

EFEKTYWNOŚĆ PRACY POMPY CIEPŁA WSPÓŁPRACUJĄCEJ Z WYMIENNIKAMI GRUNTOWYMI

Sławomir Kurpaska, Hubert Latała

Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań nad efektywnością pompy ciepła współpracującej z dolnym źródłem ciepła w postaci pionowych i poziomych gruntowych wymienników ciepła. Określono wpływ długości cyklu i długości pracy pompy ciepła w procesie ładowania energią zbiornika buforowego na przebieg średnich wartości współczynnika efektywności. Określono również statystyczną istotność tych zależności.

Słowa kluczowe: pompa ciepła, efektywność, pionowe i poziome wymienniki gruntowe

Wstęp

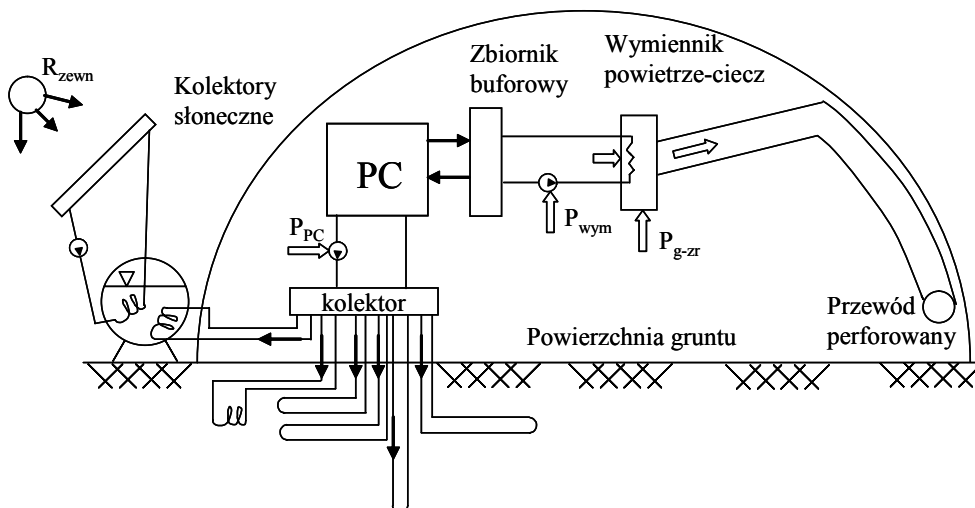
Znaczące koszty ogrzewania obiektów ogrodnich (w niektórych przypadkach koszty ciepła w krajowych warunkach stanowią blisko 70% kosztów produkcji), wzrastające wymogi ochrony środowiska narzucają konieczność poszukiwania alternatywnych, w stosunku do tradycyjnych nośników ciepła, nośników ciepła. Badania dotyczące zapotrzebowania ciepła prowadzone w krajach basenu morza śródziemnomorskiego wykazały, że koszty ogrzewania szklarni wynoszą ok. 30% ogólnych kosztów [Santamouris 1994]. W grupie rozwiązań ograniczających zużycie paliw kopalnych, istnieje wiele wyników badań w których wykorzystywano pompę ciepła do ogrzewania ogrodnich obiektów pod osłoniem. O efektywności pracy pompy ciepła współpracującej z systemem grzewczym (analizowana może dotyczyć zarówno układ monowalentny jak i hybrydowy) decyduje ilość ciepła odebranego z dolnego źródła. Im więcej ciepła odbierze pompa z dolnego źródła, tym czas jej pracy (do zmagazynowania w zbiorniku buforowym maksymalnej ilości energii) będzie krótszy, a tym samym efektywność będzie wyższa. Analiza zagadnień energetycznych, efektywności pompy ciepła w układzie monowalentnym współpracującej z wymiennikami gruntowymi (zarówno pionowymi jak i poziomymi) była prowadzona w wielu ośrodkach naukowych. I tak, Huang i Lee [2004] na podstawie wieloletnich badań określili zużycie energii elektrycznej wykorzystywanej do napędu pompy ciepła. Wyliczenia zostały przeprowadzone w odniesieniu do jednostkowego przyrostu temperatury cieczy zgromadzonej w zbiorniku buforowym pompy ciepła. Nagano i in. [2006] opracowali nowatorski system do wizualizacji i analizy efektywności pracy pompy ciepła w której jako dolne źródło wykorzystano wymiennik gruntowy. Pompa ciepła wykorzystywana była na

cele grzewcze prototypowej szklarni. W końcowej analizie przedstawili syntetyczne wskaźniki pracy pompy ciepła (efektywność pracy, wskaźniki ekonomiczne), zaś efekty energetyczne przeliczyli na ograniczenie emisji substancji emitowanych powstałych ze spalania paliw konwencjonalnych. Hepbasli i in. [2003] określili efekty energetyczne dla systemu, w którym sprężarkowa pompa ciepła współpracowała z pionowymi wymiennikami gruntowymi. W wyniku analizy określona została wydajność cieplna przewodów wymiennika gruntowego oraz współczynnik efektywności pracy. Ozgener i Hepbasli [2005a] analizowali zagadnienia energetyczne oraz nakłady finansowe ponoszone na wykorzystanie pompy ciepła (współpracującej z pionowymi wymiennikami gruntowymi) do celów grzewczych. Autorzy opracowali model symulacyjny który można wykorzystać do analizy nakładów finansowych przy stosowaniu pompy ciepła do ogrzewania obiektów. Z kolei w kolejnej pracy tych autorów [Ozgener i Hepbasli 2005b] w badaniach eksperymentalnych wyznaczyli efektywność pracy pompy grzewczej współpracującej z pionowymi wymiennikami ciepła wykorzystywanej do ogrzewania szklarni. Określili również wartość współczynnika efektywności pracy systemu (COP) który odnieśli do całkowitej energii dostarczanej z pompy ciepła oraz do tej części energii, która była wykorzystywana na cele grzewcze powyżej założonej temperatury wewnątrz obiektu szklarniowego. W pracy [Kurpaska i in. 2006] przeprowadzono analizę teoretyczną zmiany wydajności cieplnej wymiennika gruntowego w zależności od wilgotności i temperatury gruntu.

Jak można zauważyć, efektywność pompy ciepła jest uzależniona od szeregu czynników zarówno konstrukcyjnych, konfiguracji systemu wykorzystującego pompę oraz od warunków klimatycznych. Stąd celem pracy jest analiza efektywności pompy współpracującej z wymiennikami poziomymi i pionowymi zlokalizowaną w krajowych warunkach pogodowych.

Material i metoda

Badania przeprowadzono na stanowisku w którym zainstalowano pompę grzewczą służącą do ogrzewania tunelu foliowego współpracującą z wymiennikami poziomymi i pionowymi. Jako górne źródło ciepła zainstalowano dwa wymienniki ciecz- powietrze z wymuszonym przepływem powietrza. Łączna długość wymienników poziomych wynosi 300 m, zaś jako wymienniki pionowe zainstalowano 3 odwierty na głębokości ok. 20 m: w dwóch z nich zainstalowano pojedynczy wymiennik ciepła z układem zasilania typu U, zaś w jednym wymiennik z układem typu 2U. Wymienniki poziome zamontowano w czterech różnych konfiguracjach o jednakowej długości czynnej, a mianowicie na głębokości 1,7 m (układ pojedynczy), 1,5 i 2,2 m (podwójny układ równoległy) oraz w konfiguracji spiralnej o średniej głębokości posadowienia równej 1,7 m. Zarówno w pionowych jak i w poziomych wymiennikach ciepła umieszczono przewód polietylenowy o średnicy zewnętrznej 40 mm. Dodatkowo jako dolne źródło ciepła pompy grzewczej może być wykorzystany również układ hybrydowy. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie stanowisko badawcze.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 1. Test stand diagram

Do pomiaru mierzonych wielkości: parametry mikroklimatu wewnątrz i klimatu na zewnątrz obiektu, strumienia objętości i temperatury przepływającego czynnika obiegowego wykorzystano autorki Komputerowy System Pomiarowy który z czasem próbkowania równym 30 s archiwizował mierzone parametry. Współczynnik efektywności pompy obliczono ze standardowej zależności w postaci:

$$COP = \frac{Q_{wew}}{P_{PC} \cdot \tau_{PC} + P_{GR} \cdot \tau_{GR}} \quad (1)$$

Ciepło dostarczone z górnego źródła ciepła do wnętrza tunelu obliczono z zależności:

$$Q_{wew} = \sum_{i=1}^2 \left(\sum_{i=1}^n m_{GR} \cdot c_{GR} \cdot (T_{z-GR} - T_{p-GR}) \tau_{GR} \right) \quad (2)$$

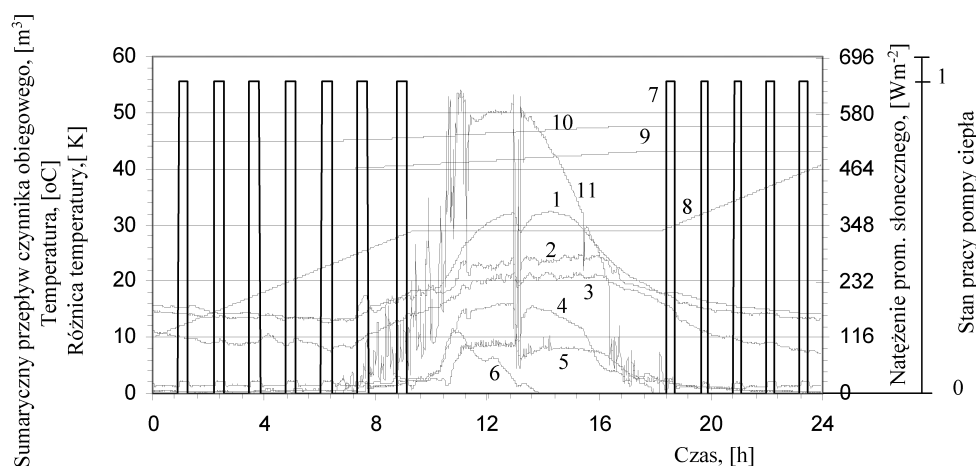
gdzie:

- Q_{wew} – ciepło dostarczone do wnętrza obiektu [J];
- P_{PC}, P_{GR} – moc elektryczna pobierana przez pompę ciepła (P_{PC}) oraz górne źródło (P_{GR}) [W];
- τ_{PC}, τ_{GR} – czas pracy pompy ciepła (τ_{PC}) oraz górnego źródła (τ_{GR}) [s];
- m_{GR} – strumień czynnika obiegowego [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$];
- c_{GR} – ciepło właściwe czynnika obiegowego [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], T_{z-GR} oraz
- T_{p-GR} – temperatura zasilania (T_{z-GR}) i powrotu (T_{p-GR}) czynnika obiegowego [$^{\circ}\text{C}$].

Do rejestracji stanu pracy pompy ciepła zastosowano układ progowy, tzn. w zależności od stanu pompy (praca, przerwa) archiwizowane było napięcie generowane przez zastosowany układ.

Wyniki i dyskusja

Badania przeprowadzono oddzielnie dla układu w którym wykorzystywano wymienniki pionowe i poziome. Na rys. 2 przedstawiono przykładowy przebieg mierzonych parametrów dla układu w którym jako dolne źródło pompy stanowiły wymienniki poziome.



Rys. 2. Przykładowy przebieg mierzonych parametrów podczas pracy wymienników poziomych: 1 – temperatura wewnątrz obiektu; 2 – średnia różnica między zasilaniem a powrotem wymienników gruntowych; 3 – stan pracy pompy ciepła; 4 – średnia różnica między zasilaniem a powrotem wymienników ciecz–powietrze; 5 – sumaryczny przepływ przez wymienniki ciecz–powietrze; 6 – sumaryczny przepływ przez wymienniki gruntowe; 7 – temperatura otoczenia; 8 – natężenie promieniowania słonecznego

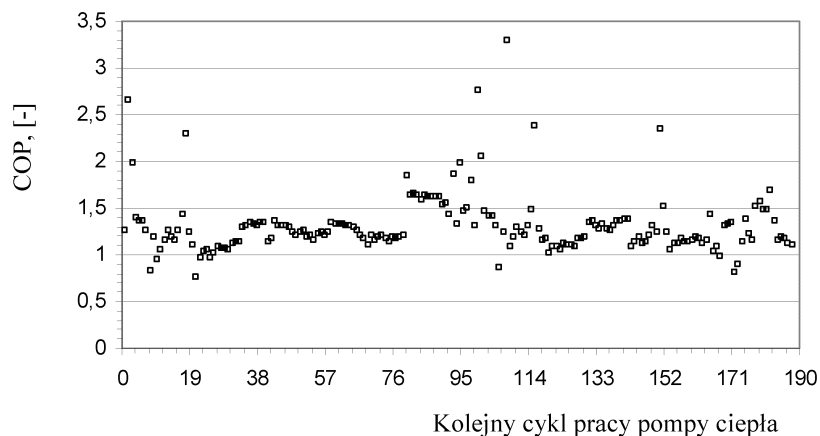
Fig. 2. Example trajectory of measured parameters during horizontal exchangers' work: 1 – inside temperature; 2 – average difference in temperature between supply and return media in ground heat exchanger; 3 – state of work heat pump; 4 – average difference in temperature between supply and return media in air – water heat exchanger; 5 – sum of media flow in air –water heat exchanger; 6 – sum of media flow in ground heat exchanger; 7 – outside temperature; 8 – solar radiation

Można zauważyć, że w okresie niskiej temperatury otoczenia oraz zaniku promieniowania słonecznego pompa grzewcza nie przekazywała ciepła do wnętrza tunelu foliowego.

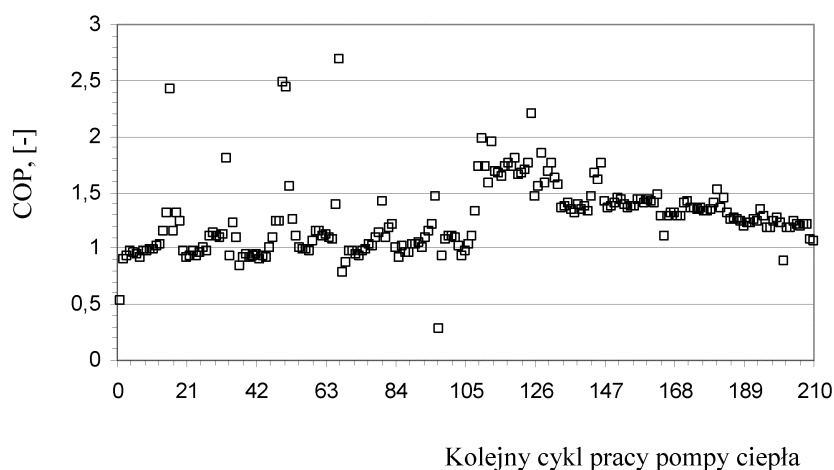
Na rys. 3 i 4 przedstawiono wyliczoną wartość współczynnika COP dla poziomych (rys. 3) i pionowych (rys. 4) wymienników ciepła.

Analizując przebieg współczynnika COP w funkcji kolejnych cykli pracy pompy grzewczej, można stwierdzić, że podczas pracy wymienników poziomych wartość tego parametru przyjmuje wyższe wartości. Średnia wartość COP podczas całego cyklu badań dla wymienników poziomych wynosi 1,52 zaś dla wymienników pionowych 1,42.

Na rys. 5 i 6 przedstawiono efektywność pompy ciepła w funkcji długości cyklu (rys. 5) oraz czasu pracy pompy ciepła (rys. 6) dla analizowanych wymienników gruntowych. Jako długość całego cyklu przyjęto czas między kolejnymi włączeniami pompy ciepła.



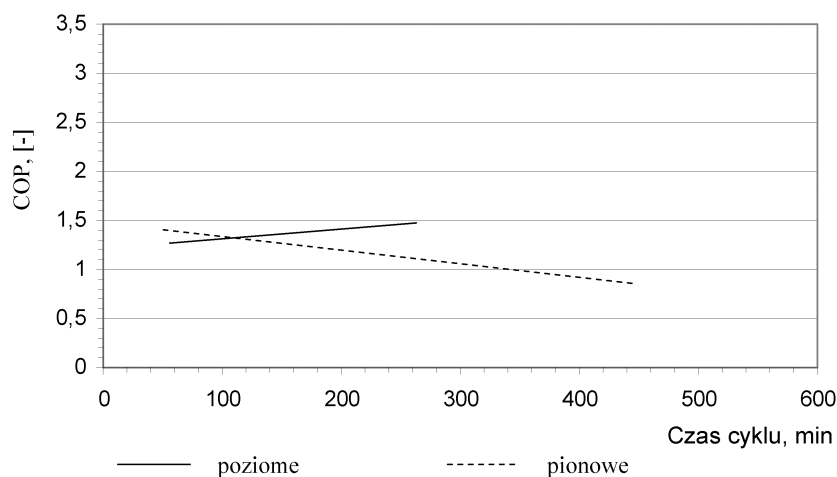
Rys. 3. Przebieg współczynnika COP podczas pracy poziomych wymienników gruntowych
Fig. 3. Trajectory of the COP coefficient during operation of horizontal ground heat exchangers



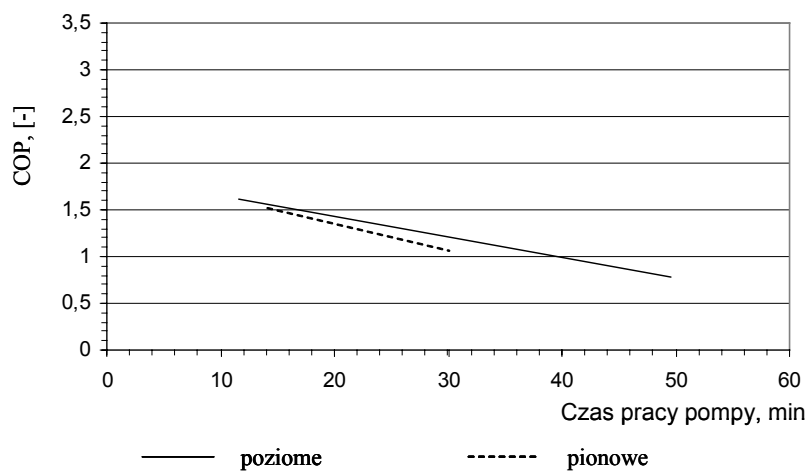
Rys. 4. Przebieg współczynnika COP podczas pracy pionowych wymienników gruntowych
Fig. 4. Trajectory of the COP coefficient during operation of vertical ground heat exchangers

Rozbieżne trendy (zmiana efektywności w funkcji długości cyklu liczonego od chwili załączenia pracy pompy do następnego załączenia) wynika z faktu zróżnicowanych warunków klimatycznych panujących wewnątrz tunelu foliowego. Układ sterowania był zaprogramowany w ten sposób, że z chwilą przekroczenia wartości zadanej (temperatura wewnątrz obiektu) następowała przerwa w dostarczaniu ciepła z wymienników cieczipowietrze, dodatkowo z teorii ruchu ciepła wynika że wraz ze wzrostem temperatury prze-

plywającego powietrza przez zastosowany wymiennik maleje intensywność przekazywania ciepła do wnętrza obiektu. Analiza statystyczna wykazała, że jedynie w przypadku wymienników pionowych zależność współczynnika COP od długości cyklu jest statystycznie istotna.



Rys. 5. Efektywność pompy ciepła w funkcji czasu cyklu
Fig. 5. Effectiveness of heat pump as cycle time function



Rys. 6. Efektywność pompy ciepła w funkcji jej czasu pracy
Fig. 6. Effectiveness of heat pump as its work time function

Z kolei wraz ze wzrostem czasu pracy pompy ciepła jej efektywność maleje. Zaobserwowane tendencje są istotne statystycznie. Wynika to z dużych wartości mocy elektrycznej (w analizowanej pompie sumaryczna moc wynosi ok. 5,4 kW) pobieranej przez silnik napędzający pompę obiegową i sprężarkę.

Analizując te wartości można stwierdzić, że stosowanie pompy ze strony energetycznej ciepła do ogrzewania obiektów ogrodniczych jest korzystne, bowiem wartość współczynnika COP przyjmuje wartości większe od jeden. Zwiększenie wartości współczynnika COP może odbyć się tylko poprzez modyfikację systemu odbioru ciepła z górnego źródła pompy grzewczej. Jak wykazały bowiem badania, czas rozładowania pompy jest równy lub zdecydowanie większy od czasu ładowania zbiornika buforowego. Istnieją więc przesłanki do stwierdzenia, że skracając czas rozładowania energii z górnego źródła można polepszyć efektywność pompy ciepła.

Wnioski

1. W badanych warunkach średnia wartość współczynnika efektywności pompy ciepła dla poziomych wymienników gruntowych jest wyższa niż dla wymienników pionowych.
2. Efektywność pompy ciepła zależy od warunków odbioru zmagazynowanego ciepła w zbiorniku buforowym.
3. Wraz ze wzrostem czasu pracy pompy ciepła jej efektywność maleje. Zależność ta jest statycznie istotna.
4. Niezależnie od rodzaju wymiennika dolnego źródła ciepła, ze strony energetycznej jest korzystne wykorzystanie pompy ciepła do ogrzewania obiektów ogrodniczych.

Bibliografia

- Hepbasli A., Akdemir O., Hancioglu E.** 2003. Experimental study of a closed loop vertical ground heat pump system. *Energy Conversion and Management* 42(4). s. 527-548.
- Huang B.J., Lee C.P.** 2004. Long-term performance of solar-assisted heat pump water heater. *Renewable Energy* 29(4). s. 633- 639.
- Kurpaska S., Latała H., Rutkowski K.** 2006. Analiza wydajności cieplnej gruntowego wymiennika ciepła w instalacji wykorzystującej pompę ciepła. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 11(86). Kraków. s. 251-259.
- Nagano K., Katsura T., Takeda S.** 2006. Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 26(14-15). s. 1578-1592.
- Ozgener O., Hepbasli A.** 2005a. Exergoeconomic analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system. *Applied Thermal Engineering* 25(10). s. 1459-1471.
- Ozgener O., Hepbasli A.** 2005b. Experimental performance analysis of solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system. *Energy and Buildings* 37(1). s. 101-110.
- Santamouris M., Argiriou A., Vallindras M.** 1994. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse. *Solar Energy* 52 (5). s. 371 - 378.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy

EFFECTIVENESS OF HEAT PUMP WORKING WITH GROUND HEAT EXCHANGERS

Abstract. The work shows results of research on effectiveness of heat pump working with lower heat sources in form of vertical and horizontal ground heat exchangers. The research allowed to determine the influence of cycle length and heat pump work duration in the process of charging the buffer tank with energy on average values of the effectiveness coefficient trajectory. Statistic relevance of these correlations was determined as well.

Key words: heat pump, effectiveness, vertical and horizontal ground heat exchangers

Adres do korespondencji:

Sławomir Kurpaska, e-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl
Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków