

Marcin ŁĘCKI, Grzegorz GÓRECKI
Politechnika Łódzka
Instytut Maszyn Przepływowych
marcinlecki@poczta.onet.pl

WYKORZYSTANIE RURKI CIEPŁA JAKO URZĄDZENIA PRZENOSZĄCEGO CIEPŁO W UKŁADACH GEOTERMALNYCH POMP CIEPŁA

Streszczenie: Geotermalne pompy ciepła są układami pobierającymi niskotemperaturowe ciepło zawarte w gruncie kosztem dostarczonej mocy elektrycznej. Dodatkowa moc pozwala na podwyższenie temperatury w obiegu na żądany poziom (np. potrzebny do przygotowania c.w.u.). Tradycyjnym rozwiązaniem pobierania odnawialnej energii z gruntu jest wykonanie pionowych odwiertów na głębokość 50-200 m i umieszczenie w nich kolektorów w formie u-rurek. Płynący w kolektorze czynnik pobiera ciepło, wiąże się to jednak z dodatkowymi kosztami energii zużywanej przez pompy obiegowe wymuszające ruch czynnika. Zastosowanie rurki ciepła zamiast tradycyjnego kolektora pozwala na obniżenie kosztów pracy układu poprzez wyeliminowanie pracy pomp obiegowych. Zasadność tego rozwiązania będzie oceniona w artykule pod względem energetycznym i ekonomicznym.

Słowa kluczowe: geotermalne pompy ciepła, rurki ciepła, termosyfony.

HEAT PIPE AS HEAT TRANSFERING DEVICE IN GEOTHERMAL HEAT PUMP SYSTEMS

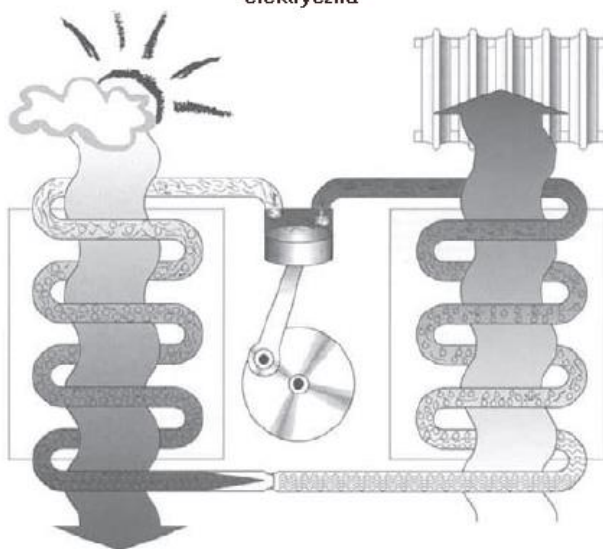
Abstract: Geothermal heat pumps are systems extracting low-temperature heat from the ground. Additionall electrical power is needed to raise the temperature level in heat pipe cycle (e. g. required for domestic hot water preparation). Traditional technical solution for absorbing ground energy is drilling 50-200 m deep boreholes with vertical collectors (U-shaped pipes)in them. Working fluid flows in collector pipes and draws heat from the ground, however it raises overall costs by the price of energy used by circulation pumps. Aplication of heat pipe instead of traditional vertical collector reduces overall costs of operation of heat pump system by eliminating additional pumping power for working fluid circulation. Economic and energetic rationale for applying this improved system will be discussed in this paper.

Keywords. geothermal heat pumps, heat pipes, termosyphons.

1. CZYM JEST GEOTERMALNA POMPA CIEPŁA?

Pompa ciepła jest to urządzenie pobierające ciepło ze źródła o temperaturze niższej i przekazujące je do źródła o temperaturze wyższej. Samoistnie ciepło nie może jednak płynąć od ciała o temperaturze niższej do ciała o temperaturze wyższej. Ta empiryczna obserwacja jest jednym ze sformułowań drugiego prawa termodynamiki. Skierowanie przepływu ciepła w „odwrotnym kierunku” wymaga doprowadzenia dodatkowej energii – pracy mechanicznej. Czynnik roboczy płynący w układzie pompy ciepła jest sprężany, praca jest więc dostarczana do układu. Sprężanie powoduje podwyższenie temperatury gazu, co pozwala na oddanie ciepła do źródła górnego o temperaturze wyższej. Zasadę działania pompy ciepła ilustruje rys. 1. Ekonomiczność układu wynika z faktu, że większa część ciepła pobierana jest z otoczenia o temperaturze niższej (np. pobierane jest ciepło ze źródła

Ciepło z otoczenia $\frac{3}{4}$ + Zakupiona energia elektryczna $\frac{1}{4}$ = Ciepło grzewcze $\frac{4}{4}$

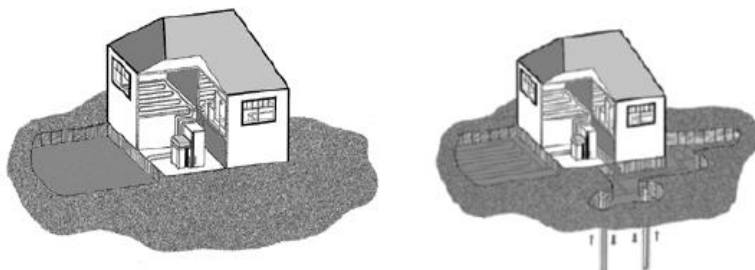


Rys. 1. Zasada działania pompy ciepła

Fig. 1. Principle of heat pump work

o temperaturze 5°C pomimo tego, że przeznaczona jest do ogrzewania powietrza w pomieszczeniu o temperaturze 22°C). Moc doprowadzana jest za pośrednictwem sprężarki najczęściej zasilanej elektrycznie, by podwyższyć „poziom temperaturowy” ciepła. Ciepło z otoczenia może stanowić $\frac{3}{4}$ ciepła grzewczego, pozostała $\frac{1}{4}$ jest dostarczana z sieci elektrycznej. Użytkownik płaci więc tylko za zakupioną energię elektryczną. W systemach geotermalnych pomp ciepła źródłem dolnym jest grunt, który stanowi alternatywę dla powietrza czy wody (wody gruntowe, zbiorniki wodne). Technicznie, istnieją różne rozwiązania kolektorów – wymienników pobierających ciepło z gruntu. Dzieli się

one na kolektory solankowe (napelnione cieczą o obniżonym punkcie zamarzania) oraz bezpośredniego parowania (ang. direct expansion), gdzie rurki kolektora wypełnione są czynnikiem chłodniczym. System z bezpośrednim parowaniem pokazany jest na rys. 2 po lewej. Po prawej przedstawione są kolektory wypełnione solanką: pionowe i poziome. Solanka krążąca w rurkach kolektora oddaje ciepło czynnikowi chłodniczemu w parowniku. Poziome wymienniki zakopywane są na głębokościach (typowych dla instalacji europejskich) od 0.8 do 1.5 m [5]. Rys. 3 ilustruje dwa różne sposoby ich ułożenia. Na tych głębokościach gruntu rozkład temperatury zmienia się w czasie (w cyklu pór roku). Ciepło pobierane z tej warstwy gruntu pochodzi niemal w całości od promieniowania słonecznego.



Rys. 2. Różne rozwiązania kolektorów gruntowych, po prawo bezpośrednie parowanie, po prawej poziome i pionowe

Fig. 2. Different types of ground collectors, direct expansion on the left and horizontal and vertical on the right



Rys. 3. Dwa rodzaje ułożenia kolektorów poziomych, po lewej w układzie równoległym, po prawej w spiralnej formie w wykopanych rowach

Fig. 3. Two ways of horizontal collectors positioning, parallel on the right, spiral in trenches on the left

2. TERMODYNAMIKA I OCENA WYDAJNOŚCI POMPY CIEPŁA

W artykule układ pompy ciepła będzie modelowany uproszczonym podejściem termodynamicznym – lewobieźnym obiegiem Carnota. Moc sprężarki można obliczyć znając poziom temperatur obiegu – temperaturę skraplania T_g i temperaturę parowania T_z oraz strumień ciepła pobrany przez kolektor \dot{Q}_k :

$$\dot{W} = 1.7 \cdot \dot{Q}_k \cdot \left(\frac{T_g}{T_z} - 1 \right) \quad (1)$$

Całość jest pomnożona przez 1.7 co zapewni bardziej realistyczne wyniki. Gdyby zastosować wzór (1) bez mnożnika otrzymałoby się tzw. egzergię strumienia ciepła, tzn. minimalną moc jaką musi dostarczać układ termodynamiczny czynnikowi by przenieść ciepło o temperaturze niższej do źródła o temperaturze wyższej. Ciepło grzewcze jest sumą ciepła doprowadzanego przez kolektor i mocy sprężarki:

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_k + \dot{W} \quad (2)$$

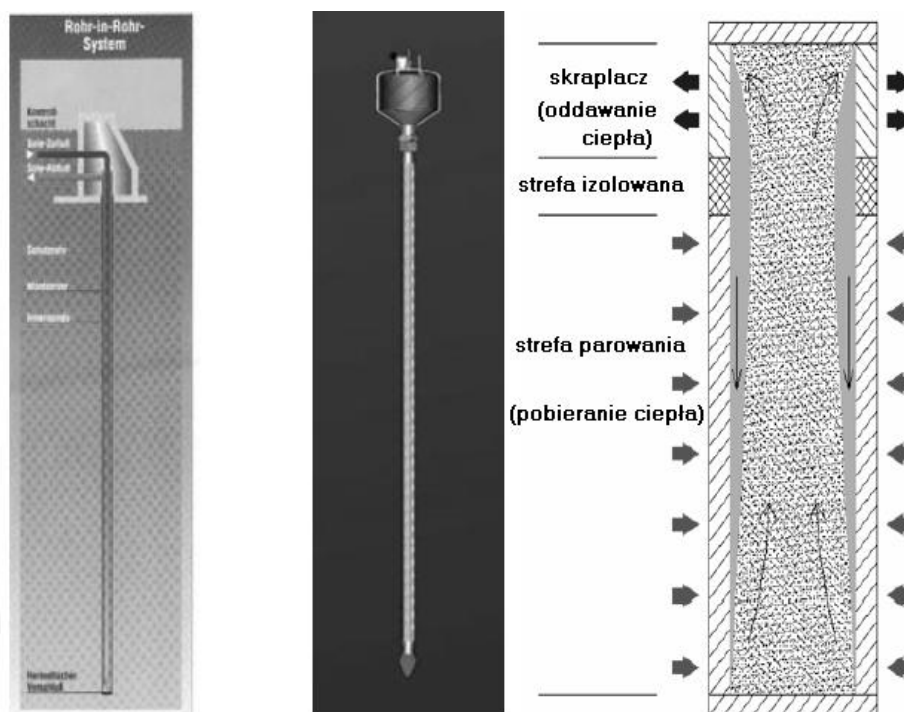
gdzie \dot{Q}_g – strumień ciepła grzewczego [W]. Należy zwrócić uwagę, że moc sprężarki nie jest tracona, ale w przybliżeniu dodaje się do doprowadzanego strumienia ciepła (w rzeczywistości mała część mocy sprężania jest jednak tracona). Wydajność pompy ciepła oceniana jest najczęściej za pomocą współczynnika COP (ang. coefficient of performance), który jest stosunkiem ciepła grzewczego do doprowadzanej mocy:

$$COP = \frac{\dot{Q}_g}{\dot{W}} \quad (3)$$

pozwala on na ocenę chwilowej wydajności obiegu. W prostej analizie ekonomicznej obliczane i porównywane będą koszty związane z użytkowaniem dwóch rozwiązań (sondy pionowej solankowej i termosyfonowej – „rurka ciepła”). Koszty inwestycji z założenia są uznawane jako porównywalne i nie brane pod uwagę. Dla kolektora pionowego solankowego dodatkowe koszty będą wiązały się z pokryciem kosztów energii elektrycznej zasilającej pompy obiegowe wymuszające przepływ solanki. Pewnym usprawnieniem solankowych kolektorów pionowych jest zastosowanie pomp obiegowych o zmiennej mocy (regulacja obrotami silnika), które dostosowują się do zapotrzebowania na moc grzewczą. W obliczeniach rozważane będą pompy obiegowe o stałej wydajności, które są zdecydowanie mniej ekonomiczne, problematycznym jest jednak przewidzenie stopnia obniżenia kosztów eksploatacji, wynikającego ze zmiennej mocy urządzeń. Moc pompy nie powinna przekraczać 50W/1kW mocy cieplnej, przyjęto więc taką samą moc pompy jak obliczono w artykule [3], tj. 200 W.

3. KOLEKTOR PIONOWY SOLANKOWY I TERMOSYFONOWY

Pionowe kolektory odznaczają się większą wydajnością cieplną niż poziome ze względu na stałą temperaturę utrzymującą się na głębokościach poniżej 15 m. wynoszącą od 10°C do 14°C, zależnie od warunków glebowych i geologicznych. Kolektor pionowy jest rurką polietylenową o średnicy zwykle od 20 do 40 mm, która umieszczona zostaje w otworze o średnicy zależnej od użytej technologii odwiertu o różnych głębokościach (typowo od 100-150 m. chociaż bywają płytsze i głębsze odwierty). Kolektor wprowadzany jest do otworu w formie U-rurki, tzn. do odwiertu głębokiego na 100 m. należy



Rys. 4. Termosyfonowa sonda CO₂ w środku, solankowa po lewej, schemat działania termosyfonu po prawej

Fig. 4. Thermosyphon CO₂ probe in the middle, brine one on the left, scheme of thermosyphon operation on the right

wprowadzić ok. 200 m rurki. Następną czynnością jest wypełnienie wolnej przestrzeni w odwiercie (zwykle mieszanką na bazie betonitu) by zapobiec migracji wód podziemnych wewnątrz odwiertu i ich mieszania się. Kolektory pionowe stanowią najczęściej stosowane rozwiązanie w Europie jako dolne, geotermalne źródło ciepła. Spowodowane jest to małą wymaganą powierzchnią działki potrzebną do instalacji. Alternatywne rozwiązanie do kolektora

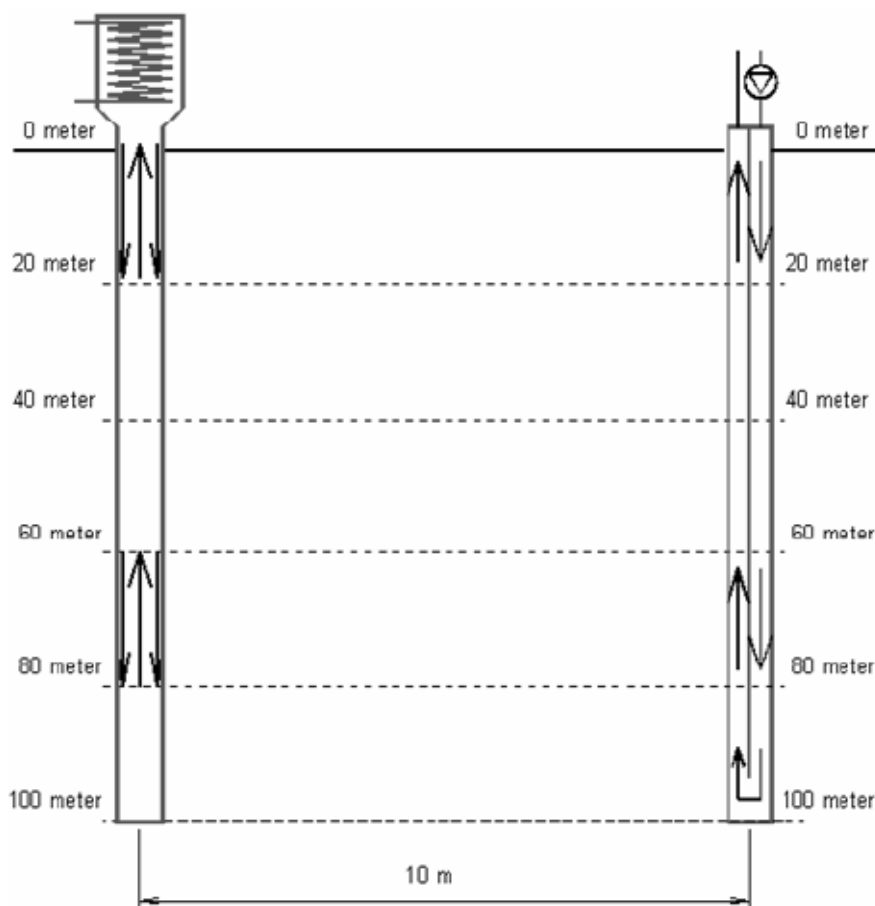
pionowego solankowego pojawiło się w Niemczech , jest to sonda pionowa CO₂. Działa ona na zasadzie dwufazowego zamkniętego termosyfonu. Rys. 4 przedstawia schemat działania termosyfonu. Czynnik roboczy odparowuje, w zamkniętym układzie, w strefie ogrzewanej gdzie pobierane jest ciepło z gleby. Para czynnika płynie w stronę skraplacza i tam skrapla się. Skropliny spływają grawitacyjnie po ściance termosyfonu. Takie rozwiązanie wyeliminowuje konieczność używania pompy obiegowej oraz może odznaczać się większą wydajnością cieplną w stosunku do kolektora solankowego. Zdaje się, że badania nad sondą CO₂ w Berlinie nie rozpoczęły się w celu skonstruowania systemu o wyższym współczynniku COP, ale aby rozwiązać problem potencjalnych klientów, których działki znajdowały się na terenach objętych ochroną wód gruntowych. W rezultacie obostrzeń prawnych nie mogli oni instalować solankowych kolektorów pionowych. Użycie CO₂ jako czynnika roboczego nie powoduje zanieczyszczenia wód gruntowych przy ewentualnym rozszczelnieniu. Termosyfon, będący kolektorem, jest wykonany w postaci rury karbowanej ze stali nierdzewnej, na rys. 5 przedstawiony jest wycinek rury kolektora oraz jego instalacja. Rura jest giętka i może być z powodzeniem przewożona na szpuli (nawinięta). Ten fakt ułatwia nie tylko logistykę, ale też instalację w porównaniu do rury sztywnej. Karbowanie pozwala na lepszą dystrybucję kondensatu na ściankach oraz większą odporność na porywanie kropli cieczy przez strumień pary (para i spływająca ciecz poruszają się w przeciwnym kierunku). Takie układy z powodzeniem pracują w Niemczech, Austrii i Szwajcarii. Autorzy nie posiadają danych o użyciu w innych krajach, jednak firmy niemieckie podają taki kolektor jako jedną z opcji instalacji, także w Polsce, np. austriacka firma Heliotherm.



Rys. 5. Instalacja kolektora pionowego w postaci karbowanej rury ze stali nierdzewnej
Fig. 5. Vertical collector installation in the form of corrugated stainless steel pipe

4. PORÓWNANIE KOLEKTORA SOLANKOWEGO Z SONDĄ CO₂

Prof. Horst Kruse wraz z Hansem Russmannem [3] przeprowadzili eksperyment porównawczy termosyfonowego kolektora pionowego z kolektorem solankowym typu u-rurka. Każdy z kolektorów o tej samej długości współpracował z jednakowym modelem pompy ciepła. Otrzymane wyniki



Rys. 6. Schematy porównywanych kolektorów w eksperymencie H. Kruse [3]

Fig. 6. Schemes of compared collectors in H. Kruse [3] experiment

przedstawione są w tabeli 1. Znajdują się w niej także wartości z symulacji przepływu ciepła w gruncie przeprowadzonej w programie ANSYS-CFX, dostosowanej do warunków opisywanego eksperymentu (przyjęta temperatura średnia ścianki termosyfonu taka jak w [3]). Wartości COP dla pompy ciepła w symulacji są obliczane na podstawie wzoru (3). W tab. 1 znajduje się także porównanie kosztów eksploatacji obu systemów, wg założeń wymienionych w rozdziale 2. Należy wspomnieć, że koszty wyliczono na podstawie średniej

przyjętej stawki za kWh (0.32 zł/kWh) przy założeniu stałej mocy grzewczej wynoszącej 6 kW oraz sezonie grzewczym wynoszącym 222 dni, z czego podczas 45% tego okresu, tzn. 2400 h pracuje pompa ciepła. W obliczeniach użyto współczynników COP podanych w tab. 1, które mogą się zmieniać w czasie trwania sezonu grzewczego. Przedstawione koszty użytkowania pompy ciepła z kolektorami pionowymi należy więc potraktować jako minimalne. Niemniej jednak oszacowana różnica między potencjalnymi sumami wydanymi na ogrzewanie w sezonie grzewczym ukazuje przewagę kolektora CO₂ nad tradycyjnym. Różnica wynosi 274 zł w której zawiera się cena energii elektrycznej pobranej przez pompę obiegową i nadwyżkę mocy sprężarki wynikającą z mniejszego współczynnika wydajności COP układu pompa ciepła –

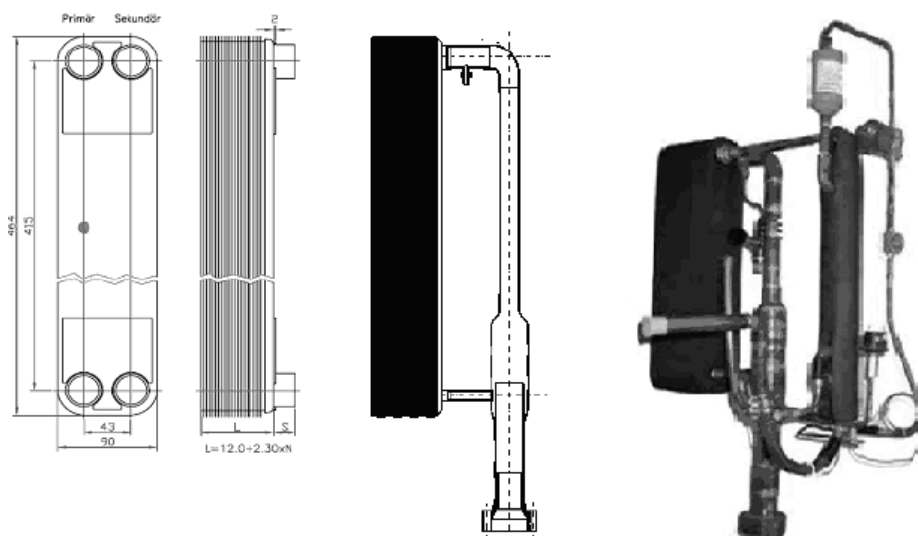


Rys. 7. Skraplacz CO₂ –parownik pompy ciepła, po prawej w przekroju

Fig. 7. CO₂ condenser – heat pump evaporator, cut view on the right

sonda solankowa. Stanowi to 20% oszczędności w stosunku do kolektora solankowego. Należy podkreślić napotkane trudności i poprawki wprowadzane w przeprowadzanych badaniach porównawczych. Główny problemem było ograniczenie zmiennych, których w tym przypadku jest wiele, aby wyizolować wpływ odpowiednich oddziaływań. Należy stworzyć takie warunki, by móc miarodajnie porównać dwa typy kolektorów, które mają różną budowę i różną zasadę działania. Jak wcześniej wspomniano, zastosowano dwa te same modele pomp ciepła, jedyną różnicą między nimi jest konstrukcja parownika przedstawiona na rys. 7. Jest to skraplacz sondy CO₂ a jednocześnie parownik pompy ciepła gdzie energia pobrana z gruntu jest przekazywana obiegowi

lewobieżnemu. Skraplacz jest wymiennikiem typu płaszczowo-rurowego (rura w kształcie węzownicy). W eksperymencie utrzymywano stałe temperatury parowania dla obu układów, oraz stałą wydajność parownika. Było to możliwe dzięki sterowaniu wydajnością sprężarki metodą modulacji szerokości impulsów (PWM – Pulse-Width Modulation [3]). Po wykonaniu wstępnych pomiarów okazało się, że powierzchnia wymiany ciepła nie jest jednakowa w obu przypadkach, co zwiększało wydajność cieplną kolektora solankowego uniemożliwiając sprawiedliwe porównanie. Powiększono więc średnicę rury



Rys. 8. Wymiennik płytowy jako wbudowana jednostka

Fig. 8. Plate heat exchanger as Built in Unit

sondy CO₂ oraz zmieniono model skraplacza na płytowy (taki jaki używano do tej pory w skraplaczu pompy ciepła z kolektorem solankowym). Mniejsze wymiary wymiennika pozwoliły na zainstalowanie go w obudowie jednostki pompy ciepła. Te usprawnienia pozwoliły na faktyczną ocenę przedstawioną w tab. 1.

Tabela 1. Zestawienie wartości z eksperymentu [3] i symulacji
Table 1. List of experimental values [3] and from simulation

Źródło wyników	Typ kolektora	COP [-]	q_{lin} [W/m]
Eksperyment [3]	Solanka	3.81	42.4
Eksperyment [3]	Sonda CO ₂	4.23	60.0
Symulacja	Sonda CO ₂	4.31	63.2
Porównanie szacowanych sezonowych kosztów eksploatacji			
Solanka		Sonda CO ₂	
1363 zł		1089 zł	
Różnica:	274 zł		

5. PODSUMOWANIE I SPODZIEWANY KIERUNEK ROZWOJU

Geotermalne pompy ciepła z sondą CO₂ zasługują na uwagę jako sprawniejsze cieplnie i bardziej ekonomiczne rozwiązanie, jeśli chodzi o koszty eksploatacji, niż kolektory solankowe. Potwierdzono to w eksperymencie wykonanym w Berlinie przez H. Kruse [3], poprzedzonym wieloletnimi badaniami instytutów niemieckich. Opisano metodykę eksperymentu i przeprowadzono prostą symulację numeryczną przewodzenia ciepła w gruncie na podstawie wyników otrzymanych w wyżej wymienionych badaniach. Pokróćce przedstawiono także technologię oraz wykonano analizę kosztów eksploatacji układu tradycyjnego i sondy CO₂. Autor sądzi, że dalszy rozwój tej technologii powinien nastąpić w kierunku rozważenia możliwości zastosowania innych naturalnych czynników roboczych w pionowym termosyfonowym kolektorze, np. solanki, propanu czy amoniaku.

Artykuł sponsorowany z projektu LIDER (NR: LIDER/08/42/L-3/11/NCBR/2012) „Intensyfikacja procesów wymiany ciepła i ich zastosowanie w innowacyjnym wymienniku ciepła – badania przy użyciu metody PIV”.

LITERATURA

- [1] Acuna J., Palm B., Khodabandeh R., Weber K., *Distributed temperature measurements on a U-pipe Thermosyphon Borehole Heat Exchanger with CO₂*, 9th IIF/IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids., International Institute of Refrigeration, Sydney, Australia. April 12-14 2010.
- [2] Hepbasli A., Kalinci Y., *A review of heat pump water heating systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier 2008, Vol. 13, 1211-1229.
- [3] Kruse H., *The FKW – CO₂ – Earth Heat Pipe as Earth Probe for Geothermal Heat Pumps*, EU Workshop, Brussels, 28 May 2008.
- [4] Ochsner K., *CO₂ heat pipes – an option for vertical collectors*, Geothermal Live! Conference and Exhibition, Part of GeoDrilling 2008, Peterborough, England. April 30-May 1 2008.
- [5] Ochsner K., *Geothermal Heat Pumps. A Guide to Planning and Installing*, Earthscan, London, Sterling 2007.
- [6] Sanner B., *Development of Geothermal Heat Pumps*, Geothermal Energy in ECA Region Countries, GeoFund – IGA Geothermal Workshop “Turkey 2009”, Istanbul, Turkey, February 16-19 2009.