

OCENA PRACY WYMIENNIKÓW CIEPŁA UŁOŻONYCH W RÓŻNYCH KONFIGURACJACH ZASILAJĄCYCH POMPEJ CIEPŁA*

Kazimierz Rutkowski, Weronika Pasternak
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę energetyczną poziomych gruntowych wymienników pompy ciepła. Przeprowadzono analizę trzech typów wymienników wykonanych z rur polietylenowych, ułożonych w gruncie w kształcie pojedynczego U podwójnego U oraz spiralnie. Wymienniki posadowione były na głębokości od 1,5 do 2,3 m. Określono wydajność cieplną wymienników przy zróżnicowanym zapotrzebowaniu energii. Dla istniejących warunków badań okazało się, że największą ilość energii uzyskuje się w wymienniku poziomym, ułożonym w konfiguracji podwójnego U, którego średnia jednostkowa wydajność mocy grzewczej wynosiła 21,5 W z 1 mb rury. Moc jednostkowa uzyskiwana z pozostałych dwóch wymienników była średnio o 40% mniejsza i wahała się w zakresie 8 do 17 W z 1 mb rury.

Słowa kluczowe: pompa ciepła, wymiennik, dolne źródło ciepła, grunt

Wprowadzenie

Gruntowe wymienniki ciepła są to wypełnione nośnikiem ciepła rury ułożone w gruncie w kształcie wężownic lub uzwojeń spiralnych. Ze względu na sposób ułożenia wymienników wyróżnia się dwa systemy: poziomy i pionowy. Pierwszy system wykorzystuje ciepło gruntu wzbogacone o energię pochodzącą z promieniowania słonecznego w okresie lata, natomiast drugi pobiera głównie ciepło geotermiczne (Rubik, 2006).

Poziome wymienniki ciepła

Graniczna głębokość, do której środowisko zewnętrzne w znacznym stopniu oddziałuje na grunt, tj. podwyższenie lub obniżenie temperatury w poszczególnych okresach roku, wynosi w zależności od składu i wilgotności gruntu do 2 m. Stąd też energia cieplna zasilająca poziome wymienniki ciepła pobierana jest z głębokości 1 do 2 m. Na tej głęboko-

* Praca wykonana w ramach realizacji projektu badawczego NR N N313 445137

kości temperatura zmienia się sezonowo i w naszej strefie klimatycznej w okresie letnim może osiągać nawet 17°C, natomiast w zimowym około 5°C (Zalewski, 1995). Badania przeprowadzone przez Rutkowskiego (2007) dowodzą, że na głębokości 1,3 m temperatura w ciągu całego roku ulega wahaniom w zakresie 3°C, maksymalna temperatura w gruncie piaszczystym o dużej wilgotności na głębokości 1,3 m osiąga 13°C.

Wyróżnia się dwie fazy procesu poboru ciepła z gruntu:

- pobór z warstw o praktycznie stałej temperaturze,
- pobór bezpośrednio z otoczenia wymiennika (ciepło, które zostało skumulowane wcześniej w gruncie).

Grunt, przybierając postać akumulatora, gromadzi ciepło latem i oddaje je zimą. Ilość ciepła pobieranego z gruntu zależy od temperatury oraz wilgotności gleby, a także od głębokości umieszczenia przewodów wymiennika (Kurpaska i in., 2006; Neuberger i in., 2006). Gruntowe poziome wymienniki ciepła wykonane są najczęściej z rur polietylenowych, występują w postaci układów szeregowych lub wężownicowych i umieszczane w poziomych wykopach do głębokości nieprzekraczającej 2 m. Zastosowanie znajdujących także wymienniki ciepła złożone z kilku poziomych wężownic znajdujących się jedna nad drugą, z różnicą głębokości posadowienia co najmniej 0,3 m. Jak podaje Rubik, średnice rur stosowanych na budowę wymienników mieszczą się w przedziale 32 a 40 mm, a odległość między nimi wynosi 0,8 do 1,0 m (Rubik, 2011). Przyrost temperatury nośnika ciepła znajdującego się w gruncie zawiera się w przedziale od 3 do 4 K, natomiast gęstość strumienia ciepła pochodzącego z gruntu jest zależna od rodzaju oraz wilgotności gruntu, przy czym gęstość strumienia ciepła pobieranego z gruntu wilgotnego ma wyższą wartość niż z gruntu suchego (wymiennik gruntowy *online*). Istotnym czynnikiem, oprócz rodzaju gruntu, jest także sposób ułożenia rur oraz ich długość. Czynniki te mają duży wpływ na średnią wartość temperatury nośnika ciepła (Rubik, 2011).

O długości wymiennika decyduje przede wszystkim typ pompy ciepła i warunki gruntu. Poziomy gruntowy wymiennik ciepła powinien zajmować przynajmniej dwukrotną powierzchnię czerpni w porównaniu do powierzchni ogrzewanej (wymiennik gruntowy *online*). Odmianą poziomego wymiennika ciepła jest wymiennik spiralny. Są to zwinięte w kształt spirali rury polietylenowe, ułożone na głębokości od 1,6 do 2,0 m. Umieszcza się je w szerokich wykopach (0,8 do 1,0 m), oddalonych od siebie o przynajmniej 3,0 m, na długości 15,0 do 17,0 m. Stwierdza się, że zastosowanie wymiennika spiralnego redukuje o 1/3 długość wykopu w porównaniu do wymiennika wężownicowego, posiadającego tę samą wydajność (wymiennik spiralny *online*). Z badań wynika, że wymienniki spiralne stwarzają wiele trudności eksploatacyjnych, m.in. powodują zapowietrzanie się dolnego układu pompy ciepła (Rutkowski, 2007).

Poziome gruntowe wymienniki ciepła cechuje prostota instalowania, a co za tym idzie – łatwość wykonania, a także niskie nakłady inwestycyjne. Wymienniki te znajdują zastosowanie także na skalistym podłożu. Ponadto do zalet ich stosowania zalicza się również całoroczne występowanie zrównoważonej temperatury gruntu oraz możliwość długiego magazynowania ciepła. Stosowanie poziomych wymienników ciepła wiąże się także z szeregiem niedogodności, gdyż między innymi wykazują one małą efektywność systemu oraz duże opory hydrauliczne, a tym samym – wysokie koszty związane z pompowaniem czynnika grzewczego. Dodatkowo instalowanie poziomych wymienników ciepła wiąże się z koniecznością rezerwacji dużej powierzchni gruntu oraz dużą dewastacją terenu w czasie

ich instalacji. Należy pamiętać, że istnieją ograniczenia zagospodarowania terenu, na którym znajdują się wymienniki. Jak podaje Rutkowski (2007), drzewostan zmniejsza wilgotność gruntu, a tym samym obniża wydajność jednostkową dolnego wymiennika pompy ciepła. Należy pamiętać, że w zależności od głębokości posadowienia dolnego źródła pompy ciepła, występuje w mniejszym lub większym stopniu schłodzenie gruntu znajdującego się nad kolektorem, co niekorzystnie wpływa na wegetację roślin. Jak podają Adamovský i in. (2011), przy ciągłej pracy pompy ciepła w wymiennikach umieszczonych na większych głębokościach obniżenie temperatury gruntu ma charakter narastający.

Cel pracy

Celem prowadzonych badań jest ocena wydajności grzewczej trzech systemów stanowiących dolny wymiennik pompy ciepła podłączonych równolegle przy rosnącym zapotrzebowaniu ciepła, jak również dokonanie oceny efektywności pracy pompy ciepła o mocy silnika 3,56 kW i mocy grzewczej 9,5 kW, zasilającej obiekt grzewczy przy rosnącym zapotrzebowaniu mocy.

Przedmiot badań

Przedmiotem badań jest pompa ciepła zasilana z trzech równolegle podłączonych wymienników. Pompa ciepła o mocy znamionowej 9,5 kW zasilala system grzewczy tunelu ogrodniczego w okresie zmiennych warunków klimatycznych. Dolne wymienniki zasilające pompę ciepła ułożono w gruncie piaszczystym w trzech różnych konfiguracjach:

- wymiennik pojedynczy – 1 U o długości 75 m,
- wymiennik podwójny – 2 U o długości 2 x 75 m,
- wymiennik spiralny – S o długości 75 m.

Wszystkie trzy systemy wymienników ciepła wykonane były z rur polietylenowych o średnicy wewnętrznej $\varnothing 40$ mm. W zależności od konfiguracji ułożone wymienniki w gruncie zajmowały długość: pojedynczy i podwójny – 75 m, zaś spiralny 17 m.

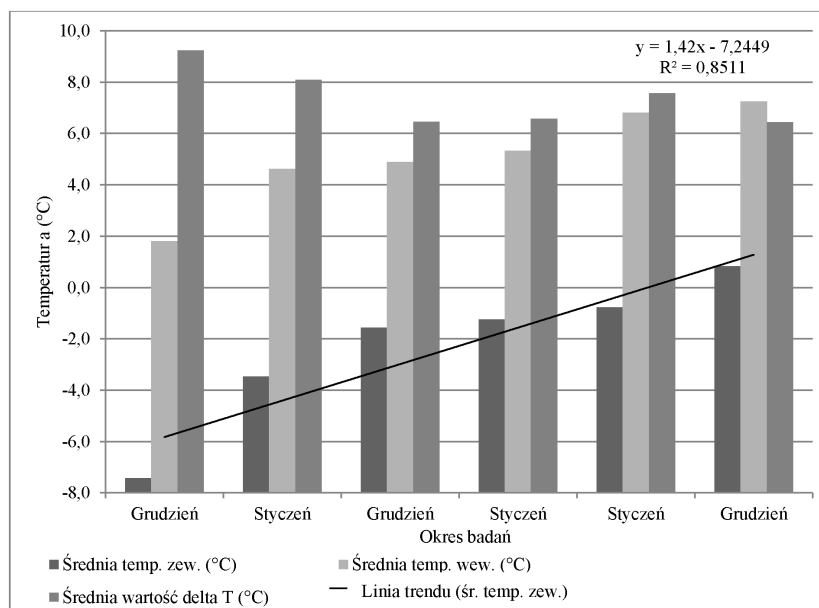
Badane wymienniki umieszczone były na głębokości:

- pojedynczy – 1,75 m,
- podwójny – pętla dolna 1,5 m; pętla górna – 2,3 m,
- spiralny – (wartość średnia) 1,75 m.

Wyniki badań

Pompa ciepła włączona jest w obieg grzewczy badanego tunelu foliowego, którego zapotrzebowanie mocy przy badanych parametrach wynosi od 5,4-7,8 kW. Zróżnicowane zapotrzebowanie mocy wynika z wartości temperatur zewnętrznych. Wartość zapotrzebowania mocy wyliczono w oparciu o wcześniej prowadzony bilans energetyczny dla zmiennych warunków zewnętrznych. Wybrane do analizy dni usystematyzowano w układzie rosnących temperatur zewnętrznych. Warunki klimatyczne, w których prowadzono badania, przedstawiono na rysunku 1. Śledząc wartości wykresu 1, zauważa się, że średnie

wartości temperatury zewnętrznej i włączona w system grzewczy pompa ciepła nie zapewniały zadanej wartości temperatury wewnątrz, która wynosiła 6°C. Analizując wartości różnicy temperatur (wewnętrznej i zewnętrznej – ΔT), zauważa się, że wahania mieszczą się w przedziale 6,5-9°C, przy wartości średniej wynoszącej 7°C.



Rysunek 1. Warunki klimatyczne w okresie prowadzonych badań usystematyzowane według malejącego zapotrzebowania mocy dostarczonej przez pompę ciepła
Figure 1. Climatic conditions within the period of the research, methodized according to the decreasing power demand supplied by a heat pump

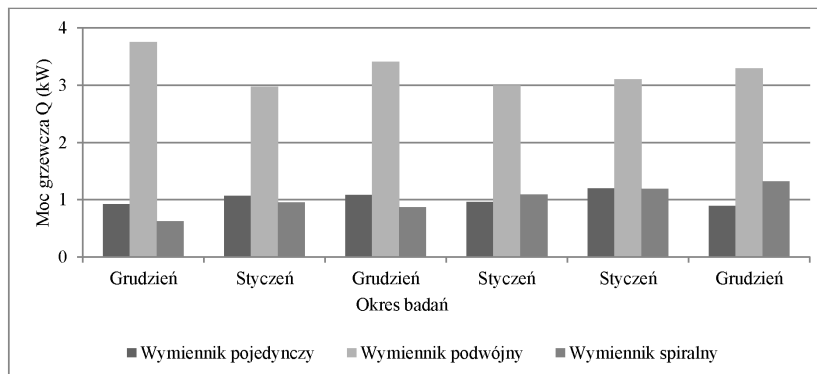
Włączone w układ zasilania pompy ciepła dolne wymienniki w wybranym okresie badań pracowały ze średnią wartością mocy (rys. 2):

- wymiennik pojedynczy – 1,02 kW,
- wymiennik podwójny – 3,22 kW,
- wymiennik spiralny – 1,01 kW.

Największymi wartościami uzyskiwanej mocy charakteryzował się wymiennik podwójny, którego wartość wahała się w zakresie 2,92-3,75 kW, przy wartości średniej 3,22 kW.

Drugim pod względem wydajności okazał się wymiennik pojedynczy, gdzie uzyskiwane wartości mocy wahały się od 0,89 do 1,19 kW, przy wartości średniej wynoszącej 1,02 kW.

Niewiele gorszym pod względem dostarczanej mocy okazał się wymiennik spiralny, którego moc wahała się w zakresie 0,62 do 1,32 zaś wartość średnia wynosiła 1,01 kW.



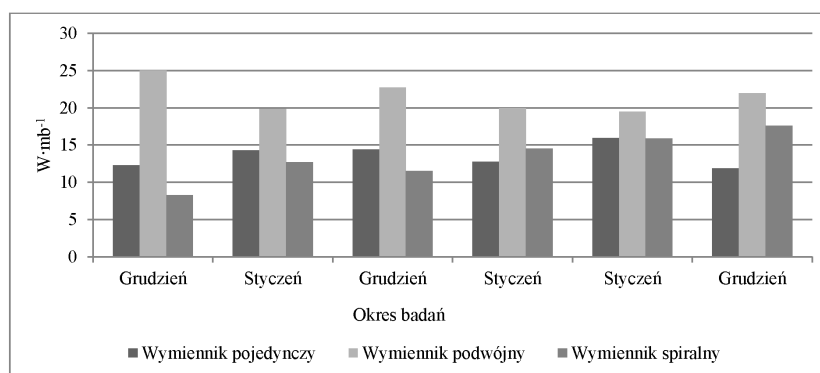
Rysunek 2. Średnie wartości mocy dolnych wymienników ciepła ułożonych w różnej konfiguracji

Figure 2. Average values of power of lower heat exchangers placed in a varied configuration

Oceniając średnie wartości mocy poszczególnych wymienników w przyjętych warunkach badań, należy stwierdzić, że największy udział w dostarczaniu energii miał wymiennik podwójny i wynosił on 60%, zaś wymienniki ułożone w konfiguracji pojedynczej i spiralnej miały mniejszy udział, który wynosił po 20%. Wymiennik ułożony w kształcie spirali w okresie badań stwarzał problemy, polegające na zapowietrzaniu się systemu. Awarie te nasilały się w czasie dłuższych przerw pracy pompy. Śledząc wartości dostarczonej mocy przez wymienniki ułożone w różnej konfiguracji (rys. 2), przy malejącym obciążeniu grzewczym pompy ciepła, zauważa się, że wymiennik ułożony w kształcie podwójnego U w miesiącu grudniu cechował się dużą wartością dostarczanej mocy niezależnie od zmieniającego się obciążenia grzewczego pompy ciepła. Analizując wyniki wcześniej prowadzonych badań (Rutkowski, 2011) i obecnych, zauważa się małą czułość wymiennika ułożonego w konfiguracji 2 U na zmieniające się warunki poboru energii. Przyczyny istniejącego stanu należy dopatrywać się w oddziaływaniu zróżnicowanej wilgotności podłoża, albowiem druga pętla tego wymiennika znajdowała się na większej głębokości gruntu, gdzie występowała większa wilgotność – wysoki poziom wód gruntowych.

Pozostałe dwa wymienniki pracowały w układzie z mniejszą mocą, która stanowiła zaledwie 30% mocy wymiennika ułożonego w konfiguracji 2 U. Wydatek mocy wymiennika ułożonego w konfiguracji 1 U nie wykazywał istotnych różnic w poszczególnych okresach zapotrzebowania mocy dostarczanej przez pompę ciepła. W wymienniku ciepła ułożonym w gruncie w kształcie spirali wraz ze spadkiem zapotrzebowania mocy dostarczanej przez pompę ciepła zauważa się malejącą wydajność. Efekt ten wyraźnie widoczny jest na rysunku 3, gdzie zilustrowano jednostkowy wydatek mocy poszczególnych wymienników. Wynik ten nasuwa wniosek, że wokół wymiennika ułożonego w kształcie spirali występuje szybsza regeneracja temperatury gruntu w okresie przerwy pracy pompy ciepła. Wynik ten wskazuje na większe zróżnicowanie wilgotności gruntu wokół wymiennika spiralnego w stosunku do wymiennika ułożonego w kształcie 1 U. Przypuszczenia te potwierdzają się podczas prowadzenia okresowych badań wilgotności gruntu. Analizując wartości zilustrowane na rysunku 3, zauważa się, że w istniejących warunkach badań najwyższą jednost-

kową wydajność z 1 mb rury wymiennika posiadał wymiennik ułożony w kształcie podwójnego U. Wydajność ta sięgała nawet 25 W na 1 mb rury. Należy podkreślić, że wysokie wydajności tego wymiennika występowały w miesiącu grudniu, po obfitych deszczach listopadowych, powodujących dużą wilgotność gruntu wokół elementów wymiennika. Wydajność jednostkowa wymiennika w miesiącu styczniu była niższa. Śledząc wyniki badań, trudno jednoznacznie określić przyczyny tak zmieniających się wydajności, albowiem w sposób ciągły nie prowadzono pomiarów wilgotności gleby, co według literatury ma duży wpływ na wymianę ciepła. Jak podaje Rezaei i in. (2012) na wydajność kolektora duży wpływ ma rodzaj materiału i struktura warstwy pokrywającej wymiennik. Na zróżnicowanie wyników mogło mieć również wpływ miejsce posadowienia wymienników, tj. oddziaływanie drzewostanu, przeszkód terenowych – ścian. Brak wyjaśnienia wymienionych różnic wydajności mobilizuje do prowadzenia bardziej szczegółowych badań obejmujących szerszy krąg czynników.



Rysunek 3. Jednostkowa średnia wartość mocy grzewczej wymienników ułożonych w różnej konfiguracji

Figure 3. Unit average value of thermal power of exchangers placed in a varied configuration

Podsumowanie i wnioski

Podsumowując, można stwierdzić, że podłączenie trzech wymienników ułożonych w różnych konfiguracjach zasilających pompę ciepła poprzez wspólny kolektor wykazało duże zróżnicowanie w zakresie dostarczanej mocy. Najefektywniejszy okazał się wymiennik ułożony w kształcie podwójnego U umieszczony na dwóch głębokościach, tj. 1,5 oraz 2,3 m. Wyraźnie odbiegające są wydatki mocy dwóch pozostałych wymienników, które umieszczone były na głębokości średnio 1,75 m. Oceniając wydatek mocy w okresie eksploatacji w odniesieniu do zmiennych warunków zapotrzebowania ciepła w wymiennikach ułożonych w kształcie pojedynczego i podwójnego U nie zauważa się wyraźnej korelacji. Odmiennie zachowuje się wymiennik spiralny, u którego wydatek mocy rośnie wraz z malejącym obciążeniem pompy ciepła. Odnosząc się do wyników pracy pompy ciepła przy malejącym obciążeniu, gdzie stosunek czasu pracy pompy do czasu przerwy rośnie,

wyraźnie widać, że w wymienniku spiralnym rośnie wydajność. W realizowanych warunkach badań wydajność grzewcza wymiennika ułożonego w kształcie podwójnego U była najwyższa; średnio jednostkowa wydajność wynosiła 21,5 W z 1 mb rury. Pozostałe dwa wymienniki, tj. pojedynczy i w kształcie spirali, posiadały średnie wydajności jednostkowe na poziomie 13 W z 1 mb rury.

Literatura

- Adamovský, R.; Masek, L.; Neuberger, P. (2011). Analysis of rock mass borehole temperatures with vertical heat exchanger. *Research in Agricultural Engineering*. No. 4(57), w druku.
- Kurpaska, S.; Latała, H.; Rutkowski, K. (2006). Analiza wydajności cieplnej gruntowego wymiennika ciepła w instalacji wykorzystującej pompę ciepła. *Inżynieria Rolnicza*, 11(86), 251-259.
- Neuberger, P.; Adamovsky, D.; Rutkowski, K. (2006). Egzergia cieplnych strumieni wymienników rekuperatorowych, część I – teoria. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 391-397.
- Rezaei, B. A.; Kolahdouz, E. M.; Dargush, G. F.; Weber, A. S. (2012). Ground source heat pump pipe performance with Tire Derived Aggregate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55/11-12, 2844-2853.
- Rubik, M. (2006). *Pompy ciepła : poradnik*. Warszawa, Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, ISBN: 83-88695-19-3.
- Rubik, M. (2011). *Pompy ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej*. Warszawa, Oficyna wydawnicza MULTICO, ISBN: 978-83-7763-052-5.
- Rutkowski, K. (2011). Ocena wydajności energetycznej wymiennika gruntowego pompy ciepła w dwóch różnych konfiguracjach. *Inżynieria Rolnicza*, 6(131), 179-185.
- Rutkowski, K. (2007). Analiza wydajności dolnego źródła pompy ciepła. *Inżynieria Rolnicza*, 6(94), 213-222.
- Zalewski, W. (1995). *Pompy ciepła : podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań : skrypt dla studentów wyższych szkół technicznych*. Kraków, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ISBN: 83-903878-3-2.

Strony internetowe:

<http://www.nanoterm.pl>

<http://www.ee.put.poznan.pl>

ASSESSMENT OF OPERATON OF HEAT EXCHANGERS PLACED IN VARIOUS CONFIGURATIONS FEEDING A HEAT PUMP

Abstract. The paper presents the energy analysis of horizontal ground exchangers of a heat pump. Three types of exchangers made of polyethylene pipes, placed in the ground single U, double U and spirally shaped were analysed. Exchangers were placed in the depth from 1.5 to 2.3 m. Thermal capacity of exchangers at varied energy demand was determined. For the existing research conditions, it was proved that the highest amount of energy is obtained in the horizontal exchanger placed in the double U configuration, the average unit thermal power capacity of which was 21.5 W from 1 current meter of a pipe. The unit power obtained from the remaining two exchangers was at the average by 40% lower and was within the range 8 to 17 W from 1 current meter of a pipe.

Key words: heat pump, exchanger, lower heat source, ground

Adres do korespondencji:

Kazimierz Rutkowski, e-mail: kazimierz.rutkowski@ur.krakow.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków