

Hubert Latała
Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Akademia Rolnicza w Krakowie

SPRAWNOŚĆ KOLEKTORA CIECZOWEGO W FUNKCJI KĄTA PADANIA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

Streszczenie

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań dotyczące określenia sprawności kolektora słonecznego w funkcji kąta padania promieniowania słonecznego. Badania eksperymentalne wykonano na specjalnie przygotowanym stanowisku, które umożliwiło monitorowanie istotnych parametrów oraz ich archiwizację. Analizowano zarówno wartość dostępnego strumienia promieniowania słonecznego jak i temperatury czynnika grzewczego na wejściu i wyjściu układu kolektorów oraz temperaturę otoczenia. Ciepło użyteczne z kolektorów wyznaczono z równania Hottela-Whilliera-Bilissa, które uwzględnia wpływ cech konstrukcyjnych kolektora i warunków jego eksploatacji. Określona na podstawie pomiarów energia promieniowania słonecznego i obliczona ilość ciepła użytecznego była podstawą do wyznaczenia efektywności badanych kolektorów w zależności od kąta padania promieniowania słonecznego.

Słowa kluczowe: kolektory słoneczne, energia słoneczna, ciepło użytkowe, kąt padania

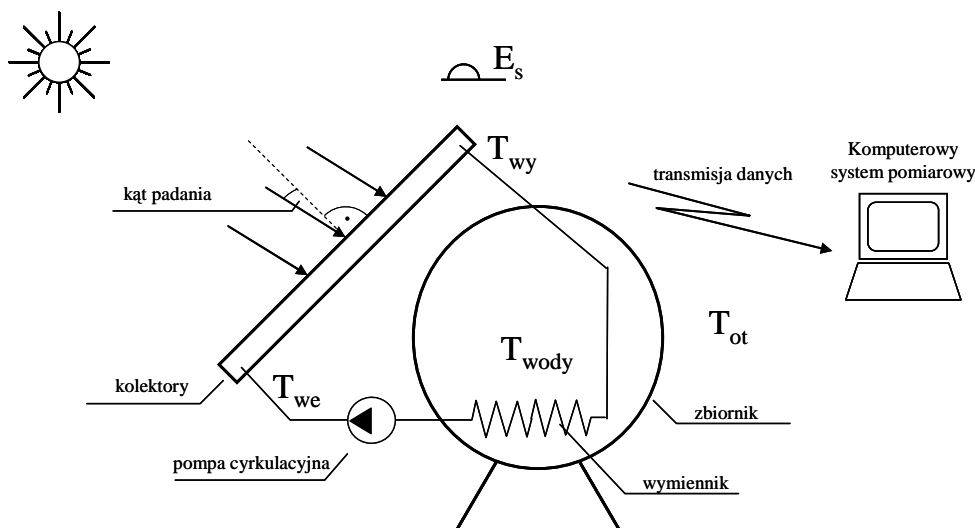
Wstęp

Ilość energii promieniowania słonecznego, która może być zamieniona na ciepło w płaskim kolektorze cieczowym, zależy nie tylko od rodzaju absorbera, ale również od jego osłony. Stanowi ją najczęściej szyba o grubości od 3 do 6,5 mm lub rzadziej tworzywa sztuczne [Mokrzycki 2005]. Promieniowanie słoneczne padając na powierzchnię kolektora, przechodzi z jednego ośrodka (powietrze) do drugiego (szkło) ulegając odbiciu na granicy tych ośrodków. Następnie ulega załamaniu i jest w części pochłaniane przez szkło. Ograniczenie natężenia promieniowania przez warstwę materiału przezroczystego zmienia się wraz z kątem padania. Osłabione w ten sposób promieniowanie ulega kolejnym odbiciom pomiędzy

absorberem i przezroczystym pokryciem. W efekcie ilość promieniowania pochłoniętego przez absorber jest mniejsza w porównaniu z promieniowaniem padającym na powierzchnię kolektora. Zadanie określenia ilościowego zysku ciepła dla promieniowania bezpośredniego jest w takim przypadku stosunkowo proste. Rozumowanie takie jednak nie ujmuje wpływu promieniowania rozproszonego i odbitego od otoczenia, w którym znajdują się kolektory słoneczne. Stąd w pracy podjęto próbę określenia wpływu kąta padania promieniowania słonecznego na sprawność konwersji promieniowania na ciepło. Realizację tak postawionego celu wykonano na podstawie porównania ilości ciepła dostępnego w kolektorach słonecznych w stosunku do całkowitej energii promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę kolektorów.

Opis obiektu badań

Badania doświadczalne przeprowadzono w obiekcie badawczym, zlokalizowanym na terenie Wydziału Agrotechnologii Akademii Rolniczej w Krakowie. System konwersji promieniowania słonecznego stanowiły 4 płaskie kolektory cieczowe skierowane płaszczyzną czynną na południe. Łączna powierzchnia absorbera konwertującego energię słoneczną wynosiła $7,1 \text{ m}^2$. Ciepło z kolektorów przekazywane było do wody zgromadzonej w zbiorniku przez wymiennik wykonany w kształcie węzownicy o powierzchni wymiany $1,38 \text{ m}^2$.



Rys. 1. Schemat ideowy systemu konwersji promieniowania słonecznego

Fig. 1. Schematic diagram of solar radiation conversion system

W układzie kolektory - wężownica znajdował się płyn niezamarzający glikol, za którego ruch odpowiadała pompa cyrkulacyjna. Zbiornik o pojemności 6 m³ wypełniony był 3000 litrów wody. Na rysunku 1 przedstawiono schemat systemu konwersji promieniowania słonecznego z zaznaczonymi parametrami, które były monitorowane, w trakcie przeprowadzanego eksperymentu, przez komputerowy system pomiarowy.

Metodyka badań

Do realizacji postawionego celu wykonano pomiary następujących parametrów: natężenia promieniowania słonecznego (E_s), temperatury otoczenia (T_{ot}), temperatury czynnika grzewczego na wejściu (T_{we}) i wyjściu (T_{wy}) z kolektora, ilości czynnika grzewczego przepływającego przez kolektory (q_c), temperatury wody w zbiorniku (T_{wody}). Pomiary, wyżej wymienionych wielkości, przeprowadzono w zmiennych warunkach solarnych w miesiącach czerwcu i październiku. Analogowe sygnały pomiarowe, z wymienionych powyżej punktów pomiarowych zamienione na sygnał cyfrowy, były archiwizowane w przedziałach 30 sekundowych. Z otrzymanych wyników wyliczono ilość ciepła dostępnego z promieniowania słonecznego, którą następnie porównano z ciepłem użytecznym z kolektorów słonecznych. Jako podstawę czasu trwania konwersji energii promieniowania słonecznego na ciepło użyteczne przyjęto okres, w którym pracowała pompa cyrkulacyjna. Sprawność systemu konwersji promieniowania słonecznego (η) obliczono według zależności (1):

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (1)$$

gdzie:

- Q_s – ciepło dostępne z promieniowania słonecznego, J
- Q_u – ciepło użyteczne z kolektora, J

Ciepło użyteczne z kolektorów (Q_u) wyznaczono z równania Hottela-Whilliera-Bilissa [Pluta 2000], które uwzględnia wpływ cech konstrukcyjnych kolektora i warunków jego eksploatacji.

$$Q_u = A_k \cdot F_R \cdot [S - U_L (T_{we} - T_{ot})] \quad (2)$$

gdzie:

- A_k – powierzchnia absorbera, m²
- F_R – współczynnik odprowadzenia ciepła z kolektora,
- S – energia promieniowania słonecznego pochłonięta przez absorber, W/m²
- U_L – zastępczy współczynnik strat ciepła kolektora, W/m² K
- T_{we} – temperatury czynnika grzewczego na wejściu do kolektora, °C
- T_{ot} – temperatura otoczenia, °C

Współczynnik odprowadzenia ciepła z kolektora określający stosunek aktualnie oddawanego ciepła użytecznego do ilości ciepła teoretycznie możliwej do uzyskania wyliczono z zależności (3) [Pluta 2000].

$$F_R = \frac{m_w \cdot c_w}{A_k \cdot U_L} \cdot \left(1 - \exp \frac{-A_k \cdot U_L \cdot F}{m_w \cdot c_w} \right) \quad (3)$$

gdzie:

- m_w – jednostkowe natężenie przepływu czynnika grzewczego, kg/s
- c_w – ciepło właściwe czynnika, J/kg K
- F – współczynnik efektywności absorbera, -

Współczynnik efektywności absorbera uzależniony jest od jego konstrukcji jak również od współczynnika strat cieplnych kolektora.

Energia promieniowania słonecznego pochłonięta przez absorber stanowiła różnicę wynikającą z osłabienia energii promieniowania słonecznego przez straty „optyczne” w osłonie przezroczystej kolektora. Straty te uwzględniają nie tylko współczynnik refrakcji, transmisyjność wynikającą z pochłaniania objętościowego w szkło, ale również absorpcje promieniowania związaną z układem pokrycie-absorber. Zgodnie z tym założeniem można zdefiniować pojęcie współczynnika transmisyjno-absorpcyjnego ($\tau\alpha$) uzależnionego od kąta padania promieniowania słonecznego na płaszczyznę kolektora według zależności (4):

$$(\tau\alpha)_\beta = \frac{E_s}{S} \quad (4)$$

gdzie:

- E_s – natężenie promieniowania słonecznego, W/m²

Wartości współczynnika transmisyjno-absorpcyjnego (5) określono na podstawie teorii wielokrotnych odbić Fresnel'a, pochłaniania promieniowania (prawo Bouguera) i uwzględnieniem absorpcyjności absorbera [Pluta 2000].

$$(\tau\alpha)_\beta = \frac{\tau_c \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho_d} \quad (5)$$

gdzie:

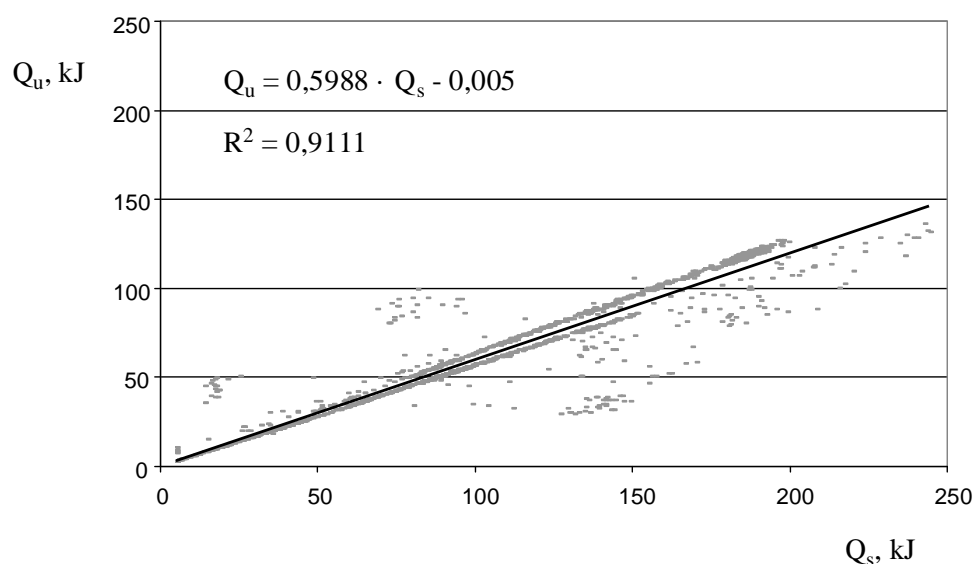
- β – kąt padania promieniowania słonecznego na płaszczyznę kolektora, °
- τ_c – całkowita transmisyjność pokryć przezroczystych, -
- α – współczynnik absorpcji absorbera (odpowiada mu współczynnik odbicia równy $1 - \alpha$)
- ρ_d – współczynnik odbicia promieniowania (szkło-powietrze)

Zastępczy współczynnik strat ciepła kolektora U_L wyliczono uwzględniając straty ciepła przez obudowę i frontową część kolektora. Współczynnik ten zawiera w sobie składowe strat zarówno przez konwekcję jak i promieniowanie.

Wyniki i dyskusja

Na podstawie przyjętej metodyki badań i wyników badań eksperymentalnych, przeprowadzonych w miesiącach - czerwcu i październiku, obliczono ilość ciepła użytecznego dostępnego w analizowanym systemie konwersji promieniowania słonecznego. Ze względu na sposób pomiaru i archiwizacji danych, który umożliwił zapis danych w 30 sekundowych przedziałach czasowych, wyznaczono chwilowe wartości ciepła użytecznego pozyskanego z kolektorów cieczowych.

Na rysunku 2 przedstawiono zależność ciepła użytecznego w funkcji ciepła dostępnego z promieniowania słonecznego w miesiącu czerwcu.

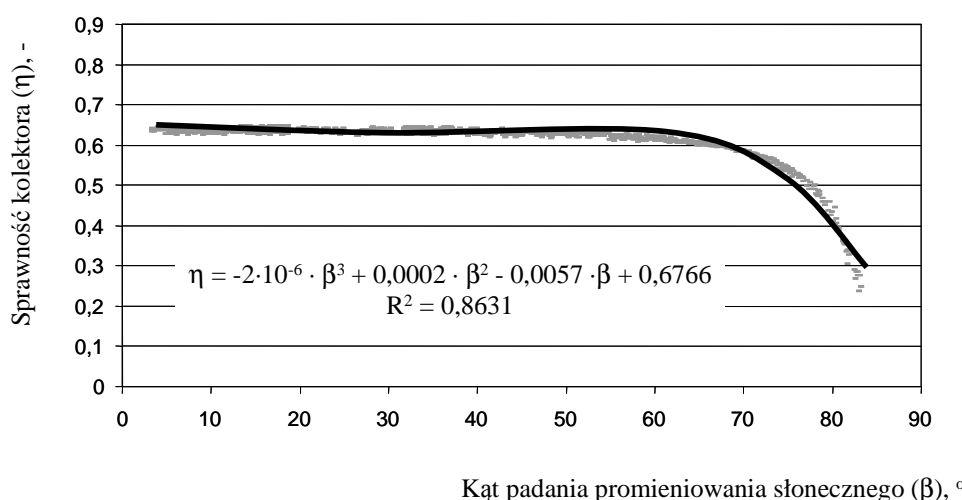


Rys. 2. Ciepło użyteczne z kolektorów w funkcji dostępnego ciepła promieniowania słonecznego w miesiącu czerwcu

Fig. 2. Useful heat from the collector as a function of available solar radiation heat in the month of June

Chwilowe wartości ciepła (dla 30 sekundowych przedziałów czasowych) docierającego z promieniowania słonecznego do powierzchni kolektorów zmieniały się w granicach od 4,7 do 244,1 kJ. System konwersji promieniowania słonecznego,

dla takich warunków solarnych, dostarczał do układu magazynującego ciepło użytecznego na poziomie zawierającym się od 2,6 do 136 kJ. Współczynnik determinacji osiągnął wartość 0,91 wyrażając w ten sposób siłę powiązania dla analizowanych zmiennych. Zmienne warunki solarne jak i kąt padania światła słonecznego na powierzchnię kolektorów były bezpośrednią przyczyną rozrzutu danych przedstawionych na rysunku 2.

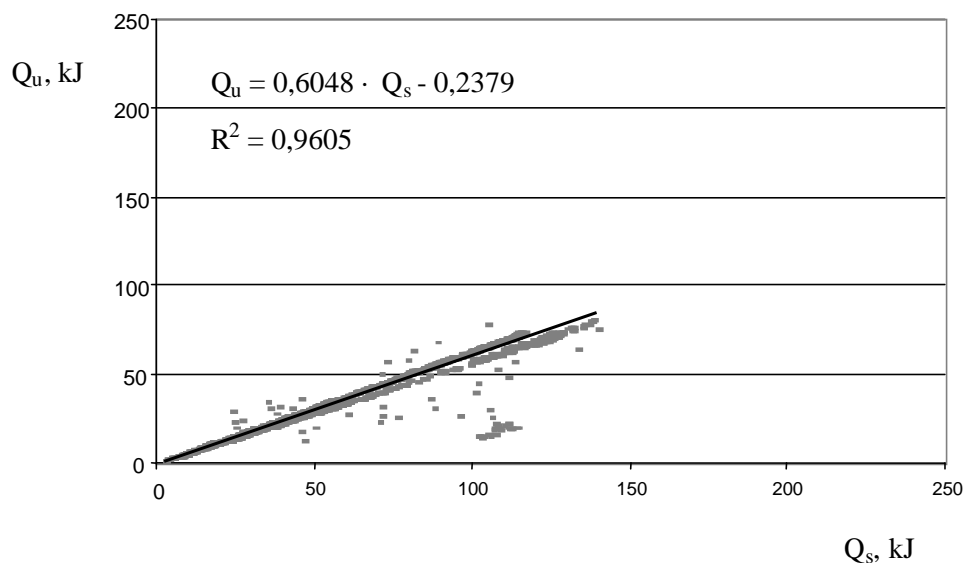


Rys. 3. Sprawność kolektora w funkcji kąta padania promieniowania słonecznego w miesiącu czerwcu

Fig. 3. Efficiency of the liquid collector as a function of angle of incidence of solar radiation in the month of June

Kolejnym zadaniem związanym z realizacją celu badań była analiza wpływu kąta padania promieniowania słonecznego na płaszczyznę kolektora na jego sprawność użyteczną. Na rysunku 3 przedstawiono wynik tej analizy w zakresie kąta padania od 3 do 83 stopni. W tym czasie sprawność kolektora zmieniła się od 0,24 do 0,65. Należy zwrócić uwagę na fakt, że zmiana kąta padania promieniowania słonecznego na płaszczyznę kolektora w zakresie od 3 do 65 stopni wywołała jedynie 5 procentowy spadek jego sprawności. Zwiększający się dalej kąt padania promieniowania skutkował wyraźnym spadkiem sprawności kolektora. Największe obniżenie zdolności konwersji promieniowania przypada dla wartości katów padania powyżej 75 stopni. Dla zakresu zmian kąta padania od 75 do 83 stopni odnotowano 52% spadek sprawności kolektora.

W październiku relacja ilości ciepła użytecznego w stosunku do wielkości promieniowania słonecznego nie uległa znaczącym zmianom. Mniejsze natężenie promieniowania słonecznego przyczyniło się do uzyskania mniejszych ilości ciepła z płaskich kolektorów cieczowych (rys. 4).

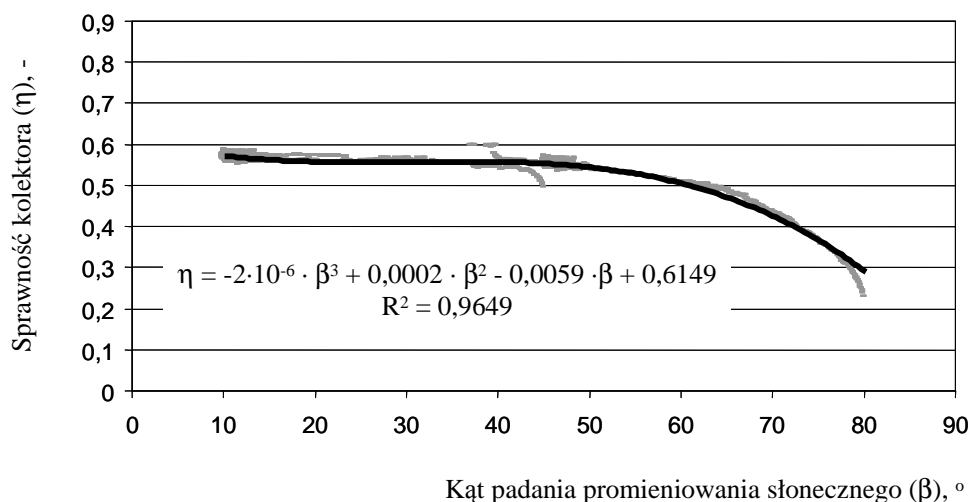


Rys. 4. Ciepło użyteczne z kolektorów w funkcji dostępnego ciepła promieniowania słonecznego w miesiącu październiku

Fig. 4. Useful heat from the collector as a function of available solar radiation heat in the month of October

Jesienne słońce dostarczało do powierzchni kolektorów ciepło zmieniające się w granicach od 2,1 do 139,5 kJ. W tym czasie płaskie kolektory cieczowe dostarczały ciepło zmieniające się w zakresie od 1,1 do 80,1 kJ. Wzajemną siłę powiązania dla analizowanych zmiennych określono na podstawie współczynnika determinacji, którego wartość osiągnęła 0,96.

Dla warunków eksperymentu przedstawionych na rysunku 4 wykonano analizę zmian sprawności płaskiego kolektora cieczowego w zakresie kątów padania promieniowania zmieniających się od 10 do 82 stopni. Sprawność systemu konwersji w tym zakresie zmieniała się od 0,23 do 0,59 (rys. 5.). Promieniowanie słoneczne, padające na powierzchnię kolektora pod zmieniającym się kątem od 10 do 62 stopni, wpłynęło jedynie na 5% obniżenie sprawności użytecznej kolektora. Dalszy wzrost kąta padania promieniowania powodował większe spadki sprawności, aż do wartości 0,23 przy kącie padania 82 stopnie.



Rys. 5. Sprawność kolektora w funkcji kąta padania promieniowania słonecznego w miesiącu październiku

Fig. 5. Efficiency of the liquid collector as a function of angle of incidence of solar radiation in the month of October

Na podstawie analizy wyników danych eksperymentalnych stwierdzono, że zwiększenie kąta padania promieniowania słonecznego obniżało sprawność płaskiego kolektora cieczowego. Przy czym zmiany sprawności dla kątów padania mniejszych niż 60 stopni nie przekraczały 5%. Zanotowano jednak różnicę w sprawności systemu konwersji promieniowania słonecznego między czerwcem i październikiem. Niższa o około 10–15% sprawność kolektorów w październiku (dla kątów padania promieniowania słonecznego mniejszych niż 60 stopni) wynikała w głównej mierze z niższych temperatur otoczenia [Latała 2005]. Większe różnice w sprawności kolektorów, dochodzące do 25%, między badanymi okresami zaobserwowano dla kątów padania powyżej 70 stopni.

Wnioski

1. Wraz ze wzrostem kąta padania promieniowania słonecznego na płaszczyznę kolektora sprawność maleje i w badanych warunkach zawierała się od 0,23 do 0,65.
2. W zakresie kąta padania promieniowania poniżej 60 stopni zmiany sprawności systemu konwersji nie przekraczały 5%.
3. Wzrost kąta padania promieniowania słonecznego na płaszczyznę kolektora powyżej 75 stopni powoduje wyraźny spadek jego sprawności użytkowej.
4. Sprawność użyteczna kolektora w październiku była niższa od 10–25% w stosunku do miesiąca czerwca.

Bibliografia

Latała H. 2005. Termiczna konwersja energii słonecznej w płaskich kolektorach cieczowych. Inżynieria Rolnicza. Nr 10(70), s. 277-284.

Lewandowski W. 2002. Proekologiczne źródła energii odnawialnej. WN-T, Warszawa.

Mokrzycki E. 2005. Podstawy gospodarki surowcami energetycznymi. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH. Ss. 423.

EFFICIENCY OF THE LIQUID COLLECTOR AS A FUNCTION OF ANGLE OF INCIDENCE OF SOLAR RADIATION

Summary

The presented work includes the results of performed tests determining solar collector efficiency as a function of angle of incidence of solar radiation. Experimental tests were performed on a specially prepared test bench, enabling monitoring and archiving of critical parameters. Both the value of the available solar radiation flux and temperatures of heating medium at the input and output of the collector system and ambient temperature were analyzed. Useful heat from collectors was set out from Hottel-Whillier-Biliss equation, which takes into account impact of design features of the collector and its operating conditions. Energy of solar radiation determined based on measurements and calculated amount of useful heat served as a basis for setting out effectiveness of tested collectors depending on the angle of incidence of solar radiation.

Key words: solar collectors, solar energy, useful heat, angle of incidence