

KRZYSZTOF NEUPAUER, JANUSZ MAGIERA*

PRÓŻNIA W KOLEKTORZE SŁONECZNYM ZMNIEJSZA STRATY CIEPŁA NA DRODZE KONWEKCJI I PRZEWODZENIA

A VACUUM IN A SOLAR COLLECTOR REDUCING THE HEAT LOST FROM CONVECTION AND CONDUCTIVITY WAY

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono podział rurowych kolektorów słonecznych, sposób ich działania, a także najczęściej występujące rozwiązania techniczne. Przeprowadzono badania wielkości strat ciepła na drodze konwekcji w identycznym elemencie kolektora z próżnią i bez próżni. Oceniono, że średnia wartość strumienia dla traconego ciepła badanego okresu wynosi odpowiednio 113,25 kJ dla rury z próżnią i 391,35 kJ dla rury bez próżni.

Słowa kluczowe: kolektory słoneczne, sprawności kolektorów, kolektory próżniowe

Abstract

In this article, the various types of solar vacuum collectors, the way of their working and the most popular their technical solution have been described. Studied the loss of heat by convection in an identical item from the manifold vacuum and without vacuum. It has been estimated that the average value of the lost heat flux for the period considered is adequately 113,25 kJ for the vacuum tubes and 391,35 kJ for a tube without a vacuum.

Keywords: solar collectors, efficiency of solar collectors

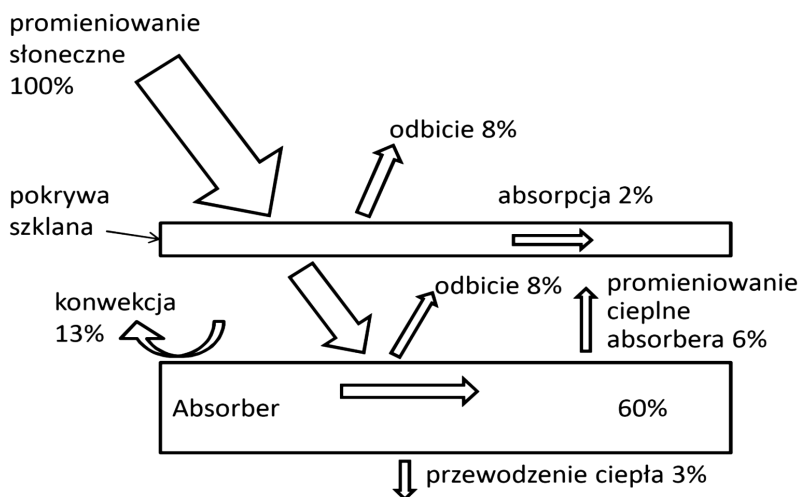
* Mgr inż. Krzysztof Neupauer, prof. dr hab. inż. Janusz Magiera, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Odnawialne źródła energii charakteryzują się tym, że w okresie ich eksploatacji wytwarzanie energii nie jest związane z emisją do atmosfery szkodliwych zanieczyszczeń gazowych, takich jak: CO_2 , SO_2 , NO_x , pyły czy niespalone węglowodory. Dla prawie wszystkich rodzajów energii odnawialnych ich prazródłem jest słońce, praktycznie niewyczerpywalny rezerwuuar energii dla kuli ziemskiej. Szacuje się, że rocznie dociera do Ziemi ze Słońca ponad 10 tysięcy razy więcej energii [1], niż wytwarzają wszystkie systemy wytwarzające energię zainstalowane na kuli ziemskiej. Jedną z form pozyskiwania energii bezpośrednio ze słońca jest konwersja energii słonecznej do energii cieplnej. Konwersja ta realizowana jest przy użyciu urządzeń, które nazywa się kolektorami słonecznymi (ang. *sollar collectors*).

Jednym z rozwiązań technicznych dla takiej konwersji są kolektory cieczowe, gdzie czynnikiem pośredniczącym w odbiorze energii słonecznej i jej przekazywaniu jest ciecz, nazywana płynem solarnym, będąca w warunkach klimatycznych Polski mieszaniną wody i glikolu propylenowego. Aktualnie dostępne są na rynku dwa podstawowe typy cieczowych kolektorów słonecznych: kolektory płaskie i kolektory rurowe-próżniowe.

Wielkości strumienia energii padającego na klasyczny kolektor płaski z przesłoną szklaną oraz strumienie tracone pokazano na rys. 1 [2].



Rys. 1. Orientacyjny bilans energii w obszarze kolektora płaskiego

Fig. 1. Reference balance of energy in the solar flat plate collector area

„Próżnia” wytwarzana w przestrzeni pomiędzy ściankami rury szklanej w kolektorze rurowym-próżniowym ma minimalizować straty ciepła od zabudowy wewnętrznej kolektora na drodze konwekcji na zewnątrz.

Kolektory rurowe-próżniowe, aczkolwiek droższe od kolektorów płaskich wykazują się wyższą sprawnością i dają większe uzyski energii cieplnej w pozostałych porach roku, [3] poza sezonem letnim.

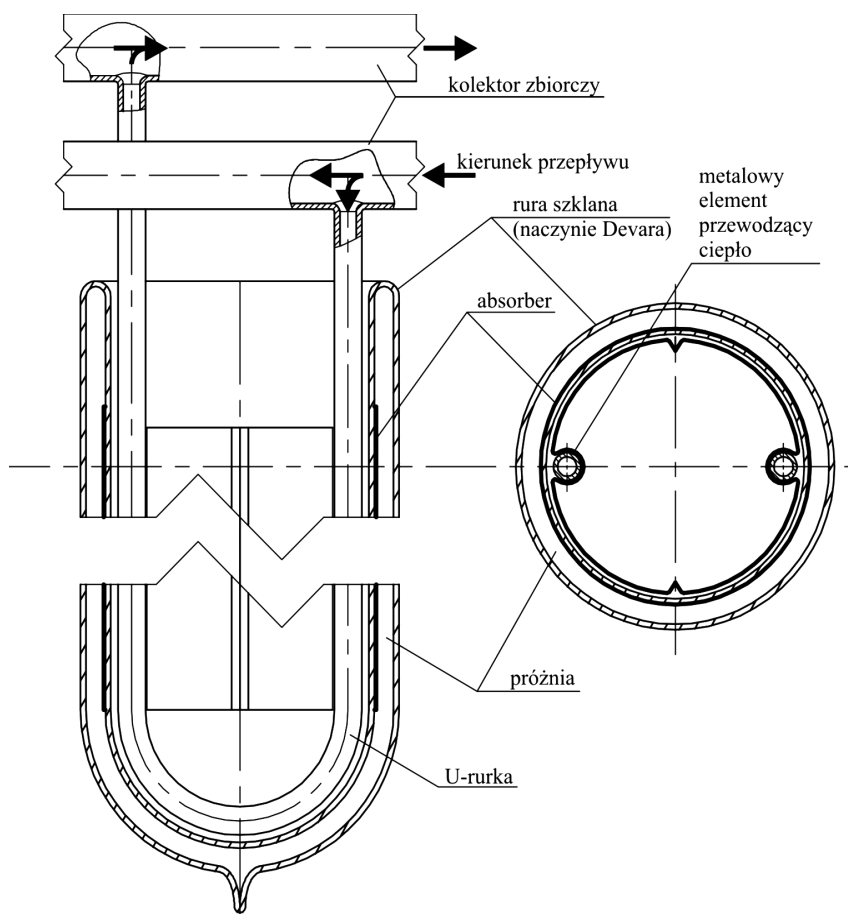
Wśród aktualnie dostępnych na rynku cieczowych kolektorów rurowych-próżniowych wyróżnia się trzy ich zasadnicze typy:

- 1) kolektor z wymiennikiem w formie U-rurki (ang. *U-pipe*),
- 2) kolektor z rurką ciepła (ang. *heat pipe*),
- 3) kolektor przepływowy (ang. *direct flow*).

Wyróżnione typy kolektorów pokazane i opisane zostały na rys. 2, 3, 4.

1.1. Kolektor z wymiennikiem w formie U-rurki

Kolektory rurowe-próżniowe z U-rurką (rys. 2) zbudowane są z przezroczystej, szklanej rury próżniowej o podwójnej ścianie. Najczęściej występująca średnica zewnętrzna rur próżniowych to 58 mm, a grubość ścianki szklanej około 1,8 mm. Absorber pochłaniający energię promieniowania słonecznego napylony jest na zewnętrznej ścianie rury wewnętrznej, w przestrzeni, gdzie znajduje się „próżnia”, jako idealna warstwa izolacyjna. Wielkość próżni pomiędzy ściankami rury szklanej szacuje się na $< 5 \cdot 10^{-3}$ Pa [4]. Cienka wygięta blacha tworząca tzw. absorber, pośredniczy w przewodzeniu energii cieplnej do cieczy płynącej wewnątrz U-rurki.

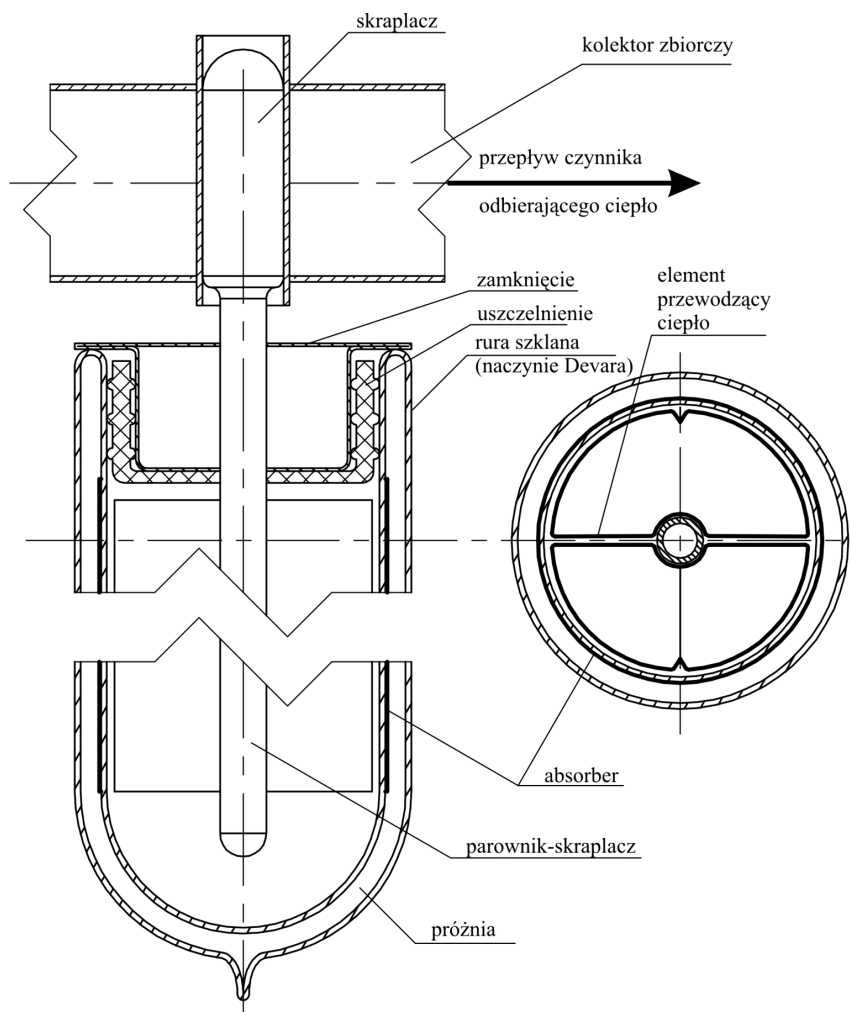


Rys. 2. Budowa i przekrój kolektora z U-rurką

Fig. 2. The geometry of U-pipe solar collectors

1.2. Kolektor z rurką ciepła (ang. *heat pipe*)

Podobnie jak kolektory rurowe-próżniowe z U-rurką, kolektory z rurką ciepła zbudowane są ze szklanej rury próżniowej pokrytej absorberem wewnątrz i metalowego elementu dobrze przewodzącego ciepło. Ogrzewanie czynnika roboczego następuje przez zamkniętą pojedynczą rurę, działającą na zasadzie kondensatora (rys. 3), wewnątrz której przepływa łatwo odparowująca ciecz. Promieniowanie słoneczne powoduje parowanie cieczy. Para przechodzi konwekcyjnie do góry, kondensatora, umiejscowionego w kanale zbiorczym będącym wymiennikiem ciepła. Poprzez kondensator, ciepło oddawane jest do kanału zbiorczego kolektora. W kondensatorze para zamieniana jest w ciecz, oddając energię cieplną, i spływa w dół do ponownego nagrzewania.

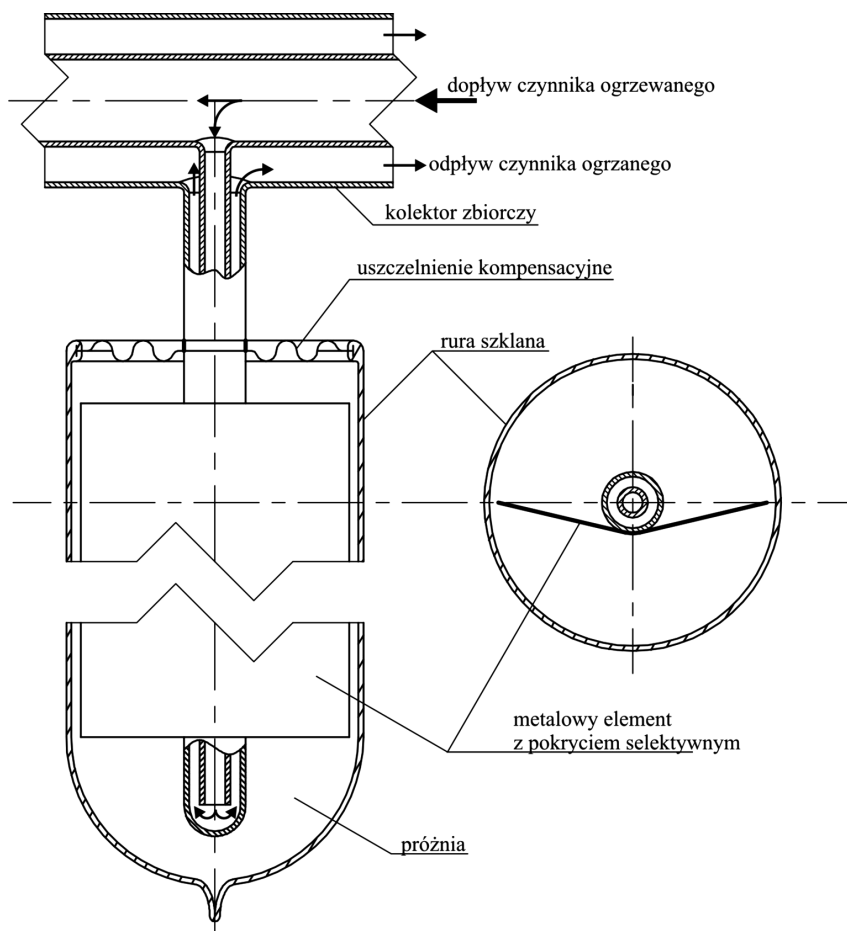


Rys. 3. Kolektor z rurką ciepła

Fig. 3. Heat pipe solar collector

1.3. Kolektor przepływowy

Kolektor przepływowy (ang. *direct flow*) zbudowany jest z jednej rury szklanej z próżnią, przezroczystej dla promieniowania słonecznego. Wewnątrz rury znajduje się podłużny pasek metalowy pokryty warstwą absorbera i przytwierdzony do wymiennika ciepła (rys. 4). Wymiennik ciepła składa się z dwóch rurek ułożonych współśrodkowo. Czynnik roboczy dopływa do kolektora wewnętrzną rurką, a opuszcza go przestrzenią międzyrurkową, odbierając przy tym energię cieplną od absorbera.



Rys. 4. Kolektor z przepływem bezpośrednim

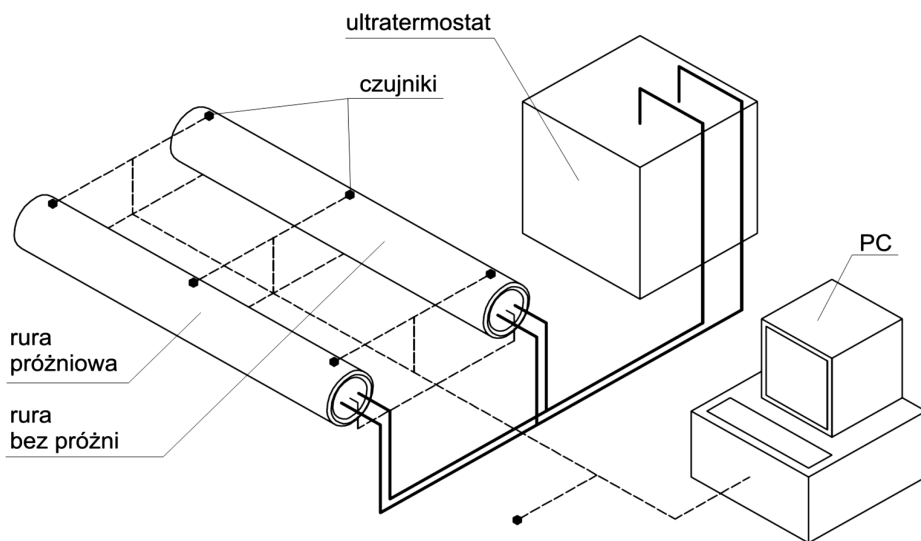
Fig. 4. Direct flow solar collector

2. Opis stanowiska badawczego i sposobu prowadzenia badań

Przez stosowanie kolektorów rurowych można ograniczyć straty ciepła do otoczenia ze strumienia energii słonecznej głównie przez konwekcję, a także na drodze przewodzenia.

Zadanie, które sobie postawiono w pracy, to próba określenia, w jakim stopniu „próżnia” w kolektorach rurowych-próżniowych ogranicza straty ciepła do otoczenia powodowane konwekcją. W normalnych warunkach pracy kolektora wewnątrz rury próżniowej znajduje się powietrze. Ze względu na uwarunkowania laboratoryjne na tym etapie badań, wewnątrz badanych rur wypełnione było wodą, która oddawała ciepło do otoczenia.

Stanowisko badawcze (rys. 6) składało się z dwóch rur próżniowych wypełnionych cieczą roboczą (wodą), ultra termostatu (Typ U 15 C) służącego do podgrzewania czynnika roboczego, instalacji hydraulicznej i układu do pomiaru oraz archiwizacji temperatur. Do pomiarów temperatury wykorzystano mikroprocesorowe czujniki temperatury DS18B20 [5], które przymocowano w wybranych punktach pomiarowych za pomocą kleju termoprzewodzącego. Zastosowane termometry pozwalają na pomiary temperatur od -55 do $+125^{\circ}\text{C}$, z dokładnością do $0,5^{\circ}\text{C}$ w zakresie od -10 do $+85^{\circ}\text{C}$. Termometry połączono za pomocą magistrali 1-Wire z komputerem PC, (rys. 7). Do odczytu i archiwizacji wyników pomiarów użyto programu Lämpömittari [6] 1.16.9.112. Unikalny 64-bitowy adres każdego z czujników umożliwia podłączenie równoległe wielu czujników do dwu lub trójprzewodowej magistrali 1-Wire.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 5. Schematic diagram of the laboratory stand

Aby zwiększyć dokładność pomiarową czujników, przeprowadzono ich kalibrację. Kalibracji dokonano w komorze zapewniającej stałą temperaturę kontrolowaną za pomocą termometru wzorcowanego w Okręgowym Urzędzie Miar. Po kalibracji temperatura określana jest [7] wzorem

$$T_{\text{COMP}} = T_{\text{TS}} - \text{Error} = T_{\text{TS}} - [\text{OFFSET} + \alpha \cdot (T_{\text{TS}} - T_{\text{ZERO_SLOPE}})^2] \quad (5)$$

gdzie:

- T_{TS} – temperatura czujnika,
- α – współczynnik korekcji krzywej,

$T_{\text{ZERO_SLOPE}}$ – temperatura wierzchołka krzywej,
 OFFSET – błąd w punkcie $T_{\text{ZERO_SLOPE}}$

Przeprowadzenie kalibracji umożliwiło uzyskanie dokładności pomiaru temperatury $0,1^{\circ}\text{C}$ w zakresie $+25$ do 60°C .

Po zamontowaniu czujników pomiarowych i przeprowadzeniu wstępnej konfiguracji systemu pomiarowego nadano termometrom nazwy odpowiadające ich miejscom na stanowisku badawczym.

Ilość traconej energii (1) w stanie nieustalonym wyznaczano w określonych przedziałach czasowych (tab. 1). Otrzymane wyniki wykorzystano do obliczenia średniego współczynnika przewodzenia ciepła U [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$], według wzoru (2).

$$\Delta Q = \Delta T_L \cdot c_{wL} \cdot m \quad [\text{J}] \quad (1)$$

gdzie:

T_L – temperatura cieczy ochładzanej [K],
 T_o – temperatura otaczającego powietrza wynosiła $289,15 \pm 0,1$ [K],
 ΔQ – ilość ciepła stracona w przyjętym przedziale czasu [J],
 ΔT_L – różnica temperatur ochładzanej wody w badanych przedziałach czasu [K],
 c_{wL} – ciepło właściwe wody [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$], do obliczeń przyjęto $c_{wL} = 4191$ [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$], (różnica wartości gęstości w granicach temperatur od 20 do 60°C wynosi tylko $0,29\%$),
 m – masa wody [kg]

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T \cdot \Delta t} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \quad (2)$$

gdzie:

U – wsp. przenikania ciepła [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$],
 ΔT – różnica temperatur cieczy ochładzanej i powietrza zewnętrznego [K],
 Δt – przedział czasu [s],
 A – powierzchnia [m^2]

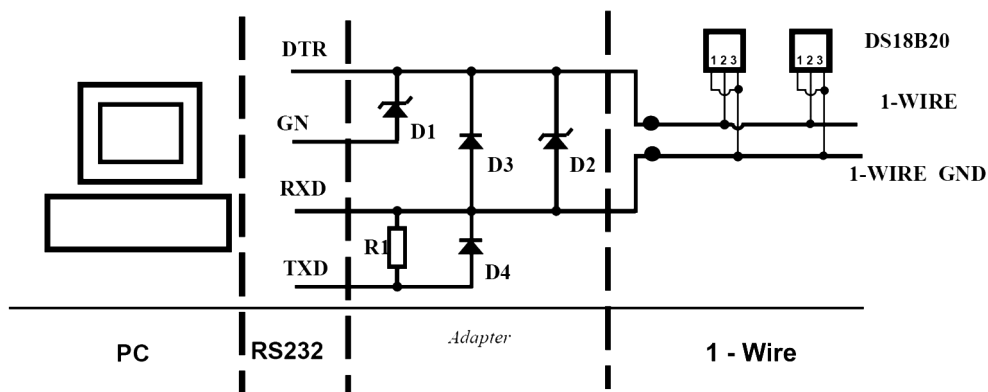
$$A = d_m \cdot \pi \cdot l \quad (3)$$

$$d_m = \frac{d_z - d_w}{\ln \frac{d_z}{d_w}} \quad (4)$$

gdzie:

d_m – średnia średnica rury szklanej [m],
 d_z – średnica zewnętrzna rury szklanej [m],
 d_w – średnica wewnętrzna rury szklanej [m],
 l – długość rury [m].

Badania przeprowadzano w ten sposób, że włączano system pomiarowy i nagrzewano medium-wodę do założonej temperatury. Po uzyskaniu odpowiedniej takiej samej temperatury w obydwu rurach, odłączano ultratermostat, po czym rejestrowano zmiany temperatur dla rury z próżnią i rury bez próżni. Mierzono także temperaturę otoczenia jako temperaturę odniesienia. Wyniki pomiarów archiwizowano w postaci plików tekstowych.



Rys. 6. Schemat podłączenia termometrów DS18B20 do komputera[8]

Fig. 6. Diagram of connecting DS18B20 thermometers to a PC

3. Otrzymane wyniki i ich analiza

Tabela 1

Ilość energii traconej na zewnątrz rury

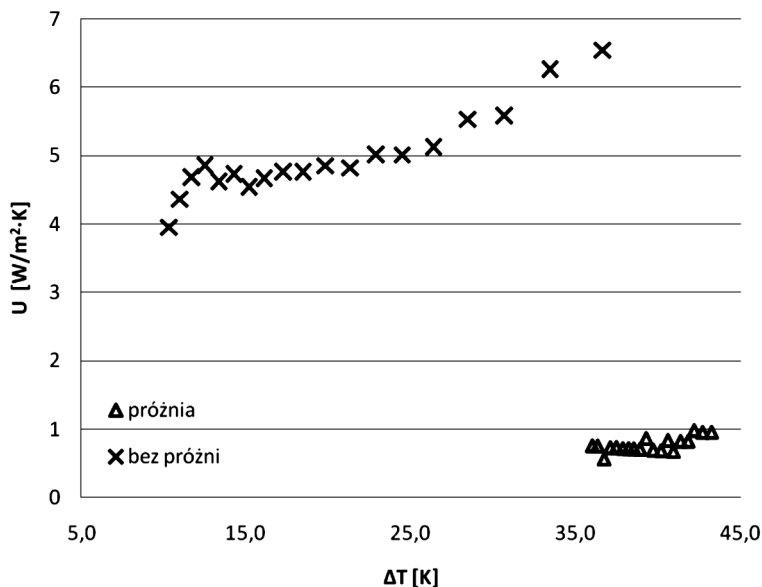
Lp.			Próżnia					Bez próżni			
	t [s]	Δt [s]	T_L [K]	ΔT [K]	ΔQ [J]	U [W/m ² ·K]		T_L [K]	ΔT [K]	ΔQ [J]	U [W/m ² ·K]
1	604	604	332,0	44,0	13 456	1,844		328,1	40,9	57 189	8,442
2	1201	597	331,4	43,3	6 728	0,950		324,6	36,6	39 247	6,542
3	1806	605	330,8	42,7	6 728	0,949		321,5	33,4	34 762	6,263
4	2402	596	330,2	42,2	6 728	0,975		319,0	30,7	28 034	5,587
5	2999	597	329,7	41,8	5 607	0,818		316,7	28,5	25 791	5,533
6	3603	604	329,2	41,4	5 607	0,818		314,7	26,4	22 427	5,131
7	4200	597	328,8	40,9	4 485	0,669		312,9	24,5	20 184	5,011
8	4805	605	328,3	40,6	5 607	0,832		311,2	22,9	19 063	5,018
9	5402	597	327,9	40,2	4 485	0,682		309,7	21,3	16 820	4,820
10	5998	596	327,5	39,7	4 485	0,691		308,3	19,8	15 698	4,848
11	6603	605	327,0	39,3	5 607	0,860		307,0	18,4	14 577	4,761
12	7200	597	326,6	38,9	4 485	0,704		305,8	17,2	13 456	4,764
13	7797	597	326,2	38,5	4 485	0,711		304,7	16,1	12 335	4,673
14	8396	599	325,8	38,2	4 485	0,714		303,8	15,2	10 092	4,042
15	9001	605	325,4	37,8	4 485	0,714		302,8	14,3	11 214	4,733
16	9598	597	325,0	37,5	4 485	0,731		301,9	13,3	10 092	4,618
17	10 204	606	324,6	37,1	4 485	0,727		301,0	12,5	10 092	4,859
18	10 801	597	324,3	36,7	3 364	0,559		300,2	11,7	8 971	4,684
19	11 398	599	323,9	36,3	4 485	0,751		299,5	10,9	7 849	4,365
20	12 004	603	323,5	36,0	4 485	0,753		298,9	10,3	6 728	3,951
21	12 601	597	323,1	35,6	4 485	0,768		298,3	9,7	6 728	4,247
				suma	113 252				suma	391 349	

Średnia wartość wsp. U dla rury:

- z próżnią wynosi 0,820 [W/m²·K]
- bez próżni wynosi 5,090 [W/m²·K]

Średnia wartość ΔT wynosi:

- dla rury z próżnią 312,7 [K]
- dla rury bez próżni 275,2 [K]



Rys. 7. Wykres współczynnika przenikania ciepła w funkcji różnicy temperatur

Fig. 7. Graph of the heat transfer coefficient as a function of temperature difference

W badanym przypadku, przy początkowej temperaturze medium oddającego ciepło $t = 60^{\circ}\text{C}$ i czasie 3,5 h, całkowita ilość energii utraconej przez kolektor wynosiła 113,25 kJ dla rury próżniowej i 391,35 kJ dla rury bez próżni.

Średnie globalne współczynniki przenikania ciepła wynosiły odpowiednio $U = 0,820$ W/m²·K dla rury z próżnią i $U = 5,090$ W/m²·K dla rury bez próżni. Producenci dostępnych na rynku rur próżniowych podają różne wartości współczynnika przenikania ciepła od 0,749 W/m²·K [9] do 1,4 W/m²·K [10]. Dla porównania, współczynnik przenikania ciepła kolektora płaskiego wynosi około 4,5 W/m²·K. Uzyskane wyniki badań są porównywalne z wartościami w notach katalogowych.

4. Wnioski

Ogólnie wiadomo jest, że kolektor słoneczny ma największą sprawność przy możliwie najniższej temperaturze jego pracy w stosunku do temperatury otoczenia. Niska temperatura pracy kolektora powoduje niską temperaturę czynnika solarnego, co ma konsekwencje dla warunków oddawania energii cieplnej z kolektora do odbiornika. Wraz ze wzrostem tempe-

ratury pracy rosną straty ciepła. Stosowanie próżni jako warstwy izolacyjnej w kolektorach słonecznych prawie 3,5-krotnie zmniejsza straty ciepła do otoczenia na drodze konwekcji. Daje to możliwość efektywnego wykorzystywania kolektorów słonecznych do produkcji ciepła w okresie późnojesiennym zimowym i wczesnowiosennym, podczas gdy zwykle kolektory (płaskie) nie pracują lub pracują z niską wydajnością.

Literatura

- [1] Quasschnig V., *Regenerative Energiesysteme*, Carl Hanser Verlag München, Wien 1998.
- [2] Neupauer K., Magiera J., *Analiza sprawności kolektorów słonecznych różnych typów*, Czasopismo Techniczne, z. 1-Ch/2009, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2009.
- [3] Sunny Life Technologies, broszura informacyjna, www.sunnylifetechnologies.com (strona dostępna w dniu 13.04.2010).
- [4] Heliosin MM Solar Sp. z o.o., nota katalogowa, www.heliosin.pl (strona dostępna w dniu 01.04.2010).
- [5] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Data Sheets. DALLAS-MAXIM [dostęp 11.07.2006], http://www.maxim-ic.com/quick_view2.cfm/qv_pk/2813.
- [6] Lämpömittari, komputerowy rejestrator temperatury, www.elektroniikka.org/thermometer (strona dostępna w dniu 29.03.2010).
- [7] Curve Fitting the Error of a Bandgap – Based Digital Temperature Sensor. Application Note 208. DALLAS-MAXIM. <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/208>. [dostęp w dniu 22.03.2010].
- [8] Borowski S., Dulcet E., *Pomiar temperatur wilgotnego siana za pomocą mikroprocesorowych czujników 1-Wire*, Inżynieria Rolnicza, nr 2 (90), 2007, s. 23-27.
- [9] Paradigma Deutschland GmbH, Technische Daten, www.paradigma.de/de/Solaranlagen (strona dostępna w dniu 13.04.2010).
- [10] Hewalex – producent kolektorów słonecznych, nota katalogowa, <http://hewalex.pl> (strona dostępna w dniu 01.04.2010).