



Zastosowanie węglowodorów oraz czynników HFO i HCFO jako alternatywnych czynników chłodniczych w pompach ciepła

Application of hydrocarbons and HFO and HCFO refrigerants as alternative refrigerants in heat pumps



Mgr inż. Konrad Medyński

Absolwent
Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Wrocławska



Dr inż. Ewelina Stefanowicz

ORCID ID: [0000-0001-9216-9046](https://orcid.org/0000-0001-9216-9046)
Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Wrocławska
ewelina.stefanowicz@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: pompa ciepła, czynnik chłodniczy, węglowodory, HFC, HFO, HCFO

Streszczenie

Artykuł przedstawia zmiany w zakresie stosowanych czynników chłodniczych w pompach ciepła, wynikające z regulacji klimatycznych Unii Europejskiej. Omówiono obecnie wykorzystywane czynniki chłodnicze oraz zakresy ich zastosowań w zależności od temperatur pracy urządzeń. Szczególną uwagę poświęcono alternatywnym rozwiązaniom, takim jak węglowodory oraz czynniki HFO i HCFO, wskazując ich możliwości zastosowania, ograniczenia oraz wyzwania związane z wdrażaniem. Przedstawione zagadnienia pozwalają ocenić kierunki rozwoju technologii pomp ciepła oraz zmiany w doborze czynników chłodniczych w praktyce projektowej i eksploatacyjnej.

Keywords: heat pump, refrigerant, hydrocarbons, HFC, HFO, HCFO

Abstract

The article presents current trends in refrigerants used in heat pumps, driven by European Union climate regulations. Commonly used refrigerants and their application ranges depending on operating temperatures are discussed. Particular attention is given to alternative solutions, such as hydrocarbons and HFO and HCFO refrigerants, highlighting their application potential, limitations, and implementation challenges. The discussed issues provide insight into the future development of heat pump technology and expected changes in refrigerant selection in design and operational practice.

Wstęp

W związku z rosnącym światowym zapotrzebowaniem na energię pierwotną zarówno Europa, jak i wiele regionów świata podejmują działania mające na celu ograniczenie negatywnego wpływu działalności człowieka na środowisko (Nalley & LaRose, 2021). Do najważniejszych z nich należą m.in. termomodernizacja obiektów (Brzeski & Kowalczyk, 2022), zastosowanie technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii (Chmielewska et al., 2025; Słowikowski et al., 2025) oraz odzysk zasobów, w tym wody (Woźniak & Zajac, 2025) i ciepła (Narojczyk et al., 2025) z systemów wentylacji i klimatyzacji. Coraz większe znaczenie zyskują również rozwiązania związane z odzyskiem wody szarej, gospodarowaniem wodą opadową oraz zastosowaniem zaawansowanych układów kogeneracyjnych i poligeneracyjnych (Konopka, 2022). Na znaczeniu zyskują także układy magazynowania energii elektrycznej bądź cieplnej. Wykorzystanie pomp ciepła jako źródła energii stanowi kluczowy element w procesie dekarbonizacji. Na podstawie raportu Międzynarodowej Agencji Energii (IEA – International Energy Agency) „The Future of Heat Pumps” z 2022 roku (International Energy Agency, 2022) szacuje się, że w latach 2021–2022 ilość

pomp ciepła na świecie mogła wynosić w przybliżeniu 180–200 mln. Zainstalowane jednostki mogą pokrywać ponad 10% zapotrzebowania na ogrzewanie budynków na świecie. W Europie do końca 2021 roku liczba zainstalowanych pomp ciepła wyniosła blisko 17 milionów jednostek. Strategiczny plan Komisji Europejskiej REPowerEU wprowadzony w maju 2022 roku w odpowiedzi na globalne zakłócenia na rynku energii zakładał podwojenie tempa wdrażania, aby w najbliższych pięciu latach przyczynić się do zainstalowania wodnych pomp ciepła w kolejnych 10 mln budynków, a do 2030 roku w 30 milionach (Lyons et al., 2022). IEA szacuje, iż zastosowanie pomp ciepła może przyczynić się do redukcji globalnej emisji dwutlenku węgla (CO₂) o co najmniej 500 milionów ton do roku 2030. Skala ta odpowiada rocznej emisji CO₂ generowanej przez cały sektor transportu samochodowego w Europie. Raport Obserwatorium Technologii Czystej Energii Komisji Europejskiej dotyczący pomp ciepła w Unii Europejskiej z 2025 roku (Volt et al., 2025) wskazuje, że liczba zainstalowanych pomp ciepła wynosi około 23 miliony. Podkreślono przy tym dynamiczny wzrost rynku, szczególnie widoczny w 2022 roku oraz utrzymującą się tendencję wzrostową w kolejnych latach, wspieraną przez działania polityczne i instrumenty wsparcia publicznego.

Czynniki chłodnicze w pompach ciepła

Substancje robocze krążące w obiegu termodynamicznym pomp ciepła oraz układów chłodniczych stanowią ich kluczowy element funkcjonalny i określane są jako czynniki chłodnicze (ziębniki). Dzięki swoim właściwościom fizykochemicznym umożliwiają realizację podstawowych przemian termodynamicznych, takich jak parowanie i kondensacja w wymiennikach ciepła, sprężanie w sprężarkach oraz rozprężanie w zaworach dławiących. Bez ich zastosowania efektywne wykorzystanie potencjału energetycznego tych urządzeń nie byłoby możliwe. Rozwój branży czynników chłodniczych na przestrzeni lat podlegał istotnym zmianom, wynikającym zarówno z postępu technologicznego, jak i regulacji prawnych oraz rosnącej świadomości w zakresie bezpieczeństwa i ochrony środowiska.

Generacje czynników chłodniczych oraz regulacje prawne

W początkowym okresie rozwoju technologii obiegów lewobieżnych, obejmującym lata około 1830–1930, stosowano substancje powszechnie dostępne i wykazujące zdolność do pracy w tego rodzaju układach. Były to głównie różnego rodzaju rozpuszczalniki oraz inne lotne ciecze, które obecnie klasyfikuje się jako pierwszą generację czynników chłodniczych. Ich zastosowanie wiązało się z licznymi zagrożeniami eksploatacyjnymi, wynikającymi z takich właściwości jak łatwopalność, toksyczność czy wysoka reaktywność chemiczna. W konsekwencji odnotowywano liczne incydenty i wypadki związane z ich użytkowaniem, co stało się impulsem do poszukiwania alternatywnych, bardziej bezpiecznych rozwiązań technologicznych. Celem rozwoju drugiej generacji czynników chłodniczych było zapewnienie wyższego poziomu bezpieczeństwa eksploatacyjnego oraz trwałości stosowanych substancji. W odróżnieniu od poprzedniej generacji, szczególny nacisk położono na wykorzystanie związków fluorowanych. Do tej grupy należały przede wszystkim chlorofluorowęglowodory (CFC) oraz wodorochlorofluorowęglowodory (HCFC). Spośród najpopularniejszych czynników z grupy CFC istotną rolę odegrały R12 oraz R11, których produkcja przemysłowa została zapoczątkowana odpowiednio w latach 1931 i 1932. Z kolei jednym z kluczowych przedstawicieli grupy HCFC był czynnik R22, który od lat 50. XX wieku znalazł szerokie zastosowanie, zwłaszcza w urządzeniach przeznaczonych do użytku domowego (Calm, 2008). Pomimo poprawy właściwości związanych z bezpieczeństwem użytkowania, czynniki te nie stanowiły rozwiązania idealnego. Ich zastosowanie przyczyniło się wprawdzie do ograniczenia liczby wypadków, a tym samym zwiększenia bezpieczeństwa użytkowników, jednak uwolnienie ich do atmosfery wskutek nieszczelności lub zaniedbania wiązało się z istotnymi, negatywnymi skutkami środowiskowymi (Goyal et al., 2019). Posiadały one bardzo duży potencjał niszczenia warstwy ozonowej (ODP – Ozone Depletion Potential) oraz potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP – Global Warming Potential). To właśnie czynnik z grupy HFC, R11 stał się punktem odniesienia dla wskaźnika ODP, dla którego wartość ustalono na 1. Wzrost świadomości społecznej dotyczącej zagrożeń dla warstwy ozonowej doprowadził do podjęcia działań mających na celu ograniczenie stosowania tej gru-

py związków. Kluczowym krokiem w tym kierunku było podpisanie w 1987 roku międzynarodowego porozumienia znanego jako Protokół montrealski, na mocy którego rozpoczęto stopniowe wycofywanie produkcji oraz stosowania czynników chłodniczych drugiej generacji (Park et al., 2021). Pomimo wycofania tych substancji z eksploatacji, ich negatywne skutki środowiskowe nadal są obserwowane. Zgodnie z prognozami Organizacji Narodów Zjednoczonych, mimo rozpoczęcia procesu odbudowy warstwy ozonowej, jej pełna regeneracja może nastąpić dopiero w latach 2040–2060. W wyniku wdrożenia postanowień Protokołu montrealskiego w latach 1987–2010 osiągnięto redukcję o około 98% produkcji i zużycia substancji szkodliwych dla warstwy ozonowej (Park et al., 2021). Czynniki chłodnicze z grupy CFC oraz HCFC były stopniowo i systematycznie wycofywane z eksploatacji. W przypadku substancji HCFC proces ten realizowano etapowo, zgodnie z harmonogramami redukcyjnymi wynikającymi z postanowień międzynarodowych. Jednocześnie państwa Europy Zachodniej i Środkowej wdrożyły przyspieszone programy eliminacji tych związków, skracając okres ich stosowania w stosunku do globalnie przyjętych ram czasowych. Wiązało się to z eliminacją najpowszechniej stosowanego R22 do 2010 roku w nowych urządzeniach, a następnie wprowadzeniem zakazu stosowania wszelkich HCFC w nowych urządzeniach do 2020 roku. Działania związane z ograniczeniem stosowania czynników chłodniczych drugiej generacji przyczyniły się do intensyfikacji poszukiwań alternatywnych substancji roboczych, które nie wykazują negatywnego oddziaływania na warstwę ozonową.

