

Sebastian PATER<sup>1</sup>  
Krzysztof NEUPAUER<sup>2</sup>  
Barbara LARWA<sup>3</sup>

## EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA KOLEKTORÓW SŁONECZNYCH WYKORZYSTUJĄCYCH WODĘ, JAKO PŁYN SOLARNY

W Polsce najczęściej stosowanym płynem solarnym w instalacjach grzewczych z kolektorami słonecznymi są 35-50% wodne roztwory glikolu propylenowego lub etylowego. Takie mieszaniny wraz z dodatkami uszlachetniającymi skutecznie zabezpieczają instalację solarną przed skutkami zamarznięcia czynnika roboczego przy niskich temperaturach zewnętrznych panujących w okresie zimowym. Roztwory te, w porównaniu do wody, charakteryzują się wyższą lepkością i niższą wartością ciepła właściwego w zakresie typowych temperatur pracy cieczy roboczej w obiegu solarnym, mają wyższą cenę w przeliczeniu na jednostkową objętość oraz mogą powodować zatrucia w wyniku przypadkowego spożycia. W instalacjach solarnych pracujących również w okresie zimowym możliwe jest wykorzystanie samej wody, bez dodatku glikoli, ale konieczne jest wtedy wyposażenie układu regulacji automatycznej sterującej instalacją w funkcję ochrony przeciwzamrożeniowej. Celem niniejszej pracy jest omówienie funkcji przeciwzamrożeniowej w instalacji solarnej z kolektorami próżniowo-rurowymi, w której wykorzystano wodę, jako płyn solarny. Poddano szczegółowej analizie okres czasu, w którym ta funkcja była stosowana. Kolektory słoneczne pracujące w warunkach rzeczywistych dla przygotowania ciepłej wody użytkowej i wspomagania centralnego ogrzewania w obiekcie mieszkalno-usługowym, są częścią multiwalentnej instalacji hybrydowej, gdzie do wytwarzania ciepła dodatkowo zastosowano trzy różne urządzenia grzewcze. Określono również efektywność energetyczną kolektorów słonecznych.

**Słowa kluczowe:** kolektory próżniowo-rurowe, sprawność kolektora, ochrona przeciwzamrożeniowa, system sterowania, odnawialne źródła energii

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Sebastian Pater, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: 12-628-2721, e-mail: sebpater@chemia.pk.edu.pl

<sup>2</sup> Krzysztof Neupauer, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: 12-628-2721, e-mail: kneupauer@chemia.pk.edu.pl

<sup>3</sup> Barbara Larwa, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: bl@indy.chemia.pk.edu.pl

## 1. Wprowadzenie

Istotnym elementem każdej solarnej instalacji grzewczej jest czynnik obiegowy, którego podstawową funkcją jest odbieranie ciepła wytworzonego przez kolektor słoneczny, a następnie przekazywanie go do odbiornika ciepła, np. zasobnika ciepłej wody użytkowej (c.w.u.). W strefie klimatycznej umiarkowanej, w której leży Polska, najczęściej stosowanymi płynami solarnymi są 35-50% wodne roztwory glikolu propylenowego lub etylowego.

Podstawową zaletą takich mieszanin jest skuteczne zabezpieczenie instalacji solarnych przed skutkami zakrzepnięcia czynnika roboczego przy niskich temperaturach zewnętrznych w okresie zimowym. Temperatura krzepnięcia dla wodnych roztworów glikolu etylenowego wynosi od ok.  $-20^{\circ}\text{C}$  do ok.  $-37^{\circ}\text{C}$ , a dla glikolu propylenowego od ok.  $-17^{\circ}\text{C}$  do ok.  $-35^{\circ}\text{C}$  [1]. Roztwory te zawierają także dodatki uszlachetniające np. inhibitory korozji.

Wodne roztwory glikoli w porównaniu z wodą:

- charakteryzują się od 2 do 5 razy większą lepkością dynamiczną oraz niższą wartością ciepła właściwego, w zakresie typowych temperatur pracy cieczy roboczej w obiegu solarnym,
- mają kilkukrotnie wyższą cenę,
- mogą powodować zatrucie w wyniku przypadkowego spożycia,
- ulegają degradacji termicznej do związków o smolistej konsystencji, które mogą osadzać się na wewnętrznych powierzchniach rurociągów, czy wymienników ciepła [5].

W instalacjach solarnych użytkowanych całorocznie możliwe jest wykorzystanie dejonizowanej wody, bez dodatku glikoli, jako czynnika obiegowego. Należy jednak wyposażyć takie instalacje w system sterowania z funkcją ochrony przeciwzamrożeniowej.

Stosowanie wody, jako płynu solarnego jest korzystne w instalacjach:

- o małej sumarycznej długości rurociągów,
- w których większa część rurociągów prowadzona jest wewnątrz pomieszczeń ogrzewanych, a rurociągi prowadzone na zewnątrz obiektu budowlanego są dobrze zaizolowane,
- wyposażonych w kolektory słoneczne o niskim współczynniku strat ciepła do otoczenia np. dla kolektorów próżniowo-rurowych.

## 2. Materiały i metody

Obiektem przeprowadzonych badań była działająca od września 2011 roku instalacja solarne, pracująca w warunkach rzeczywistych. Służyła ona dla przygotowania c.w.u. i wspomagania centralnego ogrzewania w budynku mieszkalno-usługowym o powierzchni użytkowej wynoszącej około  $460\text{ m}^2$  na obrzeżach Krakowa. Jest ona częścią multiwalentnej instalacji hybrydowej, gdzie po

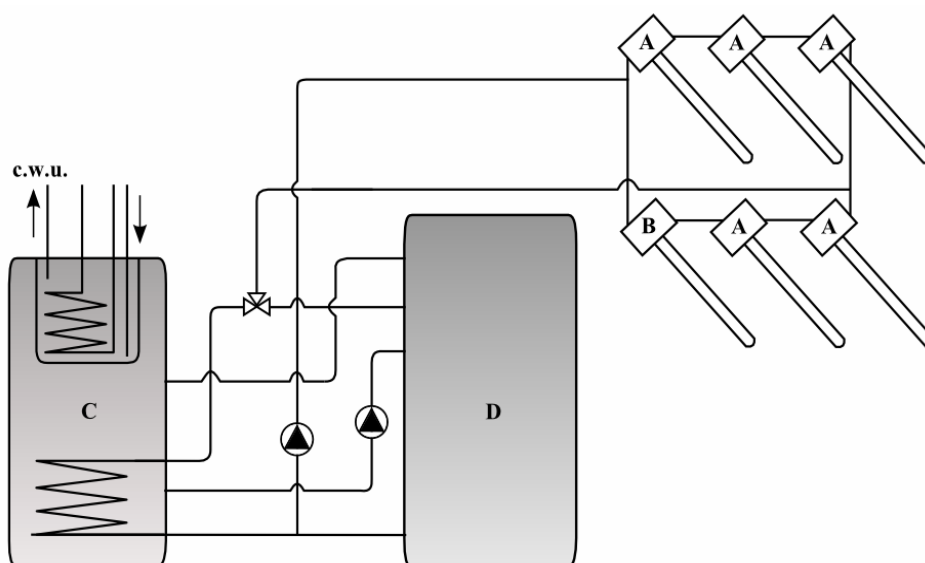
stronie wytwarzania ciepła zastosowano dodatkowo trzy różne urządzenia grzewcze: pompę ciepła typu solanka-woda, kocioł na biomasę oraz kocioł kondensacyjny gazowy. Więcej informacji na jej temat można znaleźć w [6].

W omawianej instalacji solarnej zastosowano jeden 12-rurowy i pięć 20-rurowych kolektorów próżniowo-rurowych typu „Heat-Pipe” o łącznej powierzchni apertury wynoszącej 10,55 m<sup>2</sup>. Są one połączone szeregowo-równoległe (po trzy kolektory na każdy szereg) co przedstawiono na rysunku 1. Kolektory zostały zamontowane równoległe do połaci dachu budynku skierowanej w stronę południową i o nachyleniu wynoszącym 40°. Podstawowe dane techniczne dotyczące użytych kolektorów słonecznych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczne zastosowanych kolektorów słonecznych

