

Sławomir Kurpaska, Hubert Latała, Kazimierz Rutkowski
Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Akademia Rolnicza w Krakowie

ANALIZA WYDAJNOŚCI CIEPLNEJ GRUNTOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA W INSTALACJI WYKORZYSTUJĄCEJ POMPE CIEPŁA

Streszczenie:

W pracy przeanalizowano zmiany teoretycznej wydajności ciepła gruntowego wymiennika wykonanego z przewodu polietylowego i umieszczonego w glebie piaszczystej. Ilość ciepła z gruntu możliwa do wykorzystania zależy głównie od temperatury gleby, jej wilgotności jak również od głębokości umieszczenia przewodów wymiennika. Na podstawie przeprowadzonej analizy można określić podstawowe parametry wymiennika dotyczące głębokości umieszczenia przewodów, długości oraz wydajności cieplnej wymiennika współpracującego z przyjętą do analizy pompą ciepła.

Słowa kluczowe: pompa ciepła, poziomy wymiennik gruntowy

Wstęp

W instalacji wykorzystującej pompę ciepłą na cele grzewcze istotnym problemem jest właściwy dobór dolnego źródła ciepła. Teoretycznie, dolne źródło ciepła, spośród naturalnych, może wykorzystywać ciepło zgromadzone w: wodach powierzchniowych, wodach podziemnych, powietrzu atmosferycznym oraz gruncie. Oprócz naturalnych źródeł istnieją również takie które są konsekwencją działalności człowieka np. ścieki, nośnik przemysłowy (np. ciepło odpadowe z chłodni kominowych), czy też komunalna energia odpadowa w postaci powietrza z klimatyzowanych pomieszczeń [Fic i in. 2003]. Zagadnienie analizy współpracy z dolnym źródłem ciepła było przedmiotem badań naukowych. I tak, Zeng i in. [2003] analizowali intensywność wymiany ciepła w pionowym wymienniku, stwierdzając w konkluzji że zastosowanie podwójnego wymiennika (dwie równoległe U-rurki) redukuje, w porównaniu do pojedynczego wymiennika, od 30 do

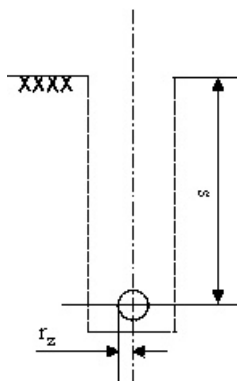
90% opór przenikania ciepła między węzownicą a otaczającą glebą. Nicholls [1981] analizował efekty energetyczne i nakłady inwestycyjne przy wykorzystaniu jako dolnego źródła ciepła powietrza z wewnątrz budynku oraz współpracującego z kolektorami słonecznymi. Berntsson [2002] dokonał syntetycznego przeglądu dolnych źródeł ciepła w instalacjach współpracujących z pompą ciepła w Szwecji wraz z analizą przydatności takich systemów w systemach grzewczych. Ozgener i Hepbasli [2005] przedstawili wyniki badań przy wykorzystywaniu pionowego wymiennika ciepła współpracującego z energią geotermalną. Instalacja grzewcza wykorzystywana była w szklarni. Autorzy szczegółowo przedstawili uzyskane efekty energetyczne, stwierdzając w konkluzji, że w badanych warunkach (instalacja zlokalizowana była w Turcji) nie ma podstaw stosowania monowalentnego systemu grzewczego (zasugerowany został system współpracujący z tradycyjnym układem grzewczym). Inalli i Esen [2005] przedstawili wyniki badań związanych ze stosowaniem w instalacji pompy ciepła poziomego wymiennika (umieszczonego na głębokości 2,0 m). Na podstawie przeprowadzonych badań, autorzy stwierdzili przydatność pompy ciepła do obniżania temperatury w okresie intensywnego nasłonecznienia budynków. Składzien i in. [2002] analizowali proces wymiany ciepła podczas nagrzewania i ochładzania się gleby w okolicy poziomego wymiennika ciepła współpracującego z pompą ciepła. Autorzy dokonali numerycznej wizualizacji temperatury w glebie oraz określili jednostkowy strumień ciepła pobierany przez czynnik krążący w dolnym źródle ciepła.

Na podstawie przedstawionych przykładowych doniesień prac badawczych, można stwierdzić, że zastosowanie dolnego źródła ciepła w postaci gruntowego wymiennika jest często spotykane, bowiem taki rodzaj źródła jest zalecany dla pomp o małej wydajności grzewczej [Brodowicz, Dyakowski 1990]. Jednak istotnym problemem jest właściwy dobór powierzchni wymiany ciepła wymiennika gruntowego, uzależniony zarówno od głębokości jak i rodzaju materiału.

