

Analiza dobowej sprawności pracy autonomicznej instalacji solarnej

Streszczenie. Celem niniejszej pracy było wyznaczenie charakterystyk sprawności płaskiego kolektora cieczowego typu KSC – AE/200S i modułu fotowoltaicznego typu SF 50, co było niezbędne do wyznaczenia sprawności autonomicznego układu do c.w.u., który wspólnie tworzą oba te urządzenia. W pierwszej części zestawiono wyniki prowadzonych pomiarów w postaci wykresów opisujących wpływ natężenia promieniowania słonecznego, temperatury otoczenia, wydatku masowego czynnika roboczego i średniej temperatury kolektora na przebieg krzywej sprawności urządzeń oraz całego badanego układu. Właściwa część opracowania przedstawia wyniki, w których określono istotność wpływu analizowanych parametrów na sprawność układu oraz ocenę wartości tejże sprawności. Z wykonanych analiz wynika, że jeśli energia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni kolektora jest powyżej $1,75 \text{ kWh/m}^2$ to przeciętna dobową jego sprawność pracy w układzie autonomicznym waha się w granicach od 60 do 77%. Natomiast przy sprzyjających warunkach tj. energii słonecznej wynoszącej powyżej 3 kWh/m^2 dobową sprawność autonomicznego układu solarnego obniża się do poziomu od 11 do 26%. To niekorzystne zjawisko wynika z faktu, iż badany układ nie miał możliwości oddawania ciepła.

Abstract. The purpose of this work was to determine the performance characteristics of a flat liquid collector type KSC - AE/200S and an SF 50 photovoltaic module, which was necessary to calculate the efficiency of the autonomous system to the heat source, which together form both these devices. The first part presents the results of the measurements carried out in the form of diagrams describing the effect of solar radiation intensity, ambient temperature, mass flow factor and average collector temperature on the curve of device efficiency and the entire system under examination. The relevant part of the study presents results, in which the significance of the influence of the analyzed parameters on the efficiency of the system and the assessment of the value of this efficiency were determined. The analyzes show that if the solar radiation energy reaching the collector surface is above 1.75 kWh/m^2 , the average daily work efficiency in the autonomous system varies within 60 to 77%. However, with favorable conditions, i.e. solar energy exceeding 3 kWh/m^2 , the daily efficiency of the autonomous solar system decreases to the level of 11 to 26%. This unfavorable phenomenon results from the fact that the tested system did not have the possibility of giving up heat. (**Analysis of the daily work efficiency of an autonomous solar installation**).

Słowa kluczowe: fotoogniwo, konwersja, kolektor słoneczny, sprawność.

Keywords: photovoltaic, conversion, solar collector, efficiency.

Wstęp

Kolektory słoneczne znajdują zastosowanie najczęściej do podgrzewania ciepłej wody w mieszkaniach, domkach letniskowych, obiektach sportowych, budynkach gospodarczych a także do podgrzewania wody w zbiornikach, basenach.

Warunki klimatyczne w Polsce ze względu na położenie są bardzo specyficzne. Położenie Polski mieści się w strefie klimatu umiarkowanego, co daje ok. $950\text{-}1250 \text{ kWh/m}^2$ nasłonecznienia. Badania IMiGW wykazały, że największe nasłonecznienie występuje na południu oraz środkowo-wschodniej części Polski natomiast niekorzystne warunki panują w części południowej oraz Górnośląskim Okręgu Przemysłowym [1].

Zdecydowanie większa część rocznego nasłonecznienia przypada w sezonie letnim w miesiącach od kwietnia do września. Usłonecznienie zależne jest od wielu czynników takich jak długość dnia, temperatura powietrza, zachmurzenie a także lokalizacja. Dla polski średnie usłonecznienie wynosi 1600 godzin, największą ilością godzin słonecznych ma Gdynia występuje tam 1671 godzin słonecznych w roku. Dla porównania Katowice to 1234 godzin na rok [1,2].

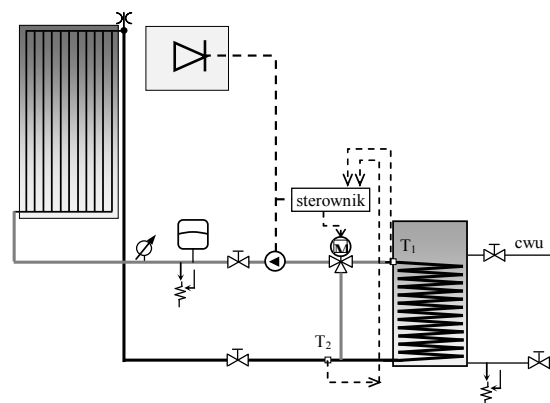
Wymienione parametry (nasłonecznienie i usłonecznienie) mają decydujący wpływ na efektywność konwersji energii w instalacjach solarnych. Są to zmienne charakterystyczne dla danej lokalizacji i niestety nie mamy wpływu na ich wielkość [3]. W celu zwiększenia stopnia wykorzystania dostępnej energii podejmowane są liczne próby w zakresie modyfikacji urządzeń, w którym następuje konwersja energii jak i w zakresie budowy całej instalacji [4,6,7,11,12]. W dalsze części pracy będą prezentowane wyniki dotyczące sprawności konwersji energii w autonomicznej instalacji solarnej.

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest wyznaczenie dobowej sprawności autonomicznej instalacji solarnej pracującej w układzie wspomaganego przygotowania ciepłej wody użytkowej. Analiza oraz obliczenia będą przeprowadzone w określonym przedziale czasowym nie mniejszym niż okres tygodnia. Przeprowadzona analiza będzie obejmować parametry otoczenia, w których pracuje instalacja solarna, parametry samej instalacji, oraz bilansowanie energii na podstawie gęstości strumienia ciepła w dwóch punktach tj. na poziomie kolektora słonecznego i zasobnika. Sprawność zostanie wyznaczona na podstawie bilansu ciepła przy odniesieniu do energii słonecznej padającej na powierzchnię tego kolektora.

Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze było zlokalizowane na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego z układem pomiarowym [Knaga 2013]

Składało się ono z kolektor słonecznego i modułu fotowoltaicznego, które były zamocowane na wspólnej konstrukcji umieszczonej na maszcie o wysokości 7 m oraz zasobnika ciepłej wody użytkowej o pojemności 120 dm³ wraz z instalacją hydrauliczną. W skład instalacji hydraulicznej były włączone dwie pompy obiegowe (Rys. 1), jedna z nich była napięta stałego a druga klasyczna napięcia przemiennego. Pompy te pracują w układzie hydraulicznym równoległym. Każda z nich może pracować niezależnie. Praca pompy obiegowej napięcia stałego uniemożliwia pracę pompy klasycznej napięcia przemiennego i na odwrót. Pompa obiegowa DC, jest zasilana bezpośrednio z modułu fotowoltaicznego FS-52, poprzez układ pomiarowy oparty na bezpośrednim pomiarze prądu i napięcia stałego. Bezpośrednio z modułu fotowoltaicznego jest zasilany również układ sterowania obiegiem czynnika roboczego.

Podstawowym elementem funkcjonalnym układu hydraulicznego badawczej instalacji solarnej jest zawór trójdrogowy, który zainstalowano tuż przy zasobniku, co utworzyło bajpas. Układ hydrauliczny, przenoszący ciepło, został w ten sposób podzielony na dwa obwody ciepłne. Obwód „mały”, obejmujący płaski kolektor układ hydrauliczny bajpasu, oraz „duży”, stanowiący typowym obwód ciepłnym.

Metoda badań

Przepływ energii zaabsorbowanej w kolektorze słonecznym do zasobnika ciepłej wody użytkowej był monitorowany w dwóch punktach. Pierwszy punkt pomiaru energii jest tuż przy kolektorze słonecznym i określa ilość ciepła wyprowadzoną z absorbera, a drugim punktem pomiaru jest moc oddawana do zasobnika ciepłej wody użytkowej. Takie ułożenie punktów pomiarowych pozwala na analizę ciepła przepływającego przez trzy elementy tj. kolektor słoneczny, układ hydrauliczny i zasobnik c.w.u.

Sprawność konwekcji promieniowania słonecznego przez kolektor słoneczny wyznaczono po scałkowaniu zależności 1:

$$(1) \quad \eta_k = \frac{\int P_k dt}{\int I_\beta \cdot A_p dt}$$

gdzie: I_β – natężenie promieniowania słonecznego (W/m²), A_p – powierzchnia czynna absorbera (m²), P_k – moc ciepła wyprowadzona z kolektora słonecznego (W).

Natomiast sprawność na poziomie zasobnika ciepłej wody użytkowej wyznaczono na podstawie zależności:

$$(2) \quad \eta_{cwu} = \frac{\int P_{cwu} dt}{\int I_\beta \cdot A_p dt}$$

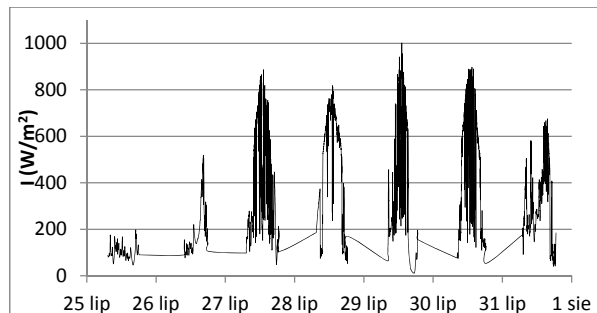
gdzie: I_β – natężenie promieniowania słonecznego (W/m²), A_p – powierzchnia czynna absorbera (m²), P_{cwu} – moc ciepła oddana do zasobnika ciepłej wody użytkowej (W).

W zbiorniku ciepła wyposażonym w nieosłonięty wymiennik węzłownicy zachodzi zjawisko pełnego mieszania, co spowoduje wyrównanie się temperatury w całej objętości tego zasobnika [9]. Zjawisko mieszania jest tym silniejsze, im niżej jest wprowadzona moc dostarczana do zasobnika ciepłej wody użytkowej.

Wyniki badań

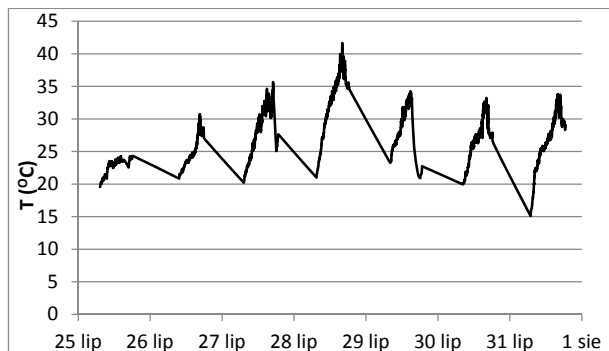
Dane surowe, zarejestrowane z dużą częstotliwością wynoszącą 0,5 Hz zostały wstępnie obrobione – przygotowane do analizy. Takie dane zostały uśrednione do czasu trwania impulsu z przepływomierza. Oznacza to że uśrednianie było realizowane w zmiennym przedziale czasu wynikającym z okresu przepompowania przez pompę obiegową stałej objętości czynnika roboczego wynoszącym

2,5 dm³. Postępując się danymi uśrednionymi sporządzono graficzną analizę parametrów pracy autonomicznej instalacji solarnej [10]. Do analizy szczegółowej wybrano tylko okres tygodnia, a sprawność tej instalacji wyznaczono w odniesieniu do doby. Analizę rozpoczęto od obserwacji parametrów zewnętrznych takich jak natężenie promieniowania słonecznego (rys. 2) i temperatura otoczenia (rys. 3) w której pracowała instalacja autonomiczna.

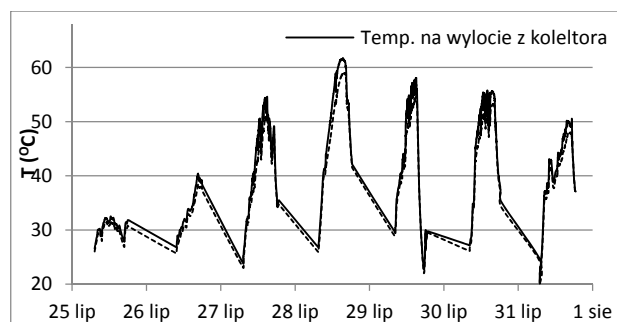


Rysunek 2. Przebieg zmian natężenia promieniowania słonecznego w badanym przedziale czasowym

W analizowanym okresie czasu promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni płaskiego kolektora słonecznego charakteryzowało się dużą dynamiką. W pierwszym dniu poddanym analizie zaobserwowano całkowite zachmurzenie, z maksymalną gęstością strumienia energii słonecznej na poziomie 150 W/m². W kolejnych dniach analizowanego czasookresu zwiększa się ilość promieniowania docierającego do kolektorów. Wśród obserwowanych dni jest też dzień 27 lipiec z idealną słoneczną pogodą, ale bez maksymalnych gęstości strumienia energii słonecznej. Natomiast największe gęstości promieniowania słonecznego obserwujemy w dniach o dużej zmienności np. 29 lipca, gdzie strumień osiągnął wartość 1030 W/m².



Rys. 3. Przebieg zmian temperatury otoczenia w badanym przedziale czasowym

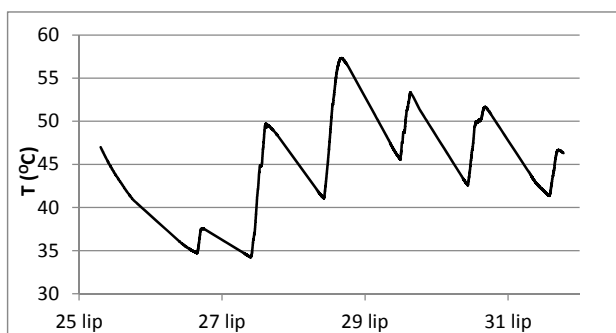


Rys. 4. Przebieg zmian temperatury na wyjściu i wejściu do płaskiego kolektora słonecznego w badanym przedziale czasowym

W badanym okresie można stwierdzić, iż temperatura otoczenia jest wysoka i zawiera się w przedziale od 20 do 40 °C, co sprzyja pracy instalacji.

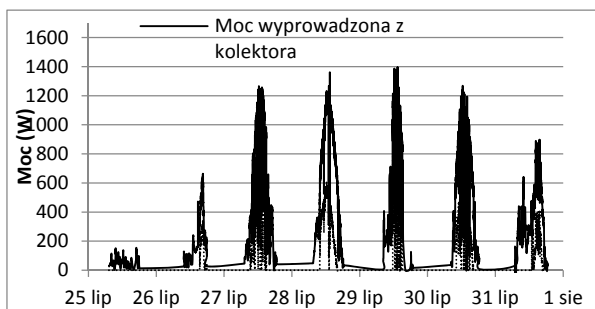
Następnie analizę przeprowadzono dla bezpośrednio rejestrowanych parametrów pracy instalacji solarnej tj. temperatury na wyjściu i wejściu kolektora słonecznego (rys. 4), oraz temperatury w zasobniku ciepłej wody użytkowej (rys. 5).

Z rysunku 4 można zauważyć, iż w okresie dnia tzn. przy docierającym promieniowaniu słonecznym nawet o stosunkowo niskiej jego wartości kolektor słoneczny absorbuje to promieniowanie o czym świadczy wyższa temperatura na wyjściu niż wejściu. Dość ciekawe jest zachowanie się autonomicznej instalacji, która generuje ciepło na poziomie kolektora, nawet przy promieniowaniu słonecznym poniżej 200 W/m², co w klasycznych rozwiązaniach jest nie możliwe. Jednak ciepło generowane przy tak niskim strumieniu energii słonecznej nie jest oddawane do zasobnika, ponieważ temperatura w nim jest wyższa niż temperatura na wyjściu z kolektora (rys. 5).



Rys. 5. Przebieg zmian temperatury w zasobniku ciepłej wody użytkowej

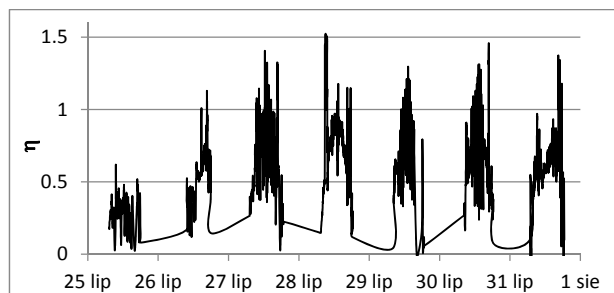
W analizowanym okresie temperatura w zasobniku c.w.u. jest stosunkowo wysoka i waha się w zakresie od 35 do 57 °C. Ciepło z zasobnika powinno być rozładowane, ponieważ wysoka temperatura w magazynie ciepła jest niekorzystna dla poprawnej i efektywnej pracy termicznej instalacji solarnej.



Rys. 6. Przebieg mocy generowanej przez płaski kolektor słoneczny i mocy oddawanej do zasobnika zasobniku ciepłej wody użytkowej

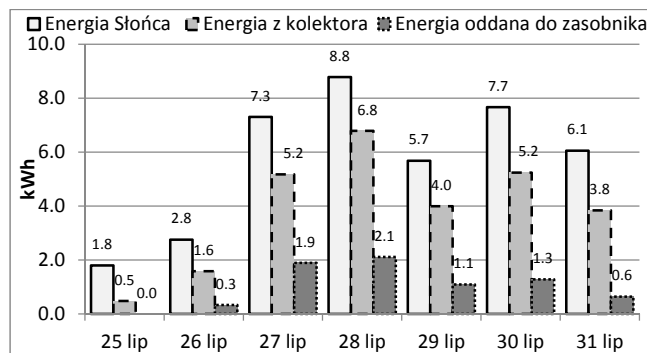
W dalszej części analizy określono gęstości strumienia ciepła na poziomie kolektora słonecznego, oraz zasobnika ciepłej wody użytkowej. Efekty tych obliczeń przedstawiono na wykresie (rys. 6). Moc generowana przez płaski kolektor słoneczny o powierzchni czynnej 1,73 m² w sprzyjających warunkach (gęstość strumienia energii słonecznej na poziomie 800 W/m²) kształtuje się na poziomie 1200 – 1400 W. Taka wartość mocy jest zadowalająca i można stwierdzić, iż kolektor pracuje poprawnie. Jednakże moc oddana do zasobnika jest o ponad 50% mniejsza (linia żółta rys. 6) co jest związane z stosunkowo wysoką temperaturą w zasobniku, a tym samym temperaturą pracy

autonomicznego układu solarnego, oraz jakością wykonanej izolacji na układzie hydraulicznym łączącym zasobnik z kolektorem słonecznym.



Rys. 7. Przebieg sprawności mocy generowanej przez płaski kolektor słoneczny

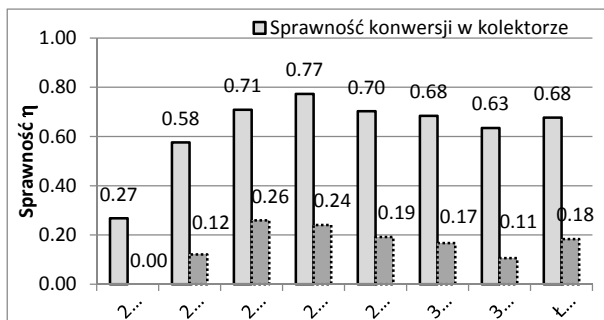
Następnym etapem jest analiza chwilowej sprawności autonomicznego układu solarnego co zostało przedstawione na rysunku 7. Na tym etapie analiza sprawności została ograniczona tylko do sprawności kolektora słonecznego, ponieważ przebieg tego parametru charakteryzuje się dużą zmiennością związaną z znaczną bezwładnością układów cieplnych. W wyniku działania tych czynników sprawność chwilowa waha się w granicach od 0,05 do 1,5 w pik. Najmniejsze wahania sprawności są w pierwszym dniu obserwacji, gdzie energia słoneczna docierająca do powierzchni kolektora kształtowała się na poziomie 150 W/m².



Rys. 8. Dobowa energia promieniowania słonecznego na powierzchni kolektora, energia wyprowadzone z kolektora, energia oddana do zasobnika ciepłej wody użytkowej

Energia promieniowania słonecznego, energia wyprowadzona z kolektora i energia oddana do zasobnika ciepłej wody użytkowej została wyznaczona po scałkowaniu chwilowej mocy na każdym poziomie w zakresie gęstości strumienia energii słonecznej od 100 do 1030 W/m². Taka wartość minimalnej gęstości strumienia energii słonecznej jest podyktowana tym, iż pompa obiegowa napięcia stałego przy takim strumieniu zaczyna pracować. Ilość energii wyprowadzona z kolektora słonecznego jest mniejsza o przeciętnie 2,2 kWh do energii słonecznej docierającej do jego powierzchni przy sprzyjających warunkach tj. przy energii słonecznej powyżej 5 kWh na dobę. Przy energii słonecznej na poziomie poniżej 3 kWh padającej na powierzchnię kolektora energia wyprowadzona z kolektora jest mniejsza o 1,2 kWh. Natomiast energia oddana do zasobnika jest 4 do 5 krotnie mniejsza niż energia wyprowadzona z kolektora, co wynika z stosunkowo wysokiej temperatury w zasobniku i jakości wykonanej izolacji układu hydraulicznego łączącego zasobnik z kolektorem słonecznym. Przy energii promieniowania słonecznego poniżej 2 kWh ciepło nie jest oddawane do zasobnika. Dobowe wartości energii posłużyły do wyznaczenia

sprawności kolektora słonecznego z zależności (1) i całego układu autonomicznego na podstawie zależności (2).



Rys. 9. Dobowa sprawność kolektora słonecznego oraz całego autonomicznego układu solarnego

Przeciętna dobowa sprawność kolektora słonecznego waha się w granicach do 60 do 77% przy energii słonecznej docierającej do jego powierzchni powyżej 1,75 kWh/m² w przypadku pracy kolektora w autonomicznym układzie solarnym (rys. 9). Taka stosunkowo wysoka sprawność jest możliwa tylko przy zmiennym natężeniu przepływu czynnika przez kolektor słoneczny co zapewnia w tym przypadku pompa obiegowa DC zasilana z modułu fotowoltaicznego. Natomiast jeżeli energia dobowa promieniowania słonecznego jest na poziomie 1 kWh·m⁻² to sprawność kolektora jest poniżej 30%, przy sprawności całego autonomicznego układu solarnego równej 0%. Natomiast dobowa sprawność autonomicznego układu solarnego przy sprzyjających warunkach tj. energii słonecznej wynoszącej powyżej 3 kWh/m² kształtuje się na poziomie do 11 do 26 % (rys. 9) i są to bardzo niskie wartości wynikające jedynie z tego iż badany układ jest laboratoryjny bez odbioru ciepła.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz pracy autonomicznego termicznego układu solarnego pracującego w układzie wspomagania ciepłej wody użytkowej można stwierdzić, iż jego parametry pracy są bardzo dobre na co składa się wiele czynników, do których należą:

1. Kolektor słoneczny pracujący w autonomicznej instalacji absorbuje energię słoneczną nawet przy promieniowaniu słonecznym z zakresu od 100 do 200 W/m², co w klasycznych rozwiązaniach wynosi 350 W/m².
2. Płaski kolektor słoneczny w układzie autonomicznym może pracować przy niewielkiej różnicy temperatur w zakresie od 0 do 4°C, pomiędzy wyjściem, a wejściem na kolektorze.
3. Ilość energii wyprowadzona z kolektora słonecznego jest mniejsza o przeciętnie 2,2 kWh do energii słonecznej docierającej do jego powierzchni przy sprzyjających warunkach tj. przy energii słonecznej powyżej 3 kWh/m² na dobę.
4. Przeciętna dobowa sprawność kolektora słonecznego pracującego w autonomicznej instalacji waha się w granicach do 60 do 77% przy energii słonecznej docierającej do jego powierzchni powyżej 1,75 kWh/m².
5. Dobowa sprawność autonomicznego układu solarnego przy sprzyjających warunkach tj. energii słonecznej wynoszącej powyżej 3 kWh/m² kształtuje się na poziomie

do 11 do 26 % (rys. 9) i są to bardzo niskie wartości wynikające jedynie z tego iż badany układ jest laboratoryjny i bez odbioru ciepła.

Autorzy: dr hab. inż. Jarosław Knaga, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: jaroslaw.knaga@urk.edu.pl; dr inż. Krzysztof Nęcka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: krzysztof.nECKA@urk.edu.pl; Prof. dr inż. Kazimierz Rutkowski, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: kazimierz.rutkowski@urk.edu.pl;

LITERATURA

- [1] J. Dobriański. Wymiana ciepła w instalacjach słonecznych z płaskimi kolektorami, Wydawnictwo Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, 2009.
- [2] Krzysztof NĘCKA, Stanisław LIS, Tomasz DRÓZDŹ, Maciej OZIEMBLÓWSKI, Paweł KIEŁBASA, Marcin TOMASIK, Marek OSTAFIN, Piotr NAWARA. Charakterystyka pracy siłowni fotowoltaicznej w zmiennych warunkach meteorologicznych. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 92 NR 12/2016, pp. 105–108. doi.org/10.15199/48.2016.12.27.
- [3] P. Matuszczyk, T. Popławski, J. Flaszka. Potencjał i możliwości energii promieniowania elektromagnetycznego Słońca. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 91 NR 1/2015, pp. 183–187. doi:10.15199/48.2015.01.41
- [4] J. Bieranowski, D. Chludziński, Ł. Gajo, Projekt i analiza techniczno ekonomiczna hybrydowego systemu energetycznego z długoterminowym magazynem ciepła dla budownictwa jednorodzinne. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 2/2018, pp. 174 – 17, doi:10.15199/48.2018.02.40
- [5] M. M. A. Khan, N. Ibrahim, I.M.Mahbulbul Hafiz Muhammad. AlicR.Saidur, Fahad A.Al-Sulaiman. Evaluation of solar collector designs with integrated latent heat thermal energy storage: A review, Solar Energy Volume 166, 15 May 2018, Pages 334-350, doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.014
- [6] A. K. Hussein, Applications of nanotechnology to improve the performance of solar collectors – Recent advances and overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 62, September 2016, Pages 767-792, doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.050
- [7] A. A. Minea, W. M. El-Maghlany, Influence of hybrid nanofluids on the performance of parabolic trough collectors in solar thermal systems: Recent findings and numerical comparison, Renewable Energy Volume 120, May 2018, Pages 350-364, doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.093
- [8] J. Knaga. Modelowanie transferu energii elektrycznej i ciepła w małych autonomicznych układach solarnych. Inżynieria Rolnicza, 2013.
- [9] Z. Pluta. Słoneczne instalacje energetyczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN: 978-83-7207-672-4 2008.
- [10] Jagusiak M., Drózdź T., Nawar P., Kiełbasa P., Lis S., Wrona P., Nęcka K., Oziembłowski M.: "Kompatybilność elektromagnetyczna w pomiarach energii elektrycznej" Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, NR 01/2016, STRONA 139-145
- [11] Korzeniewska, E., Drzymała, A. "Photovoltaic power plants – technical and economic aspects" 2013 Przegląd Elektrotechniczny 89(12), pp. 324-327
- [12] Pawlak, R., Kawczyński, R., Korzeniewska, E., Lebioda, M. Rosowski, A. Rymaszewski, J. Sibiński, M. Tomczyk, M. Walczak, M. "Photovoltaic cells of unconventional shapes" 2013 Przegląd Elektrotechniczny 89(7), pp. 288-292