

## **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL CONDITIONS AND ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR AIR COLLECTORS**

**M. Jaroš\*, P. Charvát\*, T. Kouřil\*, V. Orel\***

***Summary:** The paper deals with the experimental investigation of operating parameters of solar air collectors, installed in an experimental building in Podolí u Brna. The collectors are created as two parallel air channels between them the absorption film is installed. A data acquisition system has been installed with the aim to monitor thermal and weather conditions. The thermal gains determined from airflow rates and differences between inlet and outlet air temperatures were compared with impacting solar radiation. The relatively high efficiency of solar energy utilization in range of 30-80 %, depending on type of absorption film, was established by this way.*

### **1. Úvod**

Myšlenka využívání sluneční energie je velmi stará a v současné době zvyšování snah o úspory energie stále aktuálnější. Problémem však je efektivnost jejího využití, zejména z hlediska poměru investičních nákladů k získaným úsporám. Z tohoto úhlu pohledu představují vzduchové solární kolektory investičně nenáročnou alternativu využití sluneční energie (Cihelka, 1994; Charvát & Jaroš, 2000; Charvat & Jaros, 2002). Získaný ohřátý vzduch lze využít např. pro účely větrání nebo vytápění.

Pro praktické využití kolektorů je podstatná znalost jejich výkonových charakteristik, zejména výstupních teplot, dosažitelného tepelného výkonu a s tím související energetické účinnosti. Následující příspěvek uvádí výsledky měření solárních vzduchových kolektorů jednoduchého provedení ve zkušebním provozu. Navazuje tak na příspěvek prezentovaný na konferenci Inženýrská mechanika 2001 (Jaroš et al., 2001).

### **2. Popis experimentálního zařízení**

Výzkum probíhal na vzduchových solárních kolektorech instalovaných v Ekodomě VUES v Podolí u Brna (obr.1) – experimentálním objektu, zaměřeném na výzkum obnovitelných

---

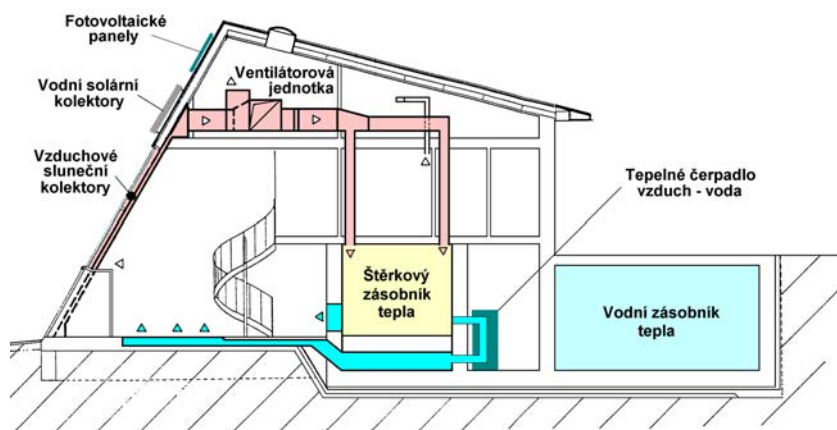
\* Dr. Ing. Michal Jaroš, Ing. Pavel Charvát, Ing. Tomáš Kouřil  
Energetický ústav, odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství,  
Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, ČR  
tel.: +420-541-143-282 e-mail: jaros@dt.fme.vutbr.cz  
tel.: +420-541-143-245 e-mail: charvat@dt.fme.vutbr.cz  
RNDr. Vojtěch Orel, CSc.  
VUES Brno a.s., Mostecká 26, 657 65 Brno, ČR  
tel.: +420-545-551-542 e-mail: orel@vues.cz



Obr.1 Ekodom VUES v Podolí u Brna

šikmé stěně objektu, která je orientována přímo na jih a je tedy po celý bezoblačný den osluněna. Sklon stěny  $60^\circ$  vzhledem k vodorovné rovině je z hlediska celoročního provozu optimální (celkové celoroční množství dopadající energie je maximální). Navíc je nejvhodnější i pro provoz v přechodných obdobích roku (únor–březen, resp. říjen–listopad). Ohřátý vzduch je z kolektorů veden buď přímo do ventilační soustavy budovy nebo do akumulčního kamenového zásobníku (obr.2). Tímto způsobem lze využít získané teplo v době, kdy není v provozu ventilace. Přiváděným teplým vzduchem se kamenový zásobník nabíjí; akumulovaného tepla pak lze využít pro ohřev ventilačního vzduchu v době, kdy v důsledku nedostatku slunečního záření nelze odebírat teplý vzduch přímo z kolektorů.

Vzduchové kolektory jsou jednoduché konstrukce (obr.4): mezi nosné trámy sluneční stěny byly vsazeny další dva okenní rámy, čímž vznikly dva souběžné vertikální kanály. Na středním okně jsou nalepeny absorpční fólie typu SDI-SUN GARD (SOLARMAX, USA) ve třech provedeních, HP 50G/D, HP 20G/D, HP 05G/D, s různou absorpční schopností (Jaroš et al., 2001). Vzduch vstupuje do kolektorů spodem přímo z místnosti. Výstupy z kolektorů jsou vyvedeny do sběrného kanálu v půdním prostoru s ventilátorem a rozvaděčem, který umožňuje směřovat vzduch podle potřeby buď přímo do ventilační soustavy domu nebo do kamenového zásobníku (viz obr.2). Ventilátor je napájen frekvenčním měničem, což umožňuje plynulé řízení jeho výkonu a průtoku vzduchu.



Obr.2 Schéma ventilačního systému v Ekodому VUES

zdrojů energie, zejm. různých forem využití sluneční energie. V budově je instalována řada solárních a doplňkových systémů, např. fotovoltaické sluneční panely, vodní a vzduchové solární kolektory, vodní a kamenový akumulční zásobník, tepelná čerpadla aj. (obr.2).

Vzduchové solární kolektory (obr.3) byly projektovány s cílem využít solární energii pro potřeby větrání, popř. pro pomocné přitápění objektu v jarním a podzimním přechodném období. Jsou instalovány v čelní

plé řízení jeho výkonu a průtoku vzduchu.

Za účelem zjištění funkčních charakteristik byl na kolektorech instalován on-line měřicí systém, který poskytuje průběžná data o relevantních veličinách (podrobněji viz Jaroš et al., 2001). Pro měření teplot jsou použita teplotní čidla AD-592 (Analog Devices, Taiwan). Vnější intenzita slunečního záře-



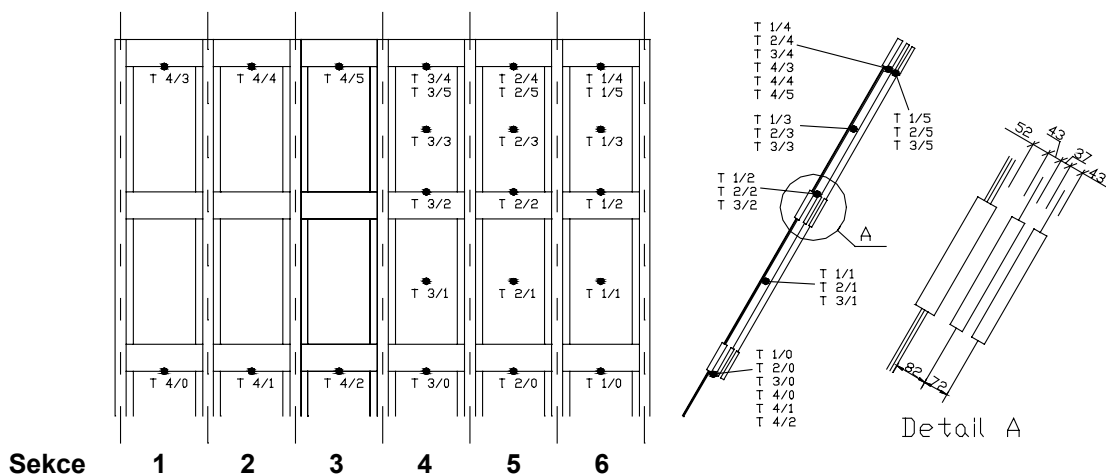
Obr.3 Vnější a vnitřní pohled na sluneční stěnu a vzduchové solární kolektory, instalované v Ekodomu VUES v Podolí u Brna

ní v rovině kolektorů je měřena pyranometrem CM-11 (Kipp&Zonen, Holandsko). Měření probíhá s časovým krokem 1 min. Časová základna měření je řízena přijímačem přesného času DCF-77.

Teplotní snímače jsou instalovány na vstupu, na výstupu a ve třech mezilehlých polohách ve vnější štěrbině kolektorů (ze strany venkovního skla), a to v každé ze tří sekcí, které se navzájem liší různou pohltivostí absorpční fólie. Kvůli porovnání výstupních teplot je další čidlo umístěno na výstupu vnitřní štěrbin kolektoru (vstupní teplota se předpokládá stejná). Pro účely kontrolních měření je šest dalších čidel instalováno na vstupech a výstupech druhé, symetricky umístěné série kolektorů. Přesné rozmístění čidel je patrné z obr.4. Dále je měřena venkovní teplota a teplota vzduchu v kanálu hlavního vzduchovodu před ventilátorem.

### 3. Stanovení energetické účinnosti kolektorů

Za ustálených provozních podmínek je energetická účinnost kolektoru dána poměrem skutečně získaného tepla  $\dot{Q}_z$  k teoretickému maximu, které odpovídá množství dopadající sluneční energie  $\dot{Q}_d$ :



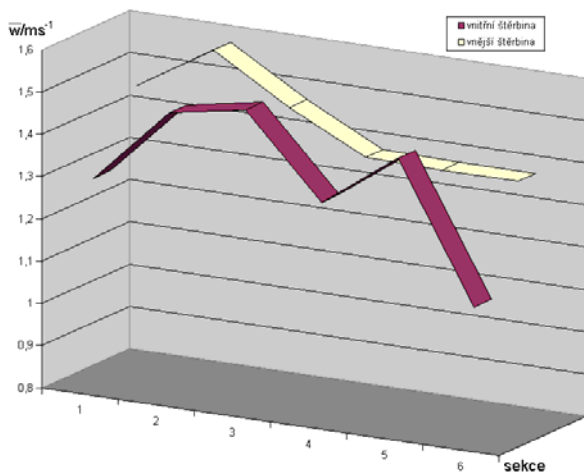
Obr.4 Schematický náčrt vzduchových solárních kolektorů a rozmístění teplotních čidel

$$\eta = \frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_d} = \frac{c_p \dot{M} (t_{m2} - t_{m1})}{SI} \quad (1)$$

Pro její stanovení je nutno určit hmotnostní tok vzduchu kolektorem  $\dot{M}$  [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ], střední vstupní a výstupní teplotu vzduchu  $t_{m1}$  a  $t_{m2}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], celkovou absorpční plochu kolektoru  $S$  [ $\text{m}^2$ ] a okamžitou intenzitu slunečního záření v rovině kolektoru  $I$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]; měrná tepelná kapacita vzduchu  $c_p$  [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] je převzata z tabulek.

Naměřeny byly následující rozměry kolektorů: šířka vnějších skel CONEX (na něž dopadá sluneční záření) 720 mm, šířka středních skel FLOAT (s nalepenou absorpční fólií) 670 mm a vnitřního skla FLOAT 780 mm. Délka jednoho solárního panelu je 1570 mm. V každé sekci jsou vždy dva solární panely řazené sériově za sebou; celková absorpční plocha jednoho kolektoru je tedy 2,104  $\text{m}^2$ .

Objemový, resp. hmotnostní tok vzduchu se u daného provedení kolektoru skládá z toku vnější a vnitřní štěrbinou. Pro jejich určení byly změřeny rozměry štěrbin v místě vstupu vzduchu a střední rychlosti proudění v tomto místě. Rychlosti byly měřeny termickým anemometrem TESTO-454 třemi na sobě nezávislými měřeními ve dvou různých dnech při odlišných teplotách na vstupu, a to ve třech místech po šířce každé štěrbiny. Žhavaná kulička anemometru byla umístěna uprostřed štěrbiny 2–5 cm od vstupu do kolektoru. Zvláštním požadavkem, vzhledem ke směrové citlivosti měřicí sondy, bylo zajištění její kolmosti na směr proudění, čehož se dosáhlo použitím držáku. Měření bylo prováděno po dobu 30 s v každém místě a odečtena střední integrální hodnota. Průměrné hodnoty rychlostí v jednotlivých štěrbinách jsou uvedeny v Tab.1.



Obr.5 Průměrné rychlosti vzduchu v kolektorech

malá rychlost proudění ve vnitřní štěrbině sekce 4 oproti rychlostem v okolních kanálech je neočekávaná. Lze ji však jen stěží přičítat chybě měření, neboť opakovaná měření vykazují velmi malý rozptyl. Spíše je tedy způsobena tvarem vyústění do společného vzduchovodu.

Tab.1 Průměrné rychlosti a hmotnostní toky vzduchu v jednotlivých kanálech solárních kolektorů

Sekce		1	2	3	4	5	6	Celkem
Rychlost vzduchu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	vnější	1.47	1.58	1.47	1.38	1.38	1.15	
	vnitřní	1.29	1.48	1.51	1.32	1.45	1.12	
Hmotnostní tok [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	vnější	0.0764	0.0801	0.0722	0.0704	0.0725	0.0706	0.7417
	vnitřní	0.0492	0.0528	0.0545	0.0488	0.0534	0.0407	

Pro výpočet účinnosti kolektorů byly použity střední hodnoty hmotnostních toků v jednotlivých kanálech (Tab.1), vypočtené z naměřeného průtočného průřezu  $S_c$  [m<sup>2</sup>] vstupních štěrbin, středních rychlostí proudění  $\bar{w}$  [m·s<sup>-1</sup>] v nich a střední hustoty  $\bar{\rho}$  [kg·m<sup>-3</sup>] nasávaného vzduchu během měření:

$$\dot{M} = \bar{\rho} \cdot \bar{w} \cdot S_c \quad (2)$$

Jejich hodnoty mohou být zatíženy mj. chybou v důsledku proměnné hustoty vzduchu a možné odchylky skutečného průtočného průřezu v místě měření od naměřených geometrických rozměrů v důsledku kontrakce vstupujícího proudu. Protože se však v době měření pohybovala vstupní teplota vzduchu v rozmezí 16–24 °C, je chyba vzniklá v důsledku zanedbání teplotní závislosti hustoty vzduchu menší než 1,5 %. Celkový hmotnostní tok solárními kolektory je určen jako součet hodnot vypočtených pro jednotlivé kanály.

Pro porovnání byl změřen průtok vzduchu v přístupné části vzduchovodu za ventilátorem. Z praktických důvodů byly rychlosti proudění měřeny pouze ve dvou na sebe kolmých směrech. Do vzduchovodu byly vyvrtány dva otvory, vždy ve středu průřezu. Nepoužívaný otvor byl zaslepen a termickým anemometrem TESTO-454 provedena opakovaná měření rychlosti proudění s krokem 0,05 m za stejných provozních podmínek (počet otáček ventilátoru 200 min<sup>-1</sup>).

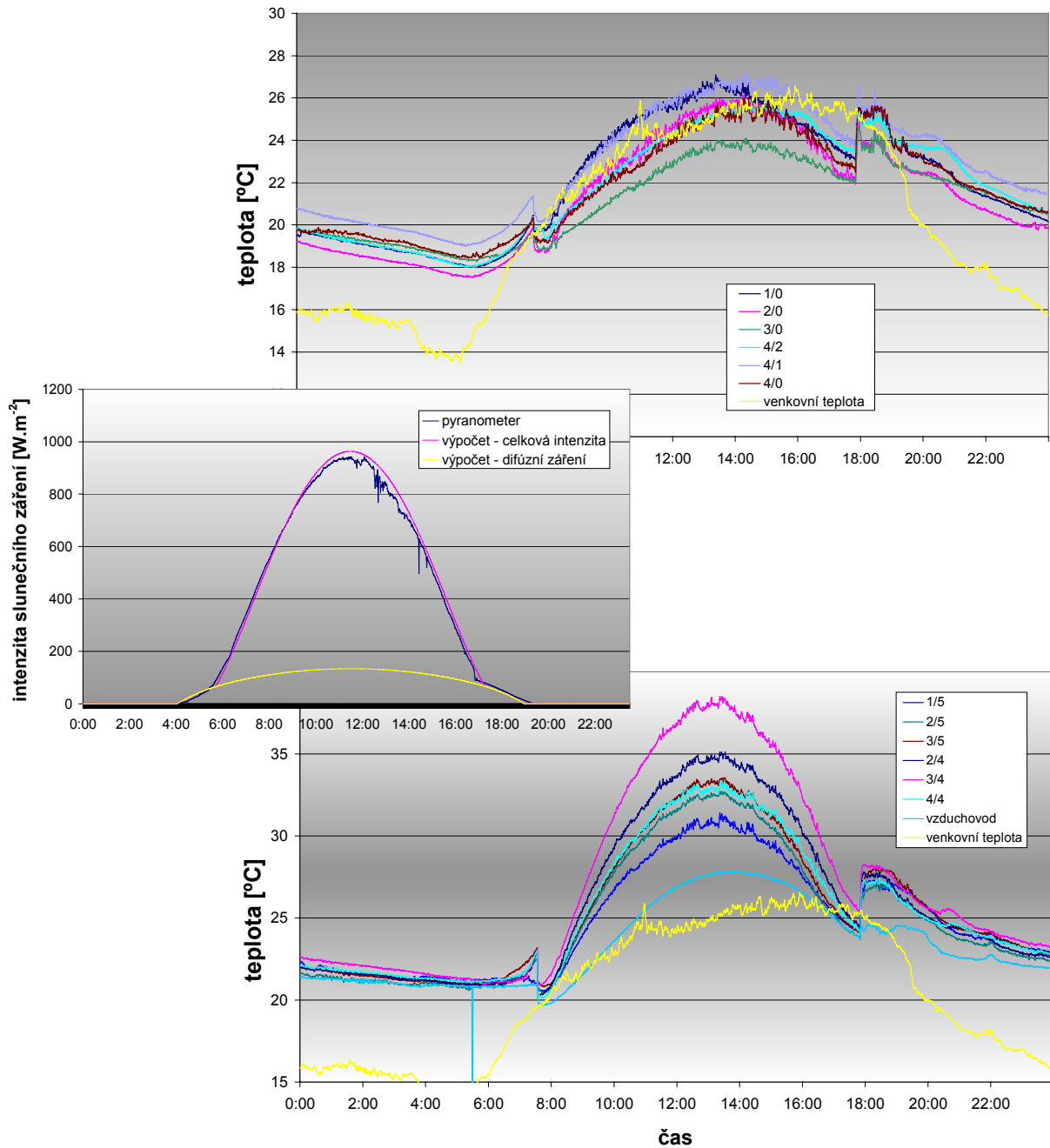
Pro vyhodnocení celkového rychlostního pole a objemového průtoku vzduchu byl použit program Surfer, který umožňuje matematický odhad průběhu veličin na základě diskrétních naměřených hodnot. Vypočtený hmotnostní tok vzduchu kanálem 0,91 kg·s<sup>-1</sup> je o 22,7 % vyšší než vypočtený hmotnostní tok kolektory. Protože tato hodnota přesahuje odhadované nepřesnosti měření, lze předpokládat, že dochází k nasávání falešného vzduchu do vzduchotechnických kanálů.

#### 4. Výsledky měření a diskuse

Již během první etapy řešení (Jaroš et al., 2001) se ukázalo, že smysluplné výsledky lze získat pouze v relativně ustáleném stavu, daném zejména krátkodobě stabilní úrovní solární radiace. Takovýchto dnů nebývá mnoho; během prováděných měření (cca 1 měsíc v období duben–květen 2002) byly pouze tři. Z téhož důvodu byl časový interval použitý pro vyhodnocení energetické účinnosti kolektorů omezen na 10:00 – 13:15 hod.

Typické příklady denního průběhu relevantních veličin jsou uvedeny na obr.6–7. Zřetelný pokles teplot v kolektorech v ranních hodinách je způsoben spuštěním ventilačního systému; rovněž při jeho vypnutí odpoledne je skok patrný. Dále lze pozorovat, že

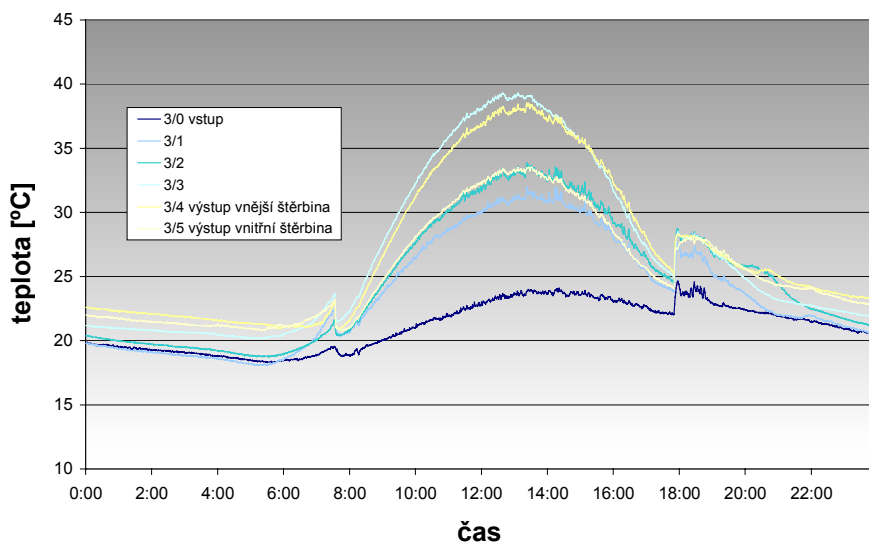
- vstupní teploty vzduchu se mezi jednotlivými kolektory liší až o 3 °C (což může být částečně způsobeno i chybou měření);
- nárůst teploty vzduchu po délce kolektoru se postupně snižuje;
- čím vyšší je absorptivita použité fólie, tím vyšší jsou výstupní teploty vzduchu z kolektoru (což odpovídá výsledkům měření při chodu naprázdno, viz Jaroš et al., 2001);
- výstupní teploty vzduchu ve vnějším kanálu jsou vyšší než ve vnitřním, a to ve všech kolektorech;
- teplota vzduchu ve výstupním vzduchovodu (před ventilátorem) je výrazně nižší než výstupní teploty z kolektorů;
- venkovní teplota je za určitých podmínek (pozdní odpoledne) vyšší nejen než vnitřní



Obr.6 Denní průběh vstupních teplot, intenzity slunečního záření a výstupních teplot z kolektorů (měřeno dne 9.5.2002)

teplota v místnosti (která je rovna vstupní teplotě vzduchu do kolektorů), ale i výstupní teploty vzduchu z kolektorů.

Za zmínku stojí zejména čtvrtá a pátá poznámka. Vyšší výstupní teploty ve vnějším kanálu byly pozorovány už při chodu naprázdno (Jaroš et al., 2001); při nucené konvekci v kanálech je však tento fakt těžko vysvětlitelný. Naproti tomu výrazně nižší teplota vzduchu ve sběrném kanálu před ventilátorem opět jen potvrzuje domněnku o přísávání falešného vzduchu (viz kap.3), i když pokles teploty může být částečně způsoben i ochlazováním vzduchu chladnými stěnami kanálu.



Obr.7 Denní průběh teplot v kolektorech – sekce 4 (měřeno dne 9.5.2002)

Podle naměřených hodnot (obr.7) rovněž nejsou některá teplotní čidla v kolektorech správně odstíněna proti sluneční radiaci nebo jsou příliš blízko skel, jejichž povrchová teplota je vyšší než teplota proudícího vzduchu.

Z naměřených vstupních a výstupních teplot v jednotlivých kanálech a průměrných hmotnostních toků vzduchu byl vypočten okamžitý tepelný výkon daného kanálu. Celkový tepelný výkon kolektoru je pak dán součtem výkonu vnitřního a vnějšího kanálu, přičemž výkon vnitřního kanálu tvoří jen 30–60 % výkonu vnějšího kanálu (Tab.2).

Tab.2 Okamžitý tepelný výkon jednotlivých kanálů kolektoru (měřeno 9.5.2002 v 11.15 hod)

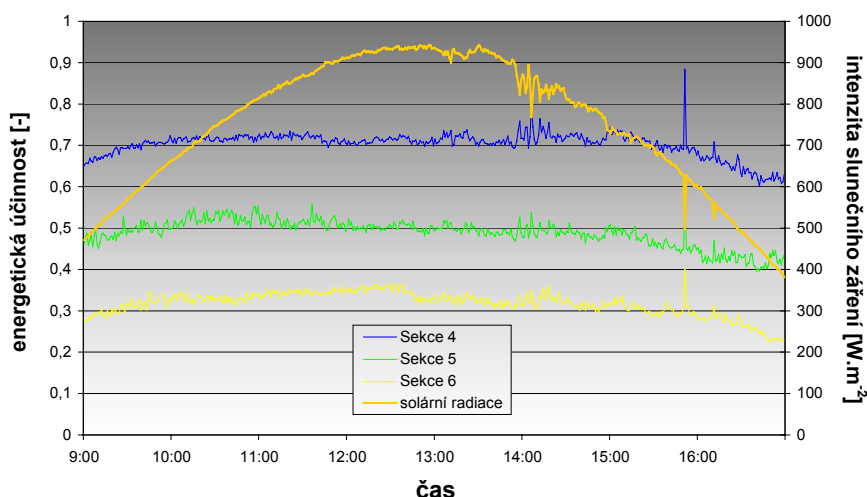
Sekce	Tepelný výkon [W]			Poměr vnitřní/vnější
	vnější	vnitřní	celkový	
4	984,6	460,8	1445,2	0,468
5	665,6	378,0	1040,6	0,568
6	521,7	165,2	686,9	0,317

Okamžitá energetická účinnost kolektoru pak byla určena podle rov. (1). Příklad denního průběhu účinnosti kolektorů s různou absorpční fólií je uveden na obr. 8. Je patrné, že v okamžiku krátkodobého poklesu intenzity slunečního záření vypočtená hodnota účinnosti prudce narůstá, protože vlivem tepelné setrvačnosti kolektoru (akumulace tepla ve hmotě kolektoru) klesá tepelný výkon kolektoru podstatně pomaleji.

Tab.3 Průměrné hodnoty energetické účinnosti solárních vzduchových kolektorů v době 10:00–13:15

Sekce	Datum			Průměr
	29. dubna 2002	5. května 2002	9. května 2002	
4	0.7411	0.7777	0.7156	0.7448
5	0.5178	0.5640	0.5126	0.5315
6	0.3723	0.3938	0.3393	0.3685

V jednotlivých dnech jsou účinnosti kolektorů téměř konstantní, avšak průměrné denní hodnoty se mezi jednotlivými dny poněkud liší (Tab.3). Přesto dávají jednotlivá měření překvapivou shodu. Experimentálně zjištěná účinnost kolektorů je neočekávaně vysoká.



Obr.8 Denní průběh energetické účinnosti vzduchových solárních kolektorů (měřeno dne 9.5.2002)

## 5. Závěr

Moderní ventilační systém by měl kombinovat

vysokou účinnost vytváření dobrého vnitřního prostředí s nízkou spotřebou energie. Z tohoto hlediska představují vzduchové solární kolektory zajímavou možnost snižování energetických nároků budovy. Jejich použití je vhodné zejména v systémech s nižšími nároky na kvalitu vnitřního prostředí, např. v zemědělských zařízeních.

Třebaže měření byla prováděna pouze ve zkušebním provozu, získané výsledky prokazují vysokou účinnost instalovaných kolektorů, která se pro různé typy absorpční fólie pohybuje v rozmezí 34–78 %. Na jejich základě lze provést kvalifikovaný odhad velikosti kolektorů potřebné pro daný tepelný výkon i očekávaných energetických zisků. Tyto výsledky tak mohou sloužit jako podklady pro investory, projektanty i uživatele podobných zařízení.

## 6. Poděkování

Práce vznikla s finanční podporou grantu MŠMT OC G3.30 a výzkumného záměru CEZ: J22/98:26210001.

## 7. Literatura

Cihelka, J. (1994) *Solární tepelná technika*. Nakl. T. Malina, Praha.

Charvát, P. & Jaroš, M. (2000) Glazed Roof as a Solar Collector, in: *Zborník XIX. medz. konferencie katedier mechaniky tekutín a termomechaniky*, EDIS, Žilina, s. 45-48.

Charvat, P. & Jaros, M. (2002) The Exploitation of Solar Energy for Energy-Saving in Ventilation, in: *Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. „Indoor Air 2002“*, Santa Cruz (USA), pp.1080-1085.

Jaroš, M., Charvát, P. & Orel, V. (2001) Investigation of thermal conditions in solar air collectors under natural convection, in: *Proc. Int. Conf. „Engineering Mechanics 2001“*, ÚT AV ČR, Praha, (CD ROM).