátor úhlu dopadu.....	10
3.	Vliv konstrukčních parametrů na účinnost kolektoru.....	12
3.1.	Emisivita absorpčního povrchu.....	12
3.2.	Tepelná izolace kolektoru.....	12
3.3.	Pokročilé kolektory a kolektory integrované do budov.....	13
3.4.	Spoj absorbér-trubka.....	14
3.5.	Teplosměnná lamela trubkového Sydney kolektoru.....	14
3.6.	Kontakt mezi pouzdrem a kondenzátorem tepelné trubice.....	16
4.	Vliv optických charakteristik na chování kolektoru.....	17
5.	Výkonnost solárních kolektorů.....	19
5.1.	Hodnocení výkonnosti solárního kolektoru.....	19
5.2.	Analýza výkonnosti solárních kolektorů.....	20
6.	Závěr.....	22
7.	Literatura.....	23

# 1. Úvod

Solární tepelný kolektor je zařízení určené k přímé přeměně energie slunečního záření v tepelnou energii pohlcením na absorběru. Teplo je z absorběru odváděno nejčastěji kapalinou protékající trubkovým registrem vodivě spojeným s absorpční plochou. Funkci solárního tepelného kolektoru lze popsat obecnou energetickou rovnováhou. Solární kolektor přijímá sluneční záření, které je částečně odraženo od zasklení a absorběru a zbytek se pohlcuje na povrchu absorběru a mění v teplo. Část tepla z pohlceného záření se odvádí teplotnosnou kapalinou, část odchází zpět do okolního prostředí ve formě tepelných ztrát kolektoru a část tepla se akumuluje v těle kolektoru. Zjednodušené schéma energetické bilance solárního kolektoru s vyznačením tepelných odporů je uvedeno na obr. 1.



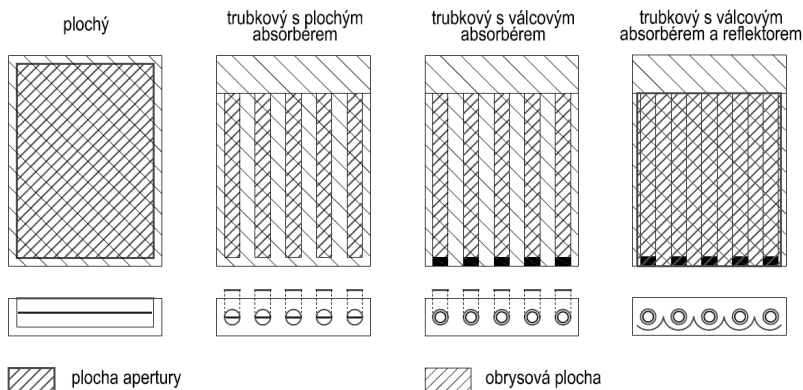
Obr. 1 – Energetická bilance solárního kolektoru

Pro omezení tepelných ztrát se využívá krycího zasklení a nízkoemisivního povrchu absorběru na přední straně kolektoru, tepelné izolace na boční a zadní straně kolektoru, případně snížení tlaku v prostoru kolektoru (vakuové kolektory). Pro snížení optických ztrát používají výrobci vysoce propustného solárního skla s nízkým obsahem oxidů železa a pohlívého absorběru nejčastěji na bázi keramicko-kovových povlaků (cer-met), případně využívají antireflexní povlaky (u obou).

V současné době se v podmínkách ČR využívá čtyř hlavních druhů solárních kolektorů: ploché nezasklené, ploché zasklené, trubkové s plochým absorběrem a trubkové s válcovým absorběrem (vakuové), viz obr. 2. U každého druhu pak na trhu existuje nespočet konstrukčních typů s různými geometrickými a fyzikálními vlastnostmi jednotlivých částí kolektorů a použitých materiálů, které ovlivňují optické a tepelné vlastnosti absorběru, zasklení, tepelně izolovaného rámu, případně vnitřního prostoru kolektoru.

## 2. Optické a tepelné charakteristiky solárního kolektoru

Pro účely energetických výpočtů solárních soustav a hodnocení výkonnosti (energetické kvality) solárního kolektoru se informace o tepelném a optickém chování kolektorů získávají matematickým modelováním nebo experimentálními zkouškami za definovaných podmínek. Jde především o křivku **tepelného výkonu** kolektoru, nebo častěji z ní odvozenou křivku **účinnosti**, a křivku **modifikátoru úhlu dopadu** vyjadřující závislost účinnosti solárního kolektoru na úhlu dopadu slunečního záření. Vliv tepelné kapacity není v praxi tak významný a proto zde nebude dále rozebírán.



Obr. 2 – Různé typy solárních kolektorů a uvažované vztažné plochy

### 2.1. Vztažná plocha kolektoru

U solárních kolektorů se rozlišují celkem tři plochy, ke kterým se vztahují parametry kolektoru, zejména křivka účinnosti:

- **plocha absorbéru  $A_A$**  – „aktivní“ plocha, na které dochází k přeměně dopadajícího slunečního záření v teplo;
- **plocha apertury  $A_a$**  – plocha otvoru, kterým vstupuje do kolektoru nesoustředěné sluneční záření;
- **obrysová plocha  $A_G$**  – průmět obrysu kolektoru.

Nejmenší plochou je zpravidla **plocha absorpční**. Je problematické změřit ji bez rozebrání kolektoru (ploché), případně rozbití kolektoru (trubkové) a běžně se jako vztažná plocha nepoužívá.

**Plochou apertury** plochého kolektoru je plocha propustné části jeho zasklení. U trubkového kolektoru bez reflektoru (jednostěnný, dvojtěnný Sydney) je plochou apertury průmět vnější trubky (krycí trubice). U trubkového Sydney kolektoru s reflektorem je aperturou kolektoru plocha průmětu reflektoru. Apertura kolektoru

se měří snadno, neboť je zvnějšku přístupná a obecně je považována za referenční plochu kolektoru.

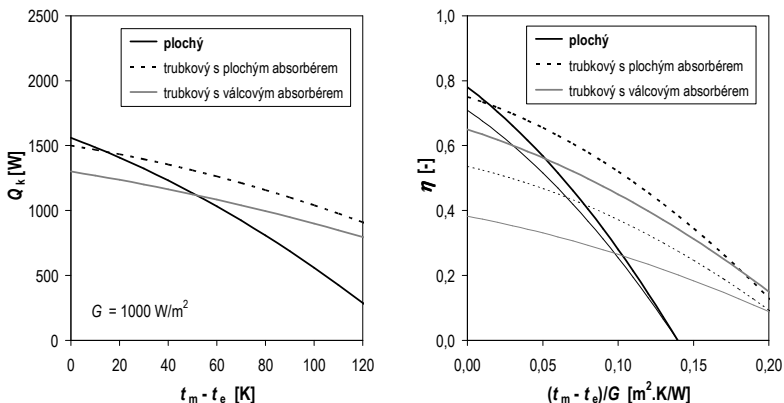
Vztažení křivky účinnosti k ploše apertury kolektoru je vhodné z hlediska porovnání vlastností dvou kolektorů, konstrukce a kvality provedení. Z hlediska rozhodování o potenciálu kolektoru pro danou aplikaci či pro porovnání kolektorů s různými účinnými plochami je vhodnější vztažení účinnosti kolektoru k obrysové ploše kolektoru  $A_G$ , tedy ke skutečné ploše, kterou kolektor zaujímá v prostoru (na střeše, na terénu, apod.). Účinnost a výkon kolektoru vztažené k **obrysové ploše kolektoru** jsou parametry, které by investora měly zajímat při analýze potenciálu využití sluneční energie na konkrétním místě instalace. Například trubkové kolektory bez reflektoru vykazují výrazný podíl neúčinné plochy na celkové ploše zastavěné kolektorem na střeše, zvláště v porovnání s plochými kolektory (viz obr. 2).

## 2.2. Výkon a účinnost solárního kolektoru

Výkon solárního kolektoru  $\dot{Q}_k$  se experimentálně stanovuje z měření průtoku  $\dot{M}$  teplosné kapaliny kolektorem a rozdílu jejich teplot mezi vstupem ( $t_{k1}$ ) a výstupem ( $t_{k2}$ ) kolektoru

$$\dot{Q}_k = \dot{M} \cdot c \cdot (t_{k2} - t_{k1}) \quad (1)$$

a vyjadřuje se jako křivka v závislosti na rozdílu mezi střední teplotou kapaliny a okolní teplotou ( $t_m - t_e$ ) pro sluneční ozáření  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ , viz obr. 3 (vlevo).



Obr. 3 – Porovnání křivek výkonu ( $2 \text{ m}^2$  apertury) a účinnosti vztažené k ploše apertury (tučně) a k obrysové ploše (tence) u jednotlivých druhů solárních kolektorů

Účinnost solárního kolektoru  $\eta$  je za ustálených podmínek definována jako poměr tepelného výkonu odváděného teplosnou kapalinou z kolektoru  $\dot{Q}_k$  k „příkonu“



slunečního záření (zářivému toku) dopadajícího na kolektor a vyhodnocuje se ve tvaru regresní paraboly

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{G \cdot A_k} = \eta_0 - a_1 \frac{t_m - t_e}{G} - a_2 \frac{(t_m - t_e)^2}{G} \quad (2)$$

kde

$G$  je sluneční ozáření, ve  $W/m^2$ ;

$A_k$  vztažná plocha kolektoru, obvykle plocha apertury kolektoru, v  $m^2$ .

$\eta_0$  účinnost solárního kolektoru při nulových tepelných ztrátách, někdy označovaná jako optická účinnost kolektoru;

$a_1$  lineární součinitel tepelné ztráty kolektoru, ve  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$a_2$  kvadratický součinitel tepelné ztráty kolektoru (vyjadřuje teplotní závislost), ve  $W/(m^2 \cdot K^2)$ ;

Součinitele křivky účinnosti  $\eta_0$ ,  $a_1$  a  $a_2$  definují křivku výkonu a účinnosti solárního kolektoru v celém rozsahu provozních podmínek a musí být uváděny v souvislosti s referenční plochou  $A_k$ , ke které je křivka účinnosti vztažena. Křivka účinnosti slouží pro porovnání kvality dvou obdobných konstrukcí kolektoru z hlediska tepelných a částečně optických vlastností. Dodavatel, který nedokáže křivku účinnosti prokázat protokolem ze zkoušky v akreditované laboratoři, vlastně zákazníkovi nemůže podat informaci o tepelném výkonu solárního kolektoru a jeho energetické kvalitě.

Z teoretické energetické bilance tepelných toků z povrchu absorbéru solárního kolektoru do okolí a do teplotnosné kapaliny [1,2] vyplývá pro účinnost vztah

$$\eta = F' \cdot \left[ \tau \cdot \alpha - U \frac{(t_m - t_e)}{G} \right] \quad (3)$$

kde

$F'$  je účinnostní součinitel, vyjadřuje schopnost absorbéru odvést z povrchu teplo do teplotnosné kapaliny;

$\tau$  propustnost slunečního záření zasklením;

$\alpha$  pohltivost slunečního záření absorbérem;

$U$  součinitel prostupu tepla kolektoru, ve  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

Porovnáním členů v rovnici (2) a rovnici (3) lze experimentálně stanoveným konstantám křivky účinnosti přiřadit fyzikální význam [3]. Pro účinnost při nulových tepelných ztrátách platí

$$F' \cdot \tau \cdot \alpha = \eta_0 \quad (4)$$

a účinný součinitel prostupu tepla kolektorem lze stanovit jako

$$F' \cdot U = a_1 + a_2 \cdot (t_m - t_e) \quad (5)$$

Pokročilé programy pro simulaci tepelného chování solárních kolektorů umožňují virtuální návrh konstrukce kolektoru a stanovení jeho křivky účinnosti na základě definovaných geometrických a fyzikálních parametrů jednotlivých částí kolektoru [4].

### 2.3. Modifikátor úhlu dopadu

Vzhledem k tomu, že propustnost slunečního záření  $\tau$  zasklením kolektoru i pohltivost  $\alpha$  absorpčního povrchu jsou optické vlastnosti závislé na úhlu dopadu slunečního záření, je nutné doplnit křivku účinnosti závislosti, vyjadřující změnu optické účinnosti kolektoru  $\eta_0$  s úhlem dopadu přímého (směrově závislého) slunečního záření oproti kolmému dopadu. Takovou závislostí je křivka modifikátoru úhlu dopadu  $K_\theta$ , někdy označovaného jako optická charakteristika kolektoru. Modifikátor úhlu dopadu je definován jako poměr

$$K_\theta = \frac{F'(\tau\alpha)_{e,\theta}}{F'(\tau\alpha)_{e,n}} = \frac{\eta_0(\theta)}{\eta_0(0^\circ)} \quad (6)$$

kde

$\eta_0(\theta)$  je optická účinnost při obecném úhlu dopadu  $\theta$ ,

$\eta_0(0^\circ)$  optická účinnost při kolmém úhlu dopadu ( $\theta = 0^\circ$ ).

Optická charakteristika se u různých druhů i typů kolektorů obecně liší. Ploché solární kolektory (ploché zasklení, plochý absorber) mají optické vlastnosti v obou hlavních rovinách (příčné: východ-západ, podélné: jih-sever) symetrické a mezi různými typy plochých kolektorů není výrazný rozdíl. Trubkové solární kolektory mají vzhledem k tvaru apertury a absorberu, případně reflektoru, nesymetrickou optickou charakteristiku, která se typ od typu může navíc výrazně lišit a hodnoty modifikátoru  $K_\theta$  je nutné vyhodnocovat odděleně ve dvou rovinách:

- podélné  $K_{\theta,L} = K_\theta(\theta_L, 0)$
- příčné  $K_{\theta,T} = K_\theta(0, \theta_T)$

Výsledná závislost modifikátoru na obecném úhlu dopadu  $\theta$  se stanoví jako součin modifikátorů určených pro příslušné úhly v jednotlivých rovinách [3]

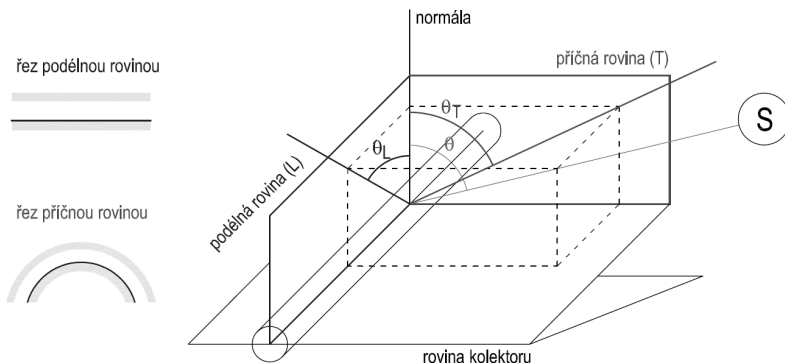
$$K_\theta(\theta_L, \theta_T) = K_{\theta,L}(\theta_L, 0) \cdot K_{\theta,T}(0, \theta_T) \quad (7)$$

Na obr. 4 je uvedena geometrie úhlů dopadu přímého slunečního záření v hlavních rovinách pro případ jedné trubky trubkového opticky nesymetrického kolektoru.

Teoreticky lze optickou charakteristiku u jednoduchých plochých kolektorů stanovit s použitím analytických Fresnelových rovnic, u složitých tvarů reflektorů a apertur trubkových kolektorů je nutné využít metod sledování paprsku (ray-tracing).

Experimentálně je křivka modifikátoru úhlu dopadu vyhodnocována stanovením hodnot účinnosti při nulových tepelných ztrátách  $\eta_0$ , tj. při střední teplotě kapaliny

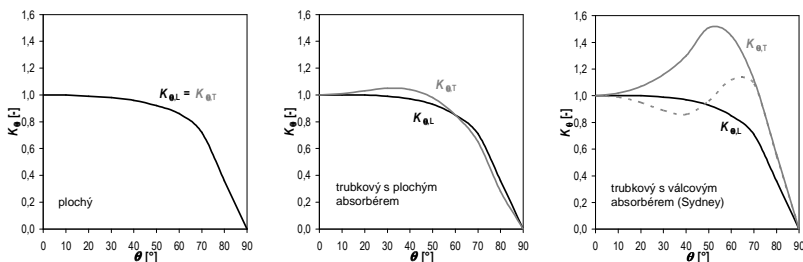
v kolektoru blízké teplotě okolního vzduchu, při různých úhlech dopadu slunečního záření v příslušných rovinách (podélné, příčné).



Obr. 4 – Geometrie trubkového kolektoru a úhlů dopadu slunečního záření v hlavních rovinách

Modifikátor úhlu dopadu  $K_d$  pro všesměrové difúzní sluneční záření se stanoví integrací v obou rovinách v mezích závislých na úhlu sklonu solárního kolektoru.

Na obr. 5 jsou uvedeny typické průběhy křivky modifikátoru úhlu dopadu pro různé druhy solárních kolektorů. V případě trubkových Sydney kolektorů je hodnota vrcholu příčného modifikátoru v oblasti úhlů 50 až 70° u různých typů (různý průměr trubek, vzdálenost trubek, tvar reflektoru, aj.) různá a pohybuje se od 1,1 do 1,6. U trubkových kolektorů s reflektorem se pro různé konstrukce může tvar křivky příčného modifikátoru  $K_{\theta,T}$  pohybovat mezi oběma uvedenými variantami. Křivka podélného modifikátoru  $K_{\theta,L}$  je u trubkových kolektorů vzhledem k obdobné optické geometrii v podélné rovině (rovná trubka) stejná jako u plochého kolektoru (viz obr.4).



Obr. 5 – Typické charakteristiky modifikátoru úhlu dopadu pro různé druhy kolektorů

### 3. Vliv konstrukčních parametrů na účinnost kolektoru

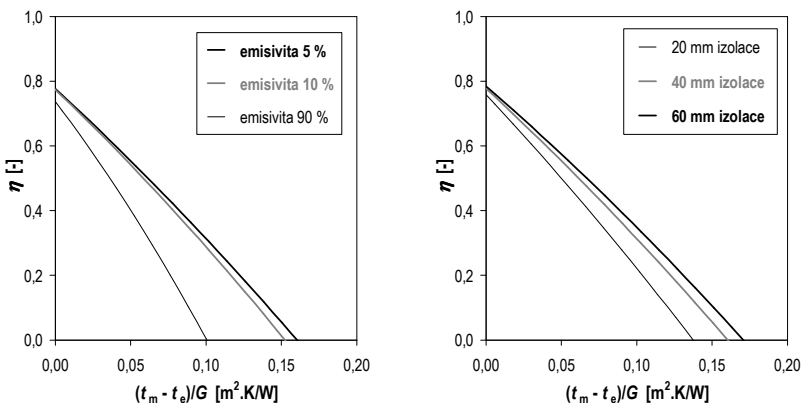
Jakým způsobem mohou konstrukční parametry ovlivnit tepelné chování solárního kolektoru lze ukázat na několika příkladech parametrických analýz. Analýzy vychází jednak z matematického modelování v programu KOLEKTOR 2.2 [5] a jednak z experimentálních zkoušek provedených v Solární laboratoři FS ČVUT v Praze [6].

#### 3.1. Emisivita absorpčního povrchu

Je zřejmé, že kolektory se spektrálně selektivním povrchem o nízké emisivitě budou mít výrazně nižší tepelné ztráty oproti spektrálně neselektivním kolektorům s vysokou hodnotou emisivity na úrovni hodnoty pohltivosti slunečního záření (viz obr. 6 vlevo). Co však na první pohled tak zřejmé není, je velmi malý rozdíl v účinnosti mezi kolektorem s 5% a 10% emisivitou absorberu, což v běžné instalaci solární soustavy s pokrytím 50 % vede k relativně malým rozdílům v konečných energetických přínosech (cca 2 %) [7].

#### 3.2. Tepelná izolace kolektoru

U běžných solárních selektivních kolektorů je poměr tepelné ztráty zasklením k celkové tepelné ztrátě kolektoru okolo 75 % a více. Častým dotazem ze strany výrobců solárních kolektorů je vliv tloušťky tepelné izolace zadní a boční strany kolektoru na účinnost a tedy do jaké míry má smysl zvyšovat tloušťku tepelné izolace kolektoru a s tím cenu kolektoru.



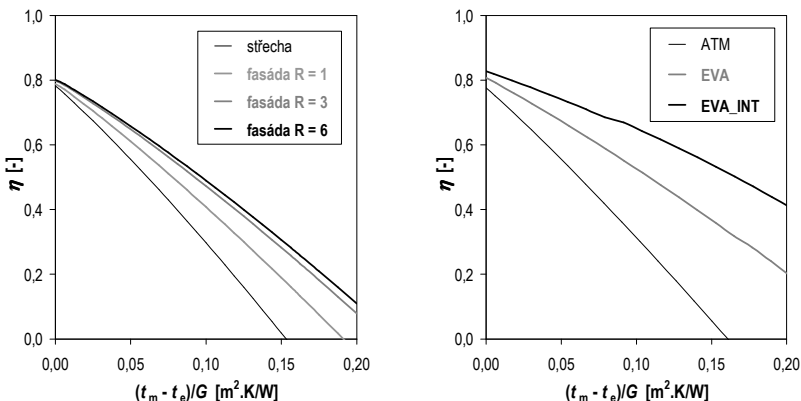
Obr. 6 – Analýza vlivu emisivity absorberu a tloušťky tepelné izolace rámu na účinnost solárního kolektoru

Pro případ selektivního kolektoru je v grafu na obr. 6 (vpravo) analyzován vliv tloušťky izolace na křivku účinnosti. Snížení tepelné ztráty se projevuje významně především v oblasti vyšších teplot a postupné zvyšování tloušťky izolace se projevuje čím dál méně, protože se zároveň zvyšuje podíl tepelné ztráty zasklením.

Ačkoli je z grafu mezi křivkami účinnosti kolektoru s tloušťkou izolace 20 a 60 mm výrazný rozdíl, v případě použití obou variant solárního kolektoru pro solární přípravu teplé vody např. s cílovým pokrytím 50 %, je rozdíl mezi dosaženými zisky okolo 12 % a v potřebné ploše do 25 % [7].

### 3.3. Pokročilé kolektory a kolektory integrované do budov

Kontaktní či přímou integraci solárních kolektorů do konstrukce obálky budovy je možné eliminovat tepelnou ztrátu zadní a boční stranou. Integraci kolektoru do fasády se navíc sníží přestup tepla volnou konvekcí mezi absorberem a zasklením kolektoru, což vede na jedné straně ke snížení tepelných ztrát, na druhé straně však vertikální umístění kolektoru znamená také nižší příjem slunečního záření o cca 30 %. Na obr. 7 jsou porovnány charakteristiky solárního kolektoru při běžné instalaci na střeše a kolektoru integrovaného do fasády o různém tepelném odporu. Výhoda fasádních solárních kolektorů oproti volné instalaci na střeších budov se proto využívá pouze u solárních soustav určených pro přitápění (vyšší zisky v zimním období) nebo u soustav s vysokým solárním pokrytím (eliminace nutnosti maření letních přebytků) [8].



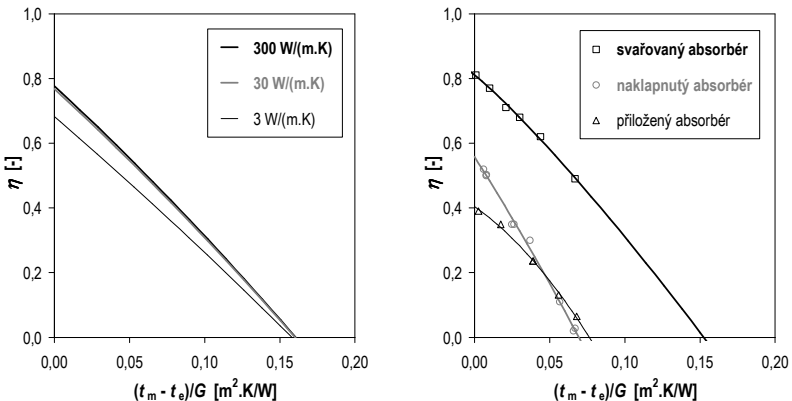
Obr. 7 – Křivky účinnosti pro kolektory integrované do fasády a pro pokročilé kolektory (atmosférický, vakuový, vakuový integrovaný do střechy)

Účinnost plochého solárního kolektoru může být dále zvýšena pokud je tlak ve vzduchové mezeře mezi absorberem a zasklením výrazně nižší než atmosférický. Obr. 7 (vpravo) ukazuje porovnání atmosférického kolektoru (případ ATM) s identickým solárním kolektorem, nicméně se vzduchovou mezerou vakuovanou na tlak 10 kPa (případ EVA). Třetí typ kolektoru s konstrukcí shodnou s EVA (plochý vakuový) je navíc uvažován jako integrovaný (případ EVA\_INT) do izolační vrstvy střešního pláště s tepelným odporem  $R = 6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Tepelné mosty vlivem přítomnosti podpůrných elementů proti zhroucení zasklení nebyly uvažovány.

Uvedená konstrukce teoreticky představuje radikální zlepšení účinnosti a výkonu solárního plochého vakuového kolektoru při vysokých teplotách požadovaných např. pro účely solárního chlazení nebo pro průmyslové procesy [9].

### 3.4. Spoj absorbér-trubka

Zajištění dostatečně vodivého spoje mezi absorpčním povrchem a trubkami registru, kterými se odvádí teplo kapalinou, patří k základním konstrukčním podmínkám solárního kolektoru, kterou však řada výrobců nerespektuje. Tento problém se vyskytuje v malém měřítku u plochých kolektorů, častěji se projevuje především v konstrukcích trubkových vakuových kolektorů typu Sydney. Pro praxi je zajímavé, že účinnostní součinitel  $F'$  je do hodnoty tepelné propustnosti zhruba  $30 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  necitlivý na kvalitu spoje, neboť v oblasti vysokých hodnot tepelné propustnosti spoje jde vždy o materiálové vodivé spojení a tepelný odpor spoje je oproti odporu lamely absorbéru výrazně menší.



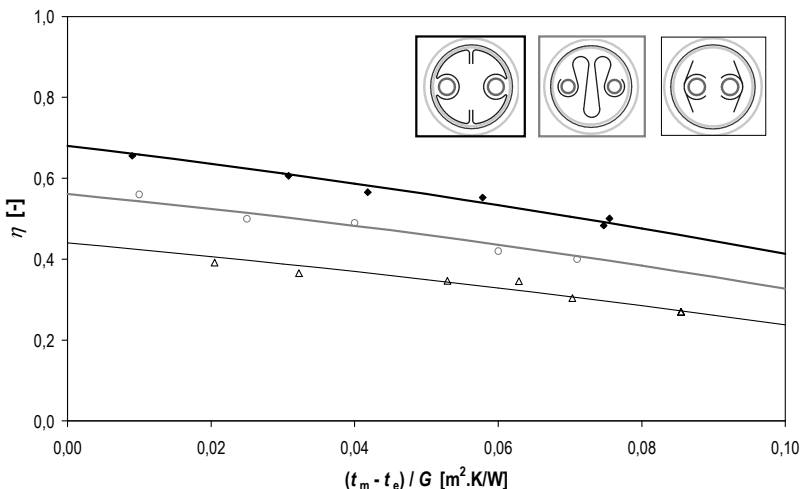
Obr. 8 – Vlivu konstrukčního provedení spoje absorbér-trubka na účinnost

Teprve pokud je spoj mezi absorbérem a trubkou velmi nekvalitní a tepelná propustnost spoje klesne pod mezní hodnotu, klesá schopnost absorbéru předat teplo do kapaliny (vyjádřená účinnostním součinitelem kolektoru  $F'$ ), což se projeví na křivce účinnosti solárního kolektoru (viz obr. 8 vlevo). To je případ dvou experimentálně ověřovaných typů spojů absorbér-trubka u plochých solárních kolektorů: 1) absorbér naklapnutý na trubce; 2) absorbér dotýkající se trubky registru. Charakteristiky obou kolektorů byly porovnány s kvalitně provedeným absorbérem ultrazvukově navařeným na trubkovém registru (viz obr. 8 vpravo) [7].

### 3.5. Teplosměnná lamela trubkového Sydney kolektoru

U trubkových vakuových kolektorů typu Sydney je účinnostní součinitel  $F'$  jediným parametrem, který výrobce kolektoru zpravidla může konstrukcí významně ovlivnit,

protože propustnost zasklení  $z$ , pohltivost absorbéru  $\alpha$ , součinitel prostupu tepla  $U$  jsou nezměnitelné parametry vlastní Sydney trubky. Kromě použití kvalitní vakuové trubky je pro výrobu účinného trubkového Sydney kolektoru nutné vhodným konstrukčním provedením teplosměnné lamely zajistit účinný přenos tepla z vnitřního povrchu absorpční trubky do teplotnosné kapaliny.



Obr. 9 – Porovnání křivek účinnosti pro různá konstrukční provedení teplosměnné lamely v Sydney trubce

Do jaké míry má vhodné použití tepelně vodivé lamely vliv na přenos tepla a tím i na účinnost celého kolektoru bylo experimentálně zkoumáno na různých konstrukčních variantách vnitřního uspořádání trubkového Sydney kolektoru (viz obr. 9):

- varianta A – kvalitní provedení lamely s celoplošným kontaktem s vnitřním povrchem absorpční trubky a vnějším povrchem teplotnosnou kapalinou protékající U-smyčky potrubního registru;
- varianta B – lamela se plně dotýká absorpční trubky pouze ve vrcholech ohybů a především více méně vyplňuje vzduchový prostor uvnitř absorpční trubky;
- varianta C – na potrubním registru jsou naklapnutá křídélka s velmi úzkou lamelou bez dotyku s absorpční trubkou.

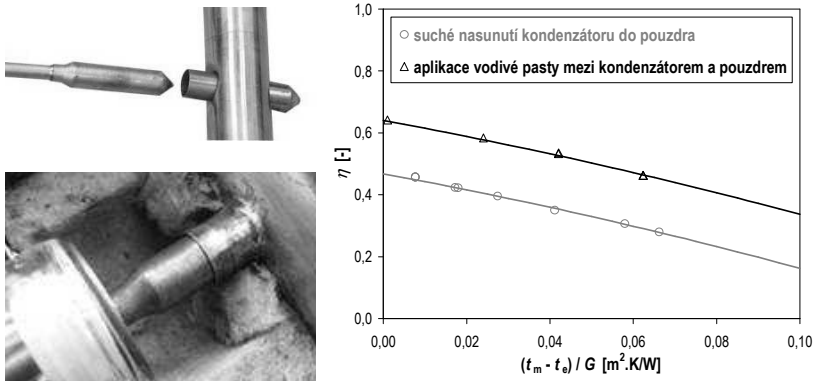
Přenos tepla z absorpční trubky do teplotnosné kapaliny u konstrukčních provedení B a C je poměrně komplikovaný: sáláním a volnou konvekcí na lamelu a dále vedením lamelou a více či méně vodivým spojem s U-smyčkou potrubního registru, což celkově znamená výrazné zhoršení účinnostního součinitele  $F'$  oproti variantě A [10].

Z výše uvedeného vyplývá nezbytnost použití vodivé teplosměnné lamely, např. z hliníku nebo mědi, o dostatečné tloušťce, která je v dobrém kontaktu jak

s absorpční plochou (rozepnutá, předepjatá, tvárná) tak potrubním registrem (nalisovaná nebo navařená na potrubí).

### 3.6. Kontakt mezi pouzdrem a kondenzátorem tepelné trubice

Konstrukce řady trubkových Sydney kolektorů využívá pro přenos tepla mezi absorpčním povrchem a teplotonosnou kapalinou tepelnou trubici, která skýtá některé výhody jako je omezení tvorby velkého množství páry z kapaliny v kolektoru při stavu bez odběru tepla (stagnace), vysoký přestup tepla či snadná vyměnitelnost jednotlivých Sydney trubek v případě poškození. Na evropský trh však přicházejí trubkové vakuové Sydney kolektory, které se vyznačují sice jednoduchým uspořádáním kondenzační části využívajícím trubkové pouzdro pro „suché“ zasunutí kondenzátoru, nicméně často se špatným kontaktem, kdy teplosměnný povrch kondenzátoru nedoléhá dostatečně k vnitřnímu povrchu pouzdra. Na obr. 10 (vlevo) je znázorněna problematická část konstrukčního uspořádání trubkového Sydney kolektoru s tepelnou trubicí.



Obr. 10 – Experimentálně zjištěné křivky účinnosti trubkového Sydney kolektoru s problematickým spojením kondenzátor-pouzdro

V případě teplosměnné lamely vodivě spojené s absorpční trubicí i výparníkem tepelné trubice může nevhodné provedení kondenzační části zcela degradovat účinnost kolektoru jak bylo potvrzeno při experimentálním zkoušení Sydney kolektoru s tepelnou trubicí (viz obr. 10 vpravo) [10]. Dolní křivka odpovídá běžnému stavu, kdy kondenzátor je nevhodně „nasucho“ nasunut do pouzdra. Vlivem nedostatečného přenosu tepla mezi absorpčním povrchem Sydney trubky a teplotonosnou kapalinou je křivka účinnosti položena velmi nízko. Pro stejný kolektor byla provedena změna v kondenzační části kolektoru a pro zlepšení tepelné propustnosti kontaktu byla použita tepelně vodivá pasta mezi kondenzátorem a pouzdrem. Důsledkem je zvýšení účinnostního součinitele  $F'$  a odpovídající posun celé křivky účinnosti do oblasti vyšších hodnot.



#### 4. Vliv optických charakteristik na chování kolektoru

Křivky účinnosti a výkonu solárních kolektorů vycházejí z výsledků zkoušek tepelného chování v ustáleném stavu za definovaných podmínek: jasný den s výraznou přímou složkou slunečního záření a kolmý (normálový) úhel dopadu slunečního záření na rovinu kolektoru. Takové podmínky však v běžném provozu solárního kolektoru nejsou časté. Úhel dopadu slunečního záření na kolektory je obecně různý vlivem proměnlivé geometrie slunečního záření během dne a roku a podíl přímého a difúzního záření je závislý na oblačnosti. Samotná křivka účinnosti, resp. výkonu solárního kolektoru pro účely modelování jeho reálného chování v průběhu roku proto nestačí a doplňuje se optickou charakteristikou, křivkou modifikátoru úhlu dopadu.

Modifikátor úhlu dopadu umožňuje zohlednit vliv úhlově závislých optických vlastností solárního kolektoru na jeho výkon pro obecné podmínky slunečního záření (úhel dopadu, přímé a difúzní záření) podle vztahu

$$\dot{Q}_k = A_a [(K_{\theta,b} G_{b,T} + K_{\theta,d} G_{d,T}) \eta_0 - a_1 (t_m - t_e) - a_2 (t_m - t_e)^2] \quad (8)$$

kde

$K_{\theta,b}$  je modifikátor úhlu dopadu vyjádřený pro úhel dopadu přímého slunečního záření  $\theta$ ;

$G_{b,T}$  přímé sluneční ozáření na rovinu kolektoru, ve  $W/m^2$ ;

$K_{\theta,d}$  modifikátor úhlu dopadu pro difúzní sluneční záření;

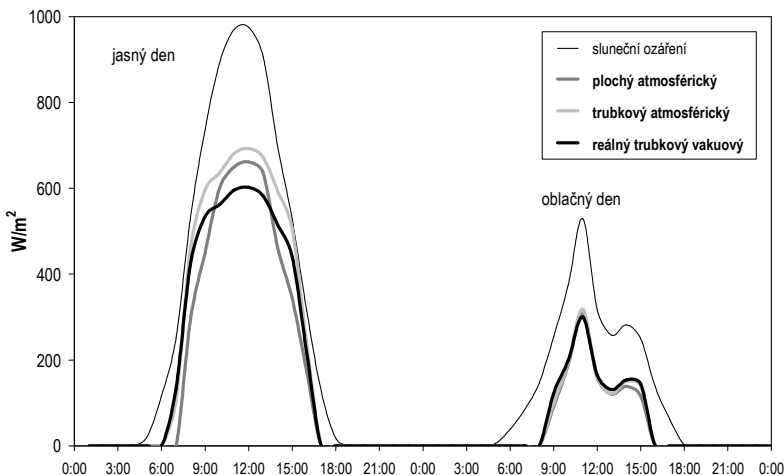
$G_{d,T}$  difúzní sluneční ozáření na rovinu kolektoru, ve  $W/m^2$ ;

Rovnice výkonu solárního kolektoru (8) umožňuje zohlednit reálné chování různých konstrukcí solárního kolektoru během dne a je základem simulačních výpočtů solárních soustav.