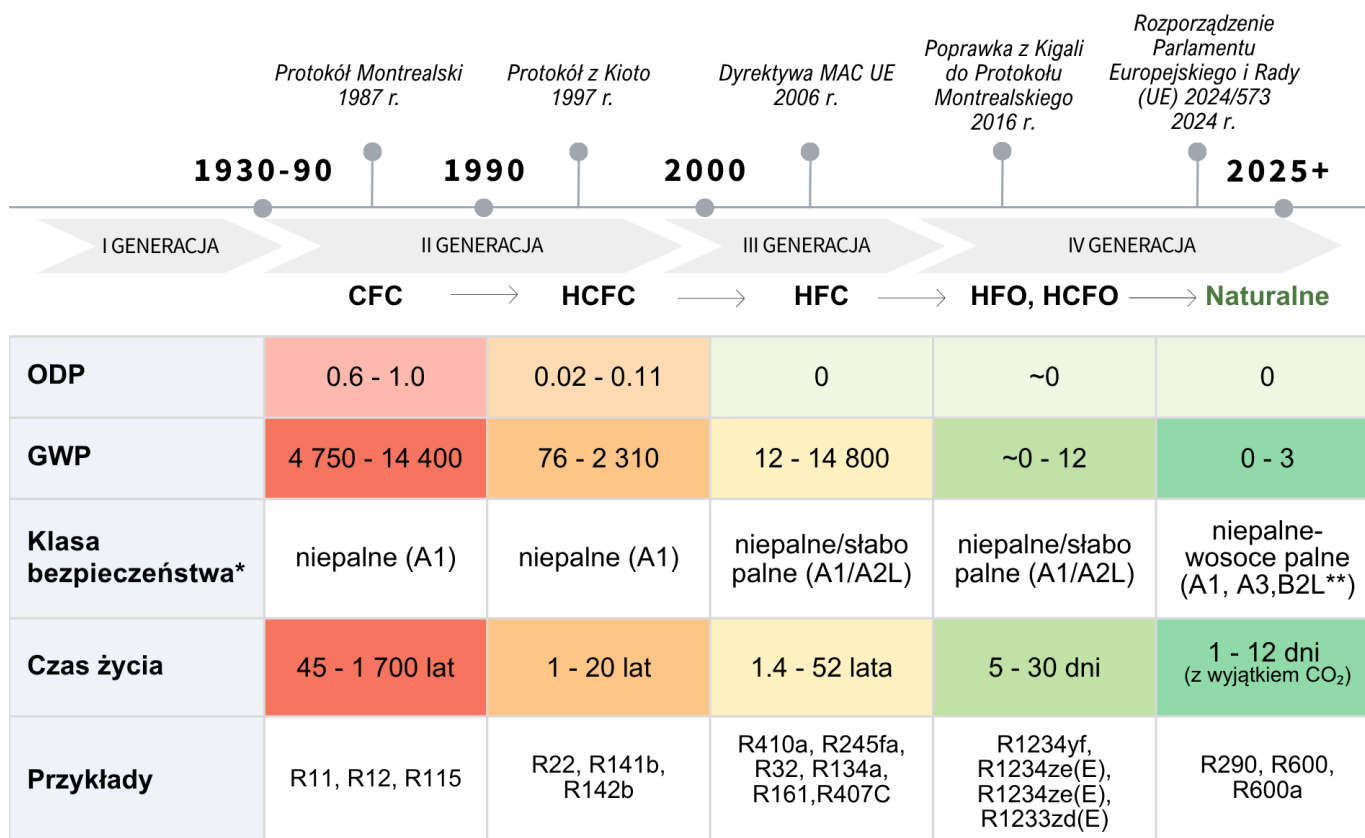
Kolejnym etapem rozwoju czynników chłodniczych stała się trzecia generacja, oparta na wodorofluorowęglowodorach (HFC). Związki te są powszechnie stosowane w wybranych współczesnych układach chłodniczych oraz pompach ciepła. Pomimo istotnych zalet w porównaniu z czynnikami poprzednich generacji, HFC charakteryzują się w wielu przypadkach wysoką wartością współczynnika GWP. Wskaźnik ten opisuje względny wpływ danej substancji na efekt cieplarniany poprzez porównanie ilości energii cieplnej zatrzymanej przez jednostkową masę gazu do wartości odpowiadającej dwutlenkowi węgla, stanowiącemu substancję referencyjną. GWP wyznacza się dla różnych horyzontów czasowych, najczęściej 20-, 100- oraz 500-letniego, przy czym w praktyce inżynierskiej i analizach środowiskowych najczęściej stosowany jest horyzont 100-letni. Wprowadzenie wskaźnika GWP było istotne ze względu na rosnące znaczenie problemu globalnego ocieplenia w dyskusji środowiskowej oraz z potrzeby opracowania ustandaryzowanej miary do oceny wpływu poszczególnych czynników na efekt cieplarniany. W czwartym sprawozdaniu oceniającym (AR4) Międzrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) wykazano, że obserwowany wzrost średnich temperatur powietrza i oceanów, jak również nasilenie ekstremalnych zjawisk pogodowych, są z dużym prawdopodobieństwem wynikiem zwiększonego stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze. Najnowszy raport AR6 na rok 2022 sporządzony przez IPCC potwierdza stwierdzenie, iż globalne ocieplenie jest zjawiskiem wynikającym ze wzrostu emisji gazów cieplarnianych w skali globalnej i stanowi istotne zagrożenie dla stabilności sys-

temu klimatycznego Ziemi oraz warunków środowiskowych w przyszłości (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). W odpowiedzi na te zagrożenia podejmowane są działania ukierunkowane na ograniczenie emisji substancji o wysokim potencjale tworzenia efektu cieplarnianego, w tym wybranych czynników chłodniczych. Kluczowe instrumenty prawne w tym zakresie obejmują m.in. poprawkę z Kigali do Protokołu montrealskiego (decyzje XVIII/2 i XVIII/3) (Heath, 2017) oraz Protokół z Kioto z 1997 roku (United Nations, 1997), które pozostają zgodne z Ramową konwencją Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (UNFCCC) i definiują cele redukcyjne emisji gazów cieplarnianych (Calm, 2008; Park et al., 2021). W ramach Poprawki Kigali do Protokołu Montrealskiego wprowadzono ograniczenia dotyczące osiemnastu grup HFC. Przewiduje się, że regulacje te doprowadzą do redukcji emisji HFC na poziomie około 88%, co może przyczynić się do ograniczenia wzrostu średniej temperatury globalnej o około 0,5°C do końca XXI wieku (Wu et al., 2021). W tym zakresie również Unia Europejska prowadzi aktywną politykę regulacyjną. Na mocy rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 573/2024 wdrożono systematyczne ograniczanie stosowania fluorowanych gazów cieplarnianych (F-gazów) o wysokim współczynniku GWP (European Parliament and Council of the European Union, 2024). Działania te realizowane są poprzez mechanizm stopniowego zmniejszania dostępności (phase-down) oraz wprowadzanie zakazów stosowania w wybranych grupach urządzeń. W akcie tym określono również szczegółowe harmonogramy ograniczeń dla

czynników z grupy HFC o wartości GWP przekraczającej 150 w określonych zastosowaniach technicznych oraz założono jako cel odejście od czynników HFC do 2050 roku (European Parliament and Council of the European Union, 2024). Najnowszą 4 generacją czynników mają być ziębniki charakteryzujące się brakiem negatywnego wpływu na warstwę ozonową, a także znikomym wpływem na tworzenie efektu cieplarnianego. Ponadto normy regulujące dobór czynników chłodniczych nowej generacji nakładają wymóg nie tylko niskiego potencjału tworzenia efektu cieplarnianego, lecz także uwzględniają szereg dodatkowych kryteriów, takich jak bezpieczeństwo użytkowania, właściwości technologiczne, kompatybilność chemiczna z materiałami konstrukcyjnymi, czas życia w atmosferze oraz możliwość integracji z wysokowydajnymi systemami chłodniczymi. Trend zmian, kolejne generacje czynników, grupy ziębników wchodzące w skład poszczególnych generacji, wartości ODP, GWP, żywotność w atmosferze oraz przykłady ziębników dla poszczególnych grup zostały przedstawione na Rysunku 1.

Czynniki stosowane w średnio- i niskotemperaturowych pompach ciepła

Pompy ciepła wykorzystywane do ogrzewania pomieszczeń mieszkalnych oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej stanowią dominujący segment rynku i osiągnęły najwyższy poziom gotowości technologicznej (Volt et al., 2025). Jednostki pracujące w zakresie średnio- i niskotemperaturowym górnego źródła (około 60°C), wykorzystują kilka powszechnie stosowanych czynników chłodniczych.