Stąd celem pracy jest analiza teoretyczna związanej z doбором gruntowego wymiennika ciepła współpracującego z pompą grzejną.

Materiał i metoda

Przedmiotem analizy jest gruntowy wymiennik ciepła wchodzący w skład instalacji zlokalizowanej w obiektach Wydziału Agrotechnologii i Inżynierii Rolniczej w Krakowie. Na rysunku 1 przedstawiono schemat wymiennika wraz z przyjętymi oznaczeniami.



Rys. 1. Schemat gruntowego wymiennika ciepła
 Fig. 1. Diagram of the ground heat exchanger

Istotnym problemem jest więc rozwiązanie zagadnienia związanego z doбором odpowiedniej długości oraz głębokości umieszczenia wymiennika gruntowego. Wielkości te winny być dobrane w taki sposób, aby zapewnić wysoką sprawność pompy grzewczej. W dużym uproszczeniu można stwierdzić, że proces wymiany ciepła w wymiennikach gruntowych uzależniony jest od wielkości oporów cieplnych pomiędzy czynnikiem cyrkulacyjnym a otaczającą glebą, stąd zależność pomiędzy tymi wielkościami można opisać zależnością [Hobler 1986]:

$$\frac{\Delta T_g}{q} = R_p + R_s \quad (1)$$

gdzie:

- ΔT_g – różnica między temperaturą czynnika a temperaturą gruntu K,
- q – jednostkowa wydajność cieplna przewodu, $W \cdot m^{-1}$; R_p ,
- R_s – jednostkowy opór cieplny, odpowiednio przewodu (R_p) oraz gruntu (R_s), $mK \cdot W^{-1}$.

Zakładając, że związek między wydajnością grzewczą pompy ciepła (Q_g) oraz wydajnością dolnego źródła ciepła (Q_{zr} - jako iloczyn jednostkowej wydajności cieplnej przewodu oraz jego długości) dany jest zależnością w postaci [Brodowicz i Dyakowski, 1990]:

$$Q_{zr} = \frac{COP - 1}{COP} \cdot Q_g \quad (2)$$

Po przekształceniu równania (1) oraz uwzględniając dobową cykliczność pracy pompy, zależność między długością przewodu (l) a pozostałymi wielkościami przyjmuje postać:

$$l = Q_g \frac{COP - 1}{COP} \cdot \frac{R_p + f_h \cdot R_s}{\Delta T_g} \quad (3)$$

gdzie:

symbol f_h dany wzorem: $f_h = \frac{\tau_p}{\tau_{grz}}$ - współczynnik dobowej cykliczności pracy pompy uwzględniający czas pracy pompy (τ_p), w stosunku do sezonu grzewczego (τ_{grz}),

COP – wskaźnik efektywności energetycznej pompy ciepła.

Istotnym problemem jest określenie temperatury gleby (gruntu)- zmiennej zarówno na głębokości jak i w cyklu rocznym. Równanie przewodnictwa cieplnego, pozwalające określić temperaturę w glebie (T) na dowolnej głębokości, opisuje znana zależność w postaci:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(a \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

gdzie:

a – współczynnik dyfuzji ciepła w glebie, m^2/s ,
 z – współrzędna skierowana w głąb profilu gleby, m .

Sinusoidalną zmianę temperatury gleby na jej powierzchni opisuje zależność:

$$T(0, \tau) = A_0 \sin \omega \tau \quad (5)$$

gdzie:

A_0 – amplituda temperatury wierzchniej warstwy gleby, $^{\circ}C$,
 ω – prędkość kątowna ziemi w cyklu rocznym, $1/s$,
 τ – okresem zmian, s .

Zakładając niecelowość całkowitej analizy temperatury gleby (przy doborze gruntowego wymiennika ciepła stosuje się najbardziej niekorzystny przypadek) w dalszych rozważaniach, na podstawie wieloletniej temperatury powietrza, wyznaczono zarówno średnioroczną temperaturę gleby wraz z amplitudą jej zmian na różnej głębokości posadowienia gruntowego wymiennika ciepła.

Oddzielnym problemem jest wyznaczenie oporów przenikania ciepła zarówno przez ściankę przewodu (polietylenowy, polibutylenowy lub polipropylenowy) oraz na granicy ścianka przewodu – otaczająca gleba. Jednostkowy opór przenikania ciepła przez ściankę przewodu określa równanie [Hobler 1986]:

$$R_p = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \cdot \ln \frac{D_z}{D_w} \quad (6)$$

gdzie:

λ_p – współczynnik przewodzenia ścianki przewodu, W/mK,
 D_z, D_w – odpowiednio średnica zewnętrzna i wewnętrzna przewodu, m.

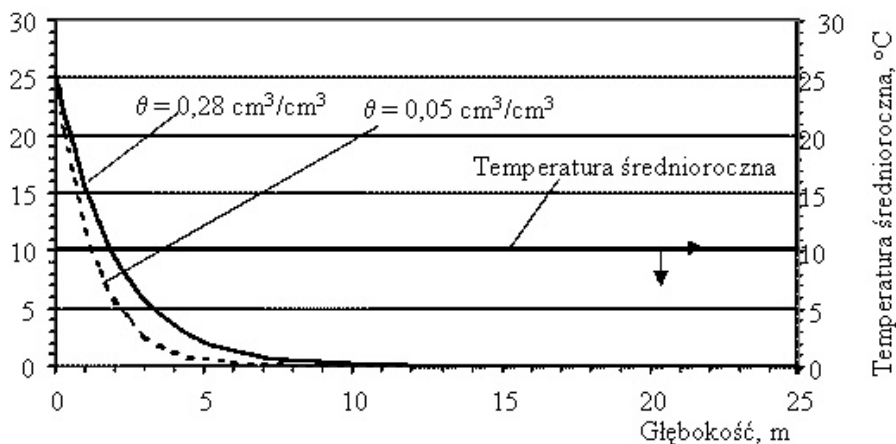
Do wyznaczenia oporu przenikania ciepła na granicy: ścianka zewnętrzna przewodu- otaczająca gleba wykorzystano metodę fikcyjnych źródeł ciepła. Metoda ta polega na znajdowaniu rozkładu temperatury w ogrzewanym ciele przy działaniu punktowych, o znanej wydajności cieplnej, źródeł ciepła. Rozkład temperatury w ogrzewanym ciele jest znajdowany przez umieszczenie, symetrycznie względem źródła rzeczywistego, fikcyjnego źródła (czyli upustu) o tej samej wydajności cieplnej co źródło rzeczywiste. Przykład zastosowania tej metody do modelowania pola temperatury w ogrzewanym podłożu ogrodniczym można znaleźć w pracy Kurpaska i Stokłosa [2004]. Wykorzystując procedurę fikcyjnych źródeł ciepła, równanie pozwalające określić opór wnikania ciepła z przewodu do gleby przyjmuje postać [Hobler 1986]:

$$R_s = \frac{\ln \frac{1-b}{b}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \quad (7)$$

gdzie: $b = \frac{r}{2 \cdot s}$, zaś parametry r , i s podano na rysunku 1, zaś λ jest współczynnikiem przewodnictwa cieplnego gleby, W/mK.

Wyniki i dyskusja

Obliczenia wykonano dla przewodu polietylenowego o następujących parametrach: $D_z/D_w = 0,04/0,034$ m; $\lambda_p = 0,4$ W/mK; $\lambda = 0,7$ oraz $1,4$ W/mK; $\lambda_s = 0,4$ W/mK, $a = 1,7$ oraz $4,1 \cdot 10^{-7}$ m²/s; pompa grzewcza o teoretycznym współczynniku COP równym $3,5$; mocy grzewczej $9,7$ kW oraz temperaturze wlotowej czynnika równej -4°C . Na Rys. 2 przedstawiono amplitudę temperatury wraz ze średnioroczną temperaturą gleby piaszczystej dla wybranych jej wilgotności. Można zauważyć, że średnia temperatura gleby, dla krajowych warunków klimatycznych wynosi $10,1^\circ\text{C}$, zaś amplituda temperatury zanika na głębokości 7 m (dla wilgotności $\theta = 0,05$ cm³/cm³) oraz na 11 m (dla wilgotności $\theta = 0,28$ cm³/cm³).

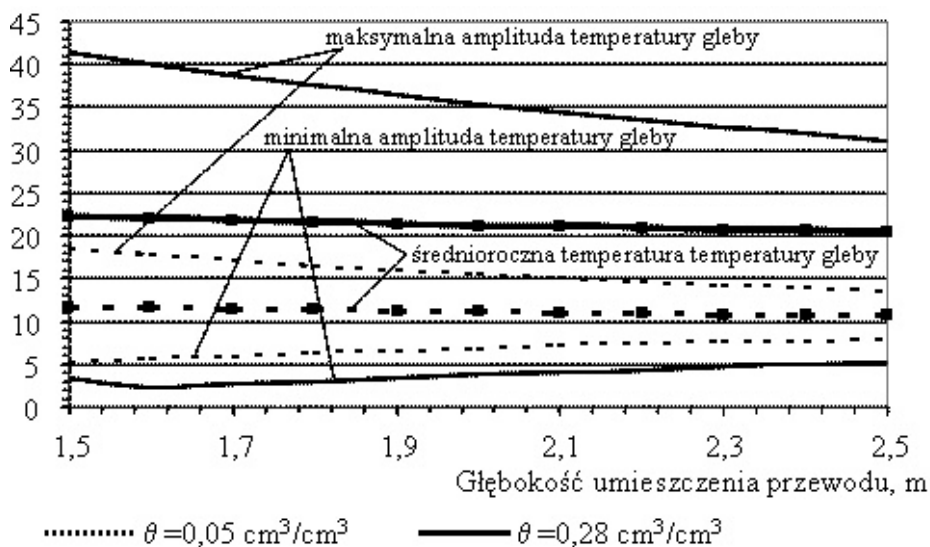


Rys. 2. Amplituda temperatury wraz z temperaturą średnioroczną dla gleby piaszczystej o różnej wilgotności

Fig. 2. Temperature amplitude with average annual temperature for sandy soil of different humidity

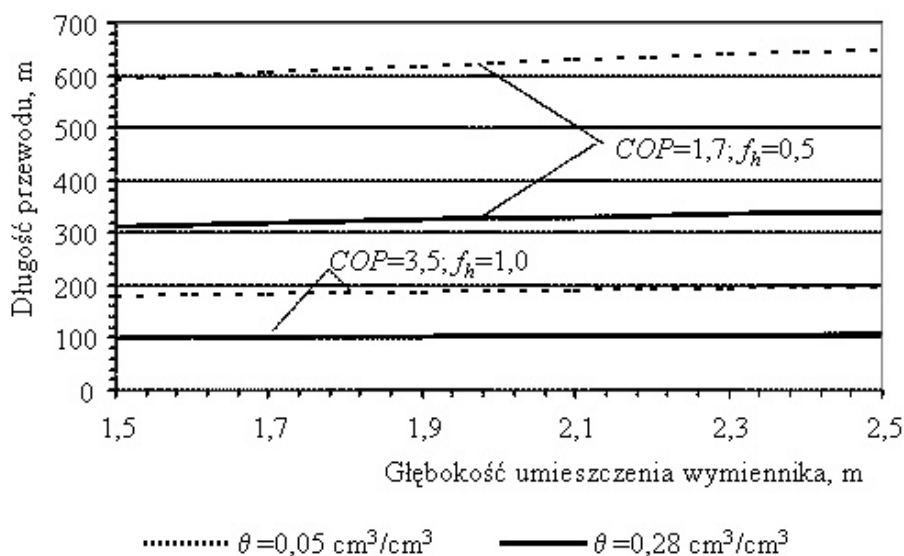
Umieszczając wymiennik na głębokości 2 m można spodziewać się temperatury gruntu, która w cyklu rocznym zmienia się od 4 do 16°C (gleba sucha). Dla gleby wilgotnej zakres tych zmian może zawierać się w granicach 1°C–19°C.

Na rysunku 3 przedstawiono zarówno średnioroczną jak i maksymalną i minimalną jednostkową wydajność cieplną analizowanego gruntowego wymiennika dla dwóch przyjętych wilgotności gleby. Wydajność ta w całym przyjętym do analizy przedziale zmiennych (wilgotność gleby, głębokość umieszczenia wymiennika) zmienia się od 2,2 do 41,4 W/m_b przewodu. Tak duży zakres zmian wydajności można wytłumaczyć zarówno zmiennością temperatury gleby jak i oporem przenikania ciepła na granicy: przewod- otaczająca przestrzeń glebowa. Jak można zauważyć, zwiększenie głębokości umieszczenia wymiennika ciepła z 1,5 do 2,5 m powoduje, w zależności od wilgotności i temperatury gleby, zmniejszenie jego wydajności od 8,4 do 57,4%. Rysunek 4 obrazuje wymaganą długość przewodu wymiennika gruntowego w zależności od współczynnika wydajności energetycznej pompy ciepła dla dwóch zróżnicowanych poziomów uwilgotnienia gleby w funkcji głębokości umieszczenia. W przyjętej do analizy zakresie zmiennych niezależnych, długość ta zawiera się w przedziale od 98 do 650 m.



Rys. 3. Jednostkowa wydajność cieplna wymiennika gruntowego
 Fig. 3. Unit caloric effect of the ground exchanger

Błąd!



Rys. 4. Wymagana długość gruntowego wymiennika ciepła w funkcji głębokości dla różnych wilgotności gleby i parametrów pracy pompy
 Fig. 4. Required length of the ground heat exchanger as a function of depth for different soil humidity values and operating parameters of the pump

Z przedstawionych zależności graficznych wynika, że im większa głębokość umieszczenia wymiennika, tym jego jednostkowa wydajność maleje. Można to wytłumaczyć wzrastającymi oporami wnikania ciepła na granicy ścianka przewodu–otaczająca gleba. Na końcowe efekty energetyczne, a tym samym wymagana długość gruntowego wymiennika ciepła ma wpływ również wilgotność gleby oraz zmiana jej temperatury. Dodatkową komplikacją, związaną z określeniem parametrów eksploatacyjnych wymiennika gruntowego, może być fakt związany z niskimi temperaturami gruntu w okresie zimy. Ma to szczególne znaczenie przy wykorzystaniu gruntu, jako zasobnika ciepła, do ogrzewania.

Należy również mieć świadomość, że niejednorodność właściwości fizycznych gruntu, niestabilna wymiana ciepła w gruncie sprawiają, że obliczenia ciepłne zostały przeprowadzone przy wielu założeniach upraszczających, stąd przedstawione końcowe wyliczenia muszą być zweryfikowane szczegółowymi badaniami eksperymentalnymi.

Wnioski

1. Jednostkowa wydajność cieplna gruntowego wymiennika w analizowanym zakresie zmiennych decyzyjnych zawiera się w przedziale od 2,2 do 41,4 W/m₀ przewodu.
2. Zwiększenie głębokości umieszczenia analizowanego wymiennika gruntowego z 1,5 do 2,5 m powoduje obniżenie jego wydajności cieplnej od 8,4 do 57,4%.
3. Dwukrotny wzrost współczynnika COP pompy, przy stałości warunków glebowych, zmniejsza trzykrotnie wymaganą długość gruntowego wymiennika ciepła.
4. W przyjętym do analizy zakresie zmiennych niezależnych długość wymiennika gruntowego zawiera się w przedziale od 98 do 650 m.

Bibliografia

- Berntsson T. 2002. Heat sources- technology, economy and environment. *International Journal of Refrigeration*, 25(4), 428-438.
- Brodowicz K., Dyakowski T. 1990. *Pompy ciepła*. PWN, Warszawa.
- Fic A., Hanuszkiewicz- Drapała M., Składzień J. 2003. Układy z pompami grzejnymi wykorzystujące zakumulowaną w gruncie energię promieniowania słonecznego. *Z. Nauk. Polit. Śląskiej, S. Energetyka*, Z. 139; 276-288.
- Hobler T. 1986. *Ruch ciepła i wymienniki*. WNT, Warszawa.

Kurpaska S., Stokłosa R. 2004. Modelowanie pola temperatury w ogrzewanym podłożu z wykorzystaniem metody fikcyjnych źródeł ciepła *Acta Agrophysica* 4(3), 727-736.

Nicholls R.I. 1981. Analysis of thermal well storage for solar collector- heat pump systems. *Building and Environment*, 16(1), 23-34.

Ozgener O., Hepbasli A. 2005. Performance analysis of a solar- assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: an experimental study. *Building and Environment*, 40 (8), 1040-1050.

Składzień J., Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M. 2002. Ochładzanie i nagrzewanie gruntu w obszarze wymiennika ciepła pompy grzewczej. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 11, 8-12.

Zeng H., Diao N., Fang Z. 1993. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchanger. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 46 (2-3), 4467-4481.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego: 2 P06R 098 29

ANALYSIS OF CALORIFIC EFFECT OF GROUND HEAT EXCHANGER IN THE HEAT PUMP INSTALLATION

Summary

The work analyzes changes of theoretical caloric effect of the ground heat exchanger made from polyethylene conduit placed in sandy soil. Amount of heat from the ground that can be used depends mainly on the temperature of the soil, its humidity and depth of placing heat exchanger conduits. Based on the performed analysis it is possible to set out basic parameters of the exchanger related to depth of conduit placement, length and calorific effect of the exchanger working with the heat pump adopted for the analysis.

Key words: heat pump, horizontal ground exchanger