Na obr. 11 jsou znázorněny průběhy měrného teoretického výkonu plochého atmosférického kolektoru, trubkového atmosférického (fiktivní kolektor s válcovým absorberem a křivkou účinnosti identickou s uvažovaným plochým atmosférickým kolektorem) a reálného trubkového vakuového kolektoru s válcovým absorberem a typickou charakteristikou účinnosti. V případě jasného dne (vlevo) umožňuje trubkový atmosférický kolektor získat více energie pouze díky svým výhodnějším optickým vlastnostem oproti plochému, avšak v průběhu oblačného dne s vyšším podílem difúzního záření již rozdíl není výrazný (vpravo). Naproti tomu reálný trubkový vakuový kolektor těžší nejen z optických vlastností válcové plochy apertury a absorberu, ale také z vyšší „citlivosti“ na nízké hladiny slunečního ozáření vlivem výrazně nižších tepelných ztrát. Tyto výhody jsou však často „kompenzovány“ nižší hodnotou  $\eta_0(0^\circ)$ , která se promítá do nižšího výkonu trubkového kolektoru v době okolo solárního poledne oproti plochému kolektoru.

Charakteristické průběhy denního výkonu u plochých a trubkových vakuových solárních kolektorů vlivem rozdílných optických charakteristik byly potvrzeny

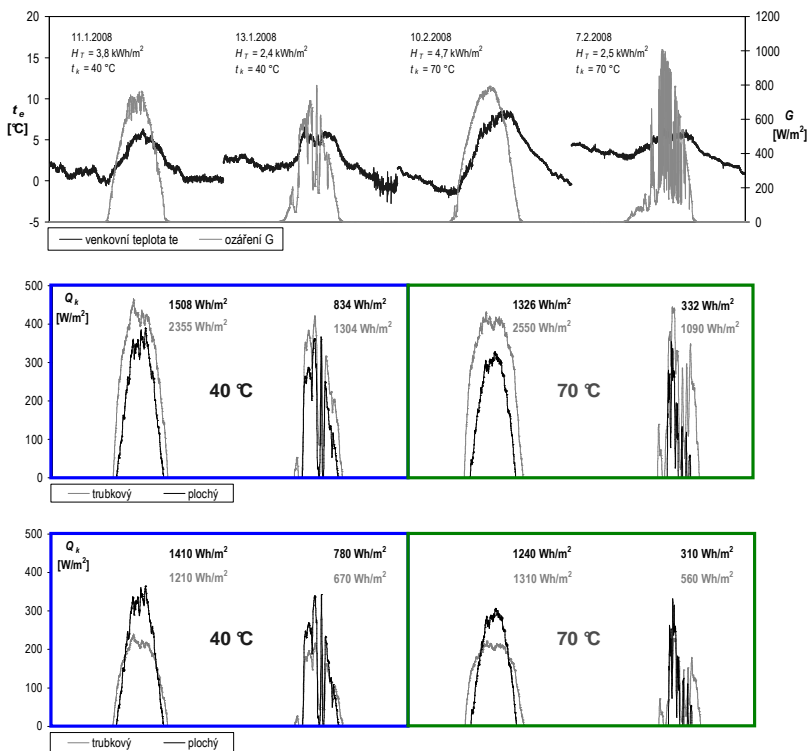
experimentálně v rámci srovnávacích měření tepelného chování kolektorů v Solární laboratoři za identických provozních a klimatických podmínek. Měření probíhalo v jasných i oblačných dnech zimního období při provozní teplotě kolektorů 40 a 70 °C. Měřeny byly celodenní průběhy výkonů obou solárních kolektorů. Sklon obou kolektorů byl 45°, typický pro celoroční provoz [11].



Obr. 11 – Porovnání průběhu výkonu kolektoru s plochým a válcovým absorbérem ( $t_m = 40\text{ °C}$ ) vztaženého k ploše apertury

Na obr. 12 je zobrazeno porovnání denních průběhů měrného výkonu plochého atmosférického solárního kolektoru a trubkového vakuového Sydney kolektoru (s přímým průtokem) vztaženého na plochu apertury kolektorů  $A_a$  a na hrubou plochu kolektorů  $A_G$ .

Z porovnání solárních kolektorů je patrný vyšší měrný výkon trubkového kolektoru v okrajových částech dne vlivem geometrie absorbéru a tedy rovnoměrnější rozložení výkonu kolektoru během dne. V případě vztažení výkonu a denních zisků k ploše apertury kolektoru  $A_a$  vykazuje zkoušený trubkový vakuový kolektor výrazně vyšší zisky než plochý. Pokud je však výkon vztažen k obrysové ploše kolektoru  $A_G$ , kterou zaujímá na místě instalace, je situace odlišná. V oblasti nízkých provozních teplot dodá plochý solární kolektor více energie na zastavěnou plochu střechy, zatímco trubkový vakuový kolektor je výkonnější především při podmínkách vyššího podílu difúzního slunečního záření a vyšších teplotních rozdílů mezi kolektorem a okolím.



Obr. 12 – Výsledky porovnání denního průběhu výkonů trubkového vakuového Sydney kolektoru (šedá) a plochého atmosférického kolektoru (černá) při různých provozních a klimatických podmínkách

## 5. Výkonnost solárních kolektorů

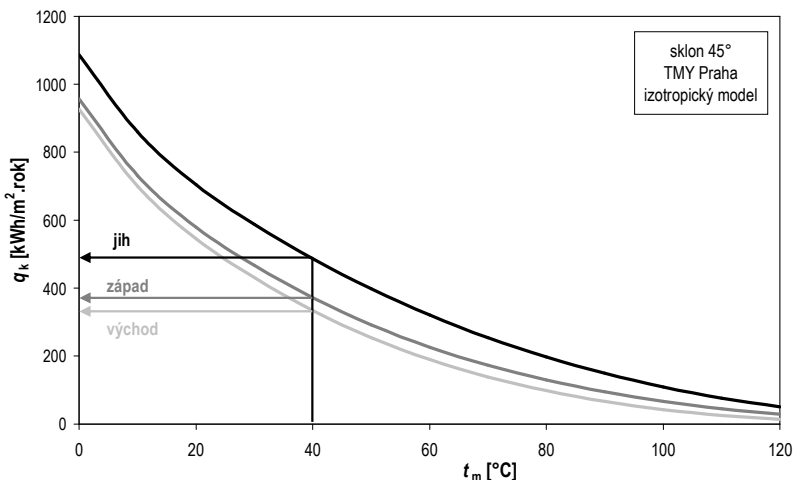
Výkonnost solárních kolektorů je možné definovat jako schopnost produkovat energetický zisk za typických místních klimatických a provozních podmínek. Výkonnost je zároveň parametrem vlastním solárnímu kolektoru bez ohledu na provedení zbytku solární soustavy a bez ohledu na využitelnost produkovaných zisků v závislosti na podmínkách odběru tepla aplikace.

### 5.1. Hodnocení výkonnosti solárního kolektoru

Pro hodnocení výkonnosti solárních kolektorů byl vyvinut výpočtový model VYKON\_SK [12], který hodnotí roční teoretický tepelný zisk solárního kolektoru simulačním výpočtem s využitím křivky účinnosti a křivky modifikátoru úhlu dopadu kolektoru jako vstupních údajů a databáze hodinových klimatických údajů o slunečním ozáření a venkovní teplotě.

Program VYKON\_SK rozpočítává celkové sluneční ozáření na vodorovnou rovinu na přímou a difúzní složku modelem na základě oblačnosti a pro zadaný sklon a orientaci kolektoru stanovuje izotropickým modelem přímou, difúzní a odraženou složku slunečního ozáření na rovinu kolektoru. Na základě parametrů kolektoru je pro každou hodinu stanoven teoreticky dostupný výkon solárního kolektoru v závislosti na přímém a difúzním slunečním ozáření pro celoročně konstantní teplotu  $t_m$ . Pro vyhodnocení celoročního teoreticky dostupného energetického zisku solárního kolektoru jsou kladné hodinové energetické zisky sečteny, zatímco záporné nejsou uvažovány. Výpočet se postupně provádí pro 13 různých provozních teplot  $t_m$  v kolektoru v rozsahu 0 až 120 °C a výsledkem výpočtu je integrální křivka výkonnosti solárního kolektoru.

Simulačním modelem je možné porovnat teoretický měrný roční zisk konstrukčně odlišných kolektorů s různými optickými i tepelnými charakteristikami za stejných provozních podmínek nebo stejného kolektoru za odlišných provozních podmínek, např. různé orientace nebo sklony kolektoru (viz obr. 13).



Obr. 13 – Křivky teoreticky dostupných ročních tepelných zisků (výkonnosti) kolektoru v závislosti na provozní teplotě pro různé orientace (jih, východ, západ)

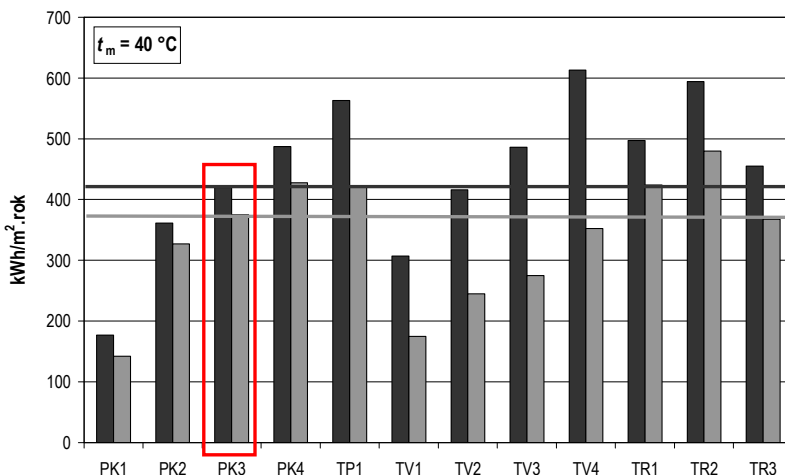
## 5.2. Analýza výkonnosti solárních kolektorů

Pro názorné porovnání výkonnosti solárních kolektorů s různými charakteristickými křivkami účinnosti a křivkami modifikátoru úhlu dopadu byly vybrány reálné kolektory různých konstrukčních typů a v různé kvalitě jak optické (hodnota  $\eta_0$ , křivka modifikátoru) tak tepelné (hodnoty  $a_1$  a  $a_2$ ), v jaké jsou dostupné na evropském trhu. Jejich optické a tepelné parametry byly převzaty ze zkušebních protokolů a hlavní údaje jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 – Geometrické, tepelné a optické charakteristiky analyzovaných kolektorů

Ozn.	Popis kolektoru	$A_a$	$A_G$	$\eta_0$	$a_1$	$a_2$	$K_{L,50}$	$K_{T,50}$
PK1	neselektivní plochý kolektor,	1,6	2,0	0,70	7,89	0,028	0,92	0,92
PK2	selektivní plochý kolektor	2,1	2,3	0,76	3,99	0,005	0,88	0,88
PK3	selektivní plochý kolektor	2,3	2,6	0,75	3,91	0,003	0,95	0,95
PK4	selektivní plochý kolektor	2,7	3,1	0,82	3,66	0,009	0,95	0,95
TP1	trubkový s plochým absorbérem	2,2	2,9	0,75	1,24	0,006	0,9	0,98
TV1	trubkový s válcovým absorbérem	1,0	1,7	0,45	1,80	0,008	0,93	1,51
TV2	trubkový s válcovým absorbérem	1,7	2,9	0,53	1,30	0,013	0,93	1,49
TV3	trubkový s válcovým absorbérem	2,8	5,0	0,66	2,16	0,009	0,95	1,44
TV4	trubkový s válcovým absorbérem	1,3	2,3	0,75	2,01	0,005	0,94	1,5
TR1	trubkový s válcovým absorbérem, s plochým reflektorem	1,7	2,0	0,57	0,91	0,003	0,95	1,28
TR2	trubkový s válcovým absorbérem, s válcovým reflektorem	1,7	2,1	0,76	1,42	0,003	0,97	0,96
TR3	trubkový s válcovým absorbérem, s CPC reflektorem	1,7	2,1	0,55	0,86	0,003	0,94	1,08

V grafu na obr. 14 jsou porovnány roční měrné zisky uvedených solárních kolektorů pro celoroční teplotu kapaliny v kolektorech 40 °C jako výstup z výpočtu v modelu VYKON\_SK. Tepelné zisky solárních kolektorů jsou vztaženy jednak k ploše apertury  $A_a$  (aby bylo možné srovnat obdobné konstrukce mezi sebou) a jednak k obrysové ploše  $A_G$  (aby bylo možné srovnat tepelný zisk ze skutečně zabrané plochy na střeše).



Obr. 14 – Roční teoretické měrné zisky srovnávaných solárních kolektorů podle apertury (tmavě šedá) a podle obrysové plochy (světle šedá)

Jako referenční solární kolektor byl zvolen běžný plochý atmosférický kolektor (PK3) se selektivním absorbérem. Z porovnání výkonnosti kolektorů vztažené **k ploše**

**apertury**  $A_a$  vyplývá, že v případě běžných aplikací s provozní teplotou  $t_m = 40\text{ °C}$  produkují kvalitní trubkové vakuové Sydney kolektory bez reflektoru ročně o cca 20 až 30 % více energie než běžné ploché kolektory, avšak méně kvalitní kolektory stejného druhu mohou vykazovat stejný případně i o 20 % nižší zisk. Výkonnost trubkových vakuových kolektorů s plochým absorbérem je o cca 30 % vyšší než u plochých kolektorů.

Odlíšná je situace v případě vztažení výkonnosti solárních kolektorů ***k obrysově ploše***  $A_G$  při zjišťování potenciálu výkonnosti dostupné plochy na střeše. Rozdíly mezi referenčním plochým kolektorem a trubkovými vakuovými kolektory obecně nejsou již tak výrazné. Navíc, zvláště trubkové kolektory typu Sydney bez reflektoru mohou vykazovat vzhledem k vysokému podílu neúčinné plochy (až 40 %) výrazně nižší výkonnost (některé varianty i o více jak 30 %) než referenční plochý kolektor.

## 6. Závěr

S rozvojem instalací solární tepelné techniky významně roste jak počet výrobců tak počet konstrukčních typů solárních kolektorů. Jejich kvalita je však velice různorodá a běžný uživatel není schopen ji posoudit. Vzniká proto potřeba jednoduchým avšak zároveň věrohodným způsobem posoudit schopnost solárního kolektoru produkovat tepelný zisk v běžných aplikacích.

Habilitation se ve své výzkumné praxi dlouhodobě teoreticky i experimentálně zabýval vlivem různých konstrukčních parametrů na účinnost a zisky solárního kolektoru a výsledky některých analýz jsou uvedeny v přednášce. Ačkoli se výrobci často zaměřují především na co nejnižší tepelnou ztrátu kolektoru (emisivita absorbéru, tloušťka izolace), uvedené analýzy ukázaly, že tato snaha nepřináší adekvátní přínos s ohledem na zvýšení ceny kolektoru. Naproti tomu nevhodné konstrukční uspořádání odvodu tepla z absorbéru může degradovat použití ostatních kvalitních prvků kolektoru, což bylo prokázáno u plochých i trubkových solárních kolektorů. Na základě publikování výsledků zkoušek někteří z dotčených výrobců změnili konstrukci solárních kolektorů. Ačkoli křivka účinnosti je základní charakteristikou při výběru solárních kolektorů, pro popis reálného chování kolektoru během roku je nezbytné znát i optickou charakteristiku pro přímé a difúzní sluneční záření.

V závěru přednášky je představena výpočtová metoda pro komplexní zhodnocení výkonnosti solárního kolektoru jako schopnosti produkovat tepelný zisk v průběhu celého roku. Výpočtový model byl použit pro srovnávací analýzu dvanácti konstrukčně odlišných solárních kolektorů, které svými optickými a tepelnými charakteristikami pokrývají různorodost evropského trhu. Z porovnání vyplývá výrazná variabilita výkonnosti především u trubkových vakuových kolektorů s válcovým absorbérem, která v řadě případů může být lepší než u plochých kolektorů, ale v řadě případů dostupných na trhu také výrazně horší.

Analýzy jasně ukázaly, že při srovnávání energetické kvality solárních kolektorů nelze paušálně označit určitý konstrukční typ za více či méně ziskový v porovnání

s jinými bez znalosti základních parametrů (křivka účinnosti a křivka modifikátoru) pro konkrétní případy a konkrétní účel hodnocení (provozní podmínky, hodnocení podle typu referenční plochy).

## 7. Literatura

- [1] Duffie, J., Beckman, W.: Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc. 1991. ISBN 0-471-51056-4.
- [2] Matuška, T.: Aktivní solární tepelné systémy, 1. – 3. část, In: Vytápění, větrání, instalace. 2003, roč. 12, č. 2, s. 64-67. ISSN 1210-1389.
- [3] Matuška, T.: Sešit projektanta č. 1 - Solární tepelné soustavy, Společnost pro techniku prostředí Praha 2009, ISBN: 978-80-02-02186-5. 194 stran.
- [4] Matuška, T. - Metzger, J. - Zmrhal, V.: Design Tool KOLEKTOR 2.2 for Virtual Prototyping of Solar Flat-Plate Collectors, In: EUROSUN 2008. Lisbon: SPES, 2008, p. 95-98. ISBN 978-972-95854-7-0.
- [5] Matuška, T. - Zmrhal, V.: Computer Program for Efficiency Calculation of Flat-Plate Solar Collectors KOLEKTOR 2.2, Autorizovaný software
- [6] Šourek, B. - Matuška, T.: Solární laboratoř na Ústavu techniky prostředí fakulty strojní ČVUT v Praze, In: Alternativní energie. 2007, roč. X, č. 4, s. 18-19. ISSN 1212-1673.
- [7] Matuška, T.: Vliv konstrukce solárního kolektoru na jeho účinnost a zisky solární soustavy, In: Vytápění 20. konference 2009. Společnost pro techniku prostředí, 2009, s. 133-141. ISBN 978-80-02-02136-0.
- [8] Šourek, B. - Matuška, T.: Facade Solar Collectors, In: Solar Energy. 2006, vol. 80, no. 11, p. 1443-1452. ISSN 0038-092X.
- [9] Metzger, J. - Matuška, T. - Schranzhofer, H.: A Comparative Simulation Study of Solar Flat-Plate Collectors Directly and Indirectly Integrated into the Building Envelope, In: Building Simulation 2009. IBPSA Glasgow, 2009, p. 805-810.
- [10] Matuška, T. - Šourek, B.: Zkušenosti ze zkoušení vakuových trubkových solárních kolektorů, In: Vykurovanie 2008. Bratislava: Slovenská spoločnosť pro techniku prostredia, 2008, s. 275-278. ISBN 978-80-89216-19-2.
- [11] Matuška, T. - Šourek, B.: Porovnání výkonových charakteristik trubkového vakuového kolektoru typu Sydney a plochého atmosférického kolektoru, In: Alternativní energie. 2008, roč. XI, č. 3, s. 18-20. ISSN 1212-1673.
- [12] Matuška, T.: Simulační model pro hodnocení výkonnosti solárních kolektorů VYKON\_SK, dostupné z <<http://solab.fs.cvut.cz/OstDok.htm>>

## **Ing. Tomáš Matuška, Ph.D.**

Narozen 24. července 1974 v Praze

1998 Ing. (Ekotechnika), Ústav techniky prostředí, FS ČVUT v Praze

2003 Ph.D. (Technika prostředí), Ústav techniky prostředí, FS ČVUT v Praze

2003 – odborný asistent, vědecký pracovník, Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní, ČVUT v Praze

2008 – vedoucí skupiny Alternativní zdroje energie na Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní, ČVUT v Praze

2007 udělena cena Young Researcher Award pro mladé vědecké pracovníky od Federation of European Heating and Air-Conditioning Associations

### ***Aktivity v oboru***

- předseda Československé společnosti pro sluneční energii
- člen výboru sekcí 02 Vytápění a 09 Alternativní zdroje energie Společnosti pro techniku prostředí
- člen Technických normalizačních komisí ČNI TNK 43 „Stavební tepelná technika“ a TNK 93 „Vytápění a ohřívání užitkové vody“

### ***Pedagogická praxe v předmětech:***

- přednášky a cvičení: Alternativní zdroje energie, Solární tepelná technika, Experimentální metody v technice prostředí
- koordinátor mezinárodního projektu Marie-Curie EST doktorského studia v oboru Advanced Solar Heating and Cooling for Buildings 2006 – 2010 (SOLNET, MEST-CT-2005-020498).

### ***Profesní zaměření a výzkum:***

- solární tepelné kolektory a soustavy – matematické modelování a experimentální zkoušení.
- výzkum nových materiálů a vývoj prvků pro využití v solární technice.
- integrace alternativních zdrojů energie do energeticky efektivních budov.
- garant části Alternativní zdroje energie v rámci Výzkumného záměru MSM 6840770011 Technika prostředí 2005-2010

### ***Významné výsledky:***

- autorizovaný software KOLEKTOR 2.2, Metodika pro výpočet zisků ze solárních soustav (ZU SFŽP)
- certifikované metodiky Zjednodušený výpočtový postup energetického hodnocení solárních soustav (MŽP), TNI 730302 (ÚNMZ), Provozní hodnocení tepelných soustav s obnovitelnými zdroji tepla (MŽP)