*Klasy bezpieczeństwa według ASHRAE Standard 34: A/B - poziom toksyczności, 1, 2L, 2, 3 - palność

**Klasa B2L oznacza czynniki o wyższej toksyczności (B) i niskiej prędkości spalania (2L), np. amoniak (R717)

Rysunek 1. Ewolucja czynników chłodniczych oraz ich właściwości w kontekście zmian regulacyjnych. Źródło: opracowanie własne
Figure 1. Evolution of refrigerants and their properties in the context of regulatory changes. Source: authors' own study

Jednym z nich jest R410a będący mieszaniną azeotropową czynników R32 i R125 w stosunku masowym 1:1. Został wprowadzony jako zamiennik R22 (HCFC) w wyniku wycofywania substancji niszczących warstwę ozonową. Jest to czynnik z grupy HFC bardzo powszechnie stosowany w systemach domowych pomp ciepła, chłodnictwie i klimatyzacji (Zhang et al., 2024). Czynnik ten charakteryzuje się zerowym wpływem na warstwę ozonową ODP=0, jest niepalny oraz nietoksyczny (Klasyfikacja bezpieczeństwa ASHRAE – A1). Posiada korzystne właściwości termodynamiczne, w szczególności wysoką wydajność objętościową, co pozwala na uzyskanie dużej mocy chłodniczej przy relatywnie niewielkiej objętości czynnika w obiegu. Dodatkowo stabilność chemiczna i brak poślizgu temperaturowego w mieszaninie azeotropowej upraszczają projektowanie i eksploatację systemów, co przyczyniło się do jego szerokiego zastosowania w nowoczesnych klimatyzatorach, pompach ciepła oraz układach VRF. Charakteryzuje się wysokim współczynnikiem $GWP_{(100y)}$ wynoszącym 2256 (Lee et al., 2024), co doprowadziło do stopniowego ograniczania jego stosowania. Mimo, że R410a nadal jest w eksploatacji w wielu układach, w ostatnich latach był on sukcesywnie zastępowany czynnikiem R32 z grupy HFC. Ziębnik ten również jest nietoksyczny, ale posiada nieco gorszą klasę palności A2L (słabo palny). R32 i R410a różnią się przede wszystkim parametrami termodynamicznymi, które bezpośrednio wpływają na konstrukcję pomp ciepła, zwłaszcza na wielkość sprężarki i wymienników ciepła. R32 ma wyższą temperaturę krytyczną (ok.

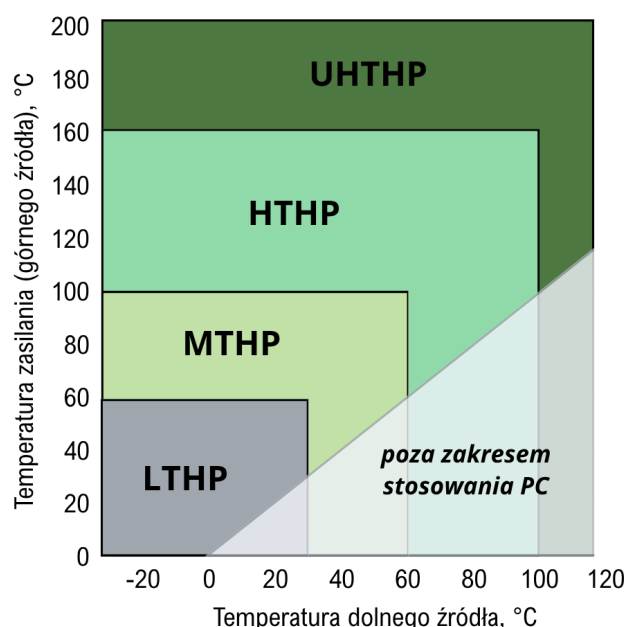
78°C) oraz wyższą objętościową wydajność chłodniczą niż R410a (Piao & Noguchi, 2001), co pozwala na zastosowanie mniejszych sprężarek. Jest bardziej przyjazny dla środowiska posiadając $GWP_{(100y)} = 749$ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022), jednak może być uznawany jako czynnik przejściowy ze względu na stopniowe ograniczenia stosowania czynników o GWP powyżej 150 w najbliższych latach, spowodowane unijnymi regulacjami (European Parliament and Council of the European Union, 2024). Sytuacja może wyglądać podobnie dla R134a (HFC o $GWP_{(100y)} = 1470$) stosowanego w starszych pompach ciepła i chillerach, czy też suszarkach do ubrań (Kim et al., 2025) oraz dwóch mieszaninach zeotropowych w postaci R452b oraz R454_B zaprojektowanych jako zamienniki dla R410a o niższym $GWP_{(100y)}$ wynoszącym kolejno 769 i 516 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Oba ziębniki posiadają klasę bezpieczeństwa A2L. R452_B jest mieszaniną R32/125/1234yf (HFC/HFC/HFO) w stosunku 67/7/26 mającą z założenia posiadać możliwość zastosowania jako zamiennik w istniejących instalacjach przy minimalnych lub średnich przeróbkach układu (choć może nie dotyczyć to każdej instalacji). Poziomą kompatybilności z układami R410a jest również zbliżony dla czynnika R454b będącego mieszaniną R32 i R1234yf (HFC/HFO) w proporcjach 68,9/31,1 (Shen et al., 2022). Oba wspomniane czynniki zyskują na popularności i są coraz częściej stosowane w układach pomp ciepła, systemach VRF oraz klimatyzacji. Jednak R454_B uważany jest za bardziej perspektywiczny.

Czynniki stosowane w wysokotemperaturowych pompach ciepła

Do wysokotemperaturowych pomp ciepła zalicza się jednostki będące w stanie osiągać temperatury powyżej 100°C (Rysunek 2) (Wu et al., 2021). Rozwiązania tego typu są zdecydowanie rzadziej stosowane niż jednostki średnio- bądź niskotemperaturowe.

Według raportu o stanie technologii pomp ciepła w Unii Europejskiej na rok 2025 stan gotowości technologicznej dla tego segmentu różni się w zależności od temperatur osiągniętych przez jednostki (Volt et al., 2025). Stopień gotowości technologicznej (TRL – Technical Readiness Level) jest dziewięciostopniową skalą służącą do oceny dojrzałości technologii – od badań podstawowych do pełnego zastosowania operacyjnego. Poziomy TRL 1–3 obejmują fazę koncepcji i badań eksperymentalnych, TRL 4–6 dotyczą walidacji i demonstracji technologii w warunkach laboratoryjnych oraz zbliżonych do rzeczywistych, natomiast TRL 7–9 odnoszą się do testów i demonstracji systemu w środowisku operacyjnym, jego kwalifikacji oraz finalnego wdrożenia i rutynowego użytkowania w warunkach rzeczywistej eksploatacji (np. przemysłowej, energetycznej, transportowej, medycznej lub innej).

Jednostki osiągające temperatury poniżej 140°C osiągnęły już stopień gotowości technologicznej TRL 8 lub wyższy dla temperatur poniżej 120°C. Dla temperatur powyżej 140°C poziomy TRL wynosi od 4 do 9, w zależności od wymaganej temperatury oraz wydajności. Technologia ta jest więc w dalszym ciągu na etapie badań, rozwoju oraz wdrażania. Już teraz obserwuje się coraz częstsze ich wykorzystanie na potrzeby ogrzewania sieciowego i procesów przemysłowych (Elwardany et al., 2026). Wysoko-



- LTHP – pompy ciepła niskotemperaturowe;
- MTHP – pompy ciepła średniotemperaturowe;
- HTHP – pompy ciepła wysokotemperaturowe;
- UHTHP – pompy ciepła bardzo wysokotemperaturowe.

Rysunek 2. Klasyfikacja sprężarkowych pomp ciepła w zależności od temperatury zasilania (górnego źródła) oraz temperatury dolnego źródła ciepła. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Wu et al., 2021)

Figure 2. Classification of vapor compressor-based heat pumps according to the supply temperature (upper source) and the temperature of the lower heat source. Source: authors' own study based on (Wu et al., 2021)

temperaturowe pompy ciepła mają zauważalny potencjał zastosowania na szerszą skalę. Mogą stanowić alternatywę dla niekiedy kosztownych i utrudnionych modernizacji instalacji ogrzewania, w celu dostosowania ich do ciepła niskotemperaturowego. Jednak największy potencjał dalszego rozwoju tych rozwiązań jest w sektorze przemysłowym. Sektor ten często dysponuje dużą ilością ciepła odpadowego, które za pośrednictwem wysokotemperaturowych pomp ciepła (HTHP) mogłoby zostać odzyskane i wykorzystane ponownie. Tego typu rozwiązanie może być szczególnie atrakcyjne dla przemysłu chemicznego, spożywczego, papierniczego, celulozowego i tekstylnego (Sayegh, 2025). Stosowanie bardzo wysokotemperaturowych pomp ciepła (UHTHP) mogłoby zwiększyć atrakcyjność tej technologii w pozostałych gałęziach przemysłu (Wu et al., 2021).

Jednym z ziębników wykorzystywanych w HTHP jest naturalny czynnik chłodniczy R717 – amoniak ($GWP_{(100y)}=0$, $ODP=0$) stosowany w urządzeniach chłodniczych i grzewczych przez ponad sto lat (Liu et al., 2017; Palm, 2008). Pomimo rozwoju syntetycznych czynników roboczych, pozostaje on nadal wykorzystywany w wielu instalacjach, zwłaszcza w systemach o dużych mocach. Jego popularność wynika między innymi z niskich kosztów eksploatacyjnych, dobrej dostępności oraz wysokiej objętościowej wydajności chłodniczej i grzewczej. Niemniej jednak posiada on wady i ograniczenia w postaci klasy bezpieczeństwa B2L (toksyczny, słabo palny), wysokiego wskaźnika adiabatycznego oraz istotnego ciśnienia skraplania przy wyższych temperaturach. Dla przykładu amoniak osiąga ciśnienie nasycenia rzędu 60 barów przy temperaturze skraplania 97,5°C (Wu et al., 2021). Właściwości te przekładają się na ograniczenia jego stosowalności oraz wyzwania projektowania układów na nim pracujących (Medyński, 2025).

Dominującym czynnikiem syntetycznym stosowanym w wielu układach wysokotemperaturowych pomp ciepła na przestrzeni ostatnich lat był R245fa (HFC) (Arpagaus et al., 2018). Jest on uważany za substancję referencyjną dla wysokotemperaturowych urządzeń do temperatur 140°C (Mateu-Royo et al., 2021). Jego cechy takie jak: wysoka temperatura krytyczna bliska 154°C, umiarkowane ciśnienie robocze (mniejsze niż dla CO₂), minimalne ryzyko kondensacji w sprężarce/turbinie oraz właściwości termodynamiczne przyczyniły się do jego powszechnego stosowania w HTHP. Posiada klasę bezpieczeństwa B1 (toksyczny, niepalny). Jednak jego wysoki wskaźnik

$GWP_{(100y)} = 966$ sprawił, że rozpoczęto badania nad alternatywnymi czynnikami chłodniczymi. Z grupy HFC do wysokotemperaturowych zastosowań można także wymienić R236fa oraz R365mfc, które pełnią głównie funkcję referencyjną w badaniach cykli HTHP w zakresie temperatur 100–150°C, przy niskowym lub marginalnym zastosowaniu w instalacjach przemysłowych (Ravindran et al., 2024). Jednym z kluczowych przyczyn ich braku stosowania na szerszą skalę jest ich współczynnik $GWP_{(100y)}$ wynoszący kolejno 9120 i 914 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

Aktualne rozwiązania bazują także na powszechnie dostępnych, bezpiecznych i stabilnych chemicznie czynnikach w postaci R744 (CO₂) oraz R718 (woda). Wysoka gęstość pary, duża pojemność cieplna przy stałym ciśnieniu oraz niska lepkość dynamiczna, które sprzyjają miniaturyzacji komponentów i redukcji kosztów, przyczyniły się do rozpowszechnienia CO₂ jako czynnika roboczego pomp ciepła. Jednak praca przy wysokich temperaturach zasilania wiąże się z pracą przy dużych ciśnieniach, skraplanie nie odbywa się w klasyczny sposób, a w chłodnicach gazu, działając poza zakresem ciśnienia krytycznego. Może to wiązać się z pracą przy różnicach ciśnień między stroną wysokiego i niskiego ciśnienia na poziomie przekraczającym 100 barów. Systemy te osiągają temperatury wyjściowe 35–90°C przy współczynniku COP 1,6–4,9, a w zastosowaniach ogrzewania powietrza nawet do ok. 120°C. R718 (woda) charakteryzuje się bardzo wysoką temperaturą krytyczną (374,15°C) oraz ciśnieniem krytycznym (22,13 MPa), co czyni ją potencjalnie odpowiednią do wysokotemperaturowych pomp ciepła. Ograniczeniem jest jednak duża objętość właściwa pary i niska masa cząsteczkowa, skutkujące wysokimi strumieniami objętościowymi oraz dużymi stopniami sprężania. Dodatkowo temperatura wrzenia 100°C przy ciśnieniu atmosferycznym wymusza pracę w warunkach podciśnienia przy niskotemperaturowych źródłach ciepła (Medyński, 2025). Aktualnie trwają jednak bardzo intensywne prace badawcze, rozwojowe oraz wdrożeniowe układów wysokotemperaturowych opartych na alternatywnych czynnikach chłodniczych o znikomym GWP.

Alternatywne czynniki chłodnicze- węglowodory, HFO, HCFO

Wskutek regulacji prawnych, prac badawczych oraz wdrażania nowoczesnych rozwiązań dąży się do coraz szerszego stosowania najnowszej generacji czynników

Tabela 1. Najczęściej występujące naturalne czynniki chłodnicze i ich właściwości (Bamigbetan et al., 2017; Medyński, 2025)

Table 1. The most common natural refrigerants and their properties (Bamigbetan et al., 2017; Medyński, 2025)

Numer ASHRAE	Nazwa IUPAC	ODP	GWP (100 lat)	Masa molowa, g·mol ⁻¹	Normalna temperatura wrzenia, °C	Temperatura krytyczna, °C	Ciśnienie krytyczne, MPa
R-290	Propan	0	3,3	44,1	-42,1	96,7	4,248
R-600	Butan	0	4,0	58,1	0,0	152,0	3,796
R-600a	Izobutan	0	3,0	58,1	-11,7	134,7	3,640
R-601	Pentan	0	4,0	72,1	36,1	196,6	3,358
R-601a	Izopentan	0	4,0	72,1	27,7	187,8	3,378
R-717	Amoniak	0	0,0	17,0	-33,3	132,4	11,280
R-718	Woda/Para	0	0,2	18,0	100,0	373,9	22,060
R-744	Dwutlenek węgla	0	1,0	44,0	-78,0	31,0	7,380

opartej na hydrofluoroolefinach (HFO), hydrochlorofluoroolefinach (HCFO), węglowodorach oraz pozostałych substancjach naturalnych. Aktualnie dąży się do stosowania czynników o GWP < 150 spełniających najnowsze wymagania Unii Europejskiej (European Parliament and Council of the European Union, 2024). Właściwości czynników naturalnych wraz z węglowodorami przedstawiono w Tabeli 1.

Węglowodory (HC) stanowią jedną z najbardziej perspektywicznych grup czynników chłodniczych, rozważanych jako potencjalne zamienniki wycofywanych czynników HFC. Wynika to przede wszystkim z ich zerowego potencjału niszczenia warstwy ozonowej (ODP = 0), bardzo niskiego współczynnika GWP (< 10) oraz korzystnych właściwości termodynamicznych. Wydajność węglowodorów może być porównywalna z czynnikami syntetycznymi, a w niektórych przypadkach może ją nawet przewyższać (Kim et al., 2025). Dlatego też czynniki takie jak R290, R600, R600a, R601 czy R1270 są coraz częściej przedmiotem badań w kontekście zastosowań w technice chłodniczej oraz w systemach pomp ciepła (Faruque et al., 2022; Uusitalo et al., 2024). Cięższe węglowodory mogą być efektywnie wykorzystywane jako czynniki robocze w wysokotemperaturowych pompach ciepła dzięki wyższej temperaturze krytycznej. Przykładowo, dla propanu (R290), butanu (R600) oraz pentanu (R601) wynosi ona odpowiednio 96,7°C, 152,0°C oraz 196,6°C. Dla niskotemperaturowych pomp ciepła propan ma bardzo duże szanse stać się czynnikiem chłodniczym powszechnie stosowanym, zastępując dotychczasowe ziębniki HFC R32, R410a oraz R134a (Bani Issa et al., 2025). Aktualnie dostrzegalne są już pierwsze zmiany i coraz częstsze stosowanie R290 jako ziębnika dla nowych niskotemperaturowych jednostek do użytku domowego. Niektórzy producenci wskazują na ryzyko niedoboru niektórych podzespołów, takich jak sprężarki, wynikające z jednoczesnych zmian stosowanych czynników w branży chłodniczej oraz pomp ciepła (Volt et al., 2025). Mimo braku negatywnego oddziaływania na środowisko stosowanie węglowodorów w dalszym ciągu spotyka się z wieloma dyskusjami na temat bezpieczeństwa ich eksploatacji. Wynika to z ich łatwopalności. O ile w jednostkach zewnętrznych typu monoblok nie stanowi to istotnego problemu, o tyle w zastosowaniach wewnętrznych maksymalna ilość czynnika w obiegu może utrudniać stosowanie urządzeń opartych na tych czynnikach chłodniczych. Dodatkowo dla węglowodorów pracujących przy niskich temperaturach źródła, a tym samym ciśnieniu poniżej warunków atmosferycznych, kwestia

zapewnienia szczelności instalacji jest niezwykle istotna, aby uniknąć przedostawania się powietrza do układu i tworzenia łatwopalnej mieszanki.

Wśród syntetycznych czynników chłodniczych czwartej generacji szczególne znaczenie mają hydrofluoroolefiny (HFO), które stanowią obecnie jedną z głównych alternatyw dla czynników z grupy HFC. Ich popularność wynika z podobnych właściwości termodynamicznych przy jednoczesnym obniżonym współczynniku GWP. Do grupy HFO należą m.in. tetrafluoropropeny (R1234yf, R1234ze(Z), R1234ze(E)) oraz heksafluorobutyleny (R1336mzz(Z), R1336mzz(E)). Systemy wykorzystujące te czynniki charakteryzują się wydajnością porównywalną lub wyższą względem układów opartych na HFC. W kontekście bezpieczeństwa heksafluorobutyleny są niepalne, natomiast tetrafluoropropeny należą do klasy A2L, co oznacza niską palność oraz niską prędkość propagacji płomienia przy zachowaniu nietoksyczności. Drugą istotną grupą czynników czwartej generacji są hydrochlorofluoroolefiny (HCFO), obejmujące m.in. R1233zd(E) oraz R1224yd(Z). Czynniki te cechują się wysokimi temperaturami krytycznymi, brakiem palności oraz niską toksycznością. Obecność atomu chloru w ich strukturze powoduje wprawdzie niezerowy, lecz bardzo niski potencjał niszczenia warstwy ozonowej (ODP odpowiednio $3,4 \cdot 10^{-4}$ i $1,2 \cdot 10^{-4}$). Ze względu na krótki czas życia w atmosferze ich wpływ na warstwę ozonową pozostaje jednak marginalny. Właściwości te czynią je obiecującymi alternatywami dla czynników o wysokim GWP, takich jak R245fa czy R134a (Medyński, 2025; Wu et al., 2021). Czas życia w atmosferze dla czynników HFO również jest niewielki i wynosi średnio około 10-22 dni. W przypadku HFC okres ten w większości liczony jest w latach (od kilku do nawet kilkuset lat). Właściwości czynników chłodniczych z grup HFO oraz HCFO przedstawiono w Tabeli 2.

W licznych badaniach analizuje się zastosowanie HFO i HCFO w wysokotemperaturowych oraz kaskadowych pompach ciepła. Wyniki wskazują, że podobnie jak węglowodory mogą one stanowić wysokowydajne zamienniki czynników wcześniejszych generacji (Bamigbetan et al., 2018; Domanski et al., 2017; Longo et al., 2014; Mateu-Royo et al., 2019; Wu et al., 2021). W szczególności wskazuje się na przydatność czynników takich jak R601, R1336mzz(Z), R1336mzz(E), R1233zd(E) oraz R1224yd(Z) w zastosowaniach wysokotemperaturowych, podczas gdy R744, R290, R1270 i R1234yf wykazują wysoką efektywność w systemach osiagających temperatury poniżej 90°C. Jednocześnie podkreśla się potrzebę dalszych badań nad ich

Tabela 2. Czynniki HFO oraz HCFO wraz z ich właściwościami. Źródło: opracowanie własne

Table 2. HFO and HCFO refrigerants and their properties. Source: authors' own study

Czynnik	Typ	Klasa bezpieczeństwa	ODP	GWP (100 lat) AR6	Żywotność w atmosferze	Masa molowa, g·mol ⁻¹	Temp. krytyczna, °C	Ciśnienie krytyczne, MPa	Normalna temperatura wrzenia, °C
R1234yf	HFO	A2L	0	0,501	10,5–11 dni	114,04	94,70	3,382	-29,49
R1234ze(E)	HFO	A2L	0	1,37	16,4 dni	114,04	109,51	3,634	-19,00
R1234ze(Z)	HFO	A2L	0	0,315	10 dni	114,04	150,10	3,530	9,80
R1336mzz(Z)	HFO	A1	0	2,08	22 dni	164,06	171,35	2,900	33,45
R1224yd(Z)	HCFO	A1	$1,2 \cdot 10^{-4}$	1	21 dni	148,49	155,54	3,340	14,62
R1233zd(E)	HCFO	A1	$3,4 \cdot 10^{-4}$	1	26 dni	130,50	166,45	3,620	18,26

zastosowaniem w zaawansowanych konfiguracjach pomp ciepła. Jako szczególnie perspektywiczny czynnik roboczy do zastosowań przy temperaturach zasilania przekraczających 100°C wskazuje się R1233zd(E) (Dong & Wang, 2024; Medyński, 2025). Niemniej jednak identyfikacja jednego uniwersalnego ziębnika dla wysokotemperaturowych pomp ciepła stanowi złożone zagadnienie, gdyż jego dobór jest ściśle uzależniony od parametrów pracy układu, takich jak zakres temperatur, wymagany poziom bezpieczeństwa, wymiary podzespołów oraz osiągnięta wartość współczynnika efektywności (COP – Coefficient of Performance).

Obecnie trwają także prace badawcze dotyczące mieszania czynników chłodniczych. Właściwy dobór składników mieszaniny pozwala na uzyskanie wymaganych parametrów operacyjnych. Ich stosowanie może być wykorzystane w celu zwiększenia elastyczności w wyborze kompromisu między GWP, palnością, COP a wydajnością objętościową. Jednak w przypadku mieszanin należy mieć na uwadze możliwość wystąpienia zjawiska poślizgu temperaturowego podczas zmiany fazy przy mieszaniu zeotropowej. Zmiany wartości poślizgu temperaturowego determinują nieliniowy charakter zależności temperatury od entalpii tej mieszaniny, prowadząc do modyfikacji rozkładu temperatury czynnika chłodniczego w wymienniku ciepła, co należy uwzględnić w procesie projektowym jednostki zasilanej badaną mieszaniną (Medyński, 2025; Zheng et al., 2013). Dodatkowym problemem może być znalezienie odpowiednich sprężarek dostępnych na rynku, kompatybilnych z danymi mieszaninami.

Podsumowanie i wnioski

Stale rosnąca liczba instalowanych pomp ciepła, ich coraz szersze zastosowanie w przemyśle oraz zaostrzające się regulacje środowiskowe spowodowały, że w ostatnich latach znacząco wzrosło zainteresowanie stosowanymi w nich czynnikami chłodniczymi. Oprócz wpływu na warstwę ozonową, kluczowym kryterium oceny stał się potencjał tworzenia efektu cieplarnianego, wyrażany współczynnikiem GWP. W konsekwencji obserwuje się obecnie spadek wykorzystania czynników chłodniczych z grupy HFC, które często charakteryzują się wysokimi wartościami tego wskaźnika. Alternatywę dla nich stanowią czynniki syntetyczne z grup HFO i HCFO, a także węglowodory oraz inne czynniki naturalne, które dzięki swoim właściwościom termodynamicznym oraz niskiemu oddziaływaniu na środowisko zyskują na znaczeniu. W pompach ciepła przeznaczonych do ogrzewania pomieszczeń i przygotowania ciepłej wody użytkowej, pracujących w zakresie temperatur niskich i średnich, szczególnie duży potencjał wykazuje propan (R290), który może zastąpić takie czynniki jak R410a, R32 czy R134a. W przypadku zastosowań wysokotemperaturowych dobór odpowiedniego czynnika nowej generacji stanowi bardziej złożone zagadnienie. W systemach osiągających temperatury poniżej 90°C wysoką efektywność wykazują m.in. R744, R290, R1270 oraz R1234yf, natomiast dla temperatur wyższych niż 90°C jako szczególnie perspektywiczne wskazuje się czynniki takie jak R1336mzz(Z), R1336mzz(E), R1233zd(E) oraz R1224yd(Z). Wymienione czynniki mogą stanowić alternatywę dla dotychczas szeroko stosowanego czynnika

roboczego R245fa oraz rzadziej stosowanych czynników z grupy HFC w wysokotemperaturowych pompach ciepła.

Bibliografia

- Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., & Bertsch, S. S. (2018). High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy*, 152, 985–1010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>
- Bamigbetan, O., Eikevik, T. M., Nekså, P., & Bantle, M. (2017). Review of vapour compression heat pumps for high temperature heating using natural working fluids. *International Journal of Refrigeration*, 80, 197–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.04.021>
- Bamigbetan, O., Eikevik, T. M., Nekså, P., Bantle, M., & Schlemminger, C. (2018). Theoretical analysis of suitable fluids for high temperature heat pumps up to 125 °C heat delivery. *International Journal of Refrigeration*, 92, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.05.017>
- Bani Issa, A. A., Liang, C., Groll, E. A., & Ziviani, D. (2025). Residential heat pump and air conditioning systems with propane (R290) refrigerant: Technology review and future perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 266, 125560. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125560>
- Brzeski, R., & Kowalczyk, A. (2022). Techniczno-ekonomiczna analiza wariantów termomodernizacji zabytkowego budynku. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 53(9) <https://doi.org/10.15199/9.2022.9.3>
- Calm, J. M. (2008). The next generation of refrigerants – Historical review, considerations, and outlook. *International Journal of Refrigeration*, 31(7), 1123–1133. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.01.013>
- Chmielewska, A., Stefanowicz, E., & Sawicka, J. (2025). Rola chłodzenia pasywnego w bilansie cieplnym gruntu i poprawie efektywności systemu zasilanego gruntem pompą ciepła. *Instal*, 10, 7–13. <https://doi.org/10.36119/15.2025.10.1>
- Domanski, P. A., Brignoli, R., Brown, J. S., Kazakov, A. F., & McLinden, M. O. (2017). Low-GWP refrigerants for medium and high-pressure applications. *International Journal of Refrigeration*, 84, 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.08.019>
- Dong, Y., & Wang, R. (2024). When and how to use cascade high temperature heat pump—Its multi-criteria evaluation. *Energy Conversion and Management*, 309, 118435. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118435>
- Elwardany, M., Turja, A. I., Hasan, M. M., & Nassif, N. (2026). High-temperature heat pumps for industrial decarbonization: Technologies, integration strategies, and future perspectives. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 225, 110806. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2026.110806>
- European Parliament and Council of the European Union. (2024, February 7). *Regulation (EU) 2024/573 on*

- fluorinated greenhouse gases. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj>
- Faruque, M. W., Uddin, M. R., Salehin, S., & Ehsan, M. M. (2022). A Comprehensive Thermodynamic Assessment of Cascade Refrigeration System Utilizing Low GWP Hydrocarbon Refrigerants. *International Journal of Thermofluids*, 15, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100177>
- Goyal, R., England, M. H., Sen Gupta, A., & Jucker, M. (2019). Reduction in surface climate change achieved by the 1987 Montreal Protocol. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124041. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4874>
- Heath, E. A. (2017). Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (Kigali Amendment). *International Legal Materials*, 56(1), 193–205. <https://doi.org/10.1017/ILM.2016.2>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- International Energy Agency. (2022). *World Energy Outlook Special Report: The Future of Heat Pumps*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4713780d-c0ae-4686-8c9b-29e782452695/TheFutureofHeatPumps.pdf>
- Kim, S., Lee, D., Lee, Y., Kwon, S., & Kim, Y. (2025). Operating characteristics and design optimization of a heat pump clothes dryer using R290 as an alternative refrigerant to R134a. *Applied Thermal Engineering*, 279, 127609. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127609>
- Konopka, L. (2022). Analiza porównawcza systemów trigeneryjnych na przykładzie obiektu szpitalnego. Część II. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 53(9). <https://doi.org/10.15199/9.2022.9.2>
- Lee, M., Lee, S., Yeob Chung, J., Kwon, S., & Kim, Y. (2024). Energy and environmental performances of heat pumps using R32 and R466A as alternatives to R410A. *Applied Thermal Engineering*, 256, 124140. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124140>
- Liu, Y., Groll, E. A., Yazawa, K., & Kurtulus, O. (2017). Energy-saving performance and economics of CO₂ and NH₃ heat pumps with simultaneous cooling and heating applications in food processing: Case studies. *International Journal of Refrigeration*, 73, 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.09.014>
- Longo, G. A., Zilio, C., Righetti, G., & Brown, J. S. (2014). Experimental assessment of the low GWP refrigerant HFO-1234ze(Z) for high temperature heat pumps. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.05.004>
- Lyons, L., Georgakaki, A., Kuokkanen, A., Letout, S., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny, G., Eulaerts, O. D., & Grabowska, M. (2022). Clean Energy Technology Observatory, Heat pumps in the European Union – Status report on technology development, trends, value chains and markets – 2022. *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/doi/10.2760/372872>
- Mateu-Royo, C., Mota-Babiloni, A., & Navarro-Esbrí, J. (2021). Semi-empirical and environmental assessment of the low GWP refrigerant HCFO-1224y-d(Z) to replace HFC-245fa in high temperature heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 127, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.02.018>
- Mateu-Royo, C., Navarro-Esbrí, J., Mota-Babiloni, A., Amat-Albuixech, M., & Molés, F. (2019). Thermodynamic analysis of low GWP alternatives to HFC-245fa in high-temperature heat pumps: HCFO-1224yd(Z), HCFO-1233zd(E) and HFO-1336mzz(Z). *Applied Thermal Engineering*, 152, 762–777. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.047>
- Medyński, K. (2025). *Analiza pracy oraz efektywności kaskadowej, wysokotemperaturowej pompy ciepła* [Praca magisterska]. Politechnika Wrocławska.
- Nalley, S., & LaRose, A. (2021). *International Energy Outlook 2021* (IEO2021).
- Narojczyk, M., Sinacka, J., & Ratajczak, K. (2025). Wykorzystanie materiałów zmienno fazowych (PCM) do odzysku ciepła w wentylacji mechanicznej w warunkach polskich. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 56(12). <https://doi.org/10.15199/9.2025.12.7>
- Palm, B. (2008). Ammonia in low capacity refrigeration and heat pump systