

TERMOWIZYJNE BADANIA PŁASKICH KOLEKTORÓW CIECZOWYCH

CZEŚĆ II. ANALIZA ROZKŁADU TEMPERATURY NA PŁASZCZYŹNIE ABSORBERA PŁASKIEGO KOLEKTORA SŁONECZNEGO

P. Obstawski

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii Produkcji, Polska

STRESZCZENIE

W warunkach eksploatacyjnych płaski kolektor słoneczny na skutek oddziaływania stochastycznych zakłóceń znajduje się w stanach nieustalonych. Do analizy stanów przejściowych często wykorzystuje się liniowe równania różniczkowe wyprowadzone z bilansu energetycznego kolektora dokonując pewnych założeń i uproszczeń. Najczęściej założenia te dotyczą budowy kolektora słonecznego. Płaski kolektor cieczowy traktowany jest jako ciało jednorodne bądź jako ciało o parametrach rozłożonych (pokrywa szklana, absorber, medium robocze). W wyniku analizy stanów termicznych otrzymywane są temperatury poszczególnych ośrodków.

W niniejszym artykule zaprezentowano metodę pomiaru temperatury absorbera i medium roboczego w warunkach eksploatacyjnych przy wykorzystaniu technik termowizyjnych. Do sterowania pracą segmentu słonecznego zastosowano regulator różnicowy zaimplementowany w sterowniku PLC.

WSTĘP

Projektując hybrydowy system zasilania energią cieplną zawsze dokonuje się założeń projektowych, które powinny być spełnione podczas eksploatacji systemu. Założenia te dotyczą rozmiarów poszczególnych segmentów systemu, które uzależnione są od wielu czynników min od: dobowego zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową, lokalizacji obiektu itp. Projektując system ważnym jest by nie przewymiarować pod względem wielkości jego poszczególnych segmentów, gdyż może to skutkować np.: w przypadku instalacji słonecznej przegrzewem i w rezultacie jej zniszczeniem. W przypadku niedoszacowania pod względem wielkości, system nie sprostą wymaganiom odbiorców.

Najczęściej w warunkach Polski podstawowym segmentem systemu hybrydowego jest segment słoneczny złożony z płaskich kolektorów cieczowych (Czekalski D., Obstawski P., 2006). Do projektowania instalacji słonecznych można wykorzystać programy komputerowe umożliwiające kompleksowe zaprojektowanie instalacji, jednakże nie umożliwiają one diagnostyki istniejącego już systemu. Zazwyczaj ich wadą jest brak możliwości symulacji pracy instalacji przy zaplanowanym zarówno pod względem wielkości i czasu trwania rozbioru ciepłej wody użytkowej oraz okresowej zmiany dawki natężenia promieniowania słonecznego. W większości

programów należy zadeklarować średnie dobowe zużycie ciepłej wody użytkowej i podać lokalizację instalacji, według której program automatycznie dokonuje oszacowania rocznych zasobów energii słonecznej. Takie podejście może być jedynie słuszne dla małych instalacji słonecznych np.: zasilających w energię domki jednorodzinne. W przypadku instalacji wielkoskalowych np.: zasilających w energię cieplną budynki hotelowe taka metodyka nie jest adekwatna, chociażby ze względu na fakt, że obciążenie hotelu jest zazwyczaj zmienne w ciągu całego roku.

Do modelowania pracy instalacji słonecznych coraz częściej wykorzystywane są nowoczesne narzędzia takie jak identyfikacja parametryczna (Chochowski A., Obstawski P., 2005), czy sieci neuronowe (Kalogirou S. A., 2006), jednakże również często stosowane są modele segmentów słonecznych oparte o analizę termiczną płaskiego kolektora słonecznego.

Analiza stanów termicznych płaskiego kolektora słonecznego zazwyczaj oparta są na równaniach różniczkowych wyprowadzonych z bilansu energetycznego wynikającego z fizyki wymiany ciepła (Dziewa P., Zima W., 2009). Wydaje się, że taką formę analizy stanów termicznych płaskiego kolektora słonecznego można wykorzystać do diagnostyki pracy segmentów słonecznych w warunkach eksploatacyjnych.

Jest wiele metod analizy stanów termicznych płaskich kolektorów cieczowych, jednakże ich stosowanie zazwyczaj wymaga dokonanie pewnych założeń i uproszczenia. Najczęściej w literaturze za podstawowe równanie bilansu energetycznego podawane jest równanie HWB opracowane przez Hottela, Whillera i Blissa, traktujące płaski kolektor słoneczny jako ciało jednorodne. Przekształcenie tego równania umożliwia wyznaczenie tzw. charakterystyki sprawności kolektora cieczowego (Schnieders J., 1997). Charakterystyka sprawności traktowana jest jako kryterium umożliwiające porównywanie kolektorów różnych producentów. Jednakże należy zauważyć, że w warunkach eksploatacyjnych płaski kolektor słoneczny pracuje przy stochastycznych wymuszeniach, odmiennych niż podczas sporządzania charakterystyki sprawności, z tego też względu wartości parametrów eksploatacyjnych kolektora mogą odbiegać od wyznaczonych podczas testów sprawnościowych.

W literaturze spotyka się również analizę stanów termicznych płaskiego kolektora słonecznego, w której wyróżnia się dwa elementy składowe kolektora: pokrywę szklaną i absorber. Taka analiza zakłada, że absorber wraz z czynnikiem roboczym stanowią ciało jednorodne o wyrównanej temperaturze (Czekalski D., Mirski T., 2002).

Innym wydaje się, że najbardziej adekwatnym podejściem analizy stanów termicznych jest wyróżnienie w budowie płaskiego kolektora słonecznego trzech ośrodków jednorodnych: pokrywy szklanej, absorbera i medium roboczego. Są to modele płaskiego kolektora cieczowego o parametrach rozłożonych. Umożliwiają one w wyniku dokonanej analizy wyznaczenie przy założonej temperaturze początkowej czynnika i natężeniu promieniowania słonecznego, temperatury wyjściowej czynnika oraz temperatury pokrywy szklanej i absorbera. W celu uproszczenia interpretacji zachodzących zjawisk termicznych w modelach o parametrach rozłożonych, często stosuje się analogię termoelektryczną, która umożliwia przedstawienie płaskiego kolektora słonecznego w postaci obwodu elektrycznego nazywanego również siecią cieplną (Eisenmann W., Vajen K., 2004), (Wójcicka - Migasiuk D., Drozd D., 2005). W analogii termoelektrycznej pojemnościami cieplnymi poszczególnych ośrodków jednorodnych odpowiada pojemność elektryczna a oporom cieplnym opory elektryczne. Rozwiązaniem sieci cieplnej jest wyznaczenie temperatur poszczególnych ośrodków jednorodnych przy zadanych parametrach wejściowych w danej chwili t . Zatem zakłada się, że w danej chwili t temperatura pokrywy szklanej, absorbera oraz medium roboczego jest stała na całej powierzchni.

Niniejszy artykuł jest próbą oceny wielkości błędu popełnianego w obliczeniach przy dokonywaniu powyższych założeń.

POMIARY TERMOWIZYJNE ROZKŁADU TEMPERATUR ABSORBERA

Badania termowizyjne przeprowadzono na stanowisku złożonym z dwóch płaskich kolektorów cieczowych zasilających w energię cieplną zasobnik o objętości 100dm^3 . Celem niniejszych badań przeprowadzonych podczas pracy kolektorów słonecznych przy zaimplementowanym w sterowniku PLC algorytmie regulatora różnicowego była rejestracja rozkładu temperatur na powierzchni absorbera i węzownicy. Algorytm regulacji różnicowej jest standardowym algorytmem implementowanym w regulatorach sterujących pracą słonecznych instalacji grzewczych. Przy takim algorytmie w pracy płaskiego cieczowego kolektora słonecznego wyróżnić można dwa charakterystyczne stany pracy: akumulację energii promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę absorbera, co odpowiada zatrzymaniu pompy cyrkulacyjnej oraz unoszenie zakumulowanej energii cieplnej poprzez medium robocze do zasobnika ciepłej wody użytkowej co odpowiada załączeniu pompy cyrkulacyjnej.

W dokonanej analizie przedstawione zostaną jedynie wybrane termogramy obrazujące charakter analizowanego zjawiska.

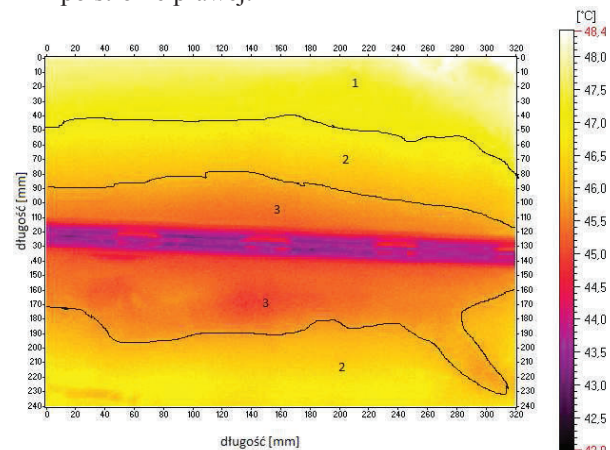
NAGRZEWANIE SIĘ ABSORBERA

Kiedy osiągnięty zostaje zadany gradient temperatur pomiędzy temperaturą czynnika w segmencie słonecznym a temperaturą w zasobniku ciepłej wody użytkowej następuje wyłączenie pompy cyrkulacyjnej. Na rysunku 1 przedstawiony został termogram rozkładu temperatur na badanej powierzchni absorbera i węzownicy bezpośrednio po zatrzymaniu pompy cyrkulacyjnej.

Traktując węzownicę jako oś symetrii, rozkład temperatur na badanej powierzchni powinien być symetryczny względem węzownicy. Jak wynika z termogramu (rys. 1) rozkład temperatur na powierzchni absorbera nie jest symetryczny względem węzownicy. Na analizowanym termogramie można wyróżnić trzy obszary zróżnicowane pod względem temperatury jak i powierzchni (oszacowano na podstawie palety kolorów).

W obszarze oznaczony numerem 1 o szerokości około 50 mm występują najwyższe temperatury zawierające się w przedziale $47,0^{\circ}\text{C} - 47,4^{\circ}\text{C}$. Obszar ten znajduje się jedynie powyżej węzownicy.

W obszarze drugim występują temperatury w przedziale $46,0^{\circ}\text{C} - 46,9^{\circ}\text{C}$. Obszar ten znajduje zarówno powyżej jak i poniżej węzownicy, aczkolwiek jego położenie względem węzownicy nie jest symetryczne. Szerokość obszaru drugiego powyżej węzownicy zawiera się w przedziale od 30 mm po stronie lewej termogramu do 50 mm po stronie prawej. Poniżej węzownicy kształt obszaru drugiego jest dość nieregularny, a jego szerokość zawiera się w przedziale od 50 mm po stronie lewej do około 60 mm po stronie prawej.



Rys. 1. Rozkład temperatur przy wyłączonej pompie cyrkulacyjnej

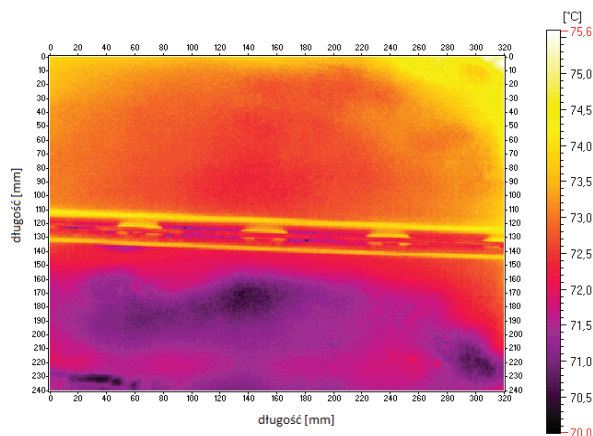
Trzeci obszar powierzchni absorbera o najniższych temperaturach zawartych w przedziale $45,9^{\circ}\text{C} - 45,0^{\circ}\text{C}$ znajduje się najbliżej węzownicy. Dla tego obszaru podobnie jak w przypadkach poprzednich węzownica nie stanowi osi symetrii. Szerokość tego obszaru powyżej węzownicy zawiera się w granicach 30 mm po stronie lewej termogramu, do 20 mm po stronie prawej.

Poniżej węzownicy szerokość obszaru trzeciego jest znacznie większa i wynosi: od strony lewej 60 mm, po stronie prawej 40mm.

Jak wynika z dokonanej analizy rozkład temperatury na powierzchni absorbera jest nierównomierny. Nierównomierny jest również rozkład temperatury na powierzchni węzownicy. Temperatura na powierzchni węzownicy waha się od 43,2°C do 44,7°C. Jak wynika z termogramu najwyższa temperatura na powierzchni węzownicy występuje na spoinach łączących absorber z węzownicą.

Na rysunku 2 zaprezentowano termogram wykonany po 270 sekundach od wyłączenia pompy cyrkulacyjnej.

Jak wynika z termogramu (rys. 2) po w miarę upływu czasu po zatrzymaniu pompy cyrkulacyjnej temperatura absorbera wzrasta (następuje akumulacja energii), jednakże jej rozkład na całej badanej płaszczyźnie nadal jest nierównomierny, aczkolwiek w porównaniu z termogramem (rys. 1) jest odmienny.



Rys. 2. Rozkład temperatur przy wyłączonej pompie cyrkulacyjnej

Temperatury na badanej powierzchni absorbera zawierają się w przedziale od 70,8°C do 75,7°C. W analizowanym przypadku znacznie wyższy poziom oraz bardziej równomierny rozkład temperatur występuje na powierzchni absorbera znajdującej się powyżej węzownicy. W porównaniu z rozkładem temperatur zaprezentowanym na rys. 1 poziom temperatury absorbera powyżej węzownicy jest bardzo wyrównany zawiera się w przedziale 72,5°C a 75,1°C. Rozkład temperatury absorbera poniżej węzownicy jest bardzo nierównomierny w porównaniu z poprzednio analizowanym termogramem. Poziom temperatur w porównaniu z temperaturą absorbera powyżej węzownicy jest znacznie niższy, średnio o 2°C. Zawiera się on w przedziale 70,2°C a 73,0 °C. Prawdopodobnie nierównomierność rozkładu temperatur wynika z budowy siatki krystalicznej materiału z którego wykonany jest absorber.

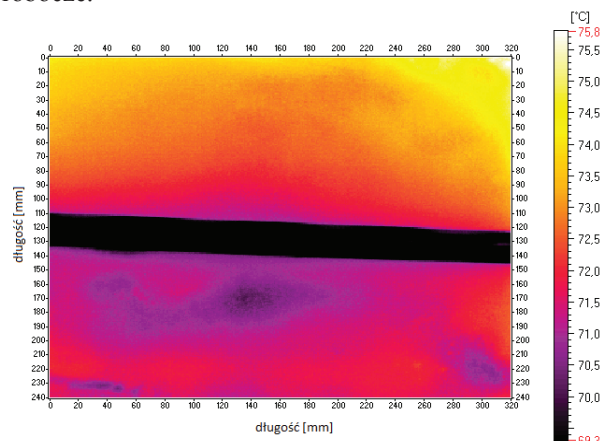
Nierównomierny rozkład temperatur tak jak w poprzednio analizowanym przypadku można również zaobserwować na powierzchni węzownicy. Najwyższy poziom temperatur występuje na krawędziach węzownicy oraz na spawach i wynosi on pomiędzy 73,2 °C -73,5°C . Najniższe wartości

temperatur występują na punktowo na środku węzownicy i wynoszą 70,5 – 71,1 °C.

WŁĄCZENIE POMPY CYRKULACYJNEJ

Włączenie pompy cyrkulacyjnej powoduje wymuszony przepływ czynnika przez instalację hydrauliczną co w rezultacie powoduje natychmiastowy spadek temperatury węzownicy z 72,3°C do temperatury 66 °C (rys. 3). Należy zauważyć, że rozkład temperatury na powierzchni węzownicy wyrównuje się, zatem ciepło jest odbierane równomiernie przez czynnik z całej powierzchni węzownicy. Rozkład temperatur na powierzchni absorbera nadal jest nierównomierny. Na granicy styku węzownicy i absorbera można wyróżnić pasmo szerokości 2-8 mm o znacznie niższej temperaturze niż pozostała powierzchnia absorbera. Świadczy to o przejmowaniu zakumulowanej energii cieplnej przez czynnik.

Na rysunku 4 przedstawiono termogram wykonany po upływie 10 sekund od włączenia pompy cyrkulacyjnej. Z termogramu wynika, że rozkład temperatur absorbera po obu stronach węzownicy jest identyczny, a więc węzownicę można w tym przypadku traktować jako oś symetrii. Świadczy to o równomiernym odbieraniu zakumulowanej energii cieplnej z całej powierzchni absorbera przez medium robocze.

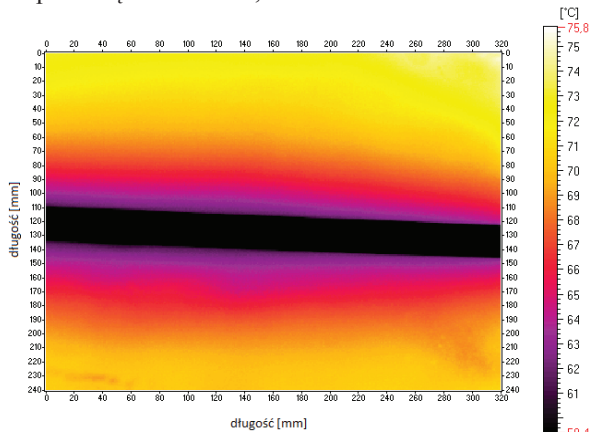


Rys. 3. Rozkład temperatur przy włączonej pompie cyrkulacyjnej

Na analizowanym termogramie podobnie jak na termogramie przedstawionym na rysunku 1 wyróżnić można kilka obszarów zróżnicowanych pod względem temperatury. W obszarze pierwszym znajdującym się najbliżej węzownicy o szerokości około 10 mm poziom temperatur zawiera się w granicach 61,0-63,7°C. W obszarze drugim, o szerokości około 15 mm temperatura absorbera waha się w granicach od 63,8-65,6. Obszar trzeci na analizowanym termogramie o szerokości około 25 mm charakteryzuje się poziomem temperatur zawierających się w przedziale od 65,7-69,5°C. Obszar czwarty na analizowanym termogramie o szerokości około 55 mm charakteryzuje się najwyższym poziomem temperatur zawierających się w przedziale od 65,7-69,5°C. Z analizowanego

termogramu wynika, że gradient pomiędzy najwyższą a najniższą temperaturą absorbera wynosi $8,5^{\circ}\text{C}$.

Temperatura wężownicy kształtowała się na poziomie $52,5^{\circ}\text{C}$, co daje gradient pomiędzy najniższą temperaturą absorbera $8,5^{\circ}\text{C}$.



Rys. 4. Rozkład temperatur po upływie 10 sekund od włączenia pompy cyrkulacyjnej

WNIOSKI

Niniejsza analiza termiczna segmentu słonecznego przeprowadzona została w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych przy zaimplementowanym standardowym algorytmie sterowania różnicowego, w którym wyróżnić można dwa zasadnicze stany pracy: włączenie lub wyłączenie pompy cyrkulacyjnej. Stany pracy pompy cyrkulacyjnej zależne są od gradientu temperatury pomiędzy temperaturą w zasobniku ciepłej wody użytkowej oraz czynnika w instalacji słonecznej.

Jak wynika z przeprowadzonych badań poziom oraz rozkład temperatury na powierzchni absorbera jak i wężownicy w stanach nieustalonych (nominalnych w warunkach eksploatacyjnych) jest nierównomierny i w dużej mierze zmienia się w zależności od stanu pracy pompy cyrkulacyjnej. Dokonując zatem analizy stanów nieustalonych płaskiego kolektora słonecznego metodą opartą na bilansie energetycznym kolektora, przy założeniu że temperatura czynnika i absorbera są sobie równe popełnia się znaczny błąd, gdyż jak wynika z przedstawionych termogramów temperatury obu ciał jednorodnych kształtują się na różnych poziomach i w skrajnym przypadku (włączenie pompy

cyrkulacyjnej rys. 3) obliczony gradient temperatur wynosi nawet 17°C .

W przypadku dokonywania analizy stanów termicznych płaskiego kolektora słonecznego przy wyróżnieniu w jego budowie trzech ciał jednorodnych analiza będzie słuszna pod warunkiem zdefiniowania temperatury absorbera. Logicznym założeniem jest, że wyznaczana z modelu temperatura absorbera rozumiana jest jako np.: maksymalna temperatura absorbera na termogramie.

LITERATURA CYTOWANA

Chochowski A., Obstawski P., *Model parametryczny baterii kolektorów słonecznych*. Inżynieria Rolnicza Nr 14/2005

Czekalski D., Obstawski P., *Wydajność hybrydowego systemu pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych w warunkach eksploatacyjnych*. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja. Nr 2/2006

Czekalski D., Mirski T., *Eksploatacyjne aspekty dynamiki nagrzewania w instalacji słonecznej*. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja. Nr 4/2002

Dziewa Piotr, Zima W., *Badania i modelowanie dynamiki cieczowego kolektora słonecznego*. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja 12/2009

Eisenmann W., Vajen K., Ackermann H.: *On the correlations between efficiency factor and material content of parallel flow flat-plate solar collectors*. Solar energy, Vol. 76, 2004

Schnieders J., *Comparison of the energy Yield predictions of stationary and dynamic solar collector models and the models' accuracy in the description of a vacuum tube collector*. Solar Energy. Vol. 61/ 1997

Kalogirou S. A., *Prediction of Flat-plate collector performance parameters using artificial neural networks*. Solar Energy. Vol. 80/2006

Wójcicka-Migasiuk D., Drozd D., *Zastępcza sieć cieplna*. Czysta energia. Nr 12/2005