Table 1. Technical data of applied solar collectors

Rodzaj kolektora	Powierzchnia apertury [m <sup>2</sup> ]	Objętość czynnika solarnego w głowicy kolektora [l]	Sprawność optyczna [-]	Współczynniki strat ciepła [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	
				a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>
20-rurowy	1,87	1,26	0,62	1,38	0,0184
12-rurowy	1,20	0,67			



Rys. 1. Schemat instalacji solarnej: A – kolektor 20-rurowy, B – kolektor 12-rurowy, C – zasobnik typu „KOMBI”, D – zasobnik buforowy

Fig. 1. The scheme of solar system: A – 20- tubes collector, B – 12- tubes collector, C – „KOMBI” type storage, D – buffer tank

Główną funkcją kolektorów słonecznych w instalacji jest dostarczanie ciepła dla c.w.u., która jest podgrzewana do zadanej temperatury w zasobniku typu „KOMBI” (inne nazwy: zbiornik w zbiorniku, zasobnik kombinowany). Całkowita pojemność zasobnika typu „KOMBI” wynosi 800 l, przy czym 200 l przypada na zasobnik wewnętrzny. Ciepło produkowane przez kolektory słoneczne kierowane jest do dolnej węzownicy zasobnika typu „KOMBI” o powierzchni wymiany ciepła  $2,4 \text{ m}^2$ . Podgrzana woda w objętości bufora na skutek konwekcji swobodnej przemieszcza się do górnej części zasobnika. Tam oddaje ciepło przez ścianki zasobnika wewnętrznego do c.w.u. W instalacji istnieje również możliwość podgrzania c.w.u. przez ciepło wytworzone w kotle kondensacyjnym gazowym. W takim sposobie podgrzewania c.w.u. bierze udział dodatkowa węzownica zamontowana w zasobniku wewnętrznym, co zostało przedstawione na rysunku 1.

Jeżeli w zasobniku typu „KOMBI” zostanie osiągnięta zadana temperatura c.w.u. poprzez odpowiednie przełączenie zaworu trójdrogowego nadmiarowe ciepło wytworzone przez kolektory słoneczne jest kierowane do zbiornika buforowego o pojemności 1 000 l (D na rysunku 1). Przekazywanie ciepła zachodzi bez użycia wymiennika ciepła, ponieważ w obiegu solarnym jak i zbiorniku buforowym znajduje się ta sama ciecz – woda dejonizowana. Jeżeli kolektory słoneczne nie pracują (np. na skutek niekorzystnych warunków pogodowych), a temperatura wody w zbiorniku buforowym jest wyższa od temperatury c.w.u. ciepło pomiędzy zbiornikami może być przekazywane przez dodatkowy obieg łączący objętości zbiorników C i D.

Płynem pośredniczącym w przekazywaniu ciepła z kolektorów słonecznych do zbiorników jest woda dejonizowana, dlatego w systemie sterowania pracą instalacji aktywowano funkcję ochrony przeciwzamrożeniowej. Instalacja wyposażona jest w zasilacz awaryjny, inaczej zwany zasilaczem UPS (ang. **Uninterruptible Power Supply**). W przypadku przerwy lub zakłóceń dostaw energii elektrycznej (co w lokalizacji rozpatrywanej instalacji zdarza się często, szczególnie w okresie zimowym) podtrzymuje napięcie w instalacji nawet do kilkudziesięciu godzin, umożliwiając ciągłe działanie ochrony przeciwzamrożeniowej i systemu sterowania.

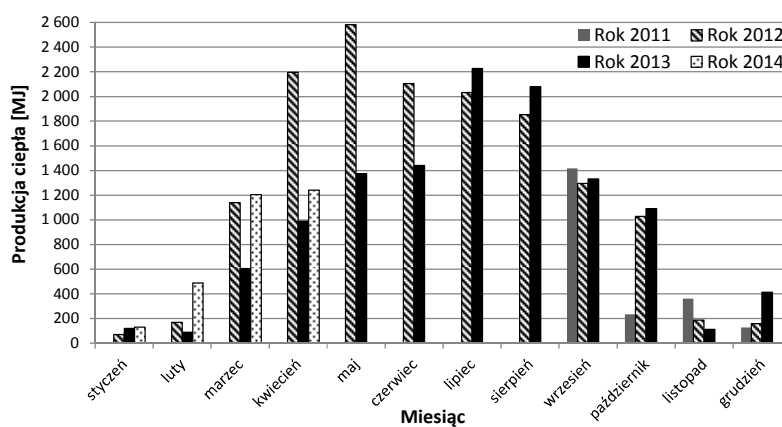
Pracą kolektorów słonecznych, jaki i pozostałych urządzeń instalacji jest nadzorowana przez system sterowania DigiENERGY, o którym szczegółowe informacje można znaleźć w [4,6].

### 3. Wyniki i dyskusja

Wyniki pracy kolektorów słonecznych analizowano od początku września 2011 roku do końca kwietnia 2014 roku. Sumarycznie kolektory w tym czasie wytworzyły 31,9 GJ ciepła, z czego 14,8 GJ ciepła w 2012 roku, a 11,9 GJ w 2013 roku. Dla tych dwóch lat różnica w miesięcznej produkcji ciepła szczególnie jest widoczna od marca do czerwca, a dla pozostałych miesięcy jest zbli-

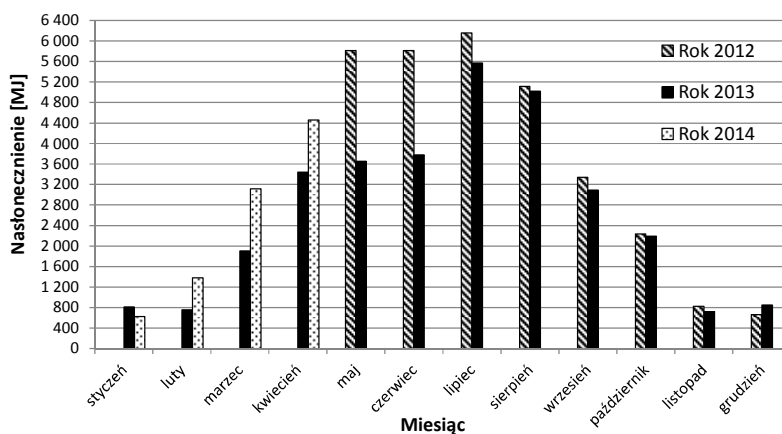
żona (rys. 2). W miesiącach od listopada do lutego ilość ciepła wytwarzana przez kolektory osiągała maksymalną wartość 500 MJ.

Od początku maja 2012 roku do końca kwietnia 2014 roku prowadzono pomiary nasłonecznienia przy użyciu pyranometru Kipp & Zonen CM21. Na rysunku 3 zestawiono miesięczne nasłonecznienie przeliczone na powierzchnię czynną kolektorów (10,55 m<sup>2</sup>). Największe miesięczne nasłonecznienie wynoszące 6,1 GJ odnotowano w lipcu 2012 roku, a najniższe 0,6 GJ w styczniu 2014 roku. Od maja do grudnia 2012 roku sumarycznie nasłonecznienie było o 20% wyższe, niż w takim samym okresie czasu 2013 roku.



Rys. 2. Miesięczna produkcja ciepła przez kolektory słoneczne

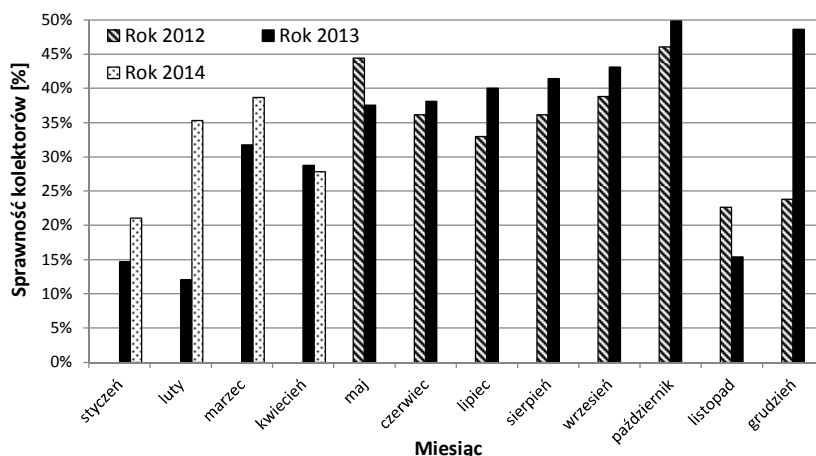
Fig. 2. Monthly production of heat by solar collectors



Rys. 3. Miesięczne nasłonecznienie w przeliczeniu na powierzchnię czynną kolektorów

Fig. 3. Monthly insolation calculated on the active surface of solar

Od maja do października miesięczna sprawność kolektorów (rys. 4) zawierała się w przedziale od 36% do 50%, natomiast dla pozostałych miesięcy była niższa (z wyjątkiem marca 2014 i grudnia 2013). Roczna sprawność kolektorów słonecznych w roku 2013 wyniosła 37,4%.

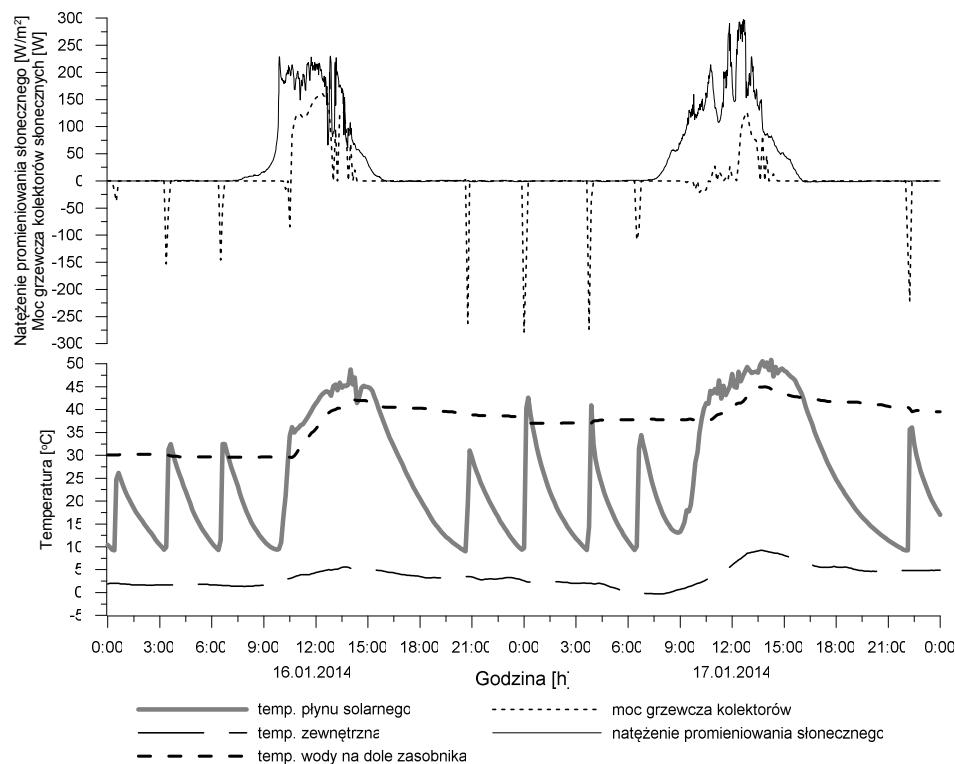


Rys. 4. Miesięczna sprawność kolektorów słonecznych

Fig. 4. Monthly efficiency of solar collectors

Od początku września 2012 do końca kwietnia 2013 roku (sezon grzewczy 2012/13) oraz od początku września 2013 do końca kwietnia 2014 roku (sezon grzewczy 2013/14), ze względu na zastosowany w instalacji płyn solarny i panujące temperatury zewnętrzne w systemie sterowania aktywowano funkcję ochrony przeciwzamrożeniowej. Polegała ona na krótkotrwałym załączeniu pompy obiegowej obiegu solarnego w sytuacji, gdy mierzona temperatura wody w głowicy zbiorczej kolektora słonecznego, osiągała wartość poniżej zadanej ( $10,5^{\circ}\text{C}$  w sezonie grzewczym 2012/13 i  $9,5^{\circ}\text{C}$  w sezonie grzewczym 2013/14). Ciepło wykorzystywane do utrzymywania odpowiedniej temperatury w kolektorze pobierano ze zbiornika buforowego do momentu, gdy temperatura wody mierzona w głowicy zbiorczej kolektora wynosiła  $25^{\circ}\text{C}$  (rys. 5). Odnotowane wyższe temperatury płynu solarnego są wynikiem bezwładności cieplnej kolektora. Natomiast ujemna moc grzewcza kolektorów słonecznych jest rezultatem działania opisanej ochrony przeciwzamrożeniowej.

Funkcja ochrony przeciwzamrożeniowej w dniach 16-17 stycznia 2014 roku, przy temperaturze zewnętrznej wynoszącej około  $3^{\circ}\text{C}$ , sumarycznie była aktywowana 8 razy, średnio co 3 godziny i zużyła 11,7 MJ ciepła (rys. 5). Jeżeli w ciągu dnia było odpowiednie natężenie promieniowania słonecznego kolektory słoneczne wytwarzały ciepło i oddawały je do zasobnika typu „KOMBI”.



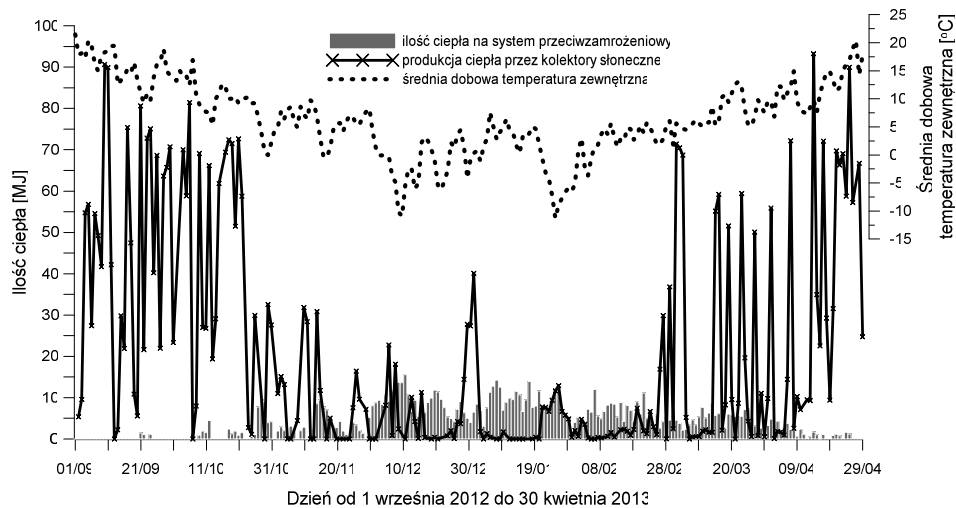
Rys. 5. Wybrane parametry pracy kolektorów słonecznych 16 i 17 stycznia 2014 roku

Fig. 5. Selected parameters of solar collectors 16 and 17 January 2014

Zarówno w sezonie grzewczym 2012/13, jak i 2013/14 dobowe zużycie ciepła przez system przeciwwamrozeniowy wynosiło maksymalnie 17 MJ (rys. 6 i 7). Od początku września do połowy listopada w obu analizowanych sezonach, gdy średnia dobowa temperatura zewnętrzna wynosiła ponad 5°C, obserwowano niskie zużycia ciepła przez system lub jego brak. W sezonie grzewczym 2012/13 jednocześnie z wysokim zużyciem ciepła przez system przeciwwamrozeniowy kolektory słoneczne wytwarzały nieznaczną ilość ciepła (szczególnie w miesiącach od grudnia do lutego).

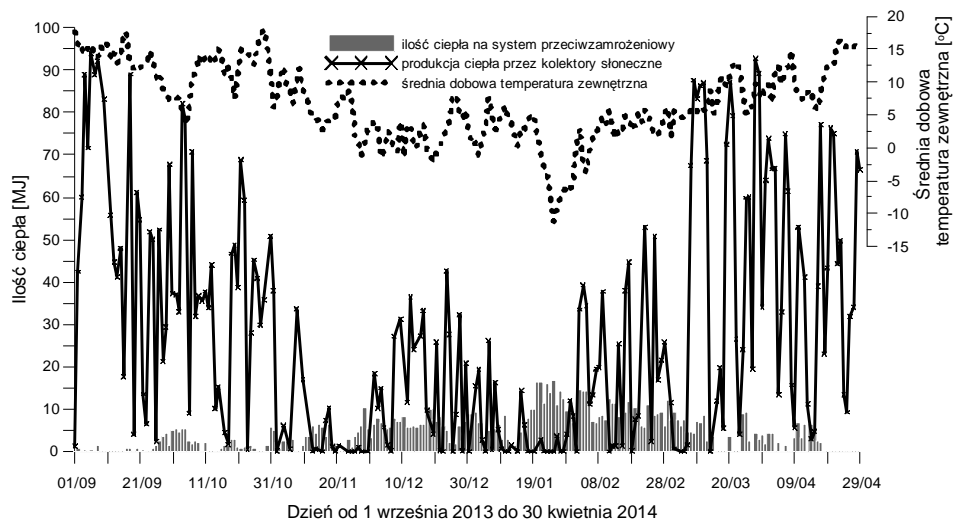
Ilość ciepła zużytego na działanie systemu przeciwwamrozeniowego oraz ilość dni, w których on funkcjonował w obu sezonach grzewczych była podobna i wynosiła odpowiednio 1,1 GJ i 187 dni (tab. 2). Zakładając równe udziały kolektorów słonecznych w stratach ciepła uzyskuje się ok. 104 MJ ciepła traconego na działanie systemu ochrony instalacji w przeliczeniu na jednostkową powierzchnię apertury kolektorów. W sezonie 2013/14 ilość wytworzonego ciepła przez kolektory była o 34% większa w stosunku do sezonu 2012/13. Największą ilość ciepła na pracę systemu przeciwwamrozeniowego zużyto w grudniu i styczniu sezonu 2012/13, a najmniejszą we wrześniu sezonu 2012/13.

W sezonie grzewczym 2012/13 system ochrony przeciwzamrożeniowej zużył około 24% ciepła wytworzonego przez kolektory słoneczne. Natomiast w sezonie grzewczym 2012/13 udział ten wynosił 18%.



Rys. 6. Zużycie ciepła przez system przeciwzamrożeniowy w sezonie grzewczy 2012/13

Fig. 6. The heat consumption by the antifreeze system in the heating season 2012/13



Rys. 7. Zużycie ciepła przez system przeciwzamrożeniowy w sezonie grzewczy 2013/14

Fig. 7. The heat consumption by the antifreeze system in the heating season 2013/14

Tabela 2. Zestawienie danych z pracy systemu przeciwwzrosteniowego instalacji solarnej

Table 2. The summary data of antifreeze system of solar installation

Miesiąc	Ilość zużytego ciepła na funkcjonowanie ochrony przeciwwzrosteniowej [MJ]		Produkcja ciepła przez kolektory [MJ]		Ilość dni pracy ochrony przeciwwzrosteniowej [dni]	
	2012/13	2013/14	2012/13	2013/14	2012/13	2013/14
Wrzesień	1,0	19,2	1 296,2	1 331,4	3	14
Październik	53,2	58,6	1 030,0	1 091,8	16	22
Listopad	88,2	95,5	187,6	110,9	24	25
Grudzień	275,7	188,1	158,2	413,1	31	30
Styczeń	272,6	261,2	119,5	130,9	31	31
Luty	175,0	270,1	91,0	488,7	28	28
Marzec	153,3	137,0	604,4	1 205,4	31	24
Kwiecień	45,7	50,5	990,5	1 242,0	22	13
<b>Suma</b>	<b>1 064,7</b>	<b>1 080,2</b>	<b>4 477,4</b>	<b>6 014,2</b>	<b>186</b>	<b>187</b>

#### 4. Podsumowanie

Ilość ciepła przekazywana w okresie zimowym ze zbiornika buforowego do płynu solarnego w stosunku do ilości ciepła, którą kolektory słoneczne wyprodukowały była niewielka i w sezonie grzewczym 2012/13 wynosiła 24%, a w sezonie 2013/14 była równa 18%. Mniejsze zużycie ciepła na funkcjonowanie systemu przeciwwzrosteniowego, przy jednocześnie większej produkcji ciepła przez kolektory słoneczne w sezonie grzewczym 2013/14 w stosunku do sezonu 2012/13 uzyskano dzięki:

- obniżeniu temperatury załączania pompy obiegowej instalacji solarnej do 9,5°C,
- większemu o 2,5 GJ nasłonecznieniu w przeliczeniu na powierzchnię apertury kolektorów.

Zmierzona wartość nasłonecznienia w 2013 roku, wynosząca 3 013 MJ/m<sup>2</sup>, była mniejsza o ponad 700 MJ od średniej wartości rocznego nasłonecznienia obliczonego na podstawie danych z lat 1884-2010 dla Krakowa [3].

Rzeczywista sprawność kolektorów słonecznych w omawianej instalacji w 2013 roku wyniosła około 37%, co jest rezultatem nieco lepszym niż sprawność tego typu urządzeń badana w długim okresie czasu [2]. Z energetycznego punktu widzenia praca instalacji solarnej wykorzystującej wodę w grudniu, styczniu i lutym może być nieopłacalna. Jednakże wyłączenie instalacji nie jest zalecane ze względu na kwestie praktyczne oraz nieprzewidywalne warunki atmosferyczne, co potwierdza grudzień roku 2013 i 2014 (tabela 2).

Przeprowadzone badania potwierdziły, że stosowanie wody, jako czynnika obiegowego w instalacjach solarnych w warunkach polskich, jest uzasadnione pod względem praktycznym i energetycznym. Wiąże się jednak z użyciem odpowiedniego sterownika, lub systemu sterowania pracy takiej instalacji. W czasie prowadzonych badań instalacja pracowała bezawaryjnie.

## Literatura

- [1] ASHARE: Fundamentals: 2001 Ashrae Handbook: Inch-Pound Edition, Amer Society of Heating, 2001.
- [2] Ayompe L. M., Duffy A.: Thermal performance analysis of a solar water heating system with heat pipe evacuated tube collector using data from a field trial, *Solar Energy*, 90, 2013, 17–28.
- [3] Matuszko D.: Long-term variability in solar radiation in Krakow based on measurements of sunshine duration, *Int. J. Climatol.*, 34, 2014, 228–234.
- [4] Neupauer K. i in.: Sterownik nowego typu dla instalacji hybrydowych z odnawialnymi źródłami energii, *Inż. Ap. Chem.*, 49, 3, 2010, 87–88.
- [5] Pater S.: Woda jako płyn solarny w cieczowych kolektorach słonecznych, Wybrane problemy naukowo-badawcze budownictwa i inżynierii środowiska, Politechnika Warszawska Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Płock, 2013.
- [6] Pater S., Magiera J.: Energetic and Ecological Balancing Hybrid Heating System with Renewable Energy Sources, *Czasopismo Techniczne*, 5, 1-M, 2012, 175–184.

## ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR COLLECTORS USING WATER, AS SOLAR LIQUID

### Summary

The Polish most commonly used solar fluid in heating systems with solar collectors are 35-50% solutions of propylene glycol or ethanol and water. Such mixtures with special additives effectively protect the solar system from freezing of working medium at low temperatures prevailing in winter time. These solutions, compared with water, are characterized by a higher viscosity and lower specific heat values in the range of typical operating temperatures of working fluid in the solar circuit, have a higher price based on the volume of the solution and may cause poisoning by accidental ingestion. The usage of water in solar systems during winter season is also possible without the addition of glycols, but it is necessary to equipped frost protection function in the control system of installation.

The purpose of this paper is to discuss the principles of operation of the frost protection in the solar system with vacuum-tube collectors, which uses water as the solar fluid and subjecting a detailed analysis of the time period in which the system functioned. This installation, operating in real conditions for the preparation of domestic hot water and auxiliary heating in residential and service building is part of a multivalent hybrid installation where heat is generating additionally by three different heating devices. Also thanks fitted pyranometer in the installation is possible to specified energy efficiency of solar collectors.

**Keywords:** vacuum-tube collectors, collector efficiency, frost protection, control system, renewable energy sources

DOI:10.7862/rb.2014.106

*Przesłano do redakcji: 25.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*