

ANALIZA ZMIENNOŚCI SPRAWNOŚCI KONWERSJI ENERGII SŁONECZNEJ DLA PŁASKIEGO KOLEKTORA SŁONECZNEGO

Jarosław Knaga

Katedra Energetyki i Automatyzacji Procesów Rolniczych, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań płaskiego kolektora słonecznego, których celem było wyznaczenie wielkości jak i określenie zmienności sprawności konwersji energii słonecznej. Opracowane modele posłużyły do sporządzenia charakterystyk opisujących zmienność sprawności w płaskim kolektorze słonecznym.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne, płaski kolektor słoneczny, sprawność

Wstęp

O powszechności wykorzystania energetyki alternatywnej w większości decydują ograniczenia związane z samym źródłem, a w dalszej kolejności z urządzeniami czerpiącymi ten rodzaj energii. Stąd w pierwszej kolejności należy identyfikować takie obszary zastosowania, które będą spójne z występowaniem tego typu energii. Niewątpliwie takim obszarem jest rolnictwo, jak i niektóre gałęzie przetwórstwa rolno-spożywczego [Wiśniewski i in. 2001; Wołoszyn 2000]. Jednym z sprzyjających obszarów do wykorzystania energii słonecznej jest przygotowanie ciepłej wody użytkowej (c.w.u) na potrzeby gospodarstw domowych, rolnych oraz w agroturystyce jak i turystyce (pola namiotowe czy kempingowe), gdzie nie ma większych ograniczeń ze względu na położenie.

Jednym z popularniejszych urządzeń energetyki alternatywnej jest kolektor słoneczny, szczególnie typu płaskiego. Tego typu kolektor słoneczny znalazł duże zastosowanie w systemach ciepłowniczych, a to za sprawą prostej budowy, łatwego montażu, taniej i w miarę niezawodnej eksploatacji, przy możliwości adaptacji istniejących instalacji.

Stosowanie systemów solarnych wyposażonych w nowoczesne układy sterowania, które mają zapewnić optymalną efektywność wykorzystania tych systemów powinno być poprzedzone badaniami kolektorów słonecznych jak i całych systemów przygotowania c.w.u. W zakresie przedmiotu badań istnieje już wiele opracowań m. in. [Chochowski, Czekalski 1997; Latała 2005, 2006; Lewandowski 2006] w których prowadzono badania układów solarnych opartych na kolektorach słonecznych. W większości prowadzonych badań analizę sprawności prowadzono na podstawie zmian ciepła. Taka metodyka jest uzasadniona w badaniach eksploatacyjnym całych układów wyposażonych w większą powierzchnię czynną składającą się z wielu kolektorów słonecznych. Natomiast, na potrzeby określenia zmian sprawności w tego typu urządzeniu, badania powinny być prowadzone w aspekcie analizy zmian mocy. W niniejszym opracowaniu autor podjął taką próbę pro-

wadzącą wstępną analizę wyznaczenia zależności i zmienności sprawności w pojedynczym płaskim kolektorze słonecznym. Dopiero takie badania pozwolą na pełne wyjaśnienie niektórych ograniczeń związanych z stosowaniem płaskich kolektorów słonecznych na potrzeby przygotowania c.w.u.

Cel pracy

Celem pracy było przeprowadzenie badań płaskiego kolektora słonecznego, które pozwolą na wyznaczenie wielkości jak i określenie zmienności sprawności konwersji energii słonecznej przez tego typu kolektor. Otrzymane wyniki badań posłużyły do opracowania charakterystyk opisujących zmienność sprawności w płaskim kolektorze słonecznym.

Przedmiot i metodyka badań

Przedmiotem badań był płaski kolektor słoneczny KSC-AE/200S, którego szczegółowe dane techniczne zamieszczono w tabeli 1.

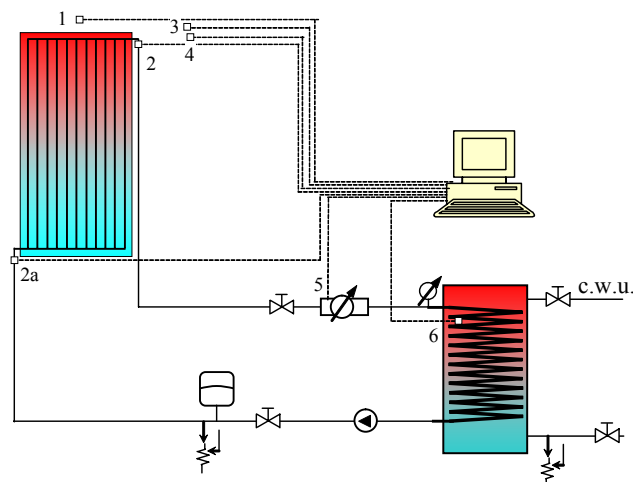
Tabela 1. Dane techniczne kolektora słonecznego KSC-AE/200S (wg producenta)
Table 1. Technical data of KSC-AE/200S solar collector (according to the producer)

Oznaczenie	KSC-AE/200S A1 Cr	
Powierzchnia kolektora	[m ²]	1,95
Powierzchnia absorbera	[m ²]	1,73
Objętość płynu w kolektorze	[dm ³]	~ 0,9
Obudowa	rama Al	
Pokrycie absorbera	Czarny chrom	
Współczynnik absorpcji/emisji	$f > 0,96 \pm 0,01$ / $E < 0,10 \pm 0,02$	
Izolacja	[mm]	30 wełny
Pokrywa kolektora	szyba solarna hartowana o grubości 4 mm	

Badanie sprawności płaskiego kolektora przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, zlokalizowanym w Katedrze Energetyki i Automatyzacji Procesów Rolniczych, na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

Kolektor słoneczny był połączony z wymiennikiem o pojemności 120 dm³ instalacją w skład której wchodzi: pompa obiegowa wymuszająca natężenia przepływu w trzech zakresach. Układ pomiarowy był oparty na pomiarze: temperatury, natężenia przepływu czynnika roboczego, natężenia promieniowania słonecznego, oraz względnej wilgotności powietrza (rys. 1).

Pomiary temperatury prowadzono w wymienniku, na wejściu i wyjściu z kolektora słonecznego, przy czym pomiary były one realizowane czujnikami parowanymi. Wielkości mierzone rejestrowano bezpośrednio na PC, z wykorzystaniem aplikacji napisanej w programie DasyLab 6.0, która zarządzała obsługą karty pomiarowej PCI Personal Daq/1005. Wartości wielkości mierzonych rejestrowano z częstotliwością próbkowania 0,5 Hz. Specyfikację elementów układu pomiarowego zamieszczono w tabeli 2, a podane dokładności dotyczą całego toru mierzonej wielkości.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego płaskiego kolektora słonecznego (elementy stanowiska pomiarowego wraz z pełną specyfikacją zamieszczono w tabeli 2)

Fig. 1. The scheme of a flat solar collector measuring system (elements of measurement station together with full specification are presented in table 2)

Tabela 2. Specyfikacja stanowiska badawczego

Table 2. Specification of the research stand

Nr	Wielkość mierzona	Rodzaj i typ przyrządu
1	Natężenie promieniowania słonecznego	pyranometr CM3 025453, czułość; 15,61 $[\mu V \cdot W/m^2]$, niestabilność $\pm 1\%$
2, 2a	Temperatura na wejściu i wyjściu kolektora	czujnik temp. PT 100, zakres; $-30-110 [^{\circ}C]$, dokładność; 0,01 $[^{\circ}C]$
3	Temperatura otoczenia	czujnik temp. PT 100, zakres; $-30-60 [^{\circ}C]$, dokładność; 0,1 $[^{\circ}C]$
4	Wilgotność powietrza	Przetwornik wilgotności PWW 2200/5, zakres; 0–100% RH, dokładność; $\pm 2\%$
5	Natężenie strumienia objętości cieczy roboczej	przepływomierz MTWH, $Q_{NOM} = 7,0 [m^3 h^{-1}]$, 2,5 $[dm^3 \cdot impuls^{-1}]$
6	Temperatura wody w zbiorniku	czujnik temp. PT 100, zakres 0–100 $[^{\circ}C]$, dokładność; 0,1 $[^{\circ}C]$

Czynnikiem roboczym, pośredniczącym w wymianie ciepła pomiędzy kolektorem słonecznym, a zasobnikiem była woda destylowana pod ciśnieniem roboczym 1,5 [kPa].

Badania przeprowadzono przy azymucie pokrywającym się z punktem najwyższego położenia słońca na nieboskłonie dla Krakowa i przy kącie pochylenia płaszczyzny kolektora wynoszącym 30 stopni. Przyjęcie takiego ustawienia kolektora do przeprowadzenia badań pozwalających na wstępną analizę zmienności sprawności było podyktowane ograniczeniem do poziomu nie przekraczającego 5% zmian natężenia promieniowania słonecznego wynikającego z pozornego ruchu słońca. Efektem tego jest ograniczenie przedziału czasowego rejestracji danych do dwóch godzin tj. od 11⁰⁰ do 13⁰⁰.

Do analizy sprawności płaskiego kolektora wybrano obserwacje, które zarejestrowano przy dodatniej różnicy temperatur między wyjściem, a wejściem do kolektora. Dla tak przyjętego założenia obliczono strumień energii absorbowanej przez kolektor, a następnie przenoszanej przez czynnik roboczy zgodnie zależnością (1);

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{wyj} - T_{wej}) \quad (1)$$

gdzie:

- $\dot{Q}$ – moc absorbowana przez płaszczyznę czynną kolektora, przenoszona przez czynnik roboczy [W],
- $\dot{V}$ – strumień czynnika roboczego [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- ρ – gęstość czynnika roboczego [$\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$],
- c_p – ciepło właściwe czynnika roboczego [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{deg})^{-1}$],
- T_{wej} – temperatura czynnika na wejściu do kolektora [$^{\circ}\text{C}$],
- T_{wyj} – temperatura czynnika na wyjściu kolektora [$^{\circ}\text{C}$].

Przy czym moc wyznaczona z zależności (1) jest ograniczona do czasu trwania impulsu z przepływomierza tj. przepływu objętości $2,5 \text{ dm}^3$, a pozostałe wartości wielkości są wyznaczone jako średnie dwusekundowe z tego czasu. Sprawność konwersji płaskiego kolektora słonecznego wyznaczono zgodnie z zależnością (2):

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{E \cdot A} \quad (2)$$

gdzie:

- η – sprawność kolektora
- $\dot{Q}$ – moc absorbowana przez płaszczyznę czynną kolektora, przenoszona przez czynnik roboczy [W],
- E – natężenie promieniowania słonecznego [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
- A – powierzchnia czynna w płaskim kolektorze słonecznym [m^2].

Obliczona w ten sposób sprawność konwersji promieniowania słonecznego w kolektorze ujmuje łącznie wszystkie straty, których podstawy teoretyczne przedstawił Chwieduk [1994] i Lewandowski [2006].

Wyniki badań

Po przeprowadzeniu analizy statystycznej w zakresie podstawowym ustalono czynniki mające istotny wpływ na sprawność płaskiego kolektora słonecznego. Najistotniejszym czynnikiem jest natężenie promieniowania słonecznego. Słabszy wpływ, ale również istotny ma: temperatura otoczenia, temperatura czynnika roboczego w kolektorze, wilgotność otoczenia i natężenie przepływu. Temperatura otoczenia i temperatura czynnika roboczego są skorelowane z natężeniem promieniowania słonecznego. Stąd do dalszej analizy przejęto różnicę tych czynników zgodnie z zależnością (3):

$$\Delta T = T_k - T_o \quad (3)$$

gdzie:

T_k – temperatura czynnika w kolektora [$^{\circ}\text{C}$],

T_o – temperatura otoczenia [$^{\circ}\text{C}$].

Przy czym temperaturę czynnika w kolektorze wyznaczono na podstawie zależności 4:

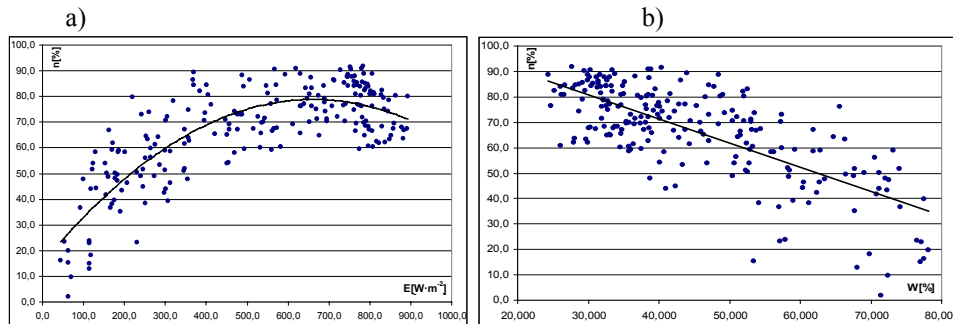
$$T_k = \frac{T_{wej} + T_{wyj}}{2} \quad (4)$$

gdzie:

T_{wej} – temperatura czynnika na wejściu do kolektora [$^{\circ}\text{C}$],

T_{wyj} – temperatura czynnika na wyjściu kolektora [$^{\circ}\text{C}$].

Dla tak wyznaczonych zmiennych niezależnych wykonano analizę graficzną (rys. 2), która pozwoliła na określenie charakteru trendu dla sprawności w płaskim kolektorze słonecznym.



Rys. 2. Przykład analizy charakteru trendu; a) natężenie promieniowania słonecznego, b) wilgotność otoczenia

Fig. 2. An example of trend nature analysis; a) solar radiation intensity, b) humidity of the surroundings

Na tej podstawie opracowano model opisujący sprawność płaskiego kolektora słonecznego, który jest równaniem (5) drugiego stopnia o czterech zmiennych bez interakcji. Opracowany model w 79% wyjaśnia badane zjawisko, przy istotności wyznaczonych współczynników na poziomie $1-\alpha$ ($\alpha=0,05$).

$$\eta = -0.119 \cdot 10^{-3} \cdot E^2 + 0.158 \cdot E - 0.0149 \cdot \Delta T^2 - 0,346 \cdot W + 512 \cdot \dot{V} + 43,7 \quad (5)$$

gdzie:

η – sprawność konwersji,

E – natężenie promieniowania Słońca [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

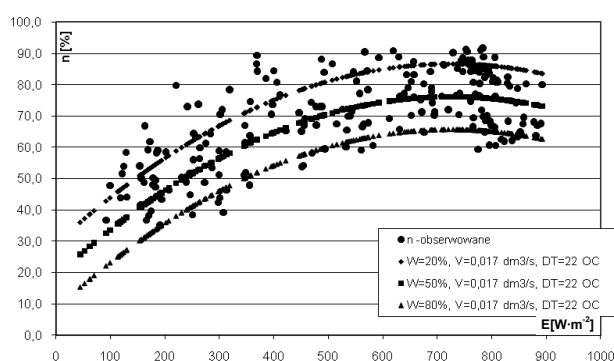
ΔT – różnica temperatury [$^{\circ}\text{C}$],

W – wilgotność względna otoczenia [%],

$\dot{V}$ – natężenie przepływu czynnika roboczego [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Z otrzymanej zależności wynika, iż natężenie promieniowania słonecznego ma jednoznaczny wpływ na sprawność płaskiego kolektora. Ze wzrostem natężenia promieniowania Słońca wzrasta sprawności kolektora (rys. 3), zgodnie z zależnością (5) osiągając maxi-

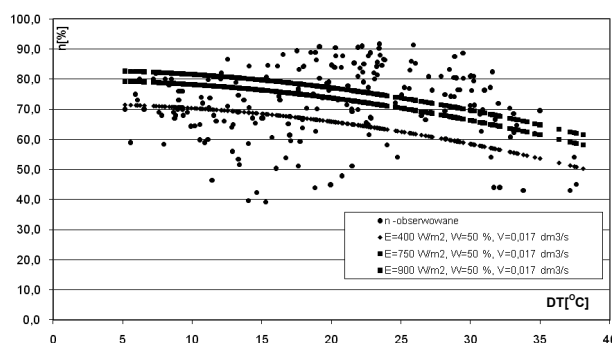
mum przy natężeniu $E=750 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Dalszy wzrost natężenia promieniowania w zakresie promieniowania bezpośredniego nie powoduje znacznych zmian sprawności. Stąd można wnioskować o wzroście strat na odbicie od przysłony zewnętrznej kolektora.



Rys. 3. Zależność sprawności płaskiego kolektora od natężenia promieniowania słonecznego w układzie zmiennej wilgotności

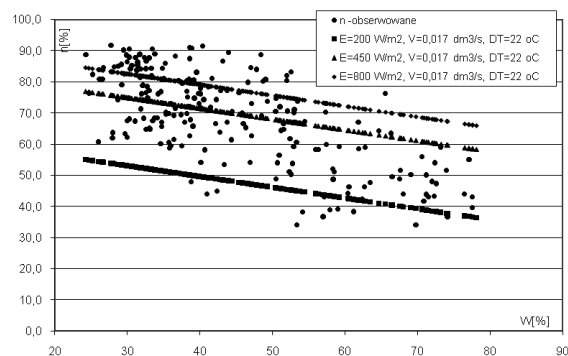
Fig. 3. The relation between a flat solar collector efficiency and solar radiation intensity in the system of variable humidity

Kolejnym czynnikiem mającym istotny wpływ na sprawność kolektora jest różnica temperatur ΔT , między temperaturą czynnika w kolektorze, a temperaturą otoczenia. Wpływ jej i zarazem dopasowanie modelu do wartości obserwowanych przedstawiono na rysunku 4. Jakość dopasowania modelu (rys. 4) w zakresie małych różnic temperatur nie jest zadowalająca, ale wyznaczony współczynnik jest istotny i tylko taka postać modelu jest właściwa. Ze wzrostem różnicy temperatur ΔT maleje sprawność zgodnie z zależnością paraboliczną.



Rys. 4. Zależność sprawności płaskiego kolektora od różnicy temperatur w układzie zmiennego natężenia promieniowania

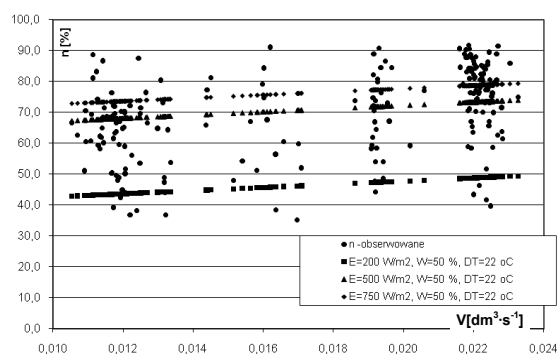
Fig. 4. The relation between a flat solar collector efficiency and temperature difference in the system of variable radiation intensity



Rys. 5. Zależność sprawności płaskiego kolektora od wilgotności otoczenia w układzie zmiennego natężenia promieniowania słonecznego

Fig. 5. The relation between a flat solar collector efficiency and humidity of the surroundings in the system of variable solar radiation intensity

Wpływ wilgotności otoczenia i natężenie przepływu czynnika roboczego na sprawność płaskiego kolektora dobrze opisuje zależność liniowa co przedstawiono na wykresach (rys. 5, i 6). Ze wzrostem wilgotności otoczenia maleje sprawność konwersji promieniowania słonecznego w płaskim kolektorze. Optymalne warunki pracy uzyskujemy dla jak najmniejszych wilgotności, a ze wzrostem wilgotności o każde 10% maleje sprawność o 3,3% aż do wystąpienia opadów.



Rys. 6. Zależność sprawności płaskiego kolektora od natężenia przepływu w układzie zmiennego natężenia promieniowania słonecznego

Fig. 6. The relation between a flat solar collector efficiency and flow intensity in the system of variable solar radiation intensity

Natężenie przepływu czynnika roboczego w kolektorze było regulowane na zaworze poprzez dławienie, stąd obserwujemy (rys. 6) kilka skupisk punktów. Pomimo stosunkowo

dużego rozrzutu wartości obserwowanych to jednak istnieje istotny związek sprawności z natężeniem przepływu. Wzrost natężenia przepływu w obszarze rozpatrywanych zmian powoduje wzrost sprawności kolektora i przy dwukrotnej zmianie natężenia przepływu z $11 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ do $22 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ wzrasta sprawność o 5,6%.

Podsumowanie

Opracowana zależność w układzie czterech zmiennych (5) dość dobrze opisuje sprawność konwersji energii promieniowania słonecznego w płaskim kolektorze. Pewne odchylenia jakości modelu (5) obserwujemy analizując wpływ różnicy temperatur ΔT . Zauważalne odchylenia modelu (5) od wartości obserwowanych są w zakresie małej różnicy temperatur, co można tłumaczyć bezwładnością badanego układu. W tym przypadku można by się pokusić o poszukiwania bardziej złożonego modelu inercyjnego, co powinno być poprzedzone odpowiednio przygotowanymi badaniami. Ciekawe zjawisko można zauważyć analizując natężenia promieniowania słonecznego. Pojawienie się ekstremum w postaci maksimum sprawności przy natężeniu $750 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (rys. 3) jest pewnego rodzaju zaskoczeniem. Można to tłumaczyć wzrostem udziału promieniowania bezpośredniego, które ulega odbiciu na przezroczystej przysłonie kolektora, lub mało efektywną pracą absorbera (możliwość wystąpienia obszarów przegrzanych).

Bibliografia

- Chochowski A., Czekalski D.** 1997. Energetyczne kryteria oceny instalacji słonecznych. Mała energetyka '97. IV Konferencja Naukowo-Techniczna.
- Chwieduk D.** 1994. Słoneczne i gruntowe systemy grzewcze, Zagadnienia symulacji funkcjonowania i wydajności cieplnej. Studia z Zakresu Inżynierii. Nr 37, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Warszawa. s. 43-48.
- Latała H.** 2005. Termiczna konwersja energii słonecznej w płaskich kolektorach cieczowych. Inżynieria Rolnicza. Nr 10(70). s. 277-284.
- Latała H.** 2005. Straty ciepła w kolektorze cieczowym w funkcji temperatury otoczenia. Inżynieria Rolnicza. Nr 11(86). s. 191-199.
- Lewandowski W.** 2006. Proekologiczne odnawialne źródła energii. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa. ISBN 83-204-3112-3
- Wiśniewski G., Gołębiowski S., Gryciuk M.** 2001. Kolektory słoneczne, poradnik wykorzystania energii słonecznej. COIB. Warszawa. ISBN 83-204-0418-5.
- Włoszyn M.** 2000. Kolektory słoneczne – wykorzystanie energii słonecznej do przygotowania ciepłej wody użytkowej. Technika Rolnicza. Nr 5. s. 23-26.

ANALYSIS OF THE VARIABILITY OF SOLAR ENERGY CONVERSION FOR A FLAT SOLAR COLLECTOR

Abstract. The study presents experimental results of a flat solar collector in order to determine the amount as well as the variability of solar energy conversion efficiency. The evaluated models were used to prepare certain characteristics describing the variability of efficiency in a flat solar collector.

Key words: solar radiation, flat solar collector, efficiency

Adres do korespondencji:

Jarosław Knaga; e-mail: jaroslaw.knaga@ur.krakow.pl
Katedra Energetyki i Automatyzacji Procesów Rolniczych
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków