

WPŁYW ZEWNĘTRZNYCH WARUNKÓW KLIMATYCZNYCH NA EFEKTYWNOŚĆ PRACY PRÓŻNIOWEGO KOLEKTORA SŁONECZNEGO

Hubert Latała

Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Absorber w próżniowym kolektorze słonecznym oddzielony jest od warunków zewnętrznych próżnią wytworzoną między koncentrycznymi szklanymi rurami. Rozwiązanie takie ogranicza do minimum straty ciepła do otoczenia. Jednak zmienne warunki pogodowe powodują powstawanie naprężeń w elementach szklanych co prowadzi do pęknięć i utraty szczelności, a w konsekwencji do obniżenia efektywności pracy kolektora próżniowego. Ujemne temperatury natomiast powodują zamarzanie wody w „ciepłych rurkach” powodując ich zniszczenie. Destrukcji ulegają zarówno elementy szklane jak i „ciepłe rurki” w sposób niezależny. Nieprawidłowości te niestety nie zawsze da się dostrzec poprzez powierzchowną obserwację – konieczny jest demontaż poszczególnych elementów kolektora. Pęknięcie rury próżniowej może być w miejscu gdzie wchodzi do rozdzielacza kolektora (miejsce niewidoczne). Trudniejsze do wykrycia jest uszkodzenie „cieplej rurki”, która dopiero po wyjęciu z kolektora może być zdiagnozowana. Wymienione powyżej czynniki obniżają wartości parametrów charakteryzujących pracę kolektora słonecznego. Porównanie tych danych z parametrami poprawnie działającego kolektora daje podstawę do działania związanego z wymianą uszkodzonych elementów. W pracy przedstawiono również zastosowanie obrazu termowizyjnego w diagnostyce elementów kolektora słonecznego.

Słowa kluczowe: próżniowy kolektor słoneczny, efektywność kolektora, warunki klimatyczne

Wstęp

Podstawą konstrukcji kolektora próżniowego jest rura wykonana ze szkła borowo-krzemowego o podwójnej ścianie. Z przestrzeni pomiędzy ścianami usuwa się powietrze uzyskując bardzo dobrą izolację cieplną dla umieszczonej w środku rurki ciepła wykonanej najczęściej z miedzi. Pomysł ciepłej rury został proponowany i opatentowany przez Gaudin w 1942 roku, a oryginalne pojęcie „heat pipe” i dobrze znana cieplna geometria rury została wprowadzona w 1963 roku przez Grover’a [Abu-Zour 2006]. We wnętrzu ciepłej rurki przemianom fazowym podlega ciecz, która wrze w parowniku, paruje, kondensuje w skraplaczu, a skropliny spływają z powrotem do parownika [Faghri 1995]. Cykl ten uzależniony jest zarówno od warunków meteorologicznych jak i od własności termofizycznych medium użytego w ciepłej rurce [Esen 2004]. Użycie osłony w postaci szklanej, dwuwarstwowej osłony zmniejsza wpływ zewnętrznych warunków i dzięki temu użycie gorącej rurki oferuje dużą elastyczność w działaniu i zastosowaniu. Jest również bardzo

efektywne w transporcie ciepła nawet dla małych różnic temperatury. W praktyce przewodność cieplna rurki może być ponad 500 razy większa w porównaniu do zwykłej przewodności cieplnej [Abu-Zour 2006].

W praktyce pojawiają się jednak pewne problemy dotyczące poprawności działania kolektorów próżniowych zarówno ze względu na pracę rurek cieplnych jak i szklanych rur, które odpowiedzialne są za izolację. Jedne z nich dotyczą wykonania „heat pipe” – łączenie dwóch metali o różnej rozszerzalności powodować może utratę szczelności i wyciek medium odpowiedzialnego za przemianę fazową. Ponadto medium wewnątrz cieplej rurki to najczęściej uwodnione sole, które w klimacie polski mogą zamarznąć w zimie, a w efekcie spowodować uszkodzenie mechaniczne uniemożliwiające dalszą pracę. Ocena poprawnego działania pojedynczej cieplej rurki możliwa jest dopiero po jej demontażu z kolektora. Rury szklane z kolei odpowiedzialne są za izolację. Napylona wewnątrz, w końcówce, warstwa metalu (lustrzany połysk) „informuje” o próżni. Sprawdzenie szczelności wymaga jednak demontażu osłony gumowej przykrywającej tą część rury. Bywa to utrudnione ze względu na miejsce zamontowania kolektora, którym najczęściej jest pochyły dach budynku. Wówczas diagnoza dotycząca szczelności rur szklanych może być wykonana w oparciu o analizę obrazu termowizyjnego. Wadliwe rury, a więc te, które utraciły szczelność z różnych przyczyn mają wyższą temperaturę w porównaniu ze sprawnymi. Wymienione powyżej defekty wpływają na obniżenie efektywności pracy kolektora próżniowego. Spowodowane jest to przez zmniejszenie liczby elementów kolektora biorących udział w konwersji promieniowania słonecznego, a dodatkowo zwiększa się oddziaływanie parametrów klimatycznych. Objawia się to głównie za sprawą braku izolacji w szklanych tubach.

Biorąc powyższe informacje postawiono sobie za cel przeanalizowanie w jaki sposób czynniki klimatyczne wpływają na efekt pracy kolektora próżniowego. Pomiary wykonano dla wybranych trzech miesięcy (wrzesień, październik, listopad) w latach 2006, 2007 i 2008. Okres pomiarów obejmował dwa lata nieprzerwanej pracy kolektora, który poddany był w tym czasie wpływom warunków zarówno zimowych jak i letnich oraz okresów wiosennych i jesiennych. Postawiony cel zrealizowano na stanowisku badawczym zlokalizowanym na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki UR w Krakowie.

Materiał i metoda

Realizację postawionego celu badań wykonano dla kolektora próżniowego (AP-30) zbudowanego z 30 szklanych rur wewnątrz, których umieszczone były ciepłe rurki wypełnione uwodnioną solą. Niestety producent nie podał rodzaju tej soli i parametrów związanych z temperaturą w jakiej następuje przejście stanu z ciekłego do gazowego. Według przypuszczeń autora przejście stanu odbywało się w temperaturze pomiędzy 20-30°C. Do analizy wzięto wyniki badań z września, października i listopada 2006 roku. Wrzesień 2006 roku był początkiem pracy tego kolektora. Badania powtórzono dla kolejnych 3 miesięcy (IX, X i XI) w latach 2007 i 2008. Sterowanie pracą kolektora odbywało się automatycznie i zależne było od różnicy temperatury medium na wyjściu z kolektora i temperatury wody w zbiorniku akumulacyjnym. Pompa obiegowa w układzie kolektora próżniowego pracowała jeżeli różnica ta osiągnęła wartość powyżej 5°C niezależnie od pory roku.

Obliczenia związane z realizacją postawionego celu wykonano na podstawie pomiarów natężenia promieniowania słonecznego w płaszczyźnie kolektora próżniowego, temperatury czynnika roboczego na wejściu i wyjściu z kolektora, temperatury powietrza zewnętrznego oraz prędkości wiatru.

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 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
- F_k – powierzchnia kolektora [m^2].

Następnie według poniższej zależności wyliczono ciepło użyteczne (Q_u) dla kolektora próżniowego:

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

gdzie:

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

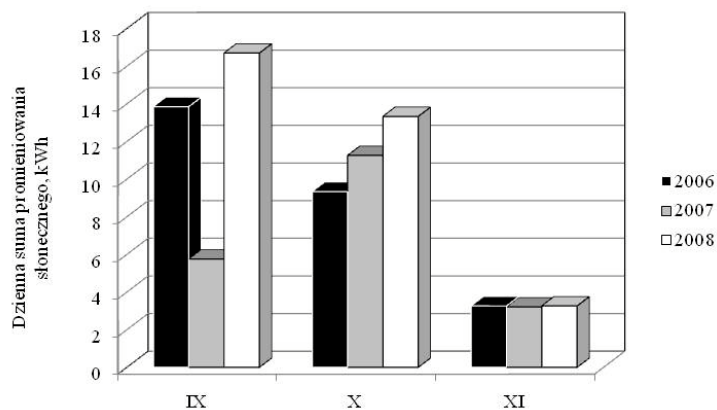
Współczynnik sprawności użytecznej (η), jako miarę jego efektywności, w badanym kolektorze wyznaczono na podstawie zależności:

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

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

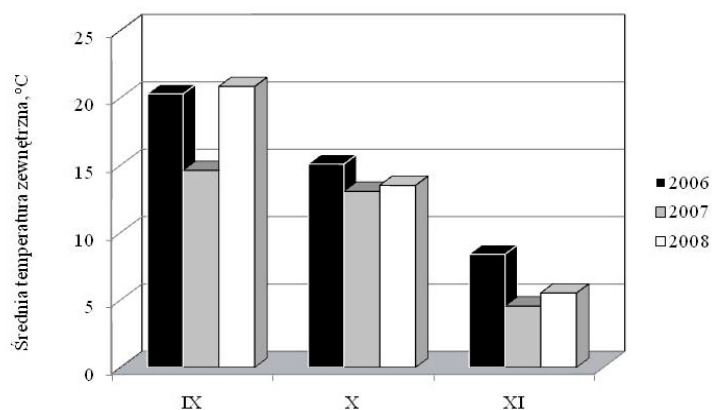
Wyniki

Warunki solarne, w postaci średnich dziennych sum promieniowania słonecznego, jakie zanotowano w analizowanych okresach zostały przedstawione na rysunku 1. Dostępna energia promieniowania słonecznego obniżała się, począwszy od września do listopada, zarówno w roku 2006 jak i 2008. Wynikało to zarówno ze zmniejszenia nasłonecznienia jak i wysokości położenia słońca nad horyzontem. Dla miesięcy września i października rok 2008 okazał się być najlepszy pod względem zasobów solarnych. Średnia dzienna suma promieniowania słonecznego dla tych miesięcy wynosiła odpowiednio 16,7 i 13,3 kWh. Jedynie w roku 2007 miesiąc wrzesień charakteryzował się prawie 2,5-krotnie niższą energią promieniowania słonecznego w porównaniu do analogicznego okresu w latach 2006 i 2008. Spowodowane to było dużą ilością dni deszczowych i pochmurnych w tym miesiącu. Jedynie suma promieniowania słonecznego w listopadzie w analizowanych latach była na tym samym poziomie i wynosiła około 3,2 kWh.



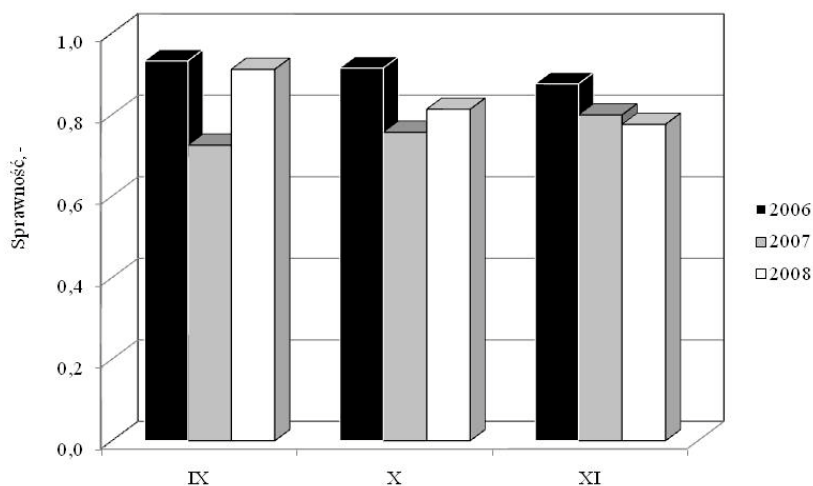
Rys. 1. Średnia dzienna suma promieniowania słonecznego odniesiona do powierzchni kolektora próżniowego AP-30 dla wybranych miesięcy (IX, X, XI) w latach 2006, 2007 i 2008, kWh
 Fig. 1. Mean daily sum of solar radiation referred to the AP-30 vacuum tube solar collector area, for selected months (Sept., Oct., Nov.) in years 2006, 2007 and 2008, kWh

Warunki solarne wpływały również na parametry termiczne w jakich pracował kolektor próżniowy (rys. 2.). Wyższe średnie temperatury powietrza zewnętrznego zanotowano w latach 2006 i 2008 dla wszystkich trzech miesięcy, których dotyczyła analiza. Rok 2007 pod tym względem był najchłodniejszy. Średnia temperatura zewnętrzna dla przedziałów czasowych w tym roku była od 0,5 do 6°C niższa. Warunki wietrzne, ze względu na osłonięte miejsce usytuowania kolektora, w niewielkim stopniu wpływały na jego pracę. Dla analizowanych okresów średnia prędkość wiatru nie przekroczyła wartości $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Rys. 2. Średnia temperatura zewnętrzna dla przedziałów czasowych, w których pracował kolektor AP-30, w wybranych miesiącach (IX, X, XI) w latach 2006, 2007 i 2008, [°C]
 Fig. 2. Mean outside temperature for time intervals, in which the AP-30 collector was working, in selected months (Sept., Oct., Nov.) in years 2006, 2007 and 2008, [°C]

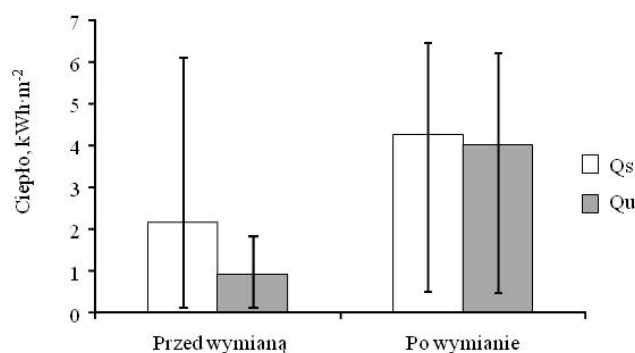
Na rysunku 3 przedstawiono średnią sprawność użyteczną kolektora próżniowego AP-30 w wybranych miesiącach w trzech kolejnych latach. Najwyższe sprawności uzyskano na początku eksploatacji kolektora w roku 2006. Osiągały one średnie wartości w granicach od 87 do 93%. Po roku eksploatacji, w analizowanych miesiącach, średnia sprawność użyteczna kolektorów była niższa i zawierała się w granicach od 72 do 80%. Wpływ na to miały zarówno warunki solarne jak i termiczne, które były na najniższym poziomie w roku 2007 (rys. 1.). Jedyne w listopadzie 2007 zanotowano nieznacznie wyższą sprawność (około 3%) w porównaniu do listopada 2008 roku. Należy również zwrócić uwagę na obniżającą się efektywność pracy kolektora począwszy od września do listopada w latach 2006 i 2008. Tendencja odwrotna związana ze wzrostem efektywności wystąpiła w roku 2007 (rys. 3.). Przyczyną tego stanu rzeczy najprawdopodobniej mogła być wymiana ciepłych rurek na nowe w kwietniu 2008 roku. Konieczność usunięcia starych „heat pipe” wynikała z analizy sprawności użytecznej kolektora próżniowego, która po zimie 2007/2008 obniżyła się o ponad 55% w porównaniu do poprawnie działającego wymiennika. Na rysunku 4 przedstawiono średnie dzienne sumy ciepła uzyskanego z promieniowania słonecznego (Q_s) i kolektorów próżniowych (Q_u) przed i po wymianie „cieplej rurki” w kwietniu 2008 r.



Rys. 3. Sprawność użyteczna kolektora próżniowego AP-30 dla wybranych miesięcy (IX, X, XI) w latach 2006, 2007 i 2008, -

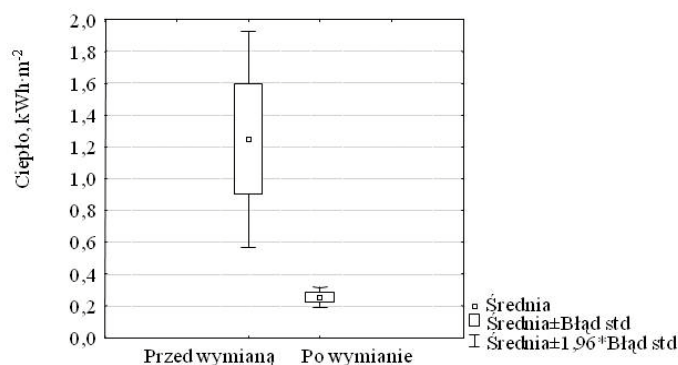
Fig. 3. Useful efficiency of the AP-30 vacuum tube solar collector for selected months (Sept., Oct., Nov.) in years 2006, 2007 and 2008, [-]

Różnice między ciepłem dostępnym z promieniowania słonecznego i uzyskanym z kolektora są znaczące. Potwierdzeniem tego jest przedstawiona na rysunku 5 średnia zmienność różnic między ciepłem dostępnym i uzyskanym w drodze konwersji promieniowania słonecznego. Ponadto należy zwrócić uwagę na duży rozrzut różnic między ciepłem dostępnym a uzyskanym, który przed wymianą osiągał wartość około $1,3 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Po wymianie różnice te zmniejszyły się do około $0,15 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.



Rys. 4. Średnia dzienna suma ciepła uzyskanego z promieniowania słonecznego (Q_s) i kolektorów próżniowych (Q_u) przed i po wymianie „ciepłej rurki” w kwietniu 2008 roku, $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$

Fig. 4. Mean daily sum of heat obtained from solar radiation (Q_s) and solar collectors (Q_u) before and after “heat pipe” exchange in April 2008, [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$]

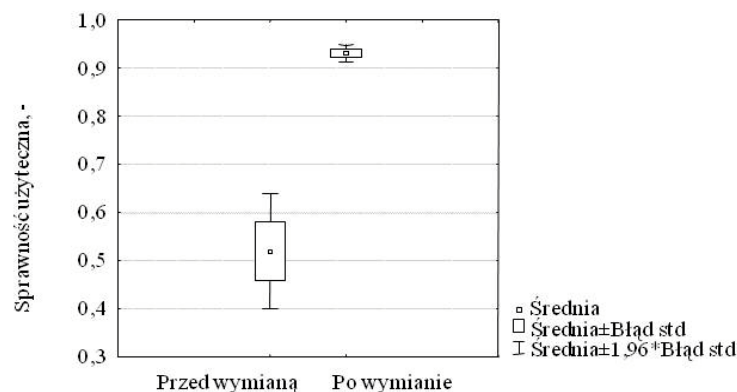


Rys. 5. Średnia zmienność różnic między ciepłem dostępnym z promieniowania słonecznego i uzyskanym z kolektora słonecznego przed i po wymianie „heat pipe”, $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$

Fig. 5. Mean variability of differences between heat available from solar radiation, and heat obtained from solar collector before and after “heat pipe” exchange, $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$

Analizując wartości sprawności użytecznej kolektora próżniowego przed wymianą ciepłych rurek (rys. 6.) należy zwrócić szczególną uwagę na jej niską wartość, której średnia była na poziomie 53%. Nie bez znaczenia jest również fakt dużej zmienności sprawności, na którą miały wpływ nie tylko uszkodzone rury szklane, ale również źle lub nie pracujące „heat pipe”. Rury szklane były pęknięte w miejscu, które nie jest bezpośrednio narażone na warunki atmosferyczne. Pęknięcia były umiejscowione wewnątrz rozdzielacza kolektora. Podczas demontażu i wymiany szklanych rur okazało się, że ciepłe rurki są pęknięte, a ich kolor z miedzianego zmienił się na brązowy. Dowodzi to o utracie medium roboczego i przegrzaniu materiału, z którego wykonano „heat pipe”. Po demontażu pozostałych ele-

mentów kolektora okazało się, że 70% ciepłych rurek było koloru brązowego. Pozostała ilość miała metaliczny kolor miedzi. Świadczy to o poprawnej pracy tych rurek.

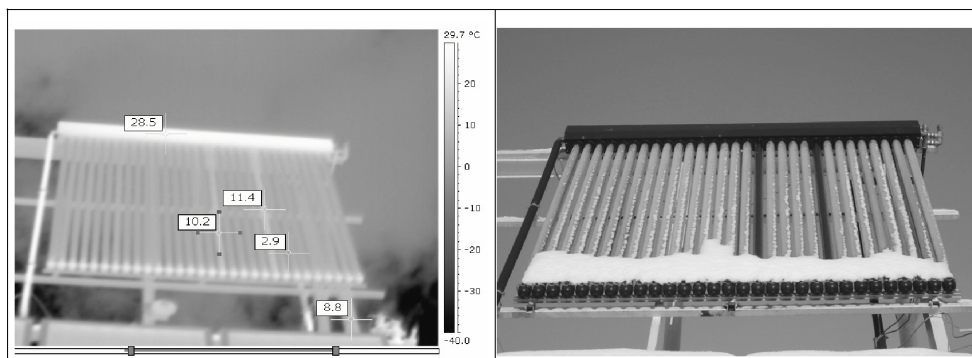


Rys. 6. Różnica między średnimi wartościami sprawności użytecznej kolektora AP-30 przed i po wymianie „heat pipe”, -

Fig. 6. Difference between mean useful efficiency values for the AP-30 collector before and after “heat pipe” exchange

Wszystkie „heat pipe” zostały wymienione na nowe i po analizie efektywności pracy kolektora okazało się, że średnia sprawność użyteczna wzrosła do poziomu 93%.

Absorber w próżniowym kolektorze słonecznym (AP-30) oddzielony jest od warunków zewnętrznych próżnią wytworzoną między koncentrycznymi szklanymi rurami. Rozwiązanie takie ogranicza do minimum straty ciepła do otoczenia. Jednak zmienne warunki pogodowe powodują powstawanie naprężeń w elementach szklanych co prowadzi do pęknięć i utraty szczelności, a w konsekwencji do obniżenia efektywności pracy kolektora. Ponadto ujemne temperatury powodują zamarzanie wody w „ciepłych rurkach” powodując ich zniszczenie. Nieprawidłowości związane z nieszczelnością szklanych rur nie zawsze da się dostrzec poprzez powierzchowną obserwację – konieczny jest wówczas demontaż poszczególnych elementów kolektora. Trudniejsze do wykrycia jest uszkodzenie „ciepłej rurki”, która dopiero po wyjęciu z kolektora może być zdiagnozowana. Wymienione powyżej czynniki obniżają wartości parametrów charakteryzujących pracę kolektora słonecznego. Można to ocenić na podstawie porównania parametrów poprawnie działającego kolektora z wynikami, które dają podstawę do stwierdzenia, że niektóre elementy kolektora nie pracują poprawnie. Przykładem tego może być zastosowanie obrazu termowizyjnego w diagnostyce elementów kolektora słonecznego. Metoda szczególnie przydatna w trudno dostępnych miejscach. Na rysunku 7 przedstawiono dwa obrazy badanego kolektora próżniowego. Jeden pochodzi z kamery termowizyjnej, a drugi z aparatu cyfrowego. Na obrazie termowizyjnym z łatwością zlokalizowano elementy szklane o wyższej temperaturze. Temperatura zewnętrzna rur bez poróżni była od 7 do 8°C wyższa w porównaniu do pozostałych sprawnych technicznie.



Rys. 7. Obrazy w zakresach: termowizyjnym i widzialnym kolektora AP-30 z uszkodzonymi dwoma rurami szklanymi

Fig. 7. Images in thermovision and visible range of the AP-30 collector with two glass pipes damaged

Czasami z pomocą mogą przyjść warunki pogodowe, które w specyficzny sposób umożliwiają postawienie podobnej diagnozy jak przy użyciu zaawansowanej techniki. Wówczas brak izolacji powoduje szybsze topnienie szronu na szklanych rurkach.

Wnioski

1. Uzysk ciepła z kolektora AP-30 po 1,5 rocznej eksploatacji (dwa okresy zimowe) był niższy średnio o około 40% w porównaniu do jego pracy po wymianie „ciepłych rurek”.
2. Średnia zmienność różnic między ciepłem dostępnym z promieniowania słonecznego i uzyskanym z kolektora słonecznego przed i po wymianie „heat pipe” wyniosła około $1 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.
3. Sprawność użyteczna przed wymianą elementów roboczych kolektora oscylowała wokół 55% , a po ich wymianie była na poziomie 93%.
4. Średnie wartości sprawności użytecznej kolektora próżniowego AP-30 dla wybranych miesięcy (IX, X, XI) w latach 2006, 2007 i 2008 zmieniły się od 72% do 93%.
5. Ocenę poprawnej izolacji elementów szklanych wykonać można na podstawie analizy obrazu termowizyjnego kolektora próżniowego.

Bibliografia

- Abu-Zour A.M. et al. 2006. New design of solar collector integrated into solar louvers for efficient heat transfer. *Applied Thermal Engineering* 26, pp. 1876-1882.
- Esen M. 2004. Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants. *Solar Energy* 76, pp. 751-757.
- Faghri A. 1995. *Heat-pipe Science and Technology*, Taylor and Francis, UK.

THE IMPACT OF EXTERNAL CLIMATIC CONDITIONS ON WORK EFFICIENCY OF VACUUM TUBE SOLAR COLLECTOR

Abstract. The absorber in a vacuum tube solar collector is separated from external conditions by vacuum generated between concentric glass pipes. This solution reduces to minimum the losses resulting from heat escape to environment. Nevertheless, changeable weather conditions generate stresses in glass elements, which leads to cracking and loss of tightness, and as a consequence to reduction of vacuum collector work efficiency. On the other hand, negative temperatures bring about water freezing in “heat pipes”, which consequently damages them. Both glass elements and “heat pipes” get damaged independently. Unfortunately, it is not always possible to see these anomalies by casual observation – it is necessary to disassemble individual collector elements. Vacuum tube may crack in the area where it enters collector divider (invisible area). “Heat pipe” defect is harder to find, because it may be diagnosed only after it has been taken out of the collector. The above-mentioned factors reduce values of parameters characterising solar collector operation. Comparing this data to the parameters of correctly working collector provides grounds for the replacement of damaged elements. Moreover, the work presents thermovision image use in diagnostics of solar collector elements.

Key words: vacuum tube solar collector, collector efficiency, climatic conditions

Adres do korespondencji:

Hubert Latała; e-mail: Hubert.Latala@ur.krakow.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków