

WPŁYW WARUNKÓW SOLARNYCH NA EFEKT PRACY PRÓŻNIOWEGO I PŁASKIEGO KOLEKTORA SŁONECZNEGO

Hubert Latała

Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wpływ warunków solarnych na efekt konwersji promieniowania słonecznego w próżniowym i płaskim kolektorze słonecznym. Odmienna zasada pracy badanych kolektorów była podstawą do sprawdzenia jak ich wydajność cieplna zależy od warunków słonecznych, które były analizowane na przestrzeni 6 miesięcy. W zakresie przeprowadzonego eksperymentu zanotowano silny związek między warunkami solarnymi i ciepłem użytecznym otrzymanym z kolektorów. Porównanie pracy kolektorów w różnych warunkach klimatycznych przez okres 6 miesięcy wykazało przewagę kolektora próżniowego pod względem ilości ciepła użytecznego otrzymanego z konwersji promieniowania słonecznego. Szczególnie jest to zauważalne w okresach o mniejszym natężeniu promieniowania słonecznego.

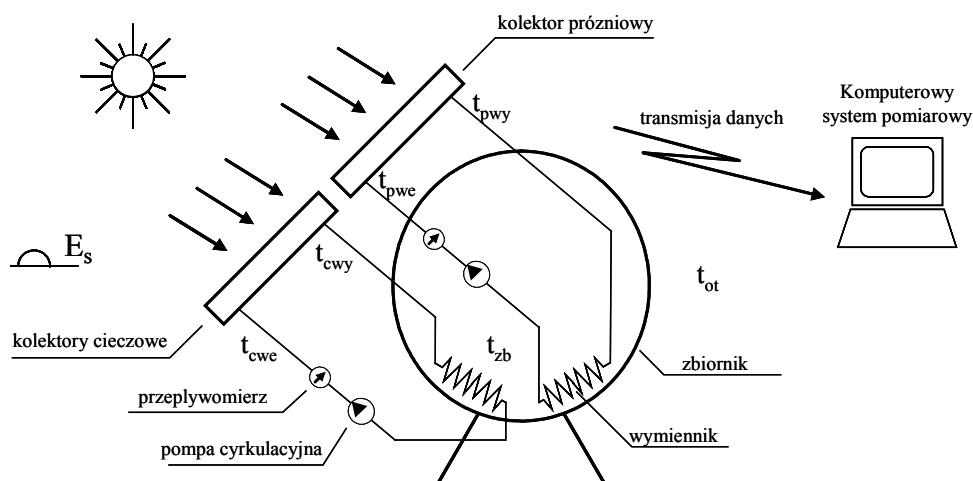
Słowa kluczowe: próżniowy kolektor słoneczny, płaski kolektor słoneczny, sprawność

Wstęp

Odmienny charakter konwersji promieniowania słonecznego w płaskim i próżniowym kolektorze słonecznym nasuwa przypuszczenie, że ilość uzyskanego ciepła powinna się różnić. Korzystniejsze w tym względzie są kolektory próżniowe, których lepsze efekty w pozyskiwaniu ciepła użytecznego można uzyskać dzięki próżni i medium zmieniającemu stan skupienia [Cui 2006, Kim 2007]. Wykorzystanie tej zaawansowanej technologii pozwala na odseparowanie absorbera od warunków otoczenia (próżnia) i zintensyfikowanie odbioru ciepła przez medium, które zmienia stan skupienia z cieczy w parę a znajduje się w tzw. „gorącej rurce”. Ponadto absorber znajdujący się w szklanej rurce wrażliwy jest na promieniowanie rozproszone z różnych kierunków [Shah 2004]. Bezsprzecznie zatem wydaje się, że kolektor próżniowy jest lepszym wymiennikiem ciepła w porównaniu z płaskim kolektorem. Jednak wyniki badań wstępnych wykonanych przez autora tej pracy pokazały, że nie jest to jednoznaczne jeśli chodzi o warunki intensywnego promieniowania słonecznego jakie występuje w miesiącach letnich. Podjęto zatem próbę oszacowania ciepła użytecznego uzyskanego z kolektora próżniowego i płaskiego oraz określenia sprawności tych wymienników pracujących w różnych warunkach solarnych.

Materiał i metoda

Badania doświadczalne przeprowadzono w obiekcie zlokalizowanym na terenie Wydziału Agrotechnologii Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. System konwersji promieniowania słonecznego stanowiły dwa niezależnie pracujące układy kolektorów słonecznych. Pierwszy składał się z kolektora próżniowego (30 rur próżniowych) o powierzchni całkowitej $4,3 \text{ m}^2$. Wewnątrz każdej szklanej rury zainstalowana była „gorąca rurka”. Znajdujące się wewnątrz medium cyklicznie zmieniało stan z ciekłego na parowy – pobierając ciepło z absorbera. Następnie skraplające się pary przekazywały ciepło do glikolu krążącego w układzie kolektor-akumulator wodny. Drugi układ to zespół 4 połączonych szeregowo płaskich kolektorów cieczowych, których powierzchnia całkowita wynosiła $8,0 \text{ m}^2$. Ciepło z kolektorów przekazywane było do akumulatora wodnego przez wymienniki wykonane z rurek miedzianych w kształcie węzownic (rys. 1.). W układzie kolektorów znajdował się płyn niezamarzający – glikol. Badania wykonano w okresie od czerwca do grudnia 2007 roku.



Rys. 1. Schemat ideowy systemu konwersji promieniowania słonecznego

Fig. 1. Schematic diagram of the solar radiation conversion system

Komputerowy System Pomiarowy umożliwiał monitoring (w przedziałach 30 sekundowych) parametrów charakteryzujących pracę kolektorów słonecznych, klimatu na zewnątrz doświadczalnego obiektu (temperatura powietrza, natężenie promieniowania słonecznego oraz prędkość wiatru). Ponadto System Pomiarowy sterował pracą pomp obiegowych w kolektorach słonecznych w zależności od zadanej różnicy temperatury glikolu na wyjściu z kolektorów i wody w zbiorniku akumulacyjnym.

Realizację postawionego celu wykonano dwuetapowo. Pierwszy polegał na zebraniu pomiarów następujących parametrów: natężenia promieniowania słonecznego (E_s), temperatury otoczenia (t_{ot}), prędkości wiatru (v_w), temperatury czynnika grzewczego na wejściu (t_{we}) i wyjściu (t_{wy}) z kolektora, ilości czynnika grzewczego przepływającego przez kolektor (m_g). Parametry związane z medium przepływającym przez kolektory (próżniowy i cieczowy niezależnie) były mierzone i rejestrowane w przedziałach 30 sekundowych przez komputerowy system pomiarowy. Drugi etap obejmował obliczenia wielkości, na podstawie których dokonano porównania efektywności pracy kolektorów.

Na podstawie danych eksperymentalnych wyliczono dla różniczkowego czasu $d\tau$ (suma dla przedziałów pomiarowych) ciepło dostępne z promieniowania słonecznego (Q_s):

$$dQ_s = \sum_{i=1}^n E_s \cdot F_k \cdot d\tau \quad (1)$$

gdzie:

- E_s – natężenie promieniowania słonecznego [$W \cdot m^{-2}$],
- F_k – powierzchnia kolektora [m^2].

Następnie według poniższej zależności wyliczono ciepło użyteczne (Q_u) zarówno dla kolektorów próżniowego (Q_{up}) jak i płaskiego (Q_{uc}):

$$dQ_u = \sum_{i=1}^n m_g \cdot c_g (t_{wy} - t_{we}) \cdot d\tau \quad (2)$$

gdzie:

- m_g – jednostkowe natężenie przepływu czynnika grzewczego [$kg \cdot s^{-1}$],
- t_{wy} , t_{we} – temperatury czynnika grzewczego na wyjściu i wejściu z kolektora [K],
- c_g – ciepło właściwe glikolu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$].

Współczynnik sprawności konwersji promieniowania słonecznego (COP) w badanych kolektorach wyznaczono ze wzoru:

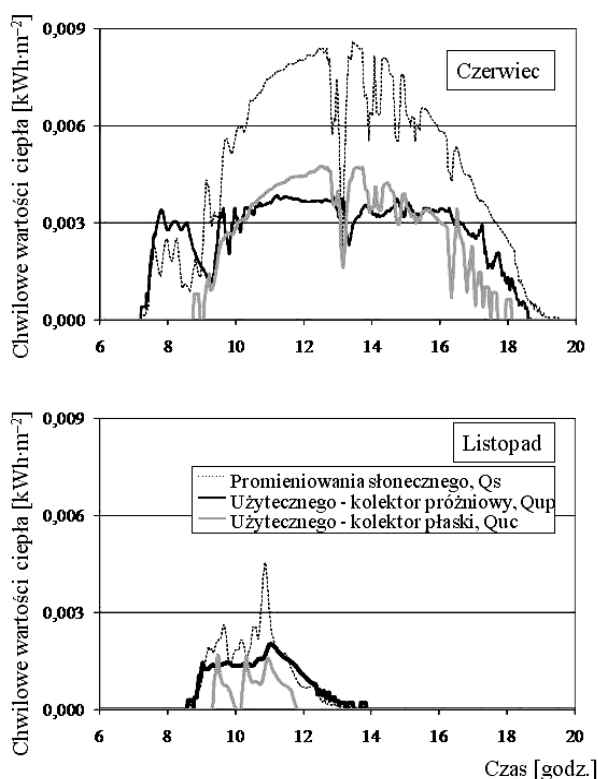
$$COP = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (3)$$

Obliczenia wykonano w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel 2003, natomiast analizę statystyczną przeprowadzono z użyciem programu Statistica v.8.

Wyniki

Dla zobrazowania zmienności warunków solarnych w okresie przeprowadzonego eksperymentu na rysunku 2 przedstawiono dynamikę zmian wartości ciepła dostępnego z promieniowania słonecznego w czasie pracy pompy cyrkulacyjnej dla wybranych dni w miesiącu czerwcu i listopadzie. Suma tego ciepła w miesiącu czerwcu była na poziomie $7,10 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$. Ilość ciepła dostępnego w listopadzie wyniosła jedynie $0,78 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$. Analizując wartości chwilowe ciepła użytecznego kolektora próżniowego i płaskiego widać, że dla wysokich wartości promieniowania słonecznego (czerwiec) kolektor płaski dostarcza

więcej ciepła. Natomiast w okresach o mniejszej intensywności promieniowania (rano i popołudniu) te role się odwracają i kolektor próżniowy jest bardziej efektywny. Dla przykładowego dnia w listopadzie jedynie kolektor próżniowy dostarcza więcej ciepła użytecznego. W tym miejscu należy zwrócić uwagę również na czas pracy kolektora próżniowego w cyklu dziennym, który w czasie eksperymentu osiągał ponad 11 godzin (czerwiec) i około 4 godzin w listopadzie. Dla kolektora płaskiego czasy te były krótsze i wyniosły odpowiednio około 7,5 i 2 godzin. Przytoczone powyżej dane pokazują skrajne wartości zmian dostępnego promieniowania słonecznego i odpowiedź dwóch typów kolektorów słonecznych pokazana w dynamice zmian ciepła użytecznego.

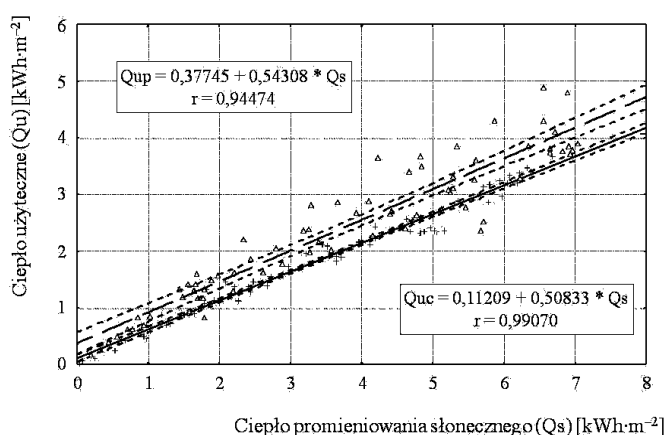


Rys. 2. Zmiany chwilowych wartości, ciepła dostępnego z promieniowania słonecznego (Q_s) oraz ciepła użytecznego kolektora próżniowego (Q_{up}) i płaskiego (Q_{uc}) przedstawione dla dwóch wybranych dni w miesiącu czerwcu i listopadzie

Fig. 2. Changes in instantaneous values of heat available from solar radiation (Q_s) and useful heat from vacuum tube collector (Q_{up}) and flat plate collector (Q_{uc}), shown for two chosen days in June and November

Rysunek 3 przedstawia zmiany konwersji dostępnego promieniowania słonecznego na ciepło użyteczne. Ilości ciepła użytecznego otrzymane z kolektora próżniowego osiągnęły

większe wartości w porównaniu do kolektora płaskiego. Wynika to przede wszystkim z faktu, że średnia wartość ciepła dostępna z promieniowania słonecznego, w zakresie prowadzonego eksperymentu, dla kolektora próżniowego była na poziomie $3,8 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, a dla płaskiego $3,2 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Najmniejsza wartość ciepła z promieniowania słonecznego podczas pracy kolektora próżniowego osiągnęła wartość $0,2 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, a największa $7,1 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Analogicznie skrajne warunki dla płaskich kolektorów słonecznych wynosiły odpowiednio $0,03 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ i $6,6 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Powyższe różnice w wartościach ciepła dostępnego z promieniowania słonecznego wynikają między innymi z krótszego czasu pracy kolektora płaskiego w porównaniu z kolektorem próżniowym.



Rys. 3. Ciepło użyteczne ciepła użytecznego kolektora próżniowego (Q_{up}) i płaskiego (Q_{uc}) w funkcji dostępnego ciepła z promieniowania słonecznego

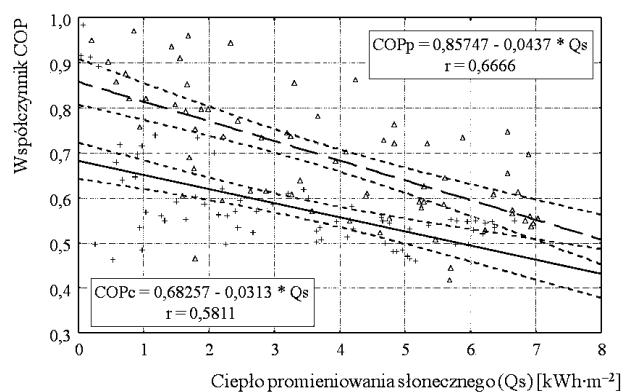
Fig. 3. Useful heat from vacuum tube collector (Q_{up}) and flat plate collector (Q_{uc}) in function of available heat from solar radiation

Na podstawie zebranych danych z kolejnych 6 miesięcy obliczono średnią dzienną wartość ciepła użytkowego dla kolektora próżniowego, która wyniosła $2,43 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Natomiast dla kolektora płaskiego wartość tego ciepła osiągnęła niższą wartość wynoszącą $1,75 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Oznacza to, że używając kolektora próżniowego otrzymamy średnio około 28% więcej ciepła użytkowego niż z kolektora płaskiego (rys.5.).

W celu sprawdzenia istotności różnicy między średnimi wartościami jednostkowymi ciepła użytkowego kolektorów próżniowego i płaskiego zastosowano test t dla zmiennych zależnych. Wyliczona różnica między średnimi wyniosła $0,67 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, poziom istotności $p=0,000000$. Oznacza to, że jednostkowe wartości ciepła użytkowego otrzymywane z porównywanych kolektorów różnią się istotnie w zakresie prowadzonego eksperymentu.

Przedstawiona na rysunku 4 zależność współczynnika COP dla badanych typów kolektorów w funkcji dostępnego ciepła promieniowania słonecznego obniża się wraz ze wzrostem ilości tego ciepła. Spadek sprawności pracy kolektora próżniowego wynika najprawdopodobniej z faktu, że wydajność przemiany fazowej w „gorącej rurce” obniża się wraz ze wzrostem temperatury glikolu odbierającego ciepło. Z kolei spadek sprawności

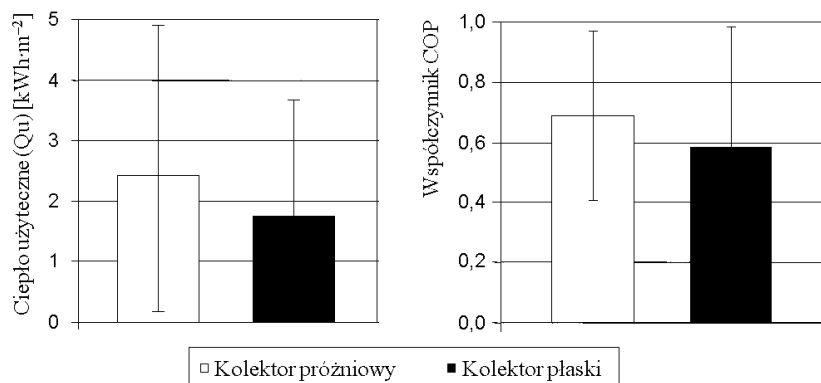
w kolektorze płaskim związany jest większymi stratami przez promieniowanie ze względu na wyższą temperaturę absorbera [Latała 2006].



Rys. 4. Współczynnik COP dla kolektora próżniowego (COPp) i płaskiego (COPc) w funkcji ciepła promieniowania słonecznego

Fig. 4. COP coefficient for vacuum tube collector (COPp) and flat plate collector (COPc) in function of solar radiation heat

W zakresie prowadzonego eksperymentu obniżenie współczynnika COP dla kolektora próżniowego wyniosło 36%, natomiast dla kolektora płaskiego 32%. Porównując z kolei różnicę między średnimi wartościami współczynników COP wykazano, że była ona istotna na poziomie $p = 0,000000$ (rys. 5.).



Rys. 5. Średnie wartości ciepła użytecznego i współczynnika COP dla kolektora próżniowego i płaskiego

Fig. 5. Average values of useful heat and COP coefficient for vacuum tube and flat plate collector

Porównując efekt pracy kolektorów wykazano, że w badanym okresie lepszy pod względem uzysku ciepła okazał się próżniowy kolektor. Ilość ciepła użytecznego z tego wymiennika była średnio o 28% wyższa w porównaniu do płaskiego kolektora. Pod względem sprawności konwersji promieniowania słonecznego również kolektor próżniowy okazał się lepszy. Jego średni współczynnik COP był o 16% większy w porównaniu do kolektora płaskiego.

Wnioski

1. W zakresie przeprowadzonego eksperymentu zanotowano silny związek między warunkami solarnymi i ciepłem użytecznym otrzymanym z kolektorów. Współczynnik korelacji dla kolektora płaskiego wyniósł 0,99, a dla próżniowego 0,94.
2. Porównanie pracy kolektorów w różnych warunkach klimatycznych przez okres 6 miesięcy wykazało przewagę kolektora próżniowego. Szczególnie jest to zauważalne w okresach o mniejszym natężeniu promieniowania słonecznego.
3. Średnia dzienna wartość ciepła użytkowego uzyskanego w wyniku przeprowadzonego doświadczenia wyniosła dla kolektora próżniowego 2,43 kWh·m⁻², natomiast dla kolektora płaskiego 1,75 kWh·m⁻².
4. Wraz ze wzrostem ciepła dostępnego z promieniowania słonecznego malała wartość współczynnika COP zarówno dla kolektorów próżniowych jak i płaskich. Średnia wartość tego współczynnika dla kolektora próżniowego wynosiła 36%, natomiast dla kolektora płaskiego 32%.

Praca naukowa finansowana ze stypendium J.M. Rektora UR w Krakowie

Bibliografia

- Cui H., Wang Z., Guo Y., Xu W., Yuan X.** 2006. Thermal performance analysis on unit tube for heat pipe receiver. *Solar Energy*. 80. s. 875-882.
- Kim Y., Seo T.** 2007. Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube. *Renewable Energy*. 32. s. 772-795.
- Latała H.** 2006. Straty ciepła w kolektorze cieczowym w funkcji temperatury otoczenia. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 11(86). s. 291-297.
- Shah L.J., Furbo S.** 2004. Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions. *Applied Energy*. 78. s. 371-395.

THE IMPACT OF SOLAR CONDITIONS ON THE EFFECT OF WORK OF VACUUM TUBE AND FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR

Abstract. The paper presents the impact of solar conditions on the effect of solar radiation conversion in vacuum tube and flat plate solar collector. Different principle of operation of the examined collectors provided the basis for checking how their calorific effect depended on solar conditions, analysed through 6 months. Strong relation between solar conditions and useful heat obtained from collectors was observed in the scope of completed experiment. Comparison of collectors operation in various climatic conditions for 6 months proved supremacy of vacuum tube collector as regards the volume of useful heat obtained through solar radiation conversion. In particular it is noticeable in periods of lower solar radiation intensity.

Key words: vacuum tube solar collector, flat plate solar collector, efficiency

Adres do korespondencji:

Hubert Latała; e-mail: rtlatala@cyf-kr.edu.pl
Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków