

ANALIZA ENERGETYCZNO-EKOLOGICZNA WYKORZYSTANIA POMPY CIEPŁA DO OGRZEWANIA TUNELU FOLIOWEGO

Sławomir Kurpaska, Hubert Latała

Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Akademia Rolnicza w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań związanych z efektami energetyczno-ekologicznymi wykorzystania pompy ciepła do ogrzewania tunelu foliowego. Pompa grzewcza pracowała w układzie hybrydowym, tzn. jako dolne źródło ciepła wykorzystano energię zmagazynowaną w zbiorniku cieczowym. W zbiorniku zainstalowano wymiennik stanowiący dolne źródło ciepła sprężarkowej pompy grzewczej. Uzyskane wyniki przeliczono na zmiany emisji substancji szkodliwych emitowanych do atmosfery w wyniku spalania tradycyjnego nośnika ciepła.

Słowa kluczowe: tunel foliowy, pompa ciepła, emisja, substancje szkodliwe, ciepło

Wstęp

Troska o stan otaczającego środowiska, zwiększone koszty pozyskiwania ciepła z tradycyjnych nośników stymulują poszukiwanie alternatywnych źródeł energii. W obecnym czasie pozyskiwanie energii z odnawialnych źródeł (energia: słoneczna, wiatru, wody, zawarta w ziemi oraz energia ze spalania biomasy) jest wyzwaniem przed którym stoją badacze z różnych ośrodków naukowych. Dotyczy to również problematyki stosowania pompy ciepłej. Zagadnienie efektywności pracy pompy ciepła, powstałe efekty energetyczno-ekologiczne były przedmiot liczych analiz. I tak, Garcia i in. [1998] rozpatrywali możliwość wykorzystania różnych źródeł ciepła (tradycyjnych i odnawialnych) do ogrzewania szklarni zlokalizowanych w różnych warunkach klimatycznych. Zauważyli, że w warunkach europejskiego klimatu w krajach basenu morza śródziemnego najlepsze efekty przyniesie stosowanie kolektorów słonecznych, podczas gdy dla krajów zlokalizowanych w północnych regionach najkorzystniej jest wspomagać ogrzewanie przy pomocy pompy ciepła. Stwierdzili konieczność magazynowania nadwyżki energii powstałej w wyniku pasywnego ogrzewania wnętrza szklarni w akumulatorach energii. Hamdan i in. [1992] analizowali wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do ogrzewania szklarni. Analizowano efektywność pracy niezależnych źródeł (pompa ciepła, kolektory słoneczne) oraz w układzie biwalentnym (hybrydowym) jako połączenie pompy z kolektorami słonecznymi. Gustavsson i Svenningsson [1996] wykazali korzyści z zastępowania tradycyjnych nośników ciepła energią powstałą z konwersji biomasy zarówno na cele grzewcze jak i paliwo służące do napędu środków transportowych. Groscurth i in. [1993] przedstawili problemy z wykorzystaniem na cele grzewcze energii pochodzącej z odnawialnych

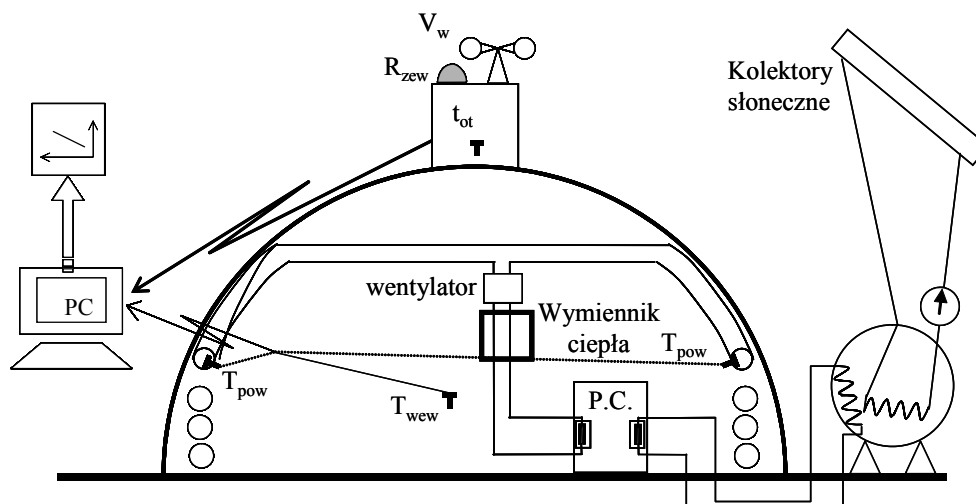
źródeł zwracając uwagę na racjonalne rozdzielenie istniejących źródeł energii odnawialnej w celu minimalizacji emisji substancji szkodliwych powstałych podczas spalania tradycyjnych nośników ciepła. Opracowali również matematyczny model systemu który wykorzystali do oceny wpływu zastępowania tradycyjnych nośników energii na zmniejszenie dwutlenku węgla emitowanego do atmosfery. W rozważaniach uwzględniono również efekty finansowe powstałe w wyniku redukcji zanieczyszczenia środowiska. Kurpaska [2007] analizował wydajność grzewczą dolnego i górnego źródła ciepła współpracujących ze sprężarkową pompą ciepła. Określono zmienność wydajności w funkcji różnicy temperatury między zasilaniem a powrotem czynnika obiegowego. Hawlader i wsp. [2001] badali efekty energetyczne systemu, w którym pompa ciepła współpracowała z kolektorem słonecznym. Autorzy określili współczynniki efektywności pracy dla poszczególnych składowych systemu. Kaygusuz [1995] przeprowadził badania symulacyjne dla systemu w którym dolne źródło ciepła współpracowało z energią powstałą z konwersji promieniowania słonecznego w powietrznych kolektorach słonecznych, zaś pompa ciepła z akumulatorem wypełnionym ciałem stałym podlegającym przemianie fazowej. Yumruta i Unsal [2000] opracowali model matematyczny do analizy współpracy pompy ciepła w której dolne źródło ciepła wykorzystywało wodę zgromadzoną w akumulatorze cieczowym umieszczonym w glebie. Przedstawiono wyniki symulacji zmienności temperatury wody jako funkcję zmiennej temperatury otaczającej gleby oraz sumarycznych star ciepła z analizowanego akumulatora. Hepbasli i wsp. [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.

Z przedstawionego przeglądu niektórych prac badawczych wynika jednoznacznie, że celowe jest przeprowadzenie analizy energetycznej oraz oszacowanie efektów ekologicznych przy stosowaniu pompy ciepła do ogrzewania obiektu ogrodniczego zlokalizowanego w warunkach polskiego klimatu.

Material i metoda

Badania przeprowadzono w tunelu foliowym (o powierzchni 54 m²) zlokalizowanym w obiektach AR w Krakowie. W tunelu zainstalowano sprężarkową pompę grzewczą (o znamionowej mocy cieplnej 9,7 kW) współpracującą z wymiennikami typu ciecz-powietrze które przekazywały ciepło ze zbiornika buforowego do wnętrza obiektu. Jako dolne źródło wykorzystano układ hybrydowy polegający na tym, że w wyniku konwersji promieniowania słonecznego następowało podgrzewanie wody zmagazynowanej w zbiorniku akumulacyjnym. W zbiorniku zainstalowano wężownicę która stanowiła dolne źródło ciepła sprężarkowej pompy grzejnej.

Zainstalowana aparatura kontrolno-pomiarowa (z przyjętym czasem próbkowania równym 30 s) umożliwiała monitoring parametrów zarówno pompy ciepła (temperatura, strumień objętości przetłaczanego czynnika w dolnym i górnym źródle ciepła) jak i parametrów klimatu wewnątrz jak i na zewnątrz doświadczalnego obiektu (temperatura powietrza, natężenie promieniowania słonecznego oraz prędkość wiatru).



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 1. Layout of experimental fixture

Poszczególne składowe bilansu ciepła rozważanego systemu (zbiornik magazynujący, ciepło dostarczone do wnętrza obiektu, zapotrzebowanie ciepła przez obiekt) dla różniczkowego czasu $d\tau$ obliczono z następujących zależności:

- ilość ciepła zmagazynowanego w zbiorniku

$$dQ_{zb} = \sum_{i=1}^n m_w \cdot c_w \cdot \rho_w dt_{zb} \quad (1)$$

- ilość ciepła dostarczonego z górnego źródła ciepła pompy do wnętrza obiektu

$$dQ_{wew} = \sum_{i=1}^2 \left(\sum_{i=1}^n m_p \cdot \rho_p \cdot c_p (t_z - t_t) \right) d\tau \quad (2)$$

- zapotrzebowanie ciepła przez ogrzewany obiekt

$$dQ_{ob} = \sum_{i=1}^n k_{ost} \cdot F_{ost} \cdot (t^* - t_{ot}) d\tau \quad (3)$$

gdzie:

- m_w – masa wody w zbiorniku akumulacyjnym, kg;
- c_w – ciepło właściwe wody, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;
- ρ_w, ρ_p – gęstość wody (ρ_w) i powietrza (ρ_p), $kg \cdot m^{-3}$;
- $t_{zb}, t_z, t_p, t^*, t_{ot}$ – temperatura odpowiednio: wody w zbiorniku (t_{zb}), zasilania (t_z) i tłoczenia (t_p) powietrza, wymagana w obiekcie (t^*), otoczenia (t_{ot}), $^{\circ}C$;
- m_p – strumień masy tłoczonego powietrza w przewodzie, $kg \cdot s^{-1}$;
- k_{ost} – współczynnik przenikania ciepła przez osłonę obiektu, $W \cdot m^{-1} \cdot K$;
- F_{ost} – powierzchnia osłony obiektu m^2 .

Hipotetyczną ilość zużytego paliwa dla obiektu bez wspomagania ogrzewania pompa ciepła (jako różnica między zapotrzebowaniem ciepła a ciepłem dostarczonym za pomocą pompy grzejnej) obliczono dla wartości opałowej węgla sortymentu miał. Współczynnik przenikania ciepła k odczytano z pracy [Kurpaska i in. 2004], zaś jednostkową emisję do atmosfery substancji szkodliwych zaczerpnięto z [Rubik 1999].

Wyniki i dyskusja

Badania przeprowadzono w zakresie następujących zmiennych: $0,4 < \sum R_{zew} < 4,33 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$; średnia temperatura otoczenia podczas dostarczania ciepła do wnętrza tunelu: $-4 < t_{ot} < 16^\circ\text{C}$.

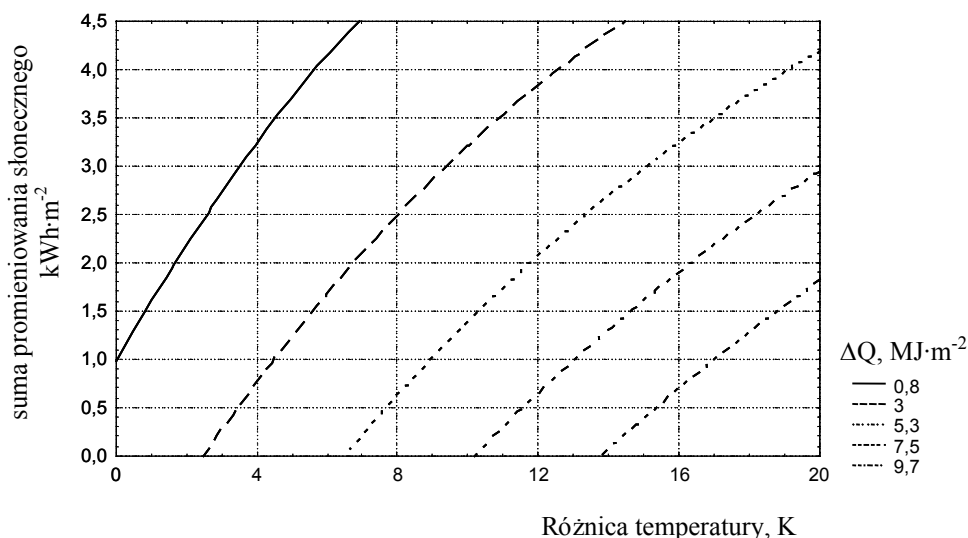
Dysponując zmierzonymi wartościami temperatury otoczenia wyliczono zapotrzebowanie ciepła przez badany obiekt podczas jednego cyklu pracy pompy ciepła. Przez cykl rozumiany jest przedział czasu od momentu rozpoczęcia pracy pompy do skończenia rozdziału ciepła ze zbiornika buforowego. Długość trwania cyklu uzależniony był głównie od natężenia promieniowania słonecznego, co w konsekwencji stymulowało czas pracy kolektorów słonecznych podgrzewających wodę zmagazynowaną w zbiorniku akumulacyjnym. Wyliczenia jednostkowego zapotrzebowanie ciepła dla analizowanego tunelu foliowego, przy założonych arbitralnie wartościach temperatury wewnątrz obiektu na poziomie 10 oraz 15°C wskazują, że dobową ilość ciepła w funkcji średniej temperatury zewnętrznej podczas wykonywania eksperymentów zawierała się w przedziale od 0 do ok. $11 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ powierzchni tunelu. Niezależnie od przyjętej temperatury wewnątrz obiektu, zależność zmiany zapotrzebowania ciepła w funkcji temperatury otoczenia wykazuje liniową tendencję.

Na rysunku 2 przedstawiono wykres warstwicyowy wpływu sumy promieniowania słonecznego oraz różnicy temperatury między wnętrzem a otoczeniem (dla dwóch wartości temperatury wewnątrz obiektu) na wymaganą ilość ciepła dostarczonego ze spalania tradycyjnego nośnika ciepła. Jak widać, wraz ze wzrostem sumy energii promieniowania słonecznego zapotrzebowanie na ciepło maleje, zaś przy wzroście różnicy temperatury wzrasta. Jest to konsekwencją zarówno zwiększonych strat ciepła przez obiekt jak i wzrostem ilości zmagazynowanego ciepła w zbiorniku akumulacyjnych będącego konsekwencją zwiększonej efektywności fototermicznej konwersji promieniowania słonecznego.

Dla przeprowadzonego cyklu badań określono warunki współpracy układu hybrydowego w aspekcie wykorzystania zgromadzonego w zbiorniku akumulacyjnym ciepła, którego źródłem były zainstalowane w systemie kolektory słoneczne. Cykle pracy systemu rozdzielono na dwa przypadki, a mianowicie korzystne i niekorzystne warunki pracy układu hybrydowego.

Pod pojęciem korzystnych warunków rozumiane jest taki stan, w którym zgromadzone ciepło w zbiorniku akumulacyjnym przewyższa zapotrzebowanie na ciepło przez obiekt badawczy. W badanych warunkach, ilość energii w odniesieniu do jednostkowej powierzchni tunelu foliowego dla korzystnych warunków wynosiła: $14,57 \text{ MJ}$ (energia słoneczna), $2,02 \text{ MJ}$ (ciepło zmagazynowane w zbiorniku), $0,48 \text{ MJ}$ (zapotrzebowanie ciepła przez obiekt przy temperaturze wewnątrz równej 10°C) oraz $1,86 \text{ MJ}$ (zapotrzebowanie ciepła przy temperaturze wewnątrz równej 15°C). Z kolei, dla niekorzystnych warunków,

poszczególne składowe ilości energii wyniosły: 2,26 (energia słoneczna), 0,05 (energia zmagazynowana w zbiorniku), 8,4 oraz 11 MJ zapotrzebowanie ciepła przez obiekt dla odpowiednio temperatury wewnątrz równej 10°C (8,4 MJ) oraz 15°C (zapotrzebowanie równe 11 MJ).



Rys. 2. Wpływ sumy promieniowania słonecznego i różnicy temperatury na zapotrzebowanie ciepła przez badany obiekt

Fig. 2. Effect of solar radiation and temperature difference on heat demand by the tested object

Na podstawie uzyskanych wyników badań w tabeli 1 przedstawiono wyliczone ilości emisji do atmosfery substancji szkodliwych powstałych ze spalania przyjętego do analizy paliwa. Wyliczenia emisji wykonano w odniesieniu do całościowej powierzchni analizowanego tunelu. Analizując zamieszczone wyniki wyliczeń, można stwierdzić, w wyniku zastosowania w systemie układu hybrydowego nastąpiło zróżnicowane zmniejszenie w emisji do atmosfery substancji szkodliwych. Największa redukcja w emisji substancji szkodliwych występuje niezależnie od przyjętej temperatury wewnątrz obiektu dla korzystnych warunków klimatycznych. W przypadku niekorzystnych warunków klimatycznych wystąpiło jedynie nieznaczne ograniczenie w emisji substancji szkodliwych. W zależności od rodzaju emitowanych do atmosfery substancji oraz przyjętej temperatury wewnątrz obiektu, zakres zmian w zmniejszenie emisji mieści się w granicach od 0,4 (dwutlenek węgla- temperatura wewnątrz 15°C) do 3,7% (dla pyłu oraz temperatury wewnątrz obiektu równej 10°C).

Tabela 1. Emisja substancji szkodliwych dla analizowanych warunków doświadczenia
 Table 1. Emission of harmful substances for analyzed experiment conditions

Rodzaj emisji [kg]	Układ grzewczy bez wspomaganie ogrzewania		Układ grzewczy ze wspomaganie ogrzewania	
	$t_{wew}=10^{\circ}\text{C}$	$t_{wew}=15^{\circ}\text{C}$	$t_{wew}=10^{\circ}\text{C}$	$t_{wew}=15^{\circ}\text{C}$
Korzystne warunki klimatyczne				
CO ₂	2,32	9,28	0	0
CO	0,046	0,184	0	0
SO ₂	0,011	0,044	0	0
NO _x	0,00025	0,001	0	0
pył	0,015	0,06	0	0
Niekorzystne warunki klimatyczne				
CO ₂	42,3	55,7	42,04	55,45
CO	0,538	0,7	0,535	0,695
SO ₂	0,204	0,26	0,203	0,256
NO _x	0,0045	0,0059	0,0044	0,0058
pył	0,27	0,35	0,26	0,34

Wnioski

1. W zależności od średniej temperatury zewnętrznej oraz przyjętej temperatury wewnątrz obiektu zapotrzebowanie na ciepło zmienia się do 0 do ok. 11 MJ·m⁻².
2. W zależności od występujących warunków, w trakcie wykonywania eksperymentów istnieją takie stany pracy analizowanego układu, kiedy nadmiar ciepła zgromadzonego w zbiorniku akumulacyjnym można wykorzystać do innych celów produkcyjnych.
3. W wyniku zastosowania zintegrowanego systemu grzewczego, w zależności od panujących warunków klimatycznych podczas cyklu pracy możliwa jest pełna redukcja substancji szkodliwych emitowanych do atmosfery.

Bibliografia

- Garcia J.L., De la Plaza S., Navas L.M., Benavente R.M., Luna L.** 1998. Evaluation of the Feasibility of Alternative Energy Sources for Greenhouse Heating. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69(2). s. 107-114.
- Groscurth H.M., Bruckner T., Kummel R.** 1993. Energy, cost, and carbon dioxide optimization of disaggregated, regional energy-supply systems. *Energy*, 18(12). s. 1187-1205.
- Gustavsson L., Svenningsson P.** 1996. Substituting fossil fuels with biomass. *Energy Conversion and Management*, 37(6-8). s. 1211-1216.
- Hamdan M. A., Al-Sayeh A. I., Jubran B. A.** 1992. Solar hybrid heating systems for greenhouses. *Applied Energy*, 41(4). s. 251-264.
- Hawladar M.N.A., Chou S.K., Ullah M.Z.** 2001. The performance of a solar assisted heat pump water heating system. *Applied Thermal Engineering*, 21(10). s. 1049-1065.
- 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.

- Kaygusuz K.** 1995. Performance of solar- assisted heat pump systems. *Applied Energy*, 51(2). s. 93-109.
- Kurpaska S.** 2007. Analiza energetyczna dolnych źródeł ciepła pompy grzewczej przy ogrzewaniu tunelu foliowego. *Inżynieria Rolnicza* (w druku).
- Yumruta R., Unsal M.** 2000. A computational model of a heat pump system with a hemispherical surface tank as a ground heat source. *Energy*, 25(4). s. 371-388.

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

POWER USE AND ECOLOGICAL ANALYSIS FOR USE OF HEAT PUMP APPLIED TO HEAT A FOIL TUNNEL

Summary. The paper presents test results pertaining to power use and ecologic effects for use of heat pump applied to heat a foil tunnel. The heat pump was operated in a hybrid system, i.e. the energy stored in a tank with liquid was used as a lower source of heat; the mentioned tank being equipped with a heat exchanger to be utilized as a lower source of heat for compressor type heat pump. The obtained results were calculated into changes of harmful waste substances flowing to the environment as a result of traditional burning of the heating medium.

Key words: foil tunnel, heat pump, emission, harmful wastes, heat

Adres do korespondencji:

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