

Experimental studies on the energy efficiency of an air-to-water heat pump in cooling mode

Badania eksperymentalne efektywności energetycznej pompy ciepła typu powietrze-woda w trybie chłodzenia



DOI: 10.15199/62.2024.12.20

Operational tests of an air-to-water heat pump in a monoblock version with the natural refrigerant R290 (propane) were presented. The effect of temp. and variable mass flow of water in the evaporator circuit and variable heat load of the condenser on the selection of electronic expansion valve settings and the cooling power of the heat pump was discussed. Tests were carried out for the heat pump in the cooling mode of a laboratory room, in 60-minute measurement cycles. For the full heat load, an av. COP of 2.20 was obtained for the entire system.

Keywords: heat pump, inverter, energy efficiency, R290, COP

Przedstawiono wyniki badań eksploatacyjnych pompy ciepła typu powietrze-woda w wersji monoblok z naturalnym czynnikiem chłodniczym R290. W pompie ciepła zastosowano sprężarkę inwerterową. Omówiono wpływ temperatury i zmiennego strumienia masy wody w obiegu parownika oraz zmiennego obciążenia cieplnego skraplacza na dobór nastaw elektronicznego zaworu rozprężnego i moc chłodniczą pompy ciepła. Badania wykonano dla pompy ciepła w trybie chłodzenia pomieszczenia hali laboratoryjnej. W czasie 60-minutowych cykli pomiarowych dla pełnego obciążenia sprężarka zużywała średnio 2700 Wh energii elektrycznej, a zapotrzebowanie wentylatorów i pompy obiegowej wynosiło średnio 900 Wh. Pompa ciepła wytwarzała energię chłodniczą na poziomie 8000 Wh.

Słowa kluczowe: pompa ciepła, inwerter, efektywność energetyczna, R290, COP

W Unii Europejskiej budynki należą do największych konsumentów energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia z udziałem ok. 50% w całkowitym zużyciu energii¹⁻³). Pompy ciepła zaliczane są do solidnej technologii umożliwiającej osiągnięcie ogólnounijných celów całkowitej dekarbonizacji sektora budowlanego do 2050 r.^{4, 5}). Przyjęto, że wszystkie nowo budowane budynki w Europie powinny być budynkami o niemal zerowym zużyciu energii. Systemy ogrzewania wykorzystujące pompy ciepła charakteryzuje wysoka efektywność energetyczna w porównaniu z konwencjonalnymi systemami ogrzewania⁶).

Obecnie w obliczu rosnących obaw dotyczących globalnej zmiany klimatu R290 (propan) jest uważany za konkurencyjny czynnik chłodniczy nowej generacji stosowany

w pompach ciepła powietrze-woda⁷). Na przykład Blanco i współpr.⁸) ocenili wydajność układu powietrze-woda w różnych warunkach przegrzania, stosując R290 jako czynnik chłodniczy. Murano i współpr.⁹) przeprowadzili badania nad wykorzystaniem odwracalnej pompy ciepła do ogrzewania budynków mieszkalnych⁹). Ghoubali i współpr.¹⁰) dokonali przeglądu norm dotyczących czynnika R290 w pompie ciepła i przedstawili badanie optymalizacji współczynnika COP (*coefficient of performance*) dla pompy ciepła z różnymi typami skraplaczy¹⁰). R290 ma zalety w zakresie wydajności termodynamicznej, efektywności ekonomicznej i cech środowiskowych. Jednak łatwopalne właściwości R290 uniemożliwiły jego szerokie zastosowanie w dużych systemach. Obecnie przyjmuje się, że z względów bezpieczeństwa, możliwość zastosowania R290 w pompach ciepła o nominalnej mocy grzewczej do 13 kW¹¹).

Celem pracy było wyznaczenie sprawności energetycznej pompy ciepła w trybie chłodzenia i analiza wykorzystania odwracalnych pomp ciepła do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń.

Część doświadczalna

Aparatura

Do budowy stanowiska badawczego wykorzystano pompę ciepła typu powietrze-woda wykonaną w wersji monoblok z uwagi na zastosowany czynnik chłodniczy R290. W pompie



Dr inż. Mariusz SZREDER (ORCID: 0000-0002-2823-4322) w roku 1994 ukończył studia na Wydziale Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku. W 2001 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na tym samym wydziale. Jest adiunktem w Instytucie Inżynierii Mechanicznej tej samej uczelni. Specjalność – inżynieria mechaniczna.

* Adres do korespondencji:

Instytut Inżynierii Mechanicznej, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska Filia w Płocku, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, tel.: (24) 367-22-74, e-mail: mariusz.szreder@pw.edu.pl

ciepła zastosowano sprężarkę inwerterową Panasonic o mocy 10 kW. Do sterowania obiegiem chłodniczym zastosowano elektroniczny zawór rozprężny sterowany za pomocą regulatora przegrzania EKE firmy Danfos. W obiegu chłodniczym zastosowano lamelowy blok skraplacza LH84 o mocy 12,8 kW i wymiennik płytowy P7-30 o mocy znamionowej 20 kW. Stanowisko testowe było wykorzystywane do ogrzewania hali laboratoryjnej o kubaturze 1000 m³. Jako wymienniki ciepła w hali laboratoryjnej zastosowano dwie nagrzewnice wodne Volcano VR3 o mocy 13–75 kW. Do pomiaru natężenia przepływu wody w obiegu górnego źródła zastosowano przepływomierz Rosemount 8732, a do pomiaru zużycia prądu używano miernika parametrów sieci 3-fazowej.

Zaprojektowane stanowisko badawcze zostało wyposażone w specjalistyczny system pomiarowo-sterujący zbudowany z wykorzystaniem sterownika Simatic serii S7-1500. Do napędu sprężarki i pompy obiegowej wykorzystano falowniki Sinamics G120C.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono dla pracy pompy ciepła w trybie chłodzenia pomieszczenia hali laboratoryjnej. Rejestracja wydajności grzewczej/chłodniczej pompy ciepła była prowadzona przez pomiar strumienia ciepła w obiegu wodnym. Do pomiaru temperatury wody wykorzystano specjalne czujniki RTD PT100 klasy A. Były one odpowiednio sparowane i specjalnie skalowane. Rejestracja strumienia ciepła odbywała się z niepewnością pomiaru poniżej 1%. W stanowisku testowym zainstalowano dodatkowe czujniki do pomiaru istotnych parametrów, które były niezbędne do wykonania analizy energetycznej procesów termodynamicznych w pompie ciepła. Do pomiaru temperatur w obiegu freonowym wykorzystano termopary typu K zamontowane na rurach za pomocą zacisków i dodatkowo zabezpieczone termicznie. Pomiar ciśnienia skraplania i parowania czynnika R290 wykonano za pomocą przetworników ciśnienia AKS32R.

Dane pomiarowe rejestrowano co 30 s w podstawowym systemie pomiarowo-sterującym. Ustawiona częstotliwość pomiaru umożliwiała wyznaczenie chwilowej mocy grzewczej/chłodniczej i zapotrzebowania na energię elektryczną.

Taką samą metodologię pomiarów

zastosowano do wykonania analizy energetycznej pompy ciepła we wcześniejszych badaniach^{12,13}. Analogicznie przeprowadzono 60-minutowe cykle pomiarowe pompy ciepła w zależności od zmiennego obciążenia cieplnego pompy ciepła.

Wyniki badań

Regulacja wydajności pompy obiegowej umożliwiała zmianę średniego natężenia strumienia masy wody w zakresie 0,23–0,35 kg/s.

Na rys. 1 przedstawiono zarejestrowane przebiegi zmian temperatury w obiegu pompy ciepła przy temperaturze powietrza zewnętrznego 30°C. Z uwagi na dużą kubaturę hali laboratoryjnej zaobserwowano nieznaczne zmiany temperatury w czasie cyklu pomiarowego w obiegu wodnym w parowniku oraz na wylocie powietrza za skraplaczem. Wynikało to z dużej bezwładności cieplnej chłodzonej przestrzeni. Oznacza to, że w czasie całego cyklu pomiarowego utrzymywały się stabilne warunki pracy pompy ciepła przy stałym obciążeniu cieplnym. Jedynie w przypadku temperatury czynnika chłodniczego na wyjściu z kompresora zaobserwowano nieznaczny jej wzrost w czasie cyklu pomiarowego. W końcowej fazie cyklu pomiarowego celowo wprowadzono zakłócenie do stabilnych warunków pracy. Wyłączono automatyczne sterowanie w regulatorze przegrzania i w trybie ręcznym wymuszono zmniejszenie otwarcia zaworu rozprężnego o 10%. Obserwowano widoczny wzrost temperatury czynnika R290 na wyjściu z kompresora oraz obniżenie temperatury wody na wyjściu z parownika i powietrza za skraplaczem. Różnica temperatur na wlocie i wylocie wody z parownika wynosiła średnio $\Delta T_w = 5,8^\circ\text{C}$, natomiast w obiegu skraplacza wynosiła średnio $\Delta T_p = 8,5^\circ\text{C}$.

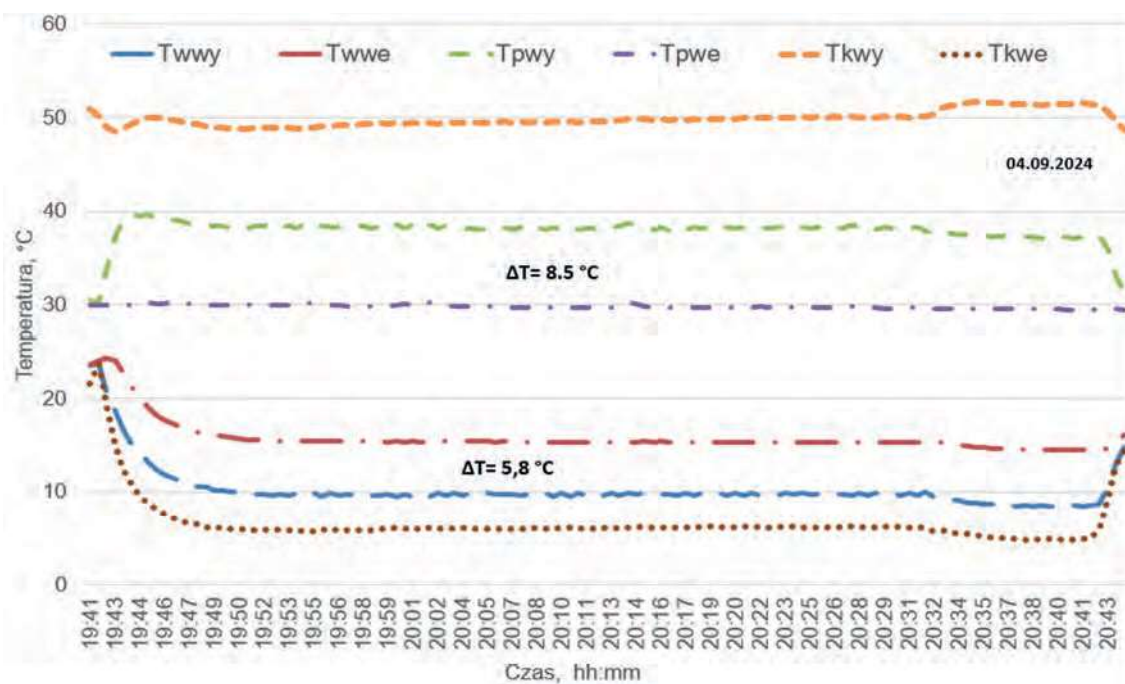


Fig. 1. Graph of temperature changes for full heat load (w – water, p – air, k – compressor)

Rys. 1. Wykres zmian temperatury dla pełnego obciążenia cieplnego (w – woda, p – powietrze, k – kompresor)

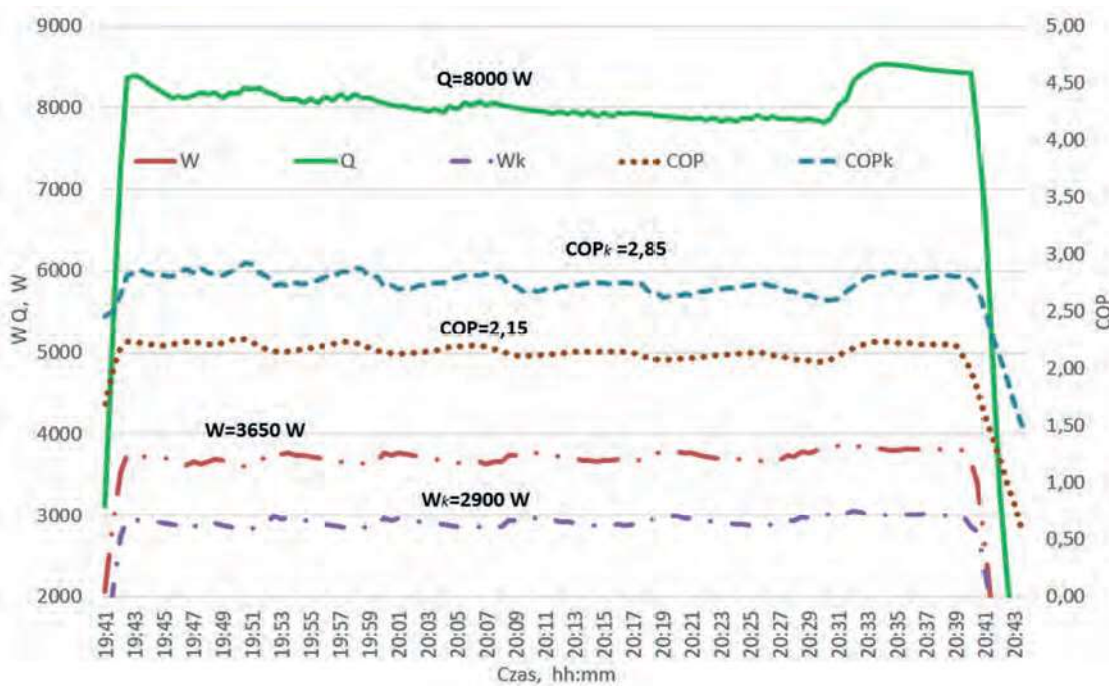


Fig. 2. Graph of instantaneous values of cooling power and electrical power demand (Q – cooling capacity, W – electricity demand, COP – coefficient of performance)

Rys. 2. Wykres wartości chwilowych mocy chłodniczej i zapotrzebowania na moc elektryczną (Q – moc chłodnicza, W – moc elektryczna, COP – współczynnik efektywności)

Table. Summary of measurement results

Tabela. Zestawienie wyników pomiarów

Nastawa falownika kompresora, Hz	Przepływ wody, kg/s	Moc chłodnicza, W	Zapotrzebowanie na energię elektryczną, W	COP	COP kompresora
30	0,23	5000	1600	3,15	4,10
45	0,35	8000	3600	2,20	2,75

Na rys. 2 podano chwilowe wartości mocy chłodniczej, zapotrzebowanie na moc elektryczną i współczynnik COP. Dla cyklu pomiarowego przy pełnym obciążeniu pompa ciepła wytworzyła 8000 Wh energii chłodniczej, zużywając 2900 Wh energii elektrycznej do zasilania sprężarki; uzyskano średni współczynnik COP = 2,75. Zapotrzebowanie na energię elektryczną do zasilania pompy obiegowej i wentylatorów wynosiło średnio 800 Wh (tabela).

Z wyników pomiarów wynika, że pompa ciepła wykazywała większą sprawność energetyczną przy częściowym obciążeniu cieplnym, jednak było to okupione znacznie mniejszą wydajnością chłodniczą.

Podsumowanie

Przeprowadzono badania eksperymentalne odwracalnej pompy ciepła w trybie chłodzenia. W czasie 60-minutowych cykli pomiarowych pompa ciepła w zależności od zmiennego obciążenia zużywała średnio 1600–3600 Wh energii elektrycznej. Moc chłodnicza zmieniała się w zakresie 5000–8000 W. Zapotrzebowanie na energię elektryczną potrzebną do napędu wentylatorów i pompy obiegowej zmieniało się w zakresie 400–900 Wh. Dla pełnego obciążenia cieplnego uzyskano średni współczynnik

COP = 2,75 dla samej pompy ciepła, niestety po uwzględnieniu zapotrzebowania wentylatorów i pompy obiegowej odnotowano spadek współczynnika do COP = 2,20. Zastosowanie elektronicznego zaworu rozprężnego umożliwiło płynną regulację mocy grzewczej/chłodniczej w zależności od zmiennych warunków obciążenia. Ponadto utrzymywanie niskiego punktu nastawy przegrzania czynnika oznaczało wzrost wydajności, co wynika ze zwiększenia ciśnienia parowania oraz lepszego wykorzystania powierzchni wymiany ciepła parownika. Zastosowanie pompy ciepła z czynnikiem chłodniczym R290 doskonale wpisuje się w zalecenia UE odno-

śnie do ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko i zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii.

Otrzymano: 09-10-2024

Zrecenzowano: 19-11-2024

Zaakceptowano: 26-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

LITERATURA

- [1] C. Wemhoener, Executive summary IEA HPT Annex 49, Report no. HPT-AN49-1, Heat Pump Centre, Borås, Sweden, 2020.
- [2] IEA, <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps>, dostęp 10 września 2024 r.
- [3] J. Polaczek, W. Lewandowski, E. Klugman, *Proekologiczne odnawialne źródła energii. Kompendium*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/844 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków i dyrektywę 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej, *Dz.U. UE* 2018 L156/75.
- [5] IEA, *The future of heat pumps*, OECD Publishing, Paris 2022, DOI: 10.1787/2bd71107-en IEA.
- [6] M. Szreder, *Chem. Eng. Technol.* 2019, **42**, nr 4, 889, DOI: 10.1002/ceat.201800606.
- [7] Y. Zhao, Y. Du, J. Lin, *Int. J. Refrig.* 2024, **159**, 385, DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2023.12.021.
- [8] J. Blanco Castro, J.F. Urchueguia, J.M. Corberan, *Appl. Therm. Eng.* 2005, **25**, nr 14–15, 2450, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.12.009.
- [9] G. Murano, F. Caffari, N. Calabrese, *Appl. Sci.* 2024, **16**, 6047, DOI: 10.3390/su16146047.
- [10] R. Ghouali, P. Byrne, *Int. J. Refrig.* 2017, **76**, 230, DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.017.
- [11] W. Tang, G. He, S. Zhou, W. Sun, *Appl. Therm. Eng.* 2018, **144**, 392, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.07.
- [12] M. Szreder, M. Miara, *Appl. Therm. Eng.* 2020, **165**, 114591, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114591.
- [13] M. Szreder, M. Miara, *Appl. Sci.* 2020, **12**, nr 24, 10521, DOI: 10.3390/su122410521.