

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

## **METODYCZNE ASPEKTY DOBORU DOLNEGO ŹRÓDŁA POMPY CIEPŁA DO OGRZEWANIA TUNELU FOLIOWEGO**

### **Streszczenie**

W pracy przeprowadzono teoretyczną analizę wydajności pionowego dolnego wymiennika pompy ciepła wykonanego z rur polietylenowych zasilającego tunel foliowy. Dostosowano metodykę obliczeń do warunków obiektu badań. Do obliczeń wykorzystano wartości temperatury gruntu na zróżnicowanych głębokościach.

**Słowa kluczowe:** pompa ciepła, pionowy wymiennik gruntowy, wydajność ciepła

### **Wstęp**

Wysokie ceny nośników energetycznych oraz narzucane dyrektywy ekologiczne zmuszają do sięgania po nowe źródła energii. Najczęściej są to źródła niekonwencjonalne do których dostęp wiąże się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi. Wysokie nakłady często odstraszały potencjalnych inwestorów. Łatwiejszy dostęp do funduszy pomocowych w ostatnich latach zwiększył zainteresowanie osób, których profil produkcji wymaga dużej ilości energii w różnorodnej formie. Produkcja ogrodnicza pod osłonami należy do tych działów gdzie udział ciepła w strukturze nakładów stanowi 46 do 75% [Kurpaska, Rutkowski 2002]. W obiektach pod osłonami w zależności od kierunku produkcji można zagospodarować różne rodzaje energii jak też one same mogą stanowić źródło energii. Albowiem osłony tych budowli to doskonała pułapka do zamiany energii promieniowania słonecznego na ciepło. Nadwyżka ciepła w ciągu lata może stanowić między innymi uzupełnienie energii dolnego źródła przy wykorzystaniu pompy ciepła. Najczęściej jako podstawowe źródło do zasilania pompy ciepła wykorzystywana jest energia pochodząca z głębszych warstw ziemi. Przy wyborze dolnego źródła ciepła należy brać pod

uwagę jego cechy jakościowe i ilościowe. Podstawowym warunkiem zainstalowania pompy ciepła są ilościowe możliwości dolnego źródła ciepła, jego temperatura oraz zakres zmienności w czasie. Temperatura dolnego źródła oraz zmienność w czasie mają decydujący wpływ na współczynnik efektywności pracy pompy ciepła. Ogólnie można stwierdzić, że im wyższa jest temperatura dolnego źródła ciepła tym wyższa jest sprawność energetyczna pompy. Niemniej ważnym czynnikiem są koszty inwestycyjne i eksploatacyjne planowanego przedsięwzięcia. Od wyżej wymienionych cech zależy ekonomiczna zasadność podjętej decyzji

Często skojarzona gospodarka energetyczna mimo początkowo wysokich kosztów inwestycyjnych pozwala na obniżenie kosztów eksploatacyjnych, co szczególnie widoczne jest w obiektach pod osłonami [Ladzińska 2005]. Jak podaje szereg autorów [Czekalski 2000; Skorek 2000; Kurski 1999] nakłady inwestycyjne na zakup pompy oraz wykonanie dolnego źródła ciepła są kilkukrotnie wyższe od tradycyjnych instalacji grzewczych zaś koszty wytwarzania energii pochodzącej ze źródeł przetwarzanych przez pompę ciepła są zdecydowanie najniższe. Stąd też należy doskonalić technologie produkcji pomp, usprawnić proces wykonywania dolnych źródeł oraz dążyć do optymalnego wykorzystania mocy grzewczej zainstalowanych pomp. Wielokierunkowa produkcja ogrodnicza pozwala na likwidację szczytów nadwyżek energetycznych przy korzystaniu z niekonwencjonalnych źródeł energii.

Najczęściej wykorzystywanym dolnym źródłem ciepła jest energia zawarta w gruncie bądź też w zbiornikach wodnych. To rozwiązanie eliminuje szereg problemów eksploatacyjnych. Do wymienionych źródeł ciepła należy zaliczyć: wody powierzchniowe, wody podziemne oraz grunt. Najpowszechniejszym jest wykorzystywanie gruntu, gdzie umieszcza się poziome bądź też pionowe wymienniki ciepła. Należy mieć na uwadze, że stosowanie pionowych wymienników ciepła eliminuje w znacznie większym stopniu uzależnienie od dynamiki zmian temperatury na powierzchni gruntu. Równocześnie umieszczanie wymienników na większych głębokościach zapewnia ze względu na większą wilgotność a niejednokrotnie występowanie wód gruntowych mniejsze opory przy przekazywaniu ciepła z gruntu do wymiennika. Wśród pionowych wymienników najczęściej spotykane są:

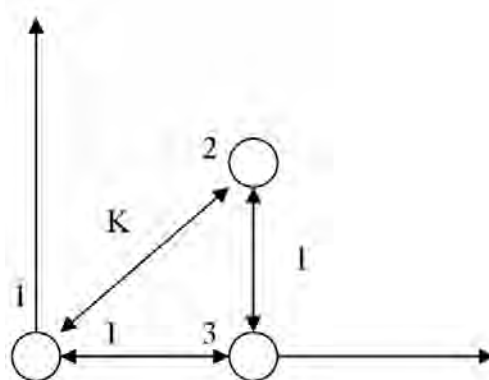
- typu U,
- z przepływem przeciwbieżnym,
- z przepływem koncentrycznym.

Na podstawie licznych prac badawczych [Skorek 2000] można stwierdzić, że warunkiem poprawności działania pompy ciepła (wysoka sprawność) jest prawidłowy dobór dolnego źródła ciepła. Przeprowadzenie takiej teoretycznej analizy dla pompy zasilającej system grzewczy tunelu foliowego będzie głównym celem pracy

## Materiał i metodyka

Przedmiotem analizy są pionowe wymienniki ciepła wykonane z rur polietylenowych stanowiące dolne źródło pompy ciepła zasilającej układ grzewczy tunelu foliowego będącego obiektem doświadczalnym na Wydziale Agrotechnologii Akademii Rolniczej w Krakowie.

Schemat rozmieszczenia odwiertów w których umieszczono wymienniki ciepła pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Rozmieszczenie wymienników pionowych w terenie

Fig. 1. Arrangement of vertical exchangers in the field

Dolne źródło pompy ciepła przyjętego obiektu badań mogą stanowić:

- wymiennik gruntowy pionowy
- wymiennik gruntowy poziomy,
- zbiornik wody podgrzewanej przez kolektor słoneczny,
- zbiornik wody podgrzewany ciepłem pochodzącym z wentylacji tunelu.

Przyjęta do badań pompa może być zasilana w różnorodnej kombinacji z zachowaniem warunków korzystnej wymiany ciepła, albowiem proces wymiany ciepła w wymiennikach gruntowych zależy przede wszystkim od oporów cieplnych między cyrkulującą cieczą a otaczającym gruntem. Uwzględniając opór cieplny materiału rur  $R_p$ , opór gruntu  $R_s$ , strumień natężenia ciepła przypadający na jednostkę długości wymiennika  $q/L$ , oraz różnicę temperatur między gruntem o nienaruszonej strukturze  $T_0$  a temperaturą  $T$  czynnika obiegowego na wyjściu z wymiennika wzajemne relacje między tymi wielkościami można przedstawić następującą zależnością:

$$\frac{T_0 - T}{q/L} = R_p + R_s \quad (1)$$

Przy zastosowaniu wymiennika w kształcie U należy określić zredukowany jednostkowy opór cieplny materiału z którego wykonane jest dolne źródło ciepła.

$$R_{pe} = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \cdot \ln \left[ \frac{D_{oe}}{D_{oe} - (D_z - D_w)} \right] \quad (2)$$

gdzie:

- $D_{oe}$  – zastępcza średnica hydrauliczna [m],
- $D_z$  – zewnętrzna średnica pojedynczej rury [m],
- $D_w$  – średnica wewnętrzna rury [m],
- $\lambda_p$  – współczynnik przewodzenia ciepła rury [W/mK].

Uwzględnioną we wzorze zastępczą średnicę hydrauliczną można obliczyć z następującej zależności.

$$D_{oe} = \sqrt{n} \cdot D_z \quad (3)$$

gdzie:

- $n$  – ilość rur

Jednostkowy opór cieplny gruntu dla pojedynczej rury można obliczyć z następującej zależności:

$$R_s = \frac{J(x)}{2\pi\lambda_s} \quad (4)$$

Wartość funkcji  $J(x)$  można odczytać z tabeli [Bose 1995] jako funkcję „ $x$ ” która wyrażona jest wzorem:

$$x = \frac{r}{2\sqrt{\alpha \cdot t}} \quad (5)$$

gdzie:

- $r$  – odległość źródła ciepła w [m] dla pojedynczej rury  $D_z$ ,
- $\alpha$  – współczynnik dyfuzji cieplnej gruntu [ $m^2/h$ ],
- $t$  – zakładany czas pracy wymiennika [h],

W zależności od sposobu rozmieszczenia pionowych wymienników w terenie należy w obliczeniach oporu cieplnego gruntu uwzględnić wzajemne oddziaływanie rur na siebie.

W ustawieniu trójkątnym pokazanym na rysunku 1 jednostkowy opór cieplny rur można obliczyć według wzoru:

$$Rs1 = \frac{J_{(xr=Do)} + J_{(xr=l)} + J_{(xr=K)}}{2\pi\lambda_s} \quad (6)$$

$$Rs2 = \frac{J_{(xr=Do)} + J_{(xr=l)} + J_{(xr=K)}}{2\pi\lambda_s} \quad (7)$$

$$Rs3 = \frac{J_{(xr=Do)} + 2J_{(xr=l)}}{2\pi\lambda_s} \quad (8)$$

Parametry geometryczne;  $k$  i  $l$  zaznaczono na rysunku 1. Wartość średniego oporu:

$$Rs = \frac{1}{3}(Rs1 + Rs2 + Rs3) \quad (9)$$

Określając długość wymiennika pionowego należy wziąć pod uwagę dodatek uwzględniający przerywany (cykliczny) charakter pracy pompy mający wpływ na wartość oporów gruntu. Najczęściej cykliczność pracy pompy ( $f_h$ ) przyjmuje się jako stosunek ilości godzin pracy pompy do czasu pracy w założonym okresie [Czekalski 2000]. Uwzględniając parametry cieplne gruntu, współczynnik efektywności pracy pompy (COP) oraz cykliczność można określić długość dolnego wymiennika ciepła ze wzoru:

$$L = \frac{Q_B \cdot \left( \frac{COP - 1}{COP} \right) (R_p + f_h \cdot R_s)}{T_0 - T} \quad (10)$$

gdzie:

$Q_B$  – maksymalne obciążenie cieplne skraplacza pompy w [W]

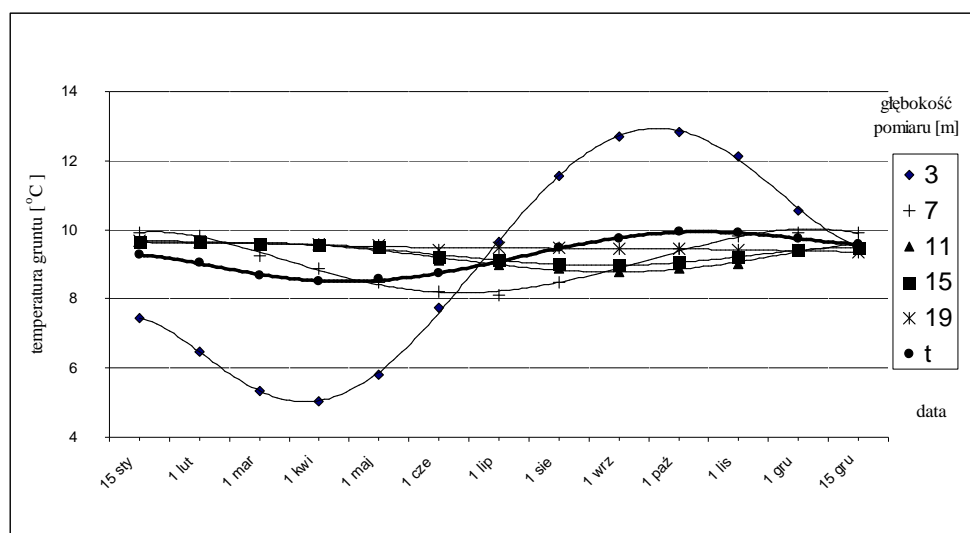
## Wyniki i dyskusja

Trzy pionowe wymienniki mają pokrywać część zapotrzebowania ciepła zasilającego tunel foliowy o powierzchni  $54 \text{ m}^2$ . Część łukową osłony tunelu stanowi folia ogrodnicza, zaś ściany szczytowe wykonane są z poliwęglanu dwuwarstwowego o grubości 6mm. Zastępczy współczynnik przenikania ciepła dla całości osłony wynosi od 4,1 do 4,8  $\text{W/m}^2\text{K}$ . Zapotrzebowanie mocy dla objętego badaniami obiektu uzależnione jest od wymagań termicznych utrzymywanych wewnątrz tunelu. Wstępnie założono, że w zakresie prowadzonych badań wystarczająca jest moc na poziomie 9 kW.

Będąc przedmiotem badań pionowe wymienniki ciepła wykonano z rur polietylenowych o średnicy 40 mm. Średnica wewnętrzna rury wynosi 34 mm. Współczynnik przewodzenia cieplnego rur przyjęto na poziomie ( $\lambda_p$ ) 0,4 W/mK, zaś opór cieplny gruntu liczone według załączonych wzorów oraz posługując się dodatkowo tabelami zamieszczonymi w literaturze [Bose 1995]. Współczynnik COP podawany przez producenta wynosi średnio 3,5, zaś moc grzewcza przy temperaturze wlotowej czynnika równej  $-4^{\circ}\text{C}$ .

Śledząc amplitudę zmian gruntu [Rubik 1999] zauważa się, że na głębokości 20 m zmiany gruncie w ciągu roku są bardzo niewielkie, rzędu  $0,35^{\circ}\text{C}$ . Im płycej tym zmiany są większe i tak na głębokości 4,5 m różnice temperatur gruntu wynoszą  $3,5^{\circ}\text{C}$ . Do obliczeń sporządzono uśredniony (zastępczy) wykres zmian temperatury gruntu w którym uwzględniono dynamikę zmian temperatury gruntu w zakresie głębokości posadowienia dolnych wymienników ciepła tj. 2,5 do 20,0 m.

Przebieg zmian temperatury gruntu przedstawiono na rysunku 2. Analizując dynamikę zmian temperatury gruntu na poszczególnych głębokościach w ciągu roku zauważa się, że wraz z głębokością umieszczenia wymiennika następuje przesunięcie w czasie oddziaływania temperatur otoczenia co korzystnie wpływa na bilans ogrzewania tunelu.



Rys. 2. Rozkład temperatur gruntu na różnych głębokościach w ciągu roku  
Fig. 2. Soil temperature distribution for different depths during the year

Przyjmując do analizy wydajności cieplnej przedstawione wcześniej wyniki oraz dolną wartość temperatury gruntu przy założonym arbitralnie współczynniku pracy pompy wynoszącym  $f_n=0,7$  możemy się spodziewać, że z zainstalowanych trzech wymienników pionowych o łącznej długości rur 114mb zasilających pompę ciepła uzyskamy moc rzędu 5,7kW w miesiącach marzec, kwiecień do 6,3kW w miesiącu październiku. Przyjęta do analizy wysoka wartość współczynnika pracy pompy wynika z warunków geologicznych podłoża w którym umieszczono wymienniki ciepła. Piaszczysty grunt o wysokim poziomie wód charakteryzuje się wysokim współczynnikiem przewodzenia ciepła przez co częstotliwość pracy pompy może być większa. Na podstawie obliczeń można stwierdzić, że analizowane pionowe wymienniki ciepła powinny posiadać jednostkową wydajność cieplną na poziomie od 50 do 55W/mb. Wydajność ta uzależniona jest od pory roku oraz warunków geologicznych. Jak wynika z przedstawionych wyników zainstalowane pionowe wymienniki ciepła są w stanie pokryć 63 do 70% szczytowego założonego zapotrzebowania ciepła ogrzewającego badany tunel ogrodnicy. Pozostałą ilość ciepła należy dostarczyć z poziomych wymienników ciepła bądź też z wody podgrzewanej kolektorem słonecznym.

### **Wnioski**

1. Dla założonych pionowych wymienników ciepła o głębokości posadowienia 20,m średnia temperatura gruntu wynosi od 8,8°C w miesiącach marzec, kwiecień do 10,2°C w miesiącu październiku.
2. Jednostkowa wydajność cieplna pionowych wymienników ciepła umieszczonych w piaszczystym, wilgotnym podłożu wynosi od 50. do 55 W/mb rury.

### **Bibliografia**

Bose J.E., Parker J.D., McQuiston F.G. 1985. Design/data manual for closed-loop Grodnu-coupled heat pump systems, Oklahoma State University.

Czekalski D. 2000. Pompy ciepła – problemy opłacalności. *Wiś Jutra* nr 18.

Gryglaszewski L. 1995. Dolne źródła energii pomp, dobór gruntowych wymienników ciepła, *Technika Chłodnicza i Klimatyzacja* nr 4.

Kurski P. 1999. Celowość stosowania pomp grzejnych w elektrociepłowni gazowej, *Gospodarka Paliwami i Energią* nr 12.

Kurpaska. S., Rutkowski K. 2002. Metodyczne aspekty określania zapotrzebowania ciepła w tunelu foliowym, *Inżynieria Rolnicza* 6(39), Kraków.

Ladzińska B. 2005. Zintegrowany system energetyczny dla modelowego obiektu szklarniowej produkcji pomidora w uprawie bezglebowej, *Rozprawa doktorska – IBMiER Warszawa*.

Rubik M. 1999. *Pompy ciepła, Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”*, Warszawa.

Skorek J., Kruppa R. 2000. Analiza ekonomiczna zastosowania pompy ciepła w typowym budynku jednorodzinnym, *Gospodarka Paliwami i Energią* nr 4.

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

## **METHODICAL ASPECTS OF SELECTING A HEAT PUMP SOURCE FOR HEATING A FOIL TUNNEL**

### **Summary**

The work includes theoretical analysis of efficiency of the vertical lower heat pump exchanger made from polyethylene pipes supplying the foil tunnel. The calculation methodology was adapted to the conditions of the tested object. For calculations values of the soil temperature for different depths were used.

**Key words:** heat pump, vertical ground exchanger, calorific effect