DOI: 10.65545/COW.2026.10.01



Wpływ konfiguracji pomp ciepła na możliwość redukcji potencjału globalnego ocieplenia w istniejącym budownictwie mieszkaniowym

The impact of heat pump configurations on reducing global warming potential in existing residential buildings



Dr inż. Agnieszka Żelazna

ORCID ID: 0000-0001-6566-5802
Wydział Inżynierii Środowiska
i Energetyki
Politechnika Lubelska
a.zelazna@pollub.pl

Słowa kluczowe: pompy ciepła, dekarbonizacja, GWP, ocena cyklu życia, modernizacja źródła ciepła

Streszczenie

Dekarbonizacja sektora ogrzewania budynków wymaga oceny możliwości zastępowania konwencjonalnych źródeł ciepła rozwiązaniami o niższym potencjale tworzenia globalnego ocieplenia (GWP). Szczególne znaczenie w tym procesie mają pompy ciepła, których efekt środowiskowy zależy jednak od zastosowanej technologii, warunków pracy oraz zastępowanego źródła ciepła. Celem pracy była ocena potencjału redukcji GWP wynikającego z zastosowania różnych typów pomp ciepła w modernizacji istniejącego budynku mieszkalnego. Analizę przeprowadzono dla budynku o powierzchni 120 m^2, porównując kocioł gazowy, olejowy, węglowy i na pellet z pompami ciepła powietrze–woda, solanka–woda oraz woda–woda. Sezonową efektywność pomp określono z wykorzystaniem programu WP-OPT© zgodnie z metodyką VDI 4650, a ocenę środowiskową przeprowadzono metodą IPCC 2013 GWP100a w ujęciu cyklu życia. Wyniki wykazały istotny potencjał redukcji GWP przy zastępowaniu kotłów gazowego, olejowego i węglowego pompami ciepła, przy czym największe ograniczenie emisji uzyskano dla kotła węglowego. Najniższe wartości GWP spośród analizowanych pomp uzyskano dla układu woda–woda, a następnie solanka–woda i powietrze–woda. Środowiskowy czas zwrotu dla wariantów B1–B3 wyniósł od 0,2 do 1,2 roku. Odmienny wynik uzyskano dla kotła na pellet, którego zastąpienie pompą ciepła zwiększało GWP w przyjętym modelu, co wynikało ze sposobu bilansowania emisji biogenicznego CO_2. Uzyskane wyniki wskazują na znaczący potencjał dekarbonizacyjny pomp ciepła w warunkach polskiego systemu elektroenergetycznego, przy jednoczesnej potrzebie uwzględnienia szerszego zakresu oddziaływań środowiskowych w dalszych analizach.

Keywords: heat pumps, decarbonization, GWP, life cycle assessment, heat source modernization

Abstract

Decarbonization of the building heating sector requires an assessment of the feasibility of replacing conventional heat sources with solutions characterized by a lower global warming potential (GWP). Heat pumps are of particular importance in this process; however, their environmental performance depends on the technology used, operating conditions, and the heat source being replaced. The aim of this study was to assess the potential for GWP reduction resulting from the use of different types of heat pumps in the modernization of an existing residential building. The analysis was conducted for a 120 m^2 building, comparing a gas, oil, coal, and pellet boiler with air-to-water, brine-to-water, and water-to-water heat pumps. The seasonal efficiency of the heat pumps was determined using the WP-OPT© software in accordance with the VDI 4650 methodology, while the environmental assessment was performed using the IPCC 2013 GWP100a method within a life cycle perspective. The results demonstrated a significant potential for GWP reduction when gas, oil, and coal boilers were replaced with heat pumps, with the greatest reduction achieved for the coal boiler. Among the analyzed heat pump technologies, the water-to-water system resulted in the lowest GWP values, followed by the brine-to-water and air-to-water systems. The environmental payback period for variants B1–B3 ranged from 0.2 to 1.2 years. A different result was obtained for the pellet boiler, for which replacement with a heat pump increased GWP in the adopted model, primarily due to the method used to account for biogenic CO_2 emissions. The results indicate a significant decarbonization potential of heat pumps under the conditions of the Polish electricity system, while also highlighting the need to consider a broader range of environmental impacts in further analyses.

Wstęp

Modernizacja istniejących budynków mieszkalnych z wykorzystaniem pomp ciepła jest zagadnieniem złożonym, ponieważ wybór rozwiązania technicznego zależy w tym przypadku od wielu czynników. Obejmują one między innymi charakterystykę energetyczną budynku, istniejący system ogrzewania, wymagane parametry instalacji odbiorczej, dostępność i właściwości źródła ciepła, a także nakłady inwestycyjne, koszty eksploatacyjne oraz – co szczególnie istotne w kontekście dekarbonizacji – wpływ zastosowanego rozwiązania na środowisko.

Z punktu widzenia transformacji energetycznej szczególnie istotna jest ocena, w jakim stopniu zastosowanie pompy ciepła w istniejącym budynku może przyczynić się do ograniczenia oddziaływania środowiskowego

związanego z jego ogrzewaniem. Skala tego efektu zależy jednak nie tylko od rodzaju zastępowanego źródła ciepła, lecz również od przyjętego scenariusza modernizacji i konfiguracji całego systemu. Z tego względu analiza wpływu różnych konfiguracji pomp ciepła na potencjał globalnego ocieplenia (GWP) może dostarczyć istotnych informacji przy ocenie możliwości ograniczenia oddziaływania środowiskowego związanego z eksploatacją istniejących budynków mieszkalnych.

W przeciwieństwie do konwencjonalnych technologii grzewczych wykorzystujących spalanie paliw kopalnych, pompy ciepła wykorzystują ciepło dostępne w powietrzu, gruncie lub wodzie i przekazują je do instalacji grzewczej budynku. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie ciepła niskotemperaturowego dostępnego w otoczeniu przy zachowaniu wysokiej efektywności energetycznej. Pompy ciepła mogą tym samym przyczyniać się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, szczególnie gdy są zasilane energią elektryczną pochodzącą z odnawialnych źródeł energii (IEA, 2022). Rosnący udział tych źródeł w produkcji energii elektrycznej jest jednym z istotnych elementów transformacji energetycznej i dekarbonizacji systemów energetycznych (Olczak i in., 2021).

Oprócz udziału w procesie dekarbonizacji, technologie pomp ciepła mogą przynosić szereg dodatkowych korzyści środowiskowych, gdy są oceniane z perspektywy całego cyklu życia. Badania wykorzystujące metodę oceny cyklu życia (LCA) wskazują, że wpływ środowiskowy pomp ciepła zależy zarówno od parametrów samego urządzenia, jak i od warunków jego eksploatacji, w tym zużycia energii elektrycznej, rodzaju zastosowanego czynnika chłodniczego oraz struktury miksu elektroenergetycznego (Autelitano i in., 2023; Marinelli et al., 2019). Szczególne znaczenie ma etap użytkowania, którego wpływ na wyniki oceny cyklu życia może być dominujący, a korzyści środowiskowe wynikające z zastosowania pompy ciepła zwiększają się wraz ze zmniejszaniem emisyjności energii elektrycznej wykorzystywanej do jej zasilania (Masternak i in., 2024; Violante i in., 2022). Jednocześnie wyniki analiz LCA wskazują, że zmiana technologii grzewczej może prowadzić do różnic w poszczególnych kategoriach oddziaływania na środowisko, dlatego ocena pomp ciepła powinna uwzględniać nie tylko ich efektywność energetyczną, ale również cały cykl życia systemu (Famiglietti i in., 2023).

Najnowsze badania koncentrują się również na ocenie wpływu środowiskowego samych technologii pomp ciepła w całym cyklu życia. Opracowano podejścia oparte na modelowaniu empirycznym, umożliwiające dokładniejszą ocenę środowiskowej charakterystyki jednostek pomp ciepła o różnych mocach i pracujących w różnych warunkach eksploatacyjnych (Autelitano i in., 2023). Ponadto analizy porównawcze technologii grzewczych stosowanych w budynkach mieszkalnych wskazują, że pompy ciepła mogą ograniczać wiele kategorii oddziaływania na środowisko, w tym zużycie zasobów oraz emisję zanieczyszczeń do powietrza, szczególnie w przyszłych scenariuszach energetycznych charakteryzujących się rosnącym udziałem energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych (Sevindik i in., 2021; Famiglietti i in., 2023).

Wyniki analiz LCA wskazują ponadto, że poszczególne etapy cyklu życia pomp ciepła w różnym stopniu kształtują ich całkowity potencjał globalnego ocieplenia. W większości analiz największy udział przypada na fazę użytkowania, przede wszystkim ze względu na emisje związane ze zużyciem energii elektrycznej. W przeglądzie badań LCA pomp ciepła średni udział fazy użytkowania w GWP wynosił 94,6%, podczas gdy w analizie porównawczej przeprowadzonej dla Wielkiej Brytanii wynosił około 74%. Produkcja urządzenia odpowiadała w tym przypadku za około 14% oddziaływania. Pozostałe etapy, w tym transport, konserwacja oraz koniec życia urządzenia, mają zazwyczaj mniejsze znaczenie, choć udział emisji związanych z czynnikiem chłodniczym może być istotny w zależności od rodzaju czynnika, jego strat oraz sposobu postępowania z nim po zakończeniu eksploatacji, jak przedstawiono w Tabeli 1.

Pomimo wymienionych ogólnych korzyści środowiskowych skuteczność dekarbonizacyjna systemów pomp ciepła jest nadal uwarunkowana szeregiem ograniczeń technicznych i ekonomicznych związanych z ich konfiguracją oraz warunkami eksploatacji. Wydajność techniczna pomp ciepła jest w znacznym stopniu zależna od charakterystyki dolnego źródła ciepła oraz stabilności warunków pracy, które wpływają na procesy wymiany ciepła i konwersji energii. Poszczególne technologie pomp ciepła pracują w odmiennych warunkach środowiskowych, co bezpośrednio wpływa na ich sezonową efektywność i niezawodność. Powietrzne pompy ciepła są narażone na znaczne wahania temperatury zewnętrznej, które mogą prowadzić do obniżenia ich wydajności w okresach niskich temperatur oraz w chłodniejszych regionach (Kudela i in., 2021; Rossi di Schio i in., 2021). Z kolei systemy

Tabela 1. Udział poszczególnych etapów cyklu życia pomp ciepła w całkowitym GWP oraz główne czynniki determinujące emisje. Źródło: opracowanie własne na podstawie źródeł literaturowych
Table 1. Contribution of individual life cycle stages of heat pumps to total GWP and the main factors determining emissions. Source: own elaboration based on literature sources

Etap cyklu życia	Udział w całkowitym GWP	Czynniki decydujące	Źródło
Użytkowanie – zużycie energii elektrycznej	ok. 70–95%, średnio 94,6% w analizowanym przeglądzie	Emisyjność miksu elektroenergetycznego, zużycie energii, SCOP, klimat, czas eksploatacji	Famiglietti i in. (2025); Sevindik i in. (2021)
Produkcja / wytworzenie urządzenia	ok. 5–20%; 14% w analizie dla Wielkiej Brytanii	Materiały, produkcja komponentów, zużycie energii w procesie produkcyjnym	Sevindik i in. (2021)
Wycieki czynnika chłodniczego	ok. 0–16% w analizowanych przypadkach	Rodzaj czynnika i jego GWP, ilość czynnika, częstość wycieków, uzupełnianie czynnika	Moore i in. (2017)
Koniec życia urządzenia	Zwykle niewielki dla samego urządzenia; do ok. 10% dodatkowego GWP przy założeniu całkowitej utraty czynnika	Sposób odzysku czynnika, jego GWP, recykling materiałów, sposób zagospodarowania urządzenia	Mattinen i in. (2015)

gruntowe i wodne korzystają ze stabilniejszych warunków cieplnych otaczającego ośrodka, co zapewnia bardziej równomierną pracę oraz na ogół wyższą wydajność sezonową (Aprianti i in., 2021).

Oprócz charakterystyki źródła ciepła, istotną rolę w kształtowaniu parametrów technicznych pomp ciepła odgrywa również ich konstrukcja wewnętrzna. Do kluczowych czynników należą technologia sprężarki, dobór czynnika chłodniczego oraz konstrukcja wymienników ciepła. Najnowsze rozwiązania w zakresie czynników chłodniczych o niższym potencjale tworzenia efektu cieplarnianego, a także zastosowanie sprężarek o zmiennej prędkości obrotowej i sprężarek inwerterowych przyczyniły się do znacznego zwiększenia efektywności oraz elastyczności eksploatacyjnej współczesnych pomp ciepła (Xue, 2025; Dongellini i in., 2023). Technologie te umożliwiają lepsze dostosowanie pracy urządzenia do zmieniającego się obciążenia cieplnego oraz efektywną eksploatację również w wymagających warunkach klimatycznych. Dalszą poprawę parametrów pracy można uzyskać poprzez optymalizację konstrukcji wymienników ciepła oraz zastosowanie zaawansowanych komponentów systemu, które zwiększają intensywność wymiany ciepła i ograniczają straty eksploatacyjne (Sui i in., 2023).

Ostatecznie na całkowitą efektywność instalacji pomp ciepła w znacznym stopniu wpływają rozwiązania projektowe oraz warunki eksploatacyjne całego systemu. Odpowiedni dobór mocy urządzenia, jakość wykonania instalacji oraz dostosowanie systemu do lokalnych warunków są niezbędne do zapewnienia jego optymalnego funkcjonowania (Żelazna i in. 2024). Istotnym czynnikiem jest również wymagana temperatura zasilania instalacji grzewczej budynku, ponieważ niskotemperaturowe systemy dystrybucji ciepła na ogół umożliwiają pracę pomp ciepła z wyższą efektywnością (RB&M Research, 2024; Żelazna i Pawłowski, 2025). Ponadto nowoczesne strategie sterowania oraz zaawansowane tryby pracy sprężarek mogą poprawiać efektywność przy częściowym obciążeniu i ograniczać straty energii związane z częstym załączaniem i wyłączaniem urządzenia (Underwood, 2015; Dong i in., 2017; Xi i in., 2022). Wszystkie te czynniki technologiczne i eksploatacyjne łącznie determinują sezonową efektywność oraz długoterminowe parametry pracy pomp ciepła, wskazując na potrzebę kompleksowej oceny technicznej podczas projektowania i optymalizacji zrównoważonych systemów ogrzewania.

Oprócz parametrów technicznych istotną rolę w ocenie możliwości zastosowania i upowszechnienia technologii pomp ciepła odgrywają również aspekty ekonomiczne. Z ekonomicznego punktu widzenia ich szerokie wdrażanie jest często ograniczone stosunkowo wysokimi nakładami inwestycyjnymi w porównaniu z konwencjonalnymi technologiami grzewczymi. Całkowite nakłady inwestycyjne obejmują nie tylko zakup samego urządzenia, lecz również koszty jego montażu oraz, w wielu przypadkach, modernizacji istniejącego systemu ogrzewania budynku, szczególnie w przypadku budynków poddawanych termomodernizacji. W rezultacie początkowy koszt instalacji pompy ciepła może być od dwóch do trzech razy wyższy niż koszt tradycyjnego kotła gazowego, co nadal stanowi istotną barierę dla upowszechnienia tej technologii (Stanytsina i in., 2025; Corbett i in., 2023; Brown i in., 2024).

Chociaż pompy ciepła zazwyczaj charakteryzują się niższymi kosztami eksploatacyjnymi w całym okresie użytkowania, wynikającymi z ich wyższej efektywności energetycznej, ich ogólna opłacalność ekonomiczna zależy od takich czynników, jak ceny energii elektrycznej, efektywność systemu oraz charakterystyka energetyczna budynku. W celu ograniczenia barier finansowych w wielu krajach wprowadzono mechanizmy wsparcia, obejmujące dotacje, ulgi podatkowe, preferencyjne kredyty oraz systemy opłat związanych z emisją ditlenku węgla, wspierające transformację w kierunku niskoemisyjnych systemów ogrzewania (Corbett i in., 2023; Brown i in., 2024). Analizy empiryczne wskazują, że wsparcie finansowe pokrywające znaczącą część kosztów instalacji może istotnie przyspieszać upowszechnianie pomp ciepła, szczególnie w sektorze mieszkaniowym (Carnieletto i in., 2024).

Znaczenie rodzaju źródła ciepła oraz parametrów pracy instalacji dla kosztów eksploatacyjnych charakterystycznych dla III kwartału 2026 roku w Polsce pokazują również dane Polskiej Organizacji Rozwoju Technologii Pomp Ciepła (PORT PC, 2026). Dla budynku o powierzchni 150 m^2 i jednostkowym zapotrzebowaniu na energię użytkową do ogrzewania EU = 140 kWh/(m^2·rok) roczne koszty ogrzewania pompą ciepła grunt–woda wynoszą 5160 zł przy ogrzewaniu podłogowym (35°C) i 6740 zł przy ogrzewaniu konwekcyjnym (55°C), natomiast dla pompy powietrze–woda odpowiednio 6110 i 8050 zł. Oznacza to wzrost kosztów związany ze zwiększeniem temperatury zasilania z 35 do 55°C o około 31–32%. Dla porównania koszt ogrzewania kotłem gazowym kondensacyjnym współpracującym z grzejnikami wynosi 9810 zł/rok, a kotłem olejowym 17 050 zł/rok. Dane te wskazują, że efektywność ekonomiczna pompy ciepła zależy nie tylko od rodzaju dolnego źródła, ale również od parametrów instalacji odbiorczej i temperatury jej pracy.

W ostatnich latach prowadzone były również badania nad integracją pomp ciepła z lokalnym wytwarzaniem energii ze źródeł odnawialnych. Essadik i in. (2024) analizowali funkcjonowanie systemów pomp ciepła wspomaganych instalacjami fotowoltaicznymi (PV) w różnych strefach klimatycznych, wykazując, że odpowiednio dobrane instalacje mogą pokrywać do 80% zapotrzebowania budynku na ciepło, przy jednoczesnej poprawie efektywności energetycznej i ograniczeniu zależności od energii elektrycznej z sieci. Dalszy rozwój tego podejścia przedstawili Namdar i in. (2025), którzy analizowali systemy łączące pompy ciepła z instalacjami fotowoltaicznymi w dzielnicach energetycznie dodatnich, w których budynki wytwarzają więcej energii, niż zużywają. Wyniki wskazują, że odpowiednio zaprojektowane konfiguracje PV–pompa ciepła mogą pokrywać do 90% zapotrzebowania budynku na ciepło, dodatkowo ograniczając zależność od zewnętrznych dostaw energii elektrycznej. Jednocześnie należy zauważyć, że w warunkach polskich, ze względu na nadal znaczący udział konwencjonalnych źródeł w krajowym miksie elektroenergetycznym, potencjał ograniczenia GWP związany z zastosowaniem pomp ciepła wymaga szczególnie wnikliwej oceny.

Pomimo rosnącej liczby badań dotyczących środowiskowej oceny pomp ciepła, wciąż niewystarczająco rozpoznane pozostaje znaczenie konfiguracji systemu grzewczego w przypadku modernizacji istniejących budynków

mieszkalnych, szczególnie w warunkach krajowego miksu elektroenergetycznego. W literaturze często analizuje się efektywność lub oddziaływanie środowiskowe samych pomp ciepła albo porównuje je z konwencjonalnymi technologiami grzewczymi, natomiast rzadziej rozpatrywany jest wpływ różnych scenariuszy modernizacji istniejącego budynku, obejmujących odmienne konfiguracje instalacji oraz zastępowane źródła ciepła, na redukcję emisji CO_2. Celem pracy jest zatem ocena wpływu różnych scenariuszy modernizacji budynku mieszkalnego z zastosowaniem pomp ciepła na potencjał globalnego ocieplenia (GWP), ze szczególnym uwzględnieniem konfiguracji instalacji grzewczej oraz rodzaju zastępowanego źródła ciepła.

Materiały i metody

Do analizy sposobów modernizacji źródła ciepła przyjęto budynek mieszkalny wzniesiony zgodnie ze standardem WT 2008, o powierzchni użytkowej 120 m^2 oraz projektowym obciążeniu cieplnym 7,2 kW obliczonym dla III strefy klimatycznej okresu zimowego. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania przyjęto na poziomie 150 kWh/(m^2·rok). Budynek wyposażony jest w instalację ogrzewania wodnego z grzejnikami konwekcyjnymi o temperaturze zasilania 55°C.

W celu określenia potencjału dekarbonizacyjnego pomp ciepła analizie poddano cztery warianty istniejących źródeł ciepła oraz ich zastąpienie trzema typami pomp ciepła: powietrze-woda, solanka-woda oraz woda-woda. Warianty bazowe reprezentują stosowane w istniejącym budownictwie źródła ciepła, natomiast warianty docelowe odpowiadają poszczególnym technologiom pomp ciepła. We wszystkich przypadkach zachowano niezmienne parametry budynku i instalacji odbiorczej, w tym zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania oraz temperaturę zasilania 55°C. Otrzymano w ten sposób zestaw zmiennych przedstawiony w Tabeli 2.

Tabela 2. Macierz wariantów modernizacji źródła ciepła. Źródło: opracowanie własne
Table 2. Matrix of heat source modernization variants. Source: authors' own study

Wariant bazowy / wariant modernizacji	M1 – pompa ciepła powietrze-woda	M2 – pompa ciepła solanka-woda	M3 – pompa ciepła woda-woda
B1 – kocioł gazowy	B1–M1	B1–M2	B1–M3
B2 – kocioł olejowy	B2–M1	B2–M2	B2–M3
B3 – kocioł węglowy	B3–M1	B3–M2	B3–M3
B4 – kocioł na pellet	B4–M1	B4–M2	B4–M3

Do analizy przyjęto trzy warianty pomp ciepła: powietrze-woda, solanka-woda oraz woda-woda. Nominalne wydajności cieplne przyjętych urządzeń wynoszą odpowiednio 16, 8 i 8 kW. W przypadku pompy powietrze-woda zastosowano urządzenie o zwiększonej nominalnej wydajności, dobrane z uwzględnieniem pracy monowalentnej przy temperaturze zewnętrznej −20°C. Dla wszystkich analizowanych pomp przyjęto temperaturę zasilania/powrotu instalacji 55/45°C. Deklarowane katalogowe wartości COP wynoszą odpowiednio 4,31 dla A10/W55, 4,68 dla B2/W55 oraz 6,00 dla W10/W55. W celu określenia potencjału dekarbonizacyjnego analizowanych źródeł ciepła wyznaczono sezonowy współczynnik efektywności (SCOP) z wykorzystaniem programu symulacyjnego WP-OPT©, służącego do projektowania, optymalizacji i symulacji pracy instalacji grzewczych z pompami ciepła. Program umożliwia określenie m.in. rocznego współczynnika efektywności SCOP, przebiegu temperatur dolnego źródła i instalacji grzewczej oraz zużycia energii elektrycznej. Obliczenia SCOP przeprowadzono zgodnie z metodyką VDI 4650, z uwzględnieniem parametrów pompy ciepła, temperatury dolnego źródła oraz wymagań temperaturowych instalacji grzewczej. Na bazie określonego SCOP wyznaczono roczne zużycie energii przez pompę ciepła.

Następnie przeprowadzono ocenę środowiskową w ujęciu cyklu życia (LCA), wykorzystując oprogramowanie SimaPro 8.0.13 oraz bazę danych ecoinvent v.3. Zakres analizy obejmował proces modernizacji źródła ciepła oraz roczną pracę systemu ogrzewania przed i po modernizacji. Metodą oceny wpływu zastosowaną w analizie była IPCC 2013 GWP100a, pozwalająca na określenie potencjału tworzenia efektu cieplarnianego w horyzoncie 100 lat, wyrażonego w kg CO_2 eq.

Proces modernizacji systemu ogrzewania scharakteryzowano poprzez porównanie emisji gazów cieplarnianych związanych z eksploatacją źródeł ciepła w wariantach bazowych oraz w odpowiadających im wariantach po modernizacji. Ponadto oszacowano nakłady środowiskowe związane z wytworzeniem pomp ciepła oraz, w przypadku gruntowej i wodnej pompy ciepła, z wykonaniem wymiennika dolnego źródła. Uwzględnienie tych nakładów pozwoliło na wyznaczenie środowiskowego czasu zwrotu, rozumianego jako okres niezbędny do zrekompensowania początkowych emisji związanych z modernizacją poprzez uzyskiwane w fazie eksploatacji ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, wyrażonych jako ekwiwalent CO_2.

Wyniki

Na podstawie zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania budynku oraz raportów programu WOPT do obliczeń sezonowego współczynnika efektywności SCOP obliczono roczne zużycie energii przez poszczególne źródła ciepła. W przypadku źródeł konwencjonalnych zużycie energii określono na podstawie sprawności konwersji energii chemicznej paliwa w kotle, natomiast w przypadku pomp ciepła – na podstawie sezonowego współczynnika efektywności SCOP (Tabela 3).

Kocioł węglowy stanowi źródło reprezentujące technologię o niskiej sprawności, obecnie niedostępną w sprzedaży. Z kolei wyniki uzyskane dla pomp ciepła reprezentują rozwiązania aktualnie dostępne rynkowo. Wyniki oceny środowiskowej metodą IPCC 100a procesów dostarczania ciepła w skali jednego roku wskazują na wyraźne zróżnicowanie potencjału tworzenia efektu cieplarnianego pomiędzy analizowanymi źródłami ciepła. Dla wariantów bazowych wartość GWP wyniosła 5019,5 kg CO_2 eq/rok dla kotła gazowego (B1), 5738,5 kg CO_2 eq/rok dla kotła

olejowego (B2), 11 166,1 kg CO_2 eq/rok dla kotła węglowego (B3) oraz 1776,8 kg CO_2 eq/rok dla kotła na pellet (B4). W przypadku pomp ciepła uzyskane wartości wyniosły odpowiednio 3224,1 kg CO_2 eq/rok dla pompy powietrze-woda (M1), 2714,5 kg CO_2 eq/rok dla pompy solanka-woda (M2) oraz 2288,4 kg CO_2 eq/rok dla pompy woda-woda (M3). Spośród analizowanych pomp ciepła najniższą wartość GWP uzyskano dla pompy woda-woda, natomiast najwyższą dla pompy powietrze-woda. Wartości dla wszystkich trzech pomp ciepła są niższe niż dla kotłów gazowego, olejowego i węglowego, jednak wariant B4 – kocioł na pellet – charakteryzuje się niższą wartością GWP niż wszystkie analizowane pompy ciepła. Niska wartość GWP dla kotła na biomasę wynika ze sposobu traktowania emisji biogenicznego CO_2 w analizie cyklu życia. Emisje CO_2 powstające podczas spalania biomasy nie są uwzględniane jako obciążenie środowiskowe netto, ponieważ węgiel zawarty w biomasie został wcześniej pobrany z atmosfery w stosunkowo krótkim cyklu wzrostu biomasy i jest następnie uwalniany podczas jej spalania. Wartość GWP przypisana do wariantu B4 wynika zatem przede wszystkim z procesów związanych z przygotowaniem i obróbką biomasy, jej transportem oraz eksploatacją kotła, w tym zużyciem energii i związanymi z nim emisjami.

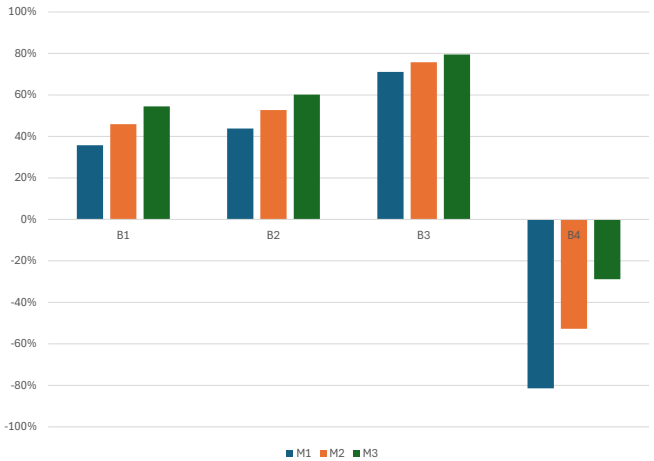
Tabela 3. Wyniki analizy energetycznej źródeł ciepła w wariantach bazowych i modernizacyjnych. Źródło: opracowanie własne
Table 3. Energy analysis results for heat sources in the baseline and modernization variants. Source: authors' own study

Wariant	Rodzaj źródła	Sprawność [%] / SCOP [–]	Roczne zużycie energii [kWh/rok]
B1	kocioł gazowy	92%	19 565
B2	kocioł olejowy	90%	20 000
B3	kocioł węglowy	64%	28 125
B4	kocioł na pellet	84%	21 429
M1	pompa ciepła powietrze-woda	3,62	4 972
M2	pompa ciepła solanka-woda	4,30	4 186
M3	pompa ciepła woda-woda	5,10	3 529

Zastosowanie pomp ciepła prowadziło do istotnego ograniczenia emisji gazów cieplarnianych w przypadku zastąpienia kotłów gazowego, olejowego i węglowego (Tabela 4). Skala redukcji zależała zarówno od rodzaju zastępowanego źródła ciepła, jak i zastosowanej technologii pompy ciepła. Największe ograniczenie emisji uzyskano w przypadku zastąpienia kotła węglowego, następnie olejowego i gazowego. W każdym z tych przypadków najniższe wartości GWP uzyskano dla pompy woda–woda, następnie solanka–woda i powietrze–woda. Zależność tę potwierdza również procentowy potencjał redukcji przedstawiony na Rysunku 1. Odmienny rezultat uzyskano dla kotła na pellet, którego zastąpienie pompą ciepła prowadziło do wzrostu GWP, co znalazło odzwierciedlenie w ujemnych wartościach potencjału redukcji. Wyniki wskazują zatem, że efekt środowiskowy zastosowania pompy ciepła jest silnie uzależniony od rodzaju zastępowanego źródła ciepła, a także od zastosowanej technologii dolnego źródła.

Tabela 4. Zmiana emisji gazów cieplarnianych w wyniku zastosowania pomp ciepła względem wariantów bazowych, kg CO_2 eq/rok. Źródło: opracowanie własne
Table 4. Change in greenhouse gas emissions resulting from the use of heat pumps compared with the baseline variants, kg CO_2 eq/year. Source: authors' own study

Wariant bazowy / wariant modernizacji	M1	M2	M3
B1	1795,4	2305,1	2731,1
B2	2514,4	3024,1	3450,1
B3	7942,0	8451,6	8877,7
B4	-1447,3	-937,6	-511,6



Rysunek 1. Potencjał dekarbonizacji analizowanych wariantów modernizacji źródła ciepła, %. Źródło: opracowanie własne
Figure 1. Decarbonization potential of the analyzed heat source modernization variants, %. Source: authors' own study

Wyniki analizy środowiskowego czasu zwrotu wskazują, że zastosowanie pomp ciepła pozwala na stosunkowo szybkie zrekompensowanie początkowych nakładów emisyjnych związanych z modernizacją. Dla zastąpienia kotła gazowego (B1) czas zwrotu emisji GWP wynosi 1,2 roku dla M1, 1,1 roku dla M2 oraz 0,8 roku dla M3. W przypadku modernizacji kotła olejowego (B2) uzyskano odpowiednio 0,8, 0,8 oraz 0,6 roku, natomiast dla kotła węglowego (B3) zaledwie 0,3, 0,3 oraz 0,2 roku. Najkrótsze czasy zwrotu uzyskano zatem dla modernizacji kotła węglowego, co wynika z dużej różnicy emisji pomiędzy wariantem bazowym o niskiej sprawności, a eksploatacją pomp ciepła. We wszystkich analizowanych przypadkach najkrótszy czas zwrotu uzyskano dla pompy woda–woda (M3), co jest związane z jej najniższą wartością GWP w fazie eksploatacji. W przypadku kotłów gazowego i olejowego różnice pomiędzy poszczególnymi typami pomp są niewielkie, natomiast dla kotła węglowego czas zwrotu jest bardzo krótki niezależnie od zastosowanego rodzaju pompy.

Dyskusja

Jakkolwiek uproszczona analiza z wykorzystaniem jednej metody oceny wpływu cyklu życia – IPCC 2013 GWP100a – nie pozwala na pełną ocenę wszystkich potencjalnych oddziaływań środowiskowych związanych z analizowanymi źródłami ciepła, umożliwia ona jednoznaczną ocenę ich wpływu na zmiany klimatu oraz określenie potencjału dekarbonizacyjnego. W analizowanym przypadku potencjał ten należy uznać za znaczący, przy czym

jego wielkość zależy zarówno od rodzaju zastępowanego źródła ciepła, jak i zastosowanej technologii pompy ciepła.

Uzyskane wyniki są zgodne z wnioskami przedstawionymi w przeglądzie literatury (Żelazna i Pawłowski, 2025), w którym wskazano na istotny potencjał pomp ciepła w ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych związanych z ogrzewaniem budynków. W szczególności wyniki niniejszej analizy potwierdzają obserwowaną w literaturze zależność, zgodnie z którą pompy ciepła wykorzystujące bardziej stabilne dolne źródła mogą charakteryzować się niższymi emisjami GHG niż pompy powietrzne. W analizowanym przypadku wartość GWP była najniższa dla pompy woda–woda (M3), następnie dla pompy solanka-woda (M2), a najwyższa dla pompy powietrze-woda (M1). Należy jednak podkreślić, że różnice w wynikach uzyskanych w poszczególnych badaniach mogą wynikać z odmiennych założeń metodologicznych, w tym granic systemu, jednostki funkcjonalnej, warunków eksploatacji oraz przyjętej emisyjności energii elektrycznej.

Masternak i in. (2024), analizując cykl życia pomp ciepła powietrze-woda i kotłów gazowych w 18 krajach europejskich, wykazali, że w przypadku nowszych budynków zastosowanie pompy ciepła prowadziło do średniej redukcji wpływu na zmiany klimatu o 54%. Autorzy wskazali jednocześnie na istotne znaczenie krajowego miksu elektroenergetycznego oraz charakterystyki energetycznej budynku dla uzyskiwanych efektów środowiskowych. Pomimo wzrostu udziału odnawialnych źródeł energii, emisyjność polskiego miksu energetycznego pozostaje relatywnie wysoka na tle średniej europejskiej, co ogranicza korzyści środowiskowe wynikające z elektryfikacji systemów ogrzewania. W niniejszej analizie redukcja GWP dla wariantu B1–M1 wyniosła 36%, co może być związane m.in. z warunkami klimatycznymi, charakterystyką energetyczną budynku, parametrami pracy pompy ciepła oraz charakterystyką polskiego systemu elektroenergetycznego.

Interesującym wynikiem analizy jest przypadek kotła na biomasę B3. W przeciwieństwie do pozostałych wariantów bazowych, jego zastąpienie pompą ciepła prowadziło do zwiększenia wartości GWP. Wynik ten należy interpretować z uwzględnieniem przyjętego sposobu bilansowania emisji biogenicznego CO_2. W analizie emisje CO_2 powstające podczas spalania biomasy nie stanowią obciążenia netto w kategorii zmian klimatu, natomiast uwzględniane są emisje związane z pozyskaniem, przetwarzaniem i transportem biomasy oraz eksploatacją kotła. W konsekwencji niska wartość GWP wariantu B4 pokazuje, że korzyści klimatyczne wynikające z zastosowania pompy ciepła zależą nie tylko od jej efektywności energetycznej, lecz również od sposobu bilansowania emisji związanych z zastępowanym paliwem. Jednocześnie należy podkreślić, że zastosowanie jednej kategorii wpływu środowiskowego, tj. GWP, nie pozwala na ocenę wszystkich efektów środowiskowych związanych z zastąpieniem kotła na biomasę pompą ciepła. Pomimo braku redukcji GWP w wariantach B4–M1–M3, modernizacja taka może przynosić dodatkowe korzyści środowiskowe, w szczególności w zakresie ograniczenia lokalnych emisji pyłów oraz innych zanieczyszczeń powietrza związanych z eksploatacją kotłów na paliwa stałe.

Wyniki wskazują również na zależność potencjału dekarbonizacyjnego od rodzaju dolnego źródła pompy ciepła. Dla wszystkich trzech źródeł bazowych charakteryzujących się wyższym GWP niż pompy ciepła (B1–B3) najniższą emisję uzyskano dla pompy woda–woda (M3), następnie dla pompy solanka-woda (M2), natomiast najwyższą dla pompy powietrze-woda (M1). Uzyskana zależność znajduje potwierdzenie w badaniach literaturowych. Violante i in. (2022), w porównawczej analizie LCA pomp ciepła powietrze-woda i solanka-woda, wykazali, że mimo większych oddziaływań związanych z produkcją i instalacją systemu gruntowego, w fazie eksploatacji to pompa powietrze–woda charakteryzowała się nieco wyższymi oddziaływaniami, a w ujęciu całego cyklu życia system gruntowy uzyskał korzystniejsze wyniki środowiskowe. Podobne zależności wskazali Shamoushaki i Koh (2024), którzy przeprowadzili porównawczą analizę cyklu życia ASHP, GSHP i WSHP. W większości analizowanych kategorii oddziaływania ASHP charakteryzowała się najwyższymi obciążeniami środowiskowymi, przy czym głównymi źródłami oddziaływań były procesy eksploatacji i wytwarzania pomp ciepła.

Przeprowadzona analiza nie wyczerpuje złożoności zagadnienia środowiskowej oceny modernizacji źródeł ciepła. Na uzyskiwane efekty środowiskowe wpływa bowiem szereg dodatkowych czynników, nieuwzględnionych w niniejszym badaniu, w tym rodzaj instalacji odbiorczej i jej parametry temperaturowe, zmiany charakterystyki energetycznej budynku, rozwiązania konstrukcyjne pomp ciepła, sposób ich sterowania oraz rodzaj zastosowanego czynnika chłodniczego. Czynniki te stanowią potencjalne zmienne dalszych analiz, pozwalających na bardziej szczegółową ocenę warunków determinujących efekty dekarbonizacyjne poszczególnych technologii. Niemniej uzyskane wyniki wskazują na istotny potencjał dekarbonizacyjny modernizacji źródeł ciepła z wykorzystaniem pomp ciepła w warunkach polskiego systemu elektroenergetycznego.

Wnioski

Przeprowadzona analiza pozwoliła na ocenę potencjału dekarbonizacyjnego zastępowania konwencjonalnych źródeł ciepła pompami ciepła w istniejącym budynku mieszkalnym, z uwzględnieniem wpływu różnych technologii pomp ciepła na emisję GHG w cyklu życia.

Pompy ciepła wykazują istotny potencjał dekarbonizacyjny w modernizacji istniejących systemów ogrzewania budynków w warunkach polskiego systemu elektroenergetycznego. Największą redukcję GWP uzyskano dla zastąpienia kotła węglowego.

Rodzaj dolnego źródła ma istotne znaczenie dla efektu środowiskowego. W analizowanych warunkach najniższe wartości GWP uzyskano dla pompy woda-woda, następnie solanka-woda, a najwyższe dla pompy powietrze-woda.

Środowiskowy czas zwrotu wyniósł od 0,2 do 1,2 roku dla analizowanych wariantów B1–B3, przy czym najkrótsze okresy uzyskano dla zastąpienia kotła węglowego. Wyniki wskazują zatem, że początkowe obciążenia środowiskowe związane z zastosowaniem pomp ciepła mogą zostać szybko skompensowane przez ograniczenie emisji GHG w fazie użytkowania.

Zastąpienie kotła na pellet pompą ciepła nie prowadziło do redukcji GWP w przyjętym modelu. Wynik ten należy wiązać przede wszystkim ze sposobem bilansowania biogenicznego CO_2 w analizie LCA.

Zastosowana analiza GWP nie obejmuje pełnego spektrum oddziaływań środowiskowych. Dalsze badania powinny ponadto uwzględniać m.in. rodzaj instalacji odbiorczej, zmiany charakterystyki energetycznej budynku, rozwiązania konstrukcyjne pomp ciepła, sposób ich sterowania oraz rodzaj czynnika chłodniczego.

Bibliografia

Aprianti, T., Tan, E., Diu, C., Sprivulis, B., Ryan, G., Srinivasan, K., & Chua, H. T. (2021). A comparison of ground and air source heat pump performance for domestic applications: A case study in Perth, Australia. *International Journal of Energy Research*, 45(15), 20686–20699. https://doi.org/10.1002/er.7133

Autelitano, K., Famiglietti, J., Toppi, T., & Motta, M. (2023). Empirical power-law relationships for the Life Cycle Assessment of heat pump units. *Cleaner Environmental Systems*, 10, 100135. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100135

Brown, C., Hampton, S., & Fawcett, T. (2024). Accelerating Renewable Heat: Overcoming Barriers to Shared-Loop Ground Source Heat Pump Systems in the United Kingdom. *Energy Research & Social Science*, 115, 103644. https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103644

Carnieletto, L., Kazanci, O. B., Olesen, B. W., Zarrella, A., & Pasut, W. (2024). Combining Energy Generation and Radiant Systems: Challenges and Possibilities for Plus Energy Buildings. *Energy and Buildings*, 325, 114965. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114965

Corbett, M., Rhodes, E., Pardy, A., & Long, Z. (2023). Pumping Up Adoption: The Role of Policy Awareness in Explaining Willingness to Adopt Heat Pumps in Canada. *Energy Research & Social Science*, 96, 102926. https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102926

Dong, X., Tian, Q., & Li, Z. (2017). Experimental investigation on heating performance of solar integrated air source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1013–1020. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.183

Dongellini, M., Natale, C., Naldi, C., Rossi di Schio, E., Valdiserri, P., & Morini, G. L. (2023). Energy and Environmental Performance Comparison of Heat Pump Systems Working with Alternative Refrigerants. *Applied Sciences*, 13, 7238. https://doi.org/10.3390/app13127238

Essadik, M., Ouderji, Z. H., McKeown, A., Lu, Y., & Yu, Z. (2024). A multi-valve flexible heat pump system with latent thermal energy storage for defrosting operation. *Energy and Buildings*, 321, 114656. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114656

Famiglietti, J., Toppi, T., Bonalumi, D., & Motta, M. (2023). Heat pumps for space heating and domestic hot water production in residential buildings, an environmental comparison in a present and future scenario. *Energy Conversion and Management*, 276, 116527. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116527

IEA. (2022). The Future of Heat Pumps. International Energy Agency, Paris. https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps

Kudela, L., Špiláček, M., & Pospíšil, J. (2021). Influence of control strategy on seasonal coefficient of performance for a heat pump with low-temperature heat storage in the geographical conditions of Central Europe. *Energy*, 234, 121276. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121276

Marinelli, S., Lolli, F., Gamberini, R., & Rimini, B. (2019). Life cycle thinking (LCT) applied to residential heat pump systems: A critical review. *Energy and Buildings*, 185, 210–223. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.035

Masternak, C., Meunier, S., Reinbold, V., Saelens, D., Marchand, C., & Leroy, Y. (2024). Potential of air-source heat pumps to reduce environmental impacts in 18 European countries. *Energy,* 292, 130487. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130487

Mattinen, M. K., Nissinen, A., Hyysalo, S., & Juntunen, J. K. (2015). Energy use and greenhouse gas emissions of air-source heat pump and innovative ground-source air heat pump in a cold climate. *Journal of Industrial Ecology*, 19, 61–70. https://doi.org/10.1111/jiec.12166

Moore, A. D., Urmee, T., Martin, A., & Walker, E. (2017). Life cycle assessment of domestic heat pump hot water systems in Australia. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2, 38. https://doi.org/10.1051/rees/2017043

Namdar, H., Rossi di Schio, E., Semprini, G., & Valdiserri, P. (2025). Photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump systems for building applications: A technical review on direct expansion systems. *Energy and Buildings*, 334, 115516. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115516

Olczak, P., Żelazna, A., Matuszewska, D., & Olek, M. (2021). The "My Electricity" program as one of the ways to reduce CO_2 emissions in Poland. *Energies*, 14(22), 7679. https://doi.org/10.3390/en14227679

RB&M Research. (2024). In-situ heat pump performance. Analysis of Ofgem data 2017–2022. https://www.recc.org.uk/pdf/rbandm-research-project.pdf

Rossi di Schio, E., Ballerini, V., Dongellini, M., & Valdiserri, P. (2021). Defrosting of Air-Source Heat Pumps: Effect of Real Temperature Data on Seasonal Energy Performance for Different Locations in Italy. *Applied Sciences*, 11, 8003. https://doi.org/10.3390/app11178003

Sevindik, S., & Spataru, C. (2020). Life Cycle Assessment of Domestic Heat Pumps with Gas Boiler and Hybrid Scenario Analysis in the UK. In S. O. Akansu & S. Unalan (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Energy, Environment and Storage of Energy (ICEESEN)*, Kayseri, Turkey, 19–21 November 2020. ISBN 978-625-409-147-6. https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10119134

Stanytsina, I., Melnyk, A., Savula, Y., & Loboda, M. (2025). Comparative Analysis of Levelized Cost of Heat in Implemented and Calculated Heat Supply Systems with Heat Pumps in Ukraine. Energies, 18, 1110. https://doi.org/10.3390/en18051110

PORT PC. (2026). *Kalkulator POBE – koszty ogrzewania w typowych budynkach w III kwartale 2026 r.* https://portpc.pl/kalkulator-koszty-ogrzewania-budynku/

Sui, Y., Sui, Z., Liang, G., & Wu, W. (2023). Superhydrophobic Microchannel Heat Exchanger for Electric Vehicle Heat Pump Performance Enhancement. *Sustainability,* 15, 13998. https://doi.org/10.3390/su151813998

Underwood, C. P. (2015). Fuzzy multivariable control of domestic heat pumps. *Applied Thermal Engineering*, 90, 957–969. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.068

Violante, A. C., Donato, F., Guidi, G., & Proposito, M. (2022). Comparative life cycle assessment of a ground source heat pump vs. an air source heat pump. *Renewable Energy,* 188, 1029–1037. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.075

Xi, L., Wang, L., Zhao, C., Luo, X., & Feng, B. (2022). Research on Fuzzy Control Strategy of Heating Condition Based on Electric Vehicle Heat Pump Air Conditioner. *Academic Journal of Science and Technology*, 3(3), 175–181. https://doi.org/10.54097/ajst.v3i3.2932

Xue, T. (2025). Modelling, design, and control of hybrid ground source heat pump system coupled with district heating. Aalto University publication series Doctoral Theses, Finland. https://aaltodoc.aalto.fi/

Żelazna, A., Gołębiowska, J., & Kosaryha, D. (2024). Multi-Criteria Study on Ground Source Heat Pump with Different Types of Heat Exchangers. *Energies*, 17, 602. https://doi.org/10.3390/en17030602

Żelazna, A., & Pawłowski, A. (2025). Review of the Role of Heat Pumps in Decarbonization of the Building Sector. *Energies*, 18, 3255. https://doi.org/10.3390/en18133255

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiekolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. *Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.*

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja.* The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.*