

## Krzysztof DUTKOWSKI<sup>1</sup>, Piotr PIĄTKOWSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I CHŁODNICTWA

<sup>2</sup> POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA TRANSPORTU, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin

# Pomiar mocy cieplnej pasywnego, powietrznego kolektora słonecznego

Dr hab. inż. Krzysztof DUTKOWSKI

Absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (1995 r.). W 2011 roku uzyskał stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Kierownik Zakładu Mechaniki Płynów w Katedrze Techniki Ciepłej i Chłodnictwa. Zajmuje się badaniami oporów przepływu oraz wymianą ciepła podczas jedno- i dwufazowego przepływu czynników w kanałach konwencjonalnych i minikanalach.



e-mail: krzysztof.dutkowski@tu.koszalin.pl

Dr hab. inż. Piotr PIĄTKOWSKI

Absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (1999 r.). W 2014 roku uzyskał stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Transportu. Zajmuje się badaniami tłokowych silników spalinowych.



e-mail: piotr.piatkowski@tu.koszalin.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych prototypowego, powietrznego kolektora słonecznego. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. Ich celem było wyznaczenie wpływu natężenia promieniowania na przyrost temperatury powietrza oraz prędkość przepływu powietrza (na skutek ruchów konwekcyjnych). W efekcie pomiarów wyznaczono natężenie przepływu powietrza oraz moc cieplną kolektora. Pionierskie rozwiązanie konstrukcyjne jak i wyniki badań będą stanowiły punkt odniesienia dla wyników badań innych konstrukcji.

**Słowa kluczowe:** powietrzny kolektor słoneczny, badania eksperymentalne, moc cieplna kolektora pasywnego.

## Measurement of thermal power of passive solar air collector

### Abstract

The results of experimental investigations of the prototype flat air solar collector are presented in this paper. The collector consists of an aluminum casing with dimensions 1.04 m (width) × 2.08 m (height) × 0.18 m (thickness). The air inlet to the collector has an inlet channel with diameter,  $d_{in}$ , of 110 mm and a length of 0.5 m. The air outlet channel has an internal diameter,  $d_{out}$ , 130 mm and a length of 0.5 m. The prototype solar air collector has a cover made of a cellular polycarbonate with a thickness of 5 mm and in brown color. The study was performed on a laboratory set-up. The collector worked under conditions of natural convection. The tests were performed for a range of irradiance  $I = 0 - 325 \text{ W/m}^2$ . The absorber surface temperature variations, air temperature increase and the collector thermal power were determined. It was found that at maximum irradiation, the air velocity was  $w = 1 \text{ m/s}$ , volume flow rate of air  $\dot{V} = 28 \text{ m}^3/\text{h}$ , and the corresponding heat transfer rate was  $\dot{Q} = 270 \text{ W}$ .

**Keywords:** solar air collector, experimental investigations, heat efficiency.

## 1. Wstęp

Słońce jest najjaśniejszym obiektem na niebie, ale przede wszystkim głównym źródłem energii docierającej na Ziemię. Energia promieniowania słonecznego podlega konwersji: fototermicznej (na ciepło), fotowoltaicznej (na prąd) oraz fotobiochemicznej (na energię wiązań biochemicznych) [1]. Metody konwersji fototermicznej dzieli się na:

- pasywne, czyli nie wymagające dodatkowego źródła energii napędowej (w tym do napędu np.: pomp, wentylatorów);
- aktywne, czyli przetwarzające energię słoneczną w ciepło w specjalnie skonstruowanych instalacjach wymagających dodatkowych nakładów energetycznych podczas ich pracy.

Zgodnie z normą [2] rozróżnia się, w zależności od rodzaju czynnika roboczego, kolektory słoneczne: cieczowe oraz powietrzne. Powietrzne kolektory słoneczne mogą być wykorzystywane do:

- suszenia (płodów rolnych, drewna, biomasy uprawowej, biomasy odpadowej, materiałów budowlanych, itp.),

- regulacji mikroklimatu w przechowalniach płodów rolnych,
- naturalnej wentylacji i ogrzewania pomieszczeń (głównie hal i magazynów) – tzw. pasywne kominy słoneczne,
- podgrzewania szklarni,
- wspomagania energią cieplną, w okresie największej podaży promieniowania słonecznego, wszelkich procesów technologicznych wymagających ciepłego powietrza.

W układach pasywnych zakup oraz montaż kolektora powietrznego jest jedynym wydatkiem ponoszonym przez inwestora. Unika więc on kosztów, ponoszonych przez użytkowników kolektorów cieczowych, a wynikających z: wykonania projektu instalacji, uzyskania zezwolenia na budowę, zakupu armatury i układów kontrolno-sterujących, zasobników, pośredniczących wymienników ciepła, czynnika roboczego, serwisowania, itp.

Niewielkie zainteresowanie powietrznymi kolektorami słonecznymi, w porównaniu do kolektorów cieczowych, wynika z braku powszechnych, rzetelnych, uzyskanych w warunkach eksploatacyjnych danych na temat parametrów ich pracy, w tym wydajności cieplnej.

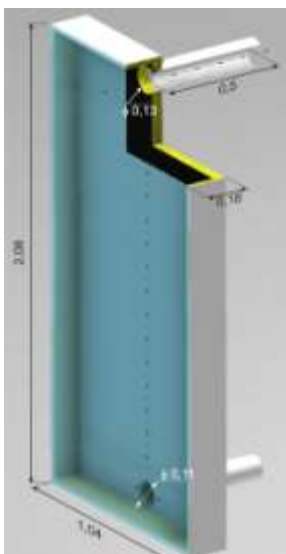
Według wiedzy autorów, na terenie Polski brak jest producenta pasywnych powietrznych kolektorów słonecznych. Podejmowane są starania mające na celu opracowanie prototypu, który będzie stanowił model gotowy do rozpoczęcia produkcji masowej. W artykule opisano wyniki badań laboratoryjnych pierwszego profesjonalnego, prototypowego pasywnego powietrznego kolektora słonecznego z płaskim absorberem i pokryciem wykonanym z poliwęglanu komorowego.

Uzyskane wyniki badań pasywnego kolektora powietrznego stanowią bazę porównawczą dla wyników badań zrealizowanych z wykorzystaniem kolejnych, bardziej zaawansowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Dostępność wyników tych badań jest szczególnie istotna, gdyż trudno jest znaleźć w literaturze światowej wyniki badań kolektorów pasywnych. Dodatkowo większość publikacji związanych z powietrznymi kolektorami słonecznymi prezentuje wyniki eksperymentów zrealizowanych w warunkach naturalnych, czyli zmiennych w czasie. Wahaniom ulega, zależnie od panujących warunków atmosferycznych: natężenie promieniowania, temperatura otoczenia, prędkość powietrza w otoczeniu. Niejednokrotnie brakuje kompletnej informacji stanowi problem w porównaniu wyników badań różnych autorów.

## 2. Stanowisko badawcze

Na rys. 1 przedstawiono widok prototypowego, powietrznego kolektora słonecznego. Kolektor składa się z aluminiowej obudowy o wymiarach: 1,04 m (szerokość) × 2,08 m (wysokość) × 0,18 m (grubość). Tylna, wewnętrzna ściana kolektora wyłożona jest izolacją z wełny mineralnej o grubości 50 mm. Na jej powierzchni znajduje się płaski absorber wykonany z blachy aluminiowej o grubości 0,5 mm pokryty cienką warstwą czarnej matowej farby. Do tylnej powierzchni absorbera przymocowano 12 termopar typu K. Ścianki boczne, górna oraz dolna kolektora wyłożone są war-

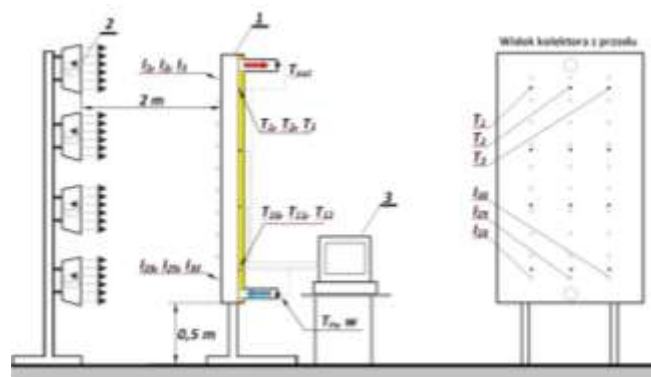
stwą izolacyjną z wełny mineralnej grubości 20 mm. Transparentne przykrycie kolektora wykonano z poliwęglanu jednokomorowego w brązowym kolorze o grubości 5 mm. Wlot powietrza do wnętrza kolektora odbywa się w sposób naturalny kanałem rurowym o średnicy  $d_{in} = 110$  mm i długości 0,5 m. Kanał wylotowy powietrza posiada średnicę wewnętrzną  $d_{out} = 130$  mm i długość 0,5 m. Osie kanałów dolotowego i wylotowego umieszczono w połowie szerokości kolektora odpowiednio 90 mm od dolnej krawędzi kolektora i 110 mm od jego górnej krawędzi.



Rys. 1. Widok badanego kolektora słonecznego

Fig. 1. View of tested solar collector

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 2. Podstawowym jego elementem był prototypowy powietrzny kolektor słoneczny ustawiony na konstrukcji nośnej. Kolektor pracował w pozycji pionowej. Odległość dolnej krawędzi kolektora od powierzchni podłogi wynosiła 0,5 m.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – kolektor powietrzny, 2 – źródło promieniowania o regulowanej mocy, 3 – system akwizycji danych,  $T_1 \div T_{12}$  – temperatura powierzchni absorbera,  $T_{in}$  – temperatura powietrza na wejściu do kolektora,  $T_{out}$  – temperatura powietrza na wyjściu z kolektora,  $w$  – prędkość przepływu powietrza,  $I_1 \div I_{30}$  – lokalne promieniowanie całkowite

Fig. 2. Schematic of the experimental set-up: 1 – air collector, 2 – adjustable radiation source, 3 – data acquisition system,  $T_1 \div T_{12}$  – temperature of the absorber surface,  $T_{in}$  – air temperature at the inlet to the collector,  $T_{out}$  – air temperature at the outlet of the collector,  $w$  – the air velocity,  $I_1 \div I_{30}$  – the local total radiation

W odległości 2 m od powierzchni czołowej kolektora umieszczono zespół promienników z możliwością regulacji ich natężenia promieniowania. Całkowite natężenie promieniowania docierające do powierzchni kolektora mierzone było za pomocą pyranometru secondary standard CMP11 firmy Kipp & Zonen. Wartość natężenia

promieniowania określono jako średnią arytmetyczną z 30 wartości lokalnych promieniowania całkowitego mierzonych w punktach równomiernie rozmieszczonych na powierzchni czołowej kolektora (patrz rys. 2). Maksymalna, możliwa do uzyskania w warunkach laboratoryjnych, wartość całkowitego natężenia promieniowania, wynosiła  $I = 350$  W/m<sup>2</sup>.

Temperaturę powietrza na wejściu do kanału wlotowego, temperaturę powietrza na wypływie z kanału wylotowego, temperaturę otoczenia oraz temperaturę powierzchni absorbera (w 12 równomiernie rozłożonych punktach) mierzono za pomocą indywidualnie wykonanych termopar typu K. Każda z termopar była indywidualnie cechowania (w zakresie 20°C ÷ 80°C) względem wzorcowego termometru szklanego o działce elementarnej 0,02°C. Błąd wskazań termopar nie przekraczał  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . Wszystkie sygnały temperatury były archiwizowane co 20 s, za pomocą rejestratora Memograph RSG40 firmy Endress & Hauser. Wartość temperatury w stanie ustalonym przyjmowano jako średnią z odczytów dokonanych w czasie 5 minut.

Prędkość przepływu powietrza mierzono na wejściu do kanału wlotowego za pomocą ręcznego termoanemometru Testo 524. Jako prędkość powietrza na wlocie przyjmowano średnią ważoną z 5 punktów pomiarowych (w osi pionowej i poziomej). Dokładność pojedynczego pomiaru prędkości wynosiła  $\pm 0,03$  m/s + 5% mierzony wartości. Stąd maksymalny błąd pomiaru prędkości wynosił  $\pm 0,08$  m/s.

Wzrost temperatury powietrza  $\Delta T$  przepływającego przez kolektor wyznaczono jako różnicę pomiędzy temperaturą powietrza opuszczającego kanał wylotowy  $T_{out}$ , a temperaturą powietrza na wejściu do kolektora  $T_{in}$ . Należy zauważyć, że temperatura powietrza na wejściu do kolektora była stała i odpowiadała temperaturze otoczenia  $T_{amb}$ , stąd  $T_{in} = T_{amb} = 20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ .

Objęściowe natężenie przepływu powietrza przez kolektor obliczono na podstawie wielkości zmierzonych w kanale dolotowym z równania:

$$\dot{V} = w \cdot (0,25 \cdot \pi \cdot d_{in}^2), \quad (1)$$

gdzie:  $w$  – średnia prędkość powietrza w kanale dolotowym,  $d_{in}$  – średnica wewnętrzna kanału dolotowego.

Wydajność cieplną kolektora słonecznego wyznaczono na podstawie zależności:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (2)$$

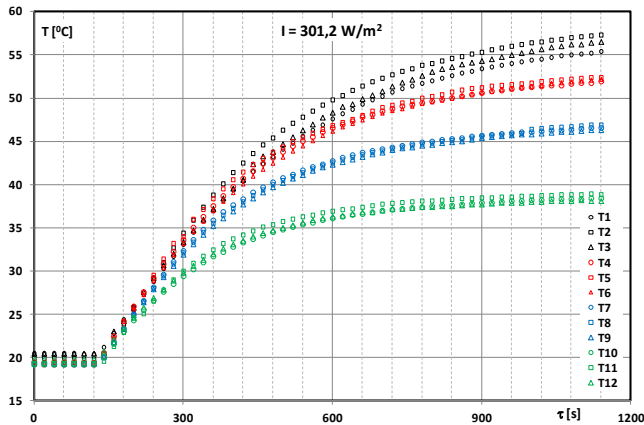
gdzie:  $\rho$  – gęstość powietrza w temperaturze wlotowej,  $c_p$  – ciepło właściwe powietrza w temperaturze otoczenia.

### 3. Metodyka badań

Po uruchomieniu przyrządów pomiarowych oraz rejestratora ustawiano, za pomocą autotransformatora, wartość natężenia prądu doprowadzanego do zespołu promienników. Układ badawczy pozostawiano do uzyskania stanu ustalonego. Brak zmian we wskazaniach temperatury powierzchni absorbera przez minimum 5 minut, był sygnałem uzyskania stanu ustalonego. Wówczas mierzono prędkości lokalne powietrza na wejściu do kanału wlotowego oraz rozkład całkowitego natężenia promieniowania na powierzchni czołowej powietrznego kolektora słonecznego. Wyniki odczytów prędkości powietrza i natężenia promieniowania oraz zapisane w pamięci rejestratora wartości chwilowe temperatury posłużyły do przeprowadzenia obliczeń oraz wykonania charakterystyk.

### 4. Wyniki badań

Na rys. 3 przedstawiono przykładowo wyniki pomiarów temperatury tylnej powierzchni absorbera, od momentu włączenia źródła promieniowania do osiągnięcia stanu ustalonego.



Rys. 3. Eksperymentalny rozkład temperatury tylnej powierzchni absorbera w czasie; natężenie promieniowania  $I = 301,2 \text{ W/m}^2$   
Fig. 3. Experimental local temperature distribution of absorber back surface versus the time; radiation intensity  $I = 301.2 \text{ W/m}^2$

Pomiar temperatury zrealizowano w 12 punktach rozmieszczonych na 4 różnych wysokościach (patrz rys. 2). Prezentowany przebieg zmiany temperatury uzyskano podczas badań przy średniej wartości całkowitym natężeniu promieniowania wynoszącej  $I = 301,2 \text{ W/m}^2$ . Z rys. 3 zauważa się, że czas, po którym osiągnięto stan ustalony jest różny i wynosi około 15 minut dla miejsc pomiarowych położonych w dolnej części kolektora do około 20 minut dla miejsc położonych najwyżej. Potwierdzają to wyniki badań przy innych wartościach natężenia promieniowania (nie prezentowane tutaj). Porównywalny czas, po jakim uzyskano stan ustalony pracy kolektora słonecznego podobnej konstrukcji, otrzymali Tanaka i inni [3] oraz Maneewan i inni [4]. Można wnioskować, że jest to więc typowa wartość.

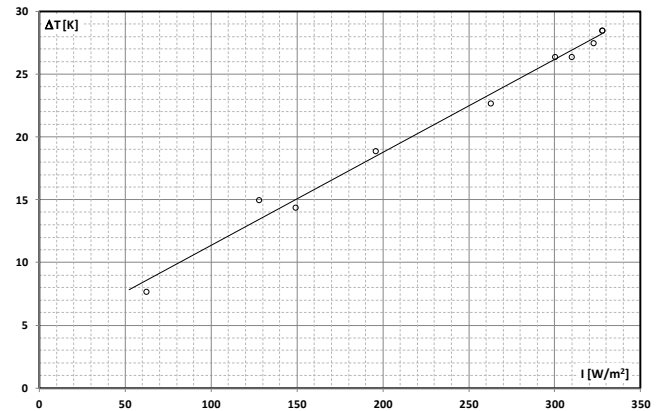
Z rys. 3 wynika również, że najwyższa, dla tego przypadku badawczego, zmierzona temperatura powierzchni absorbera wynosiła około  $58^\circ\text{C}$ . Pozostaje to w zgodzie z wynikami badań prezentowanymi w pracach [5, 6, 7] i uzyskanymi dla analogicznych warunków pracy kolektora.

Na rys. 4 przedstawiono wzrost temperatury powietrza  $\Delta T$  przepływającego przez kolektor w funkcji natężenia promieniowania  $I$ . Ze wzrostem wartości natężenia promieniowania proporcjonalnie wzrasta wartość przyrostu temperatury powietrza przepływającego przez kolektor. Prostoliniowy charakter zmian  $\Delta T$  obserwuje się zarówno podczas pracy kolektora powietrznego w warunkach wymuszonego przepływu [8, 9] jak i podczas konwekcji swobodnej [10]. Z uwagi na to, że potwierdzono eksperymentalnie, liniowy charakter wzrostu temperatury powietrza przepływającego przez kolektor, w funkcji natężenia promieniowania proponuje się stosowanie zależności [10]:

$$\Delta T = T_G \frac{I}{I_0} + T_L \quad (3)$$

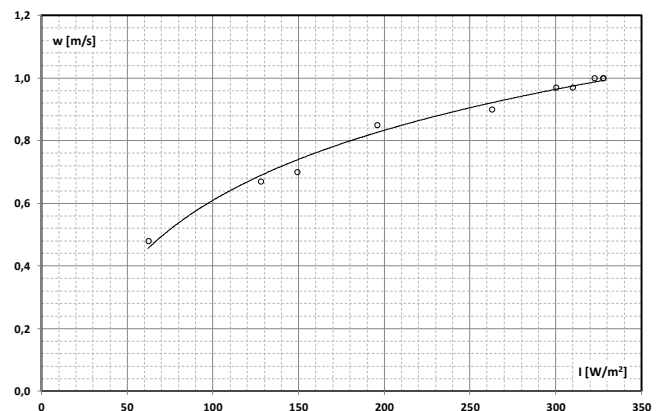
gdzie:  $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$  – standardowe natężenie promieniowania,  $T_G$  i  $T_L$  – współczynniki, temperatury charakterystyczne dla danego kolektora, a odzwierciedlające „sprawność” konwersji energii. Dla badanego kolektora, na podstawie współczynników liniowego równania regresji (rys. 4), charakterystyczne temperatury przyjmują wartości  $T_G = 74^\circ\text{C}$  oraz  $T_L = 4^\circ\text{C}$ . Zgodnie z równaniem (3) teoretyczny wzrost temperatury powietrza przepływającego przez badany kolektor, przy standardowym natężeniu promieniowania, wynosi  $\Delta T = 78^\circ\text{C}$ .

Podczas badań eksperymentalnych prototypowego, pasywnego kolektora powietrznego mierzono średnią prędkość przepływu powietrza. Ruch powietrza wywołany był konwekcją swobodną w szczeliny powietrznej utworzonej przez pokrycie kolektora i absorber. Prędkość powietrza mierzono na wlocie do kolektora, ze względu na stałą temperaturę zasysanego powietrza, równą temperaturze otoczenia.



Rys. 4. Przyrost temperatury powietrza  $\Delta T$  przepływającego przez kolektor od średniego natężenia promieniowania  $I$   
Fig. 4. The increase of air temperature  $\Delta T$  flowing through the collector versus the average radiation intensity  $I$

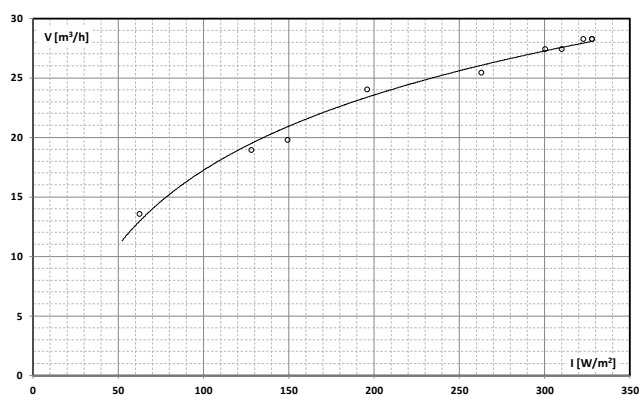
Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości powietrza przepływającego przez kolektor w zależności od natężenia promieniowania. Zauważa się, że ze wzrostem wartości natężenia promieniowania wzrasta średnia prędkość przepływu powietrza. Krzywa  $w = f(I)$  ma przebieg logarytmiczny. Zwiększanie wartości natężenia promieniowania powoduje coraz mniejszy przyrost średniej prędkości przepływu powietrza. Maksymalna, średnia prędkość przepływu powietrza na wlocie do kolektora, w warunkach eksperymentu, wynosiła około  $w = 1 \text{ m/s}$ .



Rys. 5. Prędkość powietrza  $w$  na wejściu do kanału wlotowego kolektora w zależności od natężenia promieniowania  $I$   
Fig. 5. Air velocity  $w$  at the inlet to the inlet channel of collector, depending on the irradiance  $I$

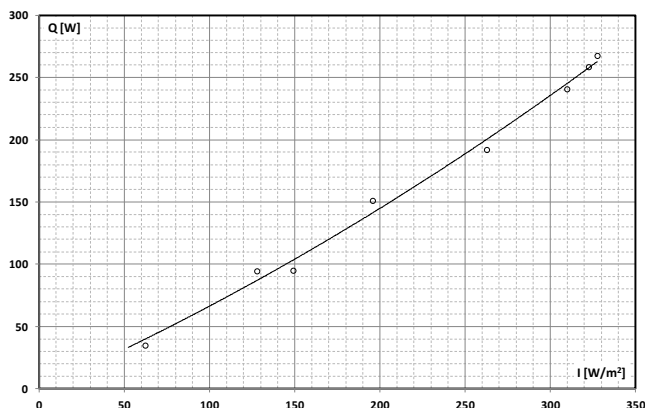
Na podstawie zmierzonej wartości średniej prędkości  $w$  obliczono, z zależności (2), objętościowe natężenie przepływu powietrza  $\dot{V}$ . Zgodnie z rys. 6 maksymalne natężenie przepływu powietrza przez prototypowy kolektor wynosiło  $\dot{V} = 28 \text{ m}^3/\text{h}$ . Jest to wartość prawie dziesięciokrotnie niższa od uzyskanej, przy analogicznym strumieniu ciepła, przez autorów Ryan i Burek [11]. Badali oni konwekcyjny przepływ powietrza w kanale o szerokości 1 m i grubości szczeliny powietrznej w zakresie  $0,02 \div 0,15 \text{ m}$ . Zhai i inni [12] badali przepływ powietrza kanałem z elektrycznie podgrzewaną tylną ścianką. Kanał o wymiarach (szerokość  $\times$  wysokość  $\times$  grubość szczeliny powietrznej)  $500 \times 1500 \times 200 \text{ mm}$  był pochylony pod kątem  $45^\circ$  i pracował w warunkach konwekcji swobodnej. Przy gęstości strumienia ciepła  $I = 300 \text{ W/m}^2$  objętościowe natężenie przepływu powietrza wynosiło około  $\dot{V} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$ , czyli było 3-krotnie większe od uzyskanego podczas niniejszych eksperymentów. Autorzy [12] zauważyli, że kąt pochyleń kolektora, inny niż  $45^\circ$  obniża natężenie przepływu powietrza.

Niższe wartości natężenia przepływu powietrza uzyskane w trakcie realizacji niniejszych badań należy tłumaczyć negatywnym oddziaływaniem kanałów: dolotowego i wylotowego. Po pierwsze znacznie zmniejszają one pole przekroju przepływu powietrza. Po drugie, wprowadzają dodatkowe opory przepływu powietrza. Kolektory wykorzystywane przez autorów wyżej cytowanych prac posiadały nieograniczoną przestrzeń wlotową i wylotową, więc uzyskane wartości natężenia przepływu powietrza były kilkukrotnie większe.



Rys. 6. Objętościowe natężenie przepływu powietrza  $\dot{V}$  przepływającego przez kanał wlotowy kolektora od średniego natężenia promieniowania  $I$   
Fig. 6. Dependence of air volume flow rate  $\dot{V}$  flowing through the inlet channel of collector duct on the average irradiance  $I$

Na rys. 7 przedstawiono wpływ natężenia promieniowania  $I$  na wydajność cieplną  $Q$  kolektora określoną zależnością (2).



Rys. 7. Wydajność cieplna  $Q$  kolektora od średniego natężenia promieniowania  $I$   
Fig. 7. The collector heat efficiency  $Q$  versus the average irradiance  $I$

Wzrost wartości natężenia promieniowania słonecznego powoduje progresywny wzrost wartości wydajności cieplnej kolektora. Z pracy Zhai i inni [12] wynika, że przy stałym natężeniu przepływu powietrza zależność wydajności cieplnej kolektora zmienia się proporcjonalnie od natężenia promieniowania. W przypadku konwekcji swobodnej wzrost natężenia promieniowania pociąga za sobą proporcjonalny przyrost temperatury czynnika oraz dodatkowy, wzrost prędkości jego przepływu. Tłumaczy to paraboliczny kształt krzywej obserwowanej na rys. 7.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Wyniki badań cieczowych, płaskich kolektorów słonecznych są w literaturze często publikowane. Podane są także zależności pozwalające określić charakterystyki cieplne tego typu kolektorów. Liczba publikacji dotyczących płaskich powietrznych kolektorów słonecznych jest znacznie mniejsza, co w znacznym stopniu utrudnia właściwe ich projektowanie i rozpowszechnienie w za-

stosowaniach wielu dziedzin, zwłaszcza gospodarki komunalnej i w technice rolniczo-spożywczej.

Przedstawione w opracowaniu wyniki własnych badań eksperymentalnych charakterystyk płaskiego, powietrznego kolektora słonecznego pozwalają zwrócić uwagę na problemy tego typu solarnych elementów pasywnych. Przedmiotem badań był płaski kolektor słoneczny z pokryciem wykonanym z poliwęglanu komorowego o grubości 5 mm w kolorze brązowym. Badania wykonane na laboratoryjnym stanowisku pomiarowym pozwoliły na opracowanie podstawowych charakterystyk eksploatacyjnych tego typu kolektora. Kolektor pracował w warunkach konwekcji swobodnej.

Na podstawie pomiarów określono rozkład temperatury powierzchni absorbera, przyrost temperatury powietrza w przepływie przez kolektor, moc cieplną kolektora, sprawność termiczną. Badania przeprowadzono w zakresie natężenia promieniowania  $I = 0 \div 325$  W/m<sup>2</sup>. Dla maksymalnej wartości natężenia promieniowania średnia prędkość przepływu powietrza w kanale wlotowym wynosiła  $w = 1$  m/s (objętościowe natężenie przepływu powietrza  $\dot{V} = 28$  m<sup>3</sup>/h), co pozwoliło uzyskać moc cieplną kolektora o wartości  $Q = 270$  W.

Wyniki badań eksperymentalnych porównano z dostępnymi badaniami innych autorów. Uzyskane efekty badań własnych są porównywalne do innych, często prototypowych konstrukcji. Fakt ten pozwala optymistycznie prognozować dalsze doskonalenie konstrukcji pasywnego, powietrznego kolektora słonecznego. Wymagane są dalsze badania eksperymentalne oraz opracowanie wyników pozwalających na uogólnienie opisu charakterystyk cieplno-przepływowych nowego typszeregu kolektorów powietrznych.

## 6. Literatura

- [1] Lewandowski W.M.: Proekologiczne odnawialne źródła energii. WNT, Warszawa, 2012.
- [2] PN EN ISO 9488. Energia słoneczna. Terminologia.
- [3] Tanaka H., Nakatake Y., Tanaka M.: Indoor experiments of the vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector. *Desalination*, vol. 177, s. 291-302, 2005.
- [4] Maneewan S., Khedari J., Zeghamati B., Hirunlabh J., Eakburanawat J.: Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector. *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 743-752, 2004.
- [5] Chena Z.D., Bandopadhyay P., Halldorsson J., Byrjalsen C., Heiselberg P., Li Y.: An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. *Building and Environment*, vol. 38, s. 893-906, 2003.
- [6] Sakonidou E.P., Karapantsios T.D., Balouktsis A.I., Chassapis D.: Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. *Solar Energy*, vol. 82, s. 80-94, 2008.
- [7] Nematollahi O., Alamdari P., Assari M. R.: Experimental investigation of a dual purpose solar heating system. *Energy Conversion and Management*, vol. 78, s. 359-366, 2014.
- [8] Karim M.A., Hawlader M.N.A.: Development of solar air collectors for drying applications. *Energy Conversion and Management*, vol. 45, s. 329-344, 2004.
- [9] Karim M.A., Hawlader M.N.A.: Performance evaluation of a v-groove solar air collector for drying applications. *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, s. 121-130, 2006.
- [10] Toure S.: Characteristic temperatures in a natural convection solar air heater. *Energy Conversion and Management*, vol. 42, s. 1157-1168, 2001.
- [11] Ryan D., Burek S.A.M.: Experimental study of the influence of collector height on the steady state performance of a passive solar air heater. *Solar Energy*, vol. 84, s. 1676-1684, 2010.
- [12] Zhai X.Q., Dai Y.J., Wang R.Z.: Experimental investigation on air heating and natural ventilation of a solar air collector. *Energy and Buildings*, vol. 37, s. 373-381, 2005.