

**Roman ŚMIERZCHALSKI, Rafał TRĘBOWICZ**POLITECHNIKA GDAŃSKA, ul. Narutowicza 11/12, 80 233 Gdańsk,  
EKOSOLAR, ul. Oliwska 103, 80-209 Chwaszczyno**Badanie właściwości eksploatacyjnych próżniowego kolektora słonecznego do grzania powietrza****Dr hab. inż. Roman ŚMIERZCHALSKI**

Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym PG specjalność automatyka. Od roku 1980 pracował w Akademii Morskiej w Gdyni, również jako elektroautomatyk na statkach. Od roku 2009 pracuje na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG. Zajmuje się sterowaniem i automatyką systemów okrętowych, metodami sztucznej inteligencji. Jest autorem ponad 200 prac naukowych, książek, skryptów, artykułów i członkiem organizacji technicznych oraz naukowych.



e-mail: romsmier@pg.gda.pl

**Inż. Rafał TRĘBOWICZ**

Studia wyższe ukończył w 2001r. na Wydziale Elektrycznym Akademii Morskiej w Gdyni. Jest właścicielem f. Ekosolar, również pracuje jako elektroautomatyk na statkach wiertniczych. Zajmuje się energią solarną i elektroautomatyką okrętową.



e-mail: magraf@autograf.pl

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono system do badania właściwości eksploatacyjnych oraz wyniki testów prototypowego próżniowego, rurowego kolektora słonecznego do grzania powietrza. Przedstawiono metody obliczenia sprawności na podstawie ilości energii przenoszonej oraz na podstawie konstrukcji kolektora z systemem rozprowadzania powietrza. Na podstawie badań określono parametry kolektora. Sprawność tego typu kolektora powietrznego jest prawie dwukrotnie większe w porównaniu do kolektora cieczowego.

**Słowa kluczowe:** próżniowy kolektor powietrzny, badanie właściwości kolektora, sprawność kolektora.

**Test performance characteristics of vacuum solar collector for heating air****Abstract**

The paper describes a vacuum solar collector for heating air – an innovative solution for distribution of the system medium - air heated in a vacuum solar collector [5]. A system for studying the properties and technical parameters of collectors and test results are presented. The energy absorbed in the air collector by an absorber is brought in a warm stream of the air flowing in collector channels - the system for distribution of the heated medium in the collector. The diagram of the system is shown in Fig. 1. To reduce costs there is proposed use of a vacuum tube in the solar collector to heat the air [4, 5]. The lack of intermediary medium (for example water) significantly improves the solar collector efficiency and provides no possibility of overheating of the collector during stagnation. An air collector with 20 vacuum tubes T (SHENTAI) was used for tests. Measurements of temperature and solar radiation were taken remotely. During the experiment continuous recording of the collector operating parameters under real conditions was carried out. The tests proved that the collector thermal efficiency depended on the level of solar radiation, the increased temperature relative to the solar efficiency remained at a constant level. The efficiency of the air vacuum collector (60%) is almost twice as large as that of the liquid collector.

**Keywords:** air collector, testing the properties of the collector, the collector efficiency.

**1. Wprowadzenie**

Konieczność ochrony środowiska i rachunek ekonomiczny stanowią główne uwarunkowania rozwoju energii odnawialnej. Energetyka odnawialna przyczynia się do rozwiązania wielu problemów ekologicznych wynikających z wytwarzaniem energii metodami tradycyjnymi. Dwa podstawowe czynniki wiatr i słońce pozwalają na wytwarzanie energii elektrycznej i cieplnej. Po wszechnie tworzone są farmy wiatrowe oraz zespoły paneli słonecznych dostarczających energię elektryczną, a także kolektory słoneczne do grzania wody. Urządzenia te mogą stanowić istotny udział w bilansie energetycznym w naszym kraju, a także przyczynią się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego,

szczególnie w obszarach z deficytem energii. W chwili obecnej coraz więcej użytkowników energii instaluje urządzenia energetyki odnawialnej – głównie wykorzystując energię słońca do podgrzewania wody (c.w.u.) oraz wspomagania centralnego ogrzewania (c.o.) budynków mieszkalnych, hal, magazynów, hoteli, budynków użyteczności publicznej [1, 7]. Główne zastosowanie w Polsce znajdują kolektory słoneczne do grzania wody dostarczając energię cieplną do budynków jednorodzinnych. Istotnym ograniczeniem stosowania tej technologii są uwarunkowania klimatyczne występujące w Polsce, a także okres zwrotu kosztów inwestycyjnych [3].

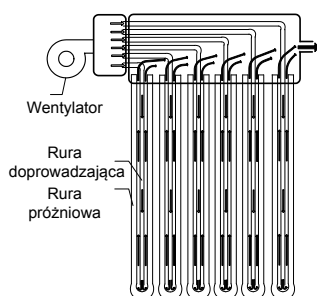
W celu redukcji kosztów instalacji solarnych oraz uproszczenia budowy systemu pozyskiwania ciepła, proponuje się zastosowanie w kolektorze słonecznym próżniowych rur do podgrzewania powietrza [4, 5]. Brak czynnika pośredniczącego (wody, glikolu) znacznie poprawia przede wszystkim sprawność kolektora słonecznego. Istotną cechą kolektorów powietrznych jest również brak wpływu na możliwość przegrzania kolektora w okresie stagnacji. Jednak dostępne na rynku kolektory powietrzne ze względu na wysokie straty ciepła do otoczenia charakteryzują się niską sprawnością. Zastosowanie kolektorów powietrznych wykorzystujących próżnię w szklanych rurach próżniowych jako izolatora, znacznie poprawiają warunki pracy tych urządzeń. Izolacja od otoczenia stosowana w kolektorach pozwala na pozyskiwanie energii przy niższych temperaturach otoczenia. Również kolektor może pracować przy świetle rozproszonym np. przy częściowym zachmurzeniu. Konstrukcja próżniowych kolektorów do grzania powietrza zapewnia możliwość pozyskiwania energii przez większość miesięcy w rok.

W dalszej części artykułu zostanie przedstawiony krótki opis próżniowego kolektora słonecznego do grzania powietrza, nowatorskie rozwiązanie systemu do rozprowadzania czynnika ogrzewanego w próżniowym kolektorze słonecznym, system do badania własności eksploatacyjnych i parametrów technicznych kolektorów oraz wyniki przeprowadzonych badań.

**2. Kolektory słoneczne do grzania powietrza**

W kolektorach słonecznych do grzania powietrznych energia pochłonięta przez absorber, jest oddawana w postaci ciepła strumieniowi przepływającego powietrza w odpowiednio ukształtowanych kanałach kolektora - systemie do rozprowadzania czynnika ogrzewanego w kolektorze. Budowa prezentowanego w pracy kolektora, z systemem do rozprowadzania powietrza jako czynnika ogrzewanego w kolektorze słonecznym, składa się z zestawu szklanych okrągłodennych rur próżniowych pochłaniających energię słoneczną i rur doprowadzających powietrze do części dolnej szklanych rur. Zastosowane w kolektorach próżniowe rury charakteryzują się właściwościami wysokiej absorpcji energii słonecznej. Głównymi cechami rur próżniowych typu T (f. SHENTAI) są: absorpcja promieni słonecznych powyżej 95%,

emisja ciepła do atmosfery, poniżej 0,06%, praca od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $300^{\circ}\text{C}$ , izolacja próżniowa oraz odporność na grad o średnicy 25mm [4]. Zastosowane próżniowe rury posiadają trzy odpowiednie warstwy: miedzianą warstwę odbijającą promienie, warstwę absorpcyjną oraz warstwę ograniczającą emisję energii do atmosfery (tytanową). Rury te pochłaniają również energię promieniowania rozproszonego, która przenika przez warstwę chmur, co daje efekt absorbowania promieni słonecznych w pochmurne, deszczowe dni. Dzięki zastosowaniu rur próżniowych i stosowanych warstw kolektory posiadają znacznie wyższą sprawność w porównaniu z kolektorami płaskimi. Działanie kolektora przedstawia się w następujący sposób: powietrze sprężone przez wentylator doprowadzane do dolnej części rury, we wewnętrznej części rury próżniowej, pochłania energię cieplną. Ogrzane powietrze następnie doprowadzane jest do zbiorczego kolektora. Schemat działania przedstawia poniższy rysunek (rys. 1), a szczegółowy opis pracy kolektora zawarto w [5]. Przepływające powietrze jako czynnik grzewczy odbierając ciepło z kolektora nie stwarza szeregu problemów w porównaniu do innych czynników jak glikol czy woda. Przede wszystkim kolektor jest mniej wrażliwy na nieszczelności, co jest istotne przy dużych wahańach temperatur, jakie występują w kolektorach, jak również powietrze nie wchodzi w reakcje ze szklanymi rurami kolektora, co zapewnia bezpieczeństwo eksploatacji tych urządzeń.



Rys. 1. Schemat działania systemu do rozprowadzania czynnika ogrzewanego w kolektorze słonecznym

Fig. 1. Diagram of the system for distribution of the heated medium in a solar collector

Brak problemów technologicznych upraszcza konstrukcję kolektora a zarazem koszty produkcji i materiałów do wytworzenia są znacznie niższe w porównaniu do kolektorów wodnych. Prosta konstrukcja kolektora implikuje nieskomplikowany montaż tych urządzeń. Moduły lekkich kolektorów do grzania powietrza mogą być montowane niezależnie lub jako zespoły kolektorów na dachach, elewacjach ścian lub wydzielonym nasłonecznionym miejscu. Dzięki zastosowaniu odpowiednich materiałów w kolektorach nie występuje problem przegrzania podczas dużego nasłonecznienia jak i w okresie stagnacji. Ponadto system nie wymaga pomp cyrkulacyjnych, a jedynie wentylatory o określonej mocy do sprężania powietrza. Zastosowanie systemu do rozprowadzania czynnika ogrzewanego w kolektorze słonecznym zapewnia wysoką sprawność urządzenia oraz wydajność cieplną.

### 3. Badania właściwości eksploatacyjnych próżniowego kolektora słonecznego

Właściwości eksploatacyjne powietrznych kolektorów słonecznych określa się na podstawie ich parametrów, do których zalicza się: sprawność cieplną, przyrost temperatury czynnika grzewczego, współczynnik strat ciepła, przepływ, powierzchnia kolektora. Najważniejszym parametrem kolektora jest sprawność cieplna, określana przez stosunek energii użytecznej, jaką odbiera medium (moc użyteczna  $P_u$  wyjściowa otrzymana na wylocie z kolektora) do energii promieniowania słonecznego dostarczonej do kolektora – energii wejściowej, określona równaniem (1).

$$\eta = P_u / I * A \quad (1)$$

gdzie:  $P_u$  – moc użyteczna [W];  $I$  – natężenie promieniowania słonecznego [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  $A$  – powierzchnia kolektora.

Na podstawie temperatur wlotowej i wylotowej powietrza z kolektora ilość energii oddanej przez kolektor  $Q$  określa równanie (2)

$$Q = m_p c_p (t_k - t_p), \quad (2)$$

i odpowiednio równania (3) i (4),

$$Q = \rho V_p c_p (t_k - t_p), \quad (3)$$

$$Q = S t \rho c_p (t_k - t_p), \quad (4)$$

gdzie:  $Q$  – ilość energii oddanej przez kolektor [J/s],  $m_p$  – masa ogrzanego czynnika [kg],  $\rho$  – gęstość powietrza [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $c_p$  – ciepło właściwe ogrzewanego czynnika [ $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{K}$ ],  $t_k$  – temperatura wylotowa powietrza z kolektora [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $t_p$  – temperatura wlotowa powietrza do kolektora [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\rho$  – gęstość czynnika ogrzewanego [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $V_p$  – prędkość przepływu czynnika ogrzewanego [m/s],  $S$  – ilość przepływającego czynnika w czasie [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],  $t$  – czas przepływania czynnika [s].

Wówczas moc użyteczna  $P_u$  wyjściowa otrzymana na wylocie z kolektora jest równa

$$P_u = Q/t = S \rho c_p (t_k - t_p), \quad (5)$$

Oprócz możliwości obliczenia sprawności na podstawie ilości energii przenoszonej przez czynnik, analizę można dokonać na podstawie konstrukcji kolektora. Analizując cechy konstrukcyjne kolektora takie jak rodzaj absorbera, jakość izolacji, transmisyjność powłoki osłaniającej, sprawność kolektora słonecznego określa równanie Hottel-Whillier'a (6) [6]. Na podstawie temperatury czynnika - powietrza na wlocie i wylocie kolektora określamy sprawność kolektora.

$$\eta = F' (\tau * \alpha) - (F' - U) \left[ \frac{(t_k + t_p) / 2 - t_e}{I} \right] \quad (6)$$

gdzie:  $F'$  – współczynnik sprawności absorbera,  $\tau$  – współczynnik transmisji;  $\alpha$  – współczynnik absorpcji;  $t_e$  – temperatura otoczenia [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $U$  – współczynnik strat ciepła z absorbera [ $\text{W}/\text{m}^2^{\circ}\text{K}$ ].

Sprawność kolektora jest zmienna w czasie i zależy głównie od różnicy temperatury pomiędzy absorberem a otoczeniem. Im wyższa będzie temperatura absorbera w stosunku do otoczenia, tym mniejsza będzie sprawność kolektora. Jednak wyznaczenie temperatury absorbera stwarza szereg problemów. Można określić współczynnik sprawności absorbera jako stosunek uzyskanej energii użytecznej, do energii, jaką można uzyskać w wypadku, gdy temperatura absorbera będzie równa temperaturze powietrza przepływającego przez kolektor. W wypadku, gdy czynnik odbierający ciepło będzie miał temperaturę porównywalną z temperaturą otoczenia to  $[(t_k + t_p) / 2 - t_e]$  w równaniu (6) będzie bliska zero, a sprawność kolektora będzie zależała od  $(\tau * \alpha)$ . W tym wypadku kolektor osiąga najwyższą sprawność teoretyczną, jaką może osiągnąć - sprawność optyczną  $\eta_0 = \tau * \alpha$ . Sprawność optyczna jest niezmienna i stanowi parametr techniczny kolektora i pośrednio informuje o cechach konstrukcyjnych kolektora i określa, jaka część promieniowania słonecznego. Określanie sprawności kolektora w oparciu o dane konstrukcyjne można określić również na podstawie zależności (7) prezentowanej w pracy [2].

$$\eta(I, t_m - t_e) = (\tau * \alpha) - a_{1a} \frac{(t_m - t_e)}{I} - a_{2a} \frac{(t_m - t_e)^2}{I} \quad (7)$$

gdzie:  $\tau * \alpha = \eta_0$  sprawność optyczna,  $t_m = (t_k + t_p) / 2$  wartość średnia temperatury [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $a_{1a}$  - liniowy współczynnik przewodzenia ciepła,  $a_{2a}$  - nieliniowy współczynnik przewodzenia ciepła.

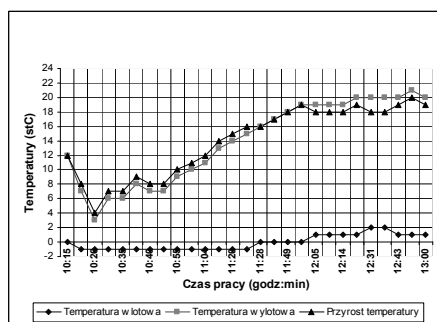
Ze względu na eksperymentalny charakter badań kolektora powietrznego, wyznaczenie sprawności przeprowadzono w oparciu o zależności (1) i (5) podczas eksploatacji kolektora w warunkach rzeczywistych. Do badań zastosowano kolektor powietrzny zbudowany z 20 rur próżniowych typu T (SHENTAI) o wysokim współczynniku absorpcji oraz niskim współczynniku emisji połączonych z systemem do rozprowadzania czynnika ogrzewanego według schematu na rys. 1. Powietrzny kolektor słoneczny zamontowany został na dachu budynku Politechniki Gdańskiej. Pomiary temperatur powietrza na wejściu oraz wyjściu rur kolektora, temperatury radiatora i otoczenia były realizowane przez czujniki PT100 o określonym zakresie temperatur. Do pomiaru natężenia promieniowania słonecznego wykorzystany został pirometr SPLite 2 firmy Kipp & Zonen, umieszczony na stelażu kolektora powietrznego w kierunku południowym pod kątem 45° do powierzchni dachu. Pomiary były realizowane i rejestrowane za pomocą sterownika PCD1 SAIA, z wykorzystaniem odpowiednich kart wejściowych oraz systemu SCADA i aplikacji Excel. Parametry kolektora powietrznego do testów przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry kolektora powietrznego do testów  
Tab. 1. Parameters for testing air collector

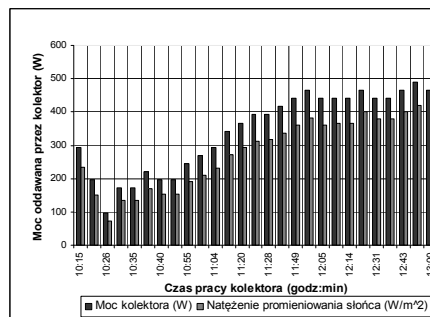
Lp.	Parametr	Wielkość
1	Powierzchnia całkowita	1,975m x 1,571m = 3,103m kw
2	Powierzchnia oświetlana	1,876m kw
3	Powierzchnia absorpcyjna	1,603m kw (powierzchnia wew. rury)
4	Materiał rury próżniowej	Szkoło borosilikonowe
5	Przepuszczalność rury zew.	95%
6	Czynnik pomiędzy rurami	próżnia <math> < 5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}</math>
7	Wymiar zewnętrzny rury	58 mm (SP)
8	Grubość ścianki rury zew.	1,5 mm
9	Wymiar wewnętrzny rury	47 mm
10	Grubość ścianki rury wew.	1,5 mm
11	Długość rury	1800 mm
12	Odległość rury od rury	75 mm
13	Ilość rur	20

Ważnym parametrem w przypadku kolektorów powietrznych jest natężenie przepływu [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] oraz prędkość przepływu powietrza [ $\text{m/s}$ ]. Pozwalają one określić objętość oraz prędkość strumienia powietrza, który jest rozprowadzany w instalacji kolektora. Do badań kolektora powietrza przyjęto następujące parametry: przepływ powietrza jako czynnika ogrzewanego był równy  $S = 80 \text{ m}^3/\text{h}$ , gęstość powietrza  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ , ciepło właściwe powietrza  $c_p = 1020 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ , kąt ustawienia kolektora względem ziemi wynosił 45 st w kierunku centralnie południowym.

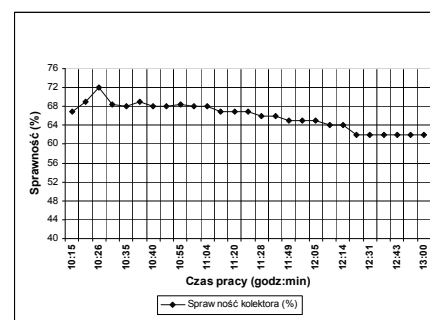
Przeprowadzono ciągłą rejestrację parametrów pracy kolektora słonecznego w warunkach rzeczywistych. Poniżej przedstawiono wybrane przykładowe wyniki testów w dniu 10.02.2011. Wykresy zawierają: przyrost temperatury czynnika grzewczego, temperaturę wlotową i wylotową powietrza z kolektora, moc oddawaną przez kolektor oraz sprawność kolektora (rys. 2, 3, 4).



Rys. 2. Wykres temperatur w czasie pracy kolektora.  
Fig. 2. Diagram of temperatures during collector operation



Rys. 3. Moc oddawana przez kolektor w czasie pracy  
Fig. 3. Output power of the collector during operation



Rys. 4. Sprawność kolektora (%)  
Fig. 4. Collector efficiency (%)

#### 4. Wnioski

Na podstawie badań kolektora słonecznego w warunkach rzeczywistych sformułowano następujące wnioski: charakterystyka sprawności cieplnej kolektora zależy od poziomu natężenia promieniowania słonecznego, wraz ze wzrostem stosunku różnicy temperatur wlotowej i wylotowej powyżej  $10^\circ\text{C}$  do wartości nasłonecznienia sprawność utrzymuje się na stałym poziomie. Charakterystyka progowej wartości natężenia promieniowania słonecznego liniowo narasta, a nachylenie zależy od różnicy temperatur pomiędzy absorberem a otoczeniem. Na podstawie charakterystyk stwierdzono, że kolektor absorbuje promieniowanie słoneczne na poziomie ok.  $15 \text{ W/m}^2$ , co w okresie zimowym jest energią dostateczną do rozpoczęcia pracy kolektora. Sprawność próżniowego kolektora powietrznego (ok. 60%) jest prawie dwukrotnie większe w porównaniu do kolektorów cieczowych.

#### 5. Literatura

- [1] Gołębiowski S., Wiśniewski G.: Kolektory słoneczne. Energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle, Wyd. MEDIUM, Warszawa 2000.
- [2] Kramer K.: Collector test according to EN 12975-1,2:2006, Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems ISE, 8th November 2007.
- [3] Różycka E.: Analiza opłacalności zastosowania niekonwencjonalnych źródeł energii w projektowanym budynku jedno-rodzinnym. Kolektory słoneczne, pompy ciepła. Politechnika Warszawska, Tom 11. 2009.
- [4] Śmierchalski R., Trębowski R.: Opis, koncepcja wykorzystania i test próżniowych kolektorów słonecznych do grzania powietrza.pdf, materiały informacyjne, Gdańsk 2010.
- [5] Śmierchalski R., Trębowski R.: System do rozprowadzania czynnika ogrzewanego w kolektorze słonecznym, Zgłoszenie patentowe nr P 387525, Urząd Patentowy, Warszawa, 2009.
- [6] Tyagi V.V., et. al.: Thermal performance evaluation of a solar air heater with and without thermal energy storage. An experimental study, J. of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 105, 2011.
- [7] Zawadzki M.: Kolektory słoneczne, Pompy ciepła - Na tak, Wyd. Zawadzki, Polska Ekologia, Warszawa 2003.