

Ing. Nikola POKORNÝ  
 doc. Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D.  
 Ing. Bořivoj ŠOUREK, Ph.D.  
 ČVUT v Praze, Univerzitní  
 centrum energeticky  
 efektivních budov

# Ověřování tepelného výkonu solárních kolektorů v laboratoři a v provozu

## Verification of the Heat Output of Solar Collectors in the Laboratory and in Operation

Recenzent  
 doc. Ing. Mojmír Vrtek, Ph.D.

Článek se zabývá problematikou testování solárních kolektorů a aplikací matematických modelů v praxi. Solární kolektory lze testovat nejen v laboratorních podmínkách ve venkovním i vnitřním prostředí pro zjištění základních parametrů potřebných pro návrh solárních soustav, ale také v provozu na konkrétní instalaci solární soustavy. Testování ve spojení s matematickým modelováním pak může sloužit pro ověření správné funkce kolektoru.

**Klíčová slova:** solární kolektor, zkoušení, modelování

The article deals with the testing of solar collectors and application of mathematical models in practice. Solar collectors can not only be tested in laboratory conditions in indoor and outdoor environment, determining the basic parameters necessary for the design of solar systems, but also during operation of the actual installation of a particular solar system. Thus the testing in conjunction with the mathematical modeling can be used to verify the correct operation of the collector.

**Keywords:** solar collector, testing, modeling

### ÚVOD

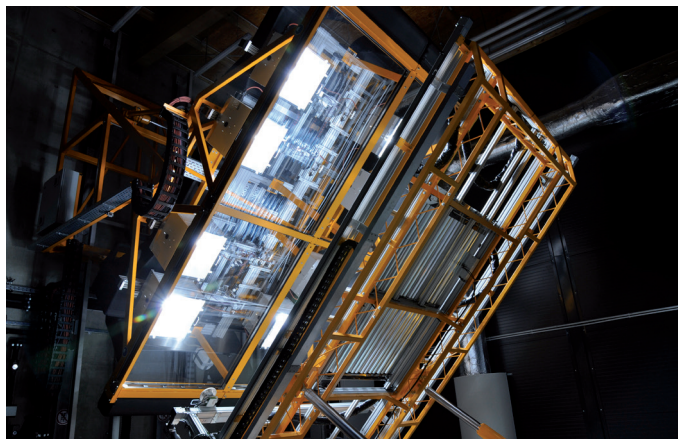
V současné době je na trhu v ČR a v Evropě velké množství solárních tepelných kolektorů a dodavatel každého z nich zpravidla uvádí jeho parametry. Solární kolektory se testují podle normových metod v laboratorních podmínkách ve venkovním nebo vnitřním prostředí (s použitím simulátoru slunečního záření). Nicméně v praxi existují situace, kdy projektant má pochyby, že konstrukci nabízeného kolektoru odpovídá deklarovaný výkon, nebo častěji, kdy uživatel solární soustavy si stěžuje na reálné přínosy, které neodpovídají předpokladům. Solární kolektory se stávají předmětem sporu, který je potřeba rozhodnout a prokázat skutečnost technickými prostředky. U takového typu případů je možné vhodně využít kombinaci matematického modelování a experimentálního testu v reálných provozních podmínkách.

### ZKOUŠENÍ SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ V LABORATOŘI

Každý projektant potřebuje pro návrh solární tepelné soustavy znát základní informace o použitém solárním kolektoru. Jako minimální informace pro návrh a zjednodušenou bilanci solární soustavy zpra-

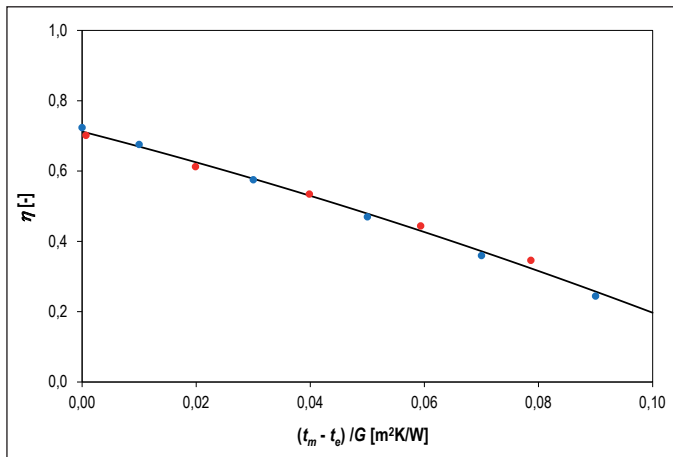
vidla postačují konstanty křivky účinnosti  $\eta_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  a vztažná plocha kolektoru  $A$ , ke které je křivka účinnosti vztažena [1]. Křivka účinnosti je výsledkem zkoušky tepelného výkonu provedené v souladu s platnou zkušební normou. V loňském roce vstoupila v platnost nová norma ČSN EN ISO 9806 [2], která se z hlediska metod a podmínek pro zkoušení kapalinových solárních kolektorů příliš neliší od předcházející ČSN EN 12975-2 [3]. Významným posunem je především rozšíření předmětu normy i na koncentrační solární kolektory a zavedení metod zkoušení pro vzduchové solární kolektory.

Laboratorní testování solárních kolektorů se provádí buď ve venkovním prostředí s přirozeným slunečním zářením, nebo ve vnitřním prostředí s umělým slunečním zářením. Obě možnosti zakotvené v normě mají své výhody a nevýhody. Zkoušení ve venkovním prostředí je závislé na počasí, neboť požadavek jasné oblohy se slunečním ozářením  $G > 700 \text{ W/m}^2$  při zkoušce ustáleného tepelného výkonu znamená omezenou dobu zkoušek během roku. Na druhé straně je možné ve venkovním prostředí provádět i zkoušku optické charakteristiky (modifikátoru úhlu dopadu), která v simulátoru je možná pouze za určitých podmínek (rovnoběžnost svazku paprsků). Oproti tomu zkoušení kolektorů s použitím simulátoru slunečního záření není závislé na počasí a může být plně automatizované.



Obr. 1 Simulátor slunečního záření v UCEEB ČVUT v Praze  
 Fig. 1 Sunlight simulator in UCEEB CTU in Prague

Solární laboratoř Univerzitního centra energeticky efektivních budov (UCEEB) v Buštěhradě umožňuje jako jediná laboratoř v ČR zkoušení solárních kolektorů jak ve venkovním prostředí, tak ve vnitřním prostředí se simulátorem slunečního záření. Vnitřní zkušební zařízení v solární laboratoři se skládá ze tří hlavních částí. Z lampového pole, termostatu a umělé oblohy. V simulátoru slunečního záření (obr. 1) je uchyceno pole osmi metalhalidových obloukových lamp, které mají spektrum záření blízké se slunečnímu záření dopadajícímu na zemský povrch. Jedna metalhalidová lampa má elektrický příkon okolo 4,5 kW, celkový elektrický příkon lamp je okolo 37 kW. Dosahovaná maximální hustota zářivého toku slunečního záření je až  $2000 \text{ W/m}^2$ . Umělou oblohou se nazývá konstrukce tvořená dvojskly umístěná mezi lampovým polem a kolektorem pro odvedení infračerveného záření, které není součástí slunečního spektra. Větranou dutinou dvojskla se odvádí tepelná energie odfiltrovaného záření klimatizační jednotkou. Termostat umístěný pod pohyblivou nosnou konstrukcí, kde je upevněn zkoušený solární kolektor, umožňuje udržovat přesně



Obr. 2 Porovnání výsledků zkoušky ve venkovním (modře) a vnitřním (červeně) prostředí pro plochý solární kolektor  
Fig. 2 Comparison of the test results for the outdoor (blue) and indoor (red) environment for the flat solar collector

požadovanou teplotu v rozsahu 5 až 115 °C v toleranci  $\pm 0,03$  K během zkoušky. Jak simulátor, tak vlastní zkušební konstrukci lze nastavit do samostatně definované polohy, od vodorovné do svislé.

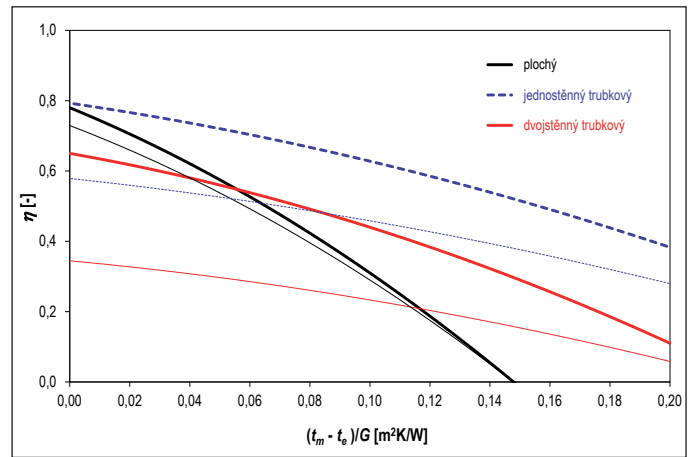
V počátcích využívání solárního simulátoru pro zkoušení tepelného výkonu solárních kolektorů ve vnitřním prostředí byla snaha ověřovat výsledky zkoušek porovnáváním se zkouškami ve venkovním prostředí. Srovnávací měření bylo provedeno ve spolupráci se Solární laboratoří na Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní ČVUT v Praze. Jako příklad porovnání lze uvést zkoušení plochého solárního kolektoru se selektivním absorbérem. Na obr. 2 je znázorněno porovnání vyhodnocené křivky účinnosti daného kolektoru zkouškou za ustálených podmínek ve venkovním prostředí (Fakulta strojní) a se simulátorem slunečního záření (UCEEB).

Při uvažování celkové nejistoty stanovení účinnosti při zkoušce kolektoru okolo 3 % lze považovat obě zkušební metody za zaměnitelné. Co je však nezaměnitelné, je čas potřebný ke zkoušce jednoho solárního kolektoru. Zatímco v případě plně automatizovaného zařízení se simulátorem je doba od nainstalování kolektoru do získání výsledků zkoušky cca 6 hodin, u venkovní zkoušky se zpravidla jedná v průměru o týdny kvůli „čekání na jasnou oblohu“.

S příchodem nové normy ČSN EN ISO 9806 byla pro odbornou veřejnost zavedena významná změna týkající se vztahné plochy solárního kolektoru  $A$ . Křivka účinnosti solárního kolektoru se nyní vztahuje k **hrubé ploše kolektoru**, na rozdíl od předcházející normy vztahující účinnost k apertuře nebo absorbéru. Z hlediska výpočtu výkonu solárních kolektorů a jejich zisků v dané aplikaci je zcela irrelevantní, ke které ploše (hrubá plocha, apertura, absorbér) je účinnost vztahena. Nicméně při porovnávání křivek účinnosti jsou nyní lépe vidět reálné aplikační oblasti jednotlivých druhů solárních kolektorů. Hrubá plocha totiž odpovídá ploše zastavěné solárními kolektory na střeše budovy. Na obr. 3 je znázorněn rozdíl mezi křivkou účinnosti základních konstrukcí solárních kolektorů vztahenou k ploše apertury (tučně) a k ploše hrubé (tence). Z průřezu plochého kolektoru a trubkového kolektoru s válcovým absorbérem lze například odvodit, že pro sluneční ozáření 1000 W/m<sup>2</sup> a venkovní teplotu 20 °C je trubkový kolektor výhodnější z hlediska účinnosti pro provozní teploty nad 120 °C.

## MODELOVÁNÍ PROVOZU SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ

Zatímco pro zjednodušené měsíční výpočty bilance solárních soustav postačuje informace o křivce účinnosti a ploše, pro podrobnější



Obr. 3 Porovnání křivky účinnosti solárních kolektorů vztaheně k ploše apertury (tučně) a k hrubé ploše (tence)  
Fig. 3 Comparison of the efficiency curve of collectors related to the aperture area (bold) and gross area (thin)

výpočty a analýzy použití solárních kolektorů jsou potřeba již detailnější modely. Kromě křivky účinnosti je potřeba znát i optickou charakteristiku (modifikátor úhlu dopadu  $K_{\theta}$  v příslušných rovinách) kolektoru, případně tepelnou kapacitu kolektoru  $C$  [J/K]. Výrobci, kteří mají solární kolektory zkoušené podle evropské normy, mají tyto parametry zpravidla uvedené v protokolu o zkoušce. V tomto ohledu je pro projektanta vynikající pomůckou databáze solárních kolektorů testovaných v rámci certifikačního systému Solar Keymark, kde jsou k dispozici zjednodušené tabelární protokoly s uvedením potřebných parametrů jak křivky účinnosti, tak optické charakteristiky či tepelné kapacity [4].

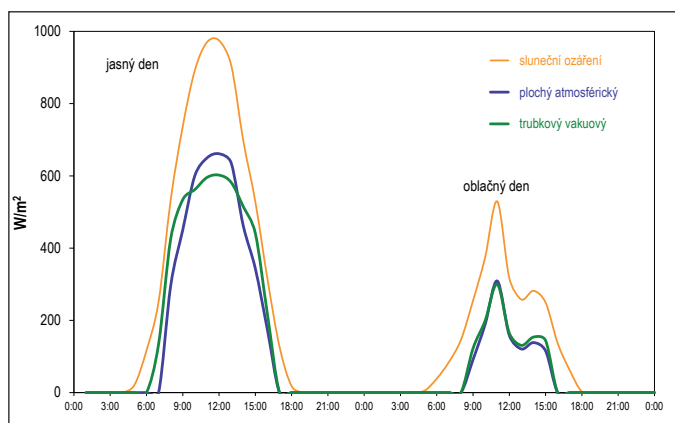
Matematický model, který zahrnuje vliv dynamického chování solárního kolektoru zastoupeného posledním členem ve vztahu (1), je oproti stacionárnímu modelu, zejména v případě hmotných solárních kolektorů, daleko komplexnější. Podrobný matematický model stanoví pro obecné provozní podmínky výkon solárního kolektoru podle vztahu [5]:

$$\dot{Q}_k(\theta) = A \cdot \left[ (K_{\theta,b} \cdot G_{bT} + K_{\theta,d} \cdot G_{dT} + K_{\theta,r} \cdot G_{rT}) \cdot \left( \eta_0 - a_1 \cdot (t_m - t_e) - a_2 \cdot (t_m - t_e)^2 - \frac{C}{A} \cdot \frac{dt_m}{d\tau} \right) \right] \quad (1)$$

kde je:

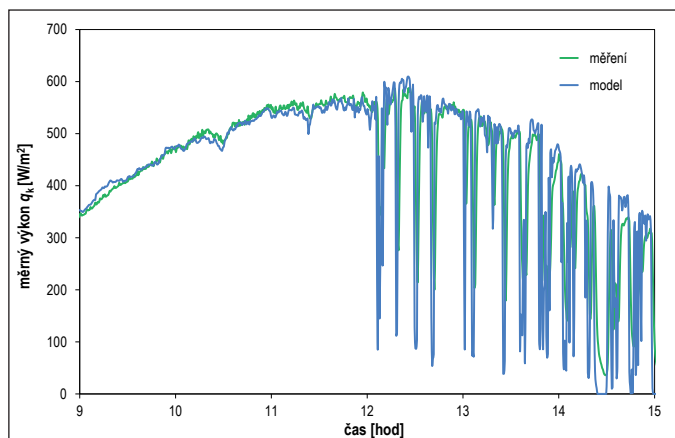
- $A$  vztahná plocha kolektoru [m<sup>2</sup>],
- $t_m$  střední teplota teplotonosné látky v kolektoru [°C],
- $t_e$  teplota okolního vzduchu [°C],
- $\tau$  čas [s],
- $G_{bT}$  přímé sluneční ozáření na plochu kolektoru [W/m<sup>2</sup>],
- $G_{dT}$  difuzní sluneční ozáření na plochu kolektoru [W/m<sup>2</sup>],
- $G_{rT}$  odražené sluneční ozáření na plochu kolektoru [W/m<sup>2</sup>],
- $K_{\theta,b}$  modifikátor úhlu dopadu vyjádřený pro úhel dopadu přímého slunečního ozáření  $\theta$  [-],
- $K_{\theta,d}$  modifikátor úhlu dopadu vyjádřený pro efektivní úhel dopadu difuzního slunečního ozáření z části oblohy nad plochou kolektoru [-],
- $K_{\theta,r}$  modifikátor úhlu dopadu vyjádřený pro efektivní úhel dopadu odraženého slunečního ozáření z části vodorovné roviny [-],
- $C$  účinná tepelná kapacita solárního kolektoru [J/K].

Na obr. 4 je uvedeno názorné porovnání průběhu výkonu dvou odlišných typů solárních kolektorů během jasného a oblačného dne s využitím podrobného modelu. Trubkový solární kolektor s válcovým



Obr. 4 Měrný výkon solárního kolektoru v závislosti na čase během jasného a oblačného dne

Fig. 4 Time-dependent specific output of solar collector during clear and cloudy days



Obr. 5 Výkon plochého solárního kolektoru v závislosti na čase za proměnlivých klimatických podmínek [8]

Fig. 5 Time-dependent output of flat-plate solar collector under varying climatic conditions [8]

vým absorberem má odlišnou optickou charakteristiku, proto v ranních a večerních hodinách vyprodukuje více tepelné energie oproti plochému kolektoru.

Podrobným modelem lze potom relativně spolehlivě hodnotit produkci solárního kolektoru hodinu po hodině během roku při zadaných provozních a klimatických podmínkách. V případě, že se pro danou aplikaci a klimatické podmínky mají zodpovědně porovnat dva solární kolektory diametrálně odlišné konstrukce, např. plochý kolektor a trubkový kolektor, s diametrálně odlišným průběhem výkonu během dne (viz obr. 4), pak nezbyvá než takový podrobný model použít. Existuje celá řada volně šiřitelných aplikací, které podrobné porovnání umožňují, např. nástroj VYKON\_SK [6] nebo program ScenoCalc [7].

## OVĚŘOVÁNÍ VÝKONU SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ NA REÁLNÉ INSTALACI

Při pochybnostech o výkonu solárních kolektorů instalovaných v konkrétním solárním systému je možné spojit matematické modelování výkonu solárního kolektoru a experimentální testování kolektoru v místě instalace. Na obr. 5 je uvedeno porovnání výsledků výkonu kolektoru stanoveného během daného dne podrobným matematickým modelem a výkonu stanoveného měřením za stejných podmí-

nek. Ověřený podrobný matematický model odpovídá reálnému provozu solárního kolektoru.

V praxi se tedy na jedné straně nasadí alespoň na několik dnů systém měření klimatických veličin (sluneční ozáření v rovině kolektoru – pyranometr, venkovní teplota v okolí kolektoru = stíněné teplotní čidlo), průtoku teplotnosné kapaliny kolektorem (objemovým nebo hmotnostním průtokoměrem) a teplot na vstupu a výstupu kolektoru (ideálně umístěných v jímce v protékající kapalině). Měřený výkon solárního kolektoru je pro konkrétní klimatické podmínky porovnán s výkonem vypočítaným podrobným modelem, a to v rozlišení velmi krátkého časového kroku (1 minuta). Pro ověření funkce kolektoru jsou vhodné měnící se podmínky jak teploty na vstupu do kolektoru (od nízkých do vysokých), tak dopadajícího slunečního záření (od difúzní oblohy po jasnou), viz obr. 5. Vstupem pro matematický model jsou deklarované parametry solárního kolektoru dodavatelem a identické provozní a klimatické podmínky s měřením. Často už z porovnání průběhů výkonu je možné odvodit nesoulad mezi modelem a měřením. Rozdíly v modelovaných a naměřených denních nebo týdenních úhrnech produkce solárních tepelných zisků kolektorem pak mohou ukázat na potenciální problém mezi deklarovanými parametry kolektorů a skutečností. Při poměrně odchylce nad 20 % nezbyvá než solární kolektor odmontovat a problém ověřit otestováním v laboratoři za normou definovaných podmínek, případně dále problém podrobněji analyzovat.

## ZÁVĚR

Laboratorní testování je základním postupem pro zjištění parametrů solárních kolektorů k dalšímu použití ve více či méně podrobných výpočtech. Zatímco pro zjednodušené výpočty v rámci projekce či hodnocení solárních soustav v programech podpory úspor postačuje základní charakteristika účinnosti, pro výpočty v případech sporů či s jinak požadovanou vysokou jistotou je nutné používat podrobné matematické modely. Provozní testování konkrétního solárního kolektoru v reálné instalaci za proměnlivých klimatických podmínek ve spojení s podrobným matematickým modelováním pak může sloužit pro ověření správné funkce kolektoru bez nutnosti demontáže a drahého laboratorního testu.

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

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

## Použité zdroje:

- [1] MATUŠKA, T. Výkonnost solárních kolektorů – 1. část: Základní parametry. *Vytápění Větrání Instalace*. 2010, roč. 19, č. 5, s. 210 – 214.
- [2] ČSN EN ISO 9806. *Solární energie – Solární tepelné kolektory – Zkušební metody*. Praha: ČNI, 2014.
- [3] ČSN EN 12975-2 *Tepelné solární soustavy a součásti – Solární kolektory – Část 2: Zkušební metody*. ČNI, 2006.
- [4] Solar Keymark Database, *List of certified collectors*. Dostupné z: <http://www.solarkeymark.dk/CollectorCertificates>
- [5] DUFFIE, J.A. a BECKMAN, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley&Sons, Inc. 2006. ISBN 978-0-471-69867-8.
- [6] MATUŠKA, T. *VYKON\_SK – Výpočtový nástroj pro hodnocení výkonnosti solárních tepelných kolektorů* [software]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page\\_id=192](http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/?page_id=192)
- [7] *ScenoCalc – a program for calculation of annual solar collector energy output* [software]. Dostupné z: <http://www.sp.se/en/index/services/solar/ScenoCalc/Sidor/default.aspx>
- [8] POKORNÝ N., MATUŠKA T. Modelování provozu solárního tepelného kolektoru, *Sborník konference AZE Kroměříž*, 2014. ISBN 978-80-02-02546-7.