

Doc. Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D.,
ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Výkonnost solárních kolektorů – 2. část: Hodnocení a analýza



Ústav techniky prostředí

Thermal performance of solar collectors – Part 2: Evaluation and analysis

Recenzent

Ing. Vladimír Jirka, CSc.

Autor analyzoval výkonnost jako schopnost kolektoru produkovat tepelný zisk v průběhu celého roku a vyhodnotil různé typy solárních kolektorů s charakteristickými křivkami účinnosti a modifikátoru úhlu dopadu slunečního záření jak pro plochu apertury tak pro obrysovou plochu kolektorů. Autor na základě analýzy jasně prokázal, 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 kolektoru (křivka účinnosti a křivka modifikátoru) a uvažování konkrétních případů a konkrétního účelu hodnocení (provozní teplota, hodnocení podle typu referenční plochy).

Klíčová slova: obrysová plocha, plocha apertury, modifikátor úhlu dopadu, křivka účinnosti, sluneční záření

Author has analyzed thermal performance of solar collector as its capability to produce a heat gain throughout the year and has evaluated various types of solar collector with different efficiency and incidence angle modifier both for aperture area and gross area. Author, on the basis of analysis, has proved that flat designation of certain type of solar collector as more or less efficient than others cannot be realised without knowledge of basic parameters (efficiency and IAM curve) and considering a particular case and particular purpose of evaluation (operation temperature, evaluation based on aperture or gross area).

Keywords: gross area, aperture area, incidence angle modifier, efficiency curve, solar radiation

Pro zodpovědné zhodnocení výkonnosti různých konstrukčních typů solárních kolektorů nestačí pouze běžně používaná křivka účinnosti, ačkoli je základní charakteristikou při výběru solárních kolektorů. Pro zahrnutí vlivu optických charakteristik kolektoru v šikmých úhlech dopadu do energetického hodnocení solárního kolektoru je nutné znát křivku modifikátoru úhlu dopadu v obou hlavních rovinách – podélné a příčné [1].

VÝKONNOST SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ

Výkonnost solárních kolektorů je možné definovat jako schopnost kolektoru produkovat energetický zisk za stanovených podmínek. S ohledem na očekávání uživatelů solárních soustav je vhodné hodnotit celoroční měrný tepelný zisk za typických místních klimatických a provozních podmínek. Pro hodnocení výkonnosti solárních kolektorů existuje řada přístupů, které hodnotí celoroční produkci tepla z kolektoru simulačním výpočtem s využitím křivky účinnosti a křivky modifikátoru úhlu dopadu kolektoru jako vstupních údajů a databáze hodinových klimatických údajů (sluneční ozáření G , venkovní teplota t_e). Mezi základní přístupy patří:

- solární kolektor zapojený do přesně definované solární soustavy s daným solárním pokrytím, např. model pro určení minimálního zisku kolektoru v solární soustavě pro přípravu teplé vody se 40% pokrytím pro udělení známky Modrý anděl (Německo) [2] nebo simulační výpočet zkušebny SPF Rapperswil (Švýcarsko) ve třech typických aplikacích s definovaným solárním pokrytím: solární přehřev teplé vody (25 %), solární příprava teplé vody (60 %), kombinovaná soustava pro přípravu teplé vody a vytápění (25 %) [3]
- solární kolektor nezapojený do solární soustavy, avšak s definovanou a celoročně stálou provozní teplotou: simulační výpočet zkušebny SP Boras (Švédsko) pro provozní teploty 25 °C, 50 °C, 75 °C [4], stanovení křivky měrných teoretických zisků v simulačním modelu VYKON_SK Solární laboratoře ČVUT v Praze (Česká Republika) [5], který je dále podrobněji popsán.

Simulační model VYKON_SK hodnotí výkonnost (roční teoretické zisky kolektoru) jako parametr vlastní solárnímu kolektoru bez ohledu na provedení zbytku solární soustavy a bez ohledu na využitelnost produkovaných zisků v závislosti na podmínkách odběru tepla aplikace. Vstupními údaji pro simulační model VYKON_SK jsou:

- konstanty křivky účinnosti solárního kolektoru η_0 , a_1 a a_2 stanovené zkouškou v souladu s ČSN EN 12975;
- hodnoty modifikátoru úhlu dopadu solárního kolektoru, stanovené pro obě hlavní roviny (podélná, příčná) v rozsahu 0 ° až 90 ° v rozlišení po 10 ° v souladu s ČSN EN 12975;
- hodinové klimatické údaje: celkové sluneční ozáření na horizontální rovinu G , teplota venkovního vzduchu t_e (databáze typického meteorologického roku TMY pro Prahu);
- uvažovaný sklon a orientace solárního kolektoru;

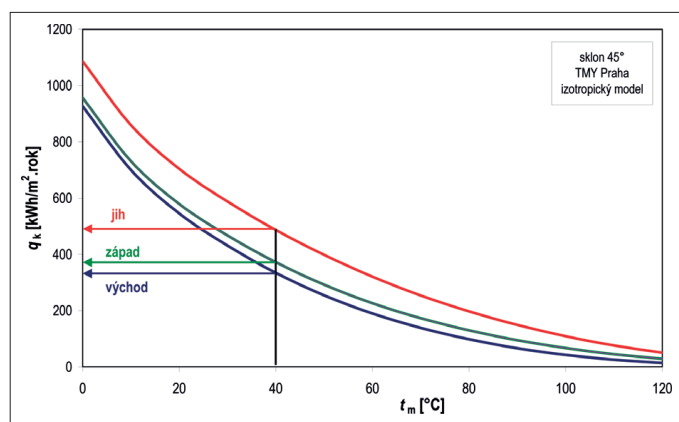
Program VYKON_SK (Excel) rozpočítává celkové sluneční ozáření na vodorovnou rovinu na přímou a difúzní složku modelem na základě jasnosti oblohy [6] a pro zadaný sklon a orientaci kolektoru stanovuje izotropickým modelem přímou, difúzní a odraženou složku slunečního ozáření na rovinu kolektoru [7]. Na základě parametrů kolektoru je pro každou hodinu stanoven teoreticky dostupný výkon solárního kolektoru v závislosti na úhlu dopadu slunečního záření a klimatických podmínkách pro celoročně konstantní teplotu t_m . Pro vyhodnocení celoročního teoreticky dostupného energetického zisku solárního kolektoru jsou kladné hodinové energetické zisky sečteny (záporné nejsou uvažovány). Výpočet je postupně proveden pro 13 různých, celoročně konstantních provozních teplot v kolektoru v rozsahu 0 až 120 °C a výsledkem výpočtu je křivka teoreticky dostupných, měrných ročních energetických zisků solárního kolektoru (viz obr. 1).

Výpočet simulačním modelem VYKON_SK lze použít především pro srovnání:

- výkonnosti daného kolektoru pro různé orientace a sklony;
- výkonnosti různých kolektorů při daném sklonu a orientaci, pro zvolenou očekávanou provozní teplotu kapaliny t_m v solárních kolektorech, např. 40 °C.

ANALÝZA VÝKONNOSTI SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ

Pro porovnání výkonnosti různých typů solárních kolektorů s různými charakteristickými křivkami účinnosti a křivkami modifikátoru úhlu dopadu byly vybrány reálné kolektory různého konstrukčního typu a v různé kvali-



Obr. 1 – Křivky teoreticky dostupných ročních tepelných zisků kolektoru v závislosti na provozní teplotě pro různé orientace (jih, východ, západ)

tě, jak optické (hodnota η_0 , křivka modifikátoru), tak tepelné (hodnoty a_1 a a_2), v kvalitě jaké jsou dostupné na trhu. Jejich parametry byly převzaty ze zkušebních protokolů databáze Solar Keymark [8]. V tabulkách jsou uváděny i plochy apertury A_a a obrysové plochy A_G kolektorů a hodnoty modifikátoru úhlu dopadu v podélné rovině $K_{\theta,L}$ a příčné rovině $K_{\theta,T}$ v rozlišení 10° .

Plochý kolektor PK1 je kolektor s neselektivním absorbérem (vysoké hodnoty a_1 a a_2) a relativně nízkou hodnotou „optické“ účinnosti, která naznačuje zpravidla nízký účinnostní součinitel F' (např. málo vodivý absorbér, velká rozteč trubkového registru, nevodivý spoj absorbér-registr).

Plochý kolektor PK2 je z hlediska křivky účinnosti běžným kolektorem, avšak křivka modifikátoru K_{θ} je položena relativně nízkou oproti účinnosti obdobnému kolektoru PK3. Kolektor PK4 je velmi kvalitním plochým kolektorem s nízkou tepelnou ztrátou, vodivým absorbérem, vysokou propustností zasklení kolektoru a pohltivostí absorbéru a vysokými hodnotami modifikátoru. Parametry srovnávaných plochých solárních kolektorů jsou uvedeny v tab. 1.

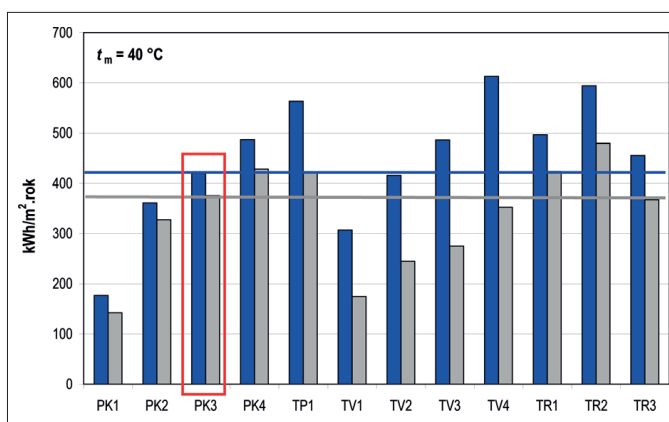
Trubkové vakuové kolektory s plochým absorbérem od různých výrobců vykazují navzájem velmi podobné vlastnosti jak z hlediska účinnosti křivky tak křivky modifikátoru. Pro porovnání byla proto použita jediná varianta solárního kolektoru TP1, jehož parametry jsou uvedeny v tab. 1.

Trubkové vakuové kolektory s válcovým absorbérem (typ Sydney) bez reflektoru jsou v analýze výkonnosti zastoupeny čtyřmi kategoriemi (TV1, TV2, TV3, TV4) z hlediska účinnosti křivky, nicméně s obdobnými křivkami modifikátoru. Z hlediska četnosti výskytu těchto kolektorů na trhu se nejvíce objevují kolektory s charakteristikami mezi TV2 a TV3. Jejich parametry jsou uvedeny v tab. 2.

Z trubkových vakuových kolektorů s válcovým absorbérem (typ Sydney) s reflektorem byly vybrány tři různé konstrukční varianty. Kolektor TR1 je vybaven plochým reflektorem, kolektor TR2 má reflektor válcového tvaru a kolektor TR3 využívá složeného parabolického reflektoru (CPC). Parametry trubkových kolektorů s reflektorem jsou uvedeny v tab. 3

V grafu na obr. 2 jsou porovnány roční měrné zisky uvedených solárních kolektorů pro střední teplotu kapaliny v kolektorech 40°C (celoročně konstantní) jako výstup z výpočtu v modelu VYKON_SK. Tepelné zisky solárních kolektorů jsou jednak vztaženy k ploše apertury (aby bylo možné srovnávat obdobné konstrukce mezi sebou) a jednak k obrysové ploše (srovnání tepelného zisku ze skutečně zabrané plochy na střeše).

Jako referenční solární kolektor byl zvolen běžný, plochý atmosférický kolektor PK3. Z porovnání **výkonnosti** kolektorů vztažené k **ploše apertury** vyplývá, že v případě běžných aplikací s provozní teplotou $t_m = 40^{\circ}\text{C}$ pro-



Obr. 2 – Roční měrné zisky srovnávaných solárních kolektorů podle apertury (modrá) a podle obrysové plochy (šedá)

Tab. 1 – Parametry porovnávaných plochých solárních kolektorů a trubkového kolektoru s plochým absorbérem

	PK1	PK2	PK3	PK4	TP1
$\eta_{0,a}$	0,702	0,755	0,753	0,824	0,751
$a_{1,a}$	7,89	3,99	3,91	3,66	1,24
$a_{2,a}$	0,028	0,005	0,003	0,009	0,006
A_a	1,62	2,12	2,30	2,74	2,15
A_G	2,01	2,34	2,58	3,11	2,87
θ	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$
0	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1,01
20	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
30	0,98	0,97	0,99	0,99	0,97
40	0,96	0,93	0,97	0,97	0,95
50	0,92	0,88	0,95	0,95	0,90
60	0,86	0,78	0,91	0,91	0,82
70	0,72	0,58	0,83	0,83	0,54
80	0,36	0,29	0,41	0,41	0,27
90	0	0	0	0	0

Tab. 2 – Parametry porovnávaných trubkových vakuových kolektorů bez reflektoru

	TV1	TV2	TV3	TV4
$\eta_{0,a}$	0,45	0,533	0,659	0,745
$a_{1,a}$	1,80	1,30	2,16	2,01
$a_{2,a}$	0,008	0,013	0,009	0,005
A_a	0,95	1,71	2,80	1,33
A_G	1,66	2,91	4,95	2,32
θ	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$
0	1	1	1	1
10	1	1,02	1	1,01
20	1	1,07	1	1,06
30	0,99	1,16	0,99	1,13
40	0,97	1,30	0,97	1,25
50	0,93	1,51	0,93	1,44
60	0,85	1,45	0,86	1,47
70	0,71	1,12	0,72	1,11
80	0,36	0,56	0,36	0,56
90	0	0	0	0

Tab. 3 – Parametry porovnávaných trubkových vakuových kolektorů s reflektorem

	TR1	TR2	TR3
$\eta_{0,a}$	0,569	0,756	0,552
$a_{1,a}$	0,91	1,42	0,86
$a_{2,a}$	0,003	0,003	0,003
A_a	1,74	1,72	1,72
A_G	2,04	2,13	2,13
θ	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$	$K_{\theta,L}, K_{\theta,T}$
0	1	1	1
10	1	1,02	1
20	1	1,07	1
30	0,99	1,13	1
40	0,98	1,19	0,99
50	0,95	1,28	0,97
60	0,88	1,38	0,91
70	0,75	1,16	0,79
80	0,38	0,58	0,40
90	0	0	0

dukují kvalitní trubkové vakuové kolektory bez reflektoru ročně o cca 20 až 30 % více energie než běžné ploché kolektory, nicméně méně kvalitní kolektory stejného typu mohou vykazovat stejný případně i o 30 % menší zisk. Trubkové kolektory s reflektorem vykazují v porovnání výsledky lepší. Vzhledem ke spolehlivé kvalitě trubkových kolektorů s plochým absorberem lze předpokládat, že jejich o 30 % vyšší výkonnost oproti plochým kolektorům platí pro tento konstrukční typ obecně.

Odišná je situace v případě vztažení **výkonnosti** solárních kolektorů **k obrysové ploše** 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.

ZÁVĚR

Výkonnost jako schopnost kolektoru produkovat tepelný zisk v průběhu celého roku byla vyhodnocena pro různé typy solárních kolektorů s charakteristickými křivkami účinnosti a modifikátoru úhlu dopadu slunečního záření, jak pro plochu apertury, tak pro obrysovou plochu kolektorů. Analýza byla provedena simulačním modelem VYKON_SK vyhodnocujícím roční tepelný zisk solárního kolektoru pro zvolenou, celoročně stálou, provozní teplotu (v analýze 40 °C).

Z porovnání vyplývá výrazná variabilita energetické kvality různých trubkových vakuových kolektorů s válcovým absorberem a její dopad na potenciální tepelné zisky trubkových solárních kolektorů, které v řadě pří-

padů mohou být lepší než u plochých kolektorů, ale v řadě případů dostupných na trhu také výrazně horší.

Analýza jasně ukázala, 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 kolektoru (křivka účinnosti a křivka modifikátoru) a uvažování konkrétních případů a konkrétního účelu hodnocení (provozní teplota, hodnocení podle typu referenční plochy).

Kontakt na autora: Tomas.Matuska@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] Matuška, T.: Výkonnost solárních kolektorů – 1. část: Základní parametry, Vytápění, větrání, instalace. 2010, roč. 19, č. 5, s. 210–214. ISSN 1210–1389.
- [2] RAL-UZ 73: Basic Criteria for Award of the Environmental Label „Der Blaue Engel“, Solar Collectors, březen 2009, dostupné z <http://www.blauer-engel.de>
- [3] Solartechnik Prüfung Forschung (SPF) Rapperswil, dostupné <http://www.solar-energy.ch>
- [4] Nordman, R.: Description of Microsoft excel code for energy output evaluation, Report SP Technical Research Institute of Sweden, 2007, dostupné na <http://www.estif.org>
- [5] Matuška, T.: Nástroj pro hodnocení výkonnosti solárních kolektorů VYKON_SK, dostupné na <http://solab.fs.cvut.cz>
- [6] Orgill, J. F., Hollands, K. G. T.: Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal Surface, Solar Energy 19, str. 357–359, 1977
- [7] Liu, B. Y. H., Jordan, R. C.: The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors, Solar Energy 7, str. 53–74, 1963
- [8] CEN Keymark Scheme for Solar Thermal Products, Solar Keymark Collector Database, srpen 2009, dostupné z <http://www.estif.org/solarkeymark> ■

POMOK Vzduchotechnika

Polyuretanové potrubí PITRE P₃ ductal

Originál je pouze jeden – polyuretanové potrubí P₃ ductal s patentovaným přírubovým spojem.

Široký rozsah použití ve všech odvětvích průmyslu včetně potravinářského.

POMOK - Vzduchotechnika, sdružení podnikatelů
Průmyslová 325, 285 06 Sázava
Tel.: 603 296 208, 603 443 897, e-mail: milena.kucharova@pomok.cz

P₃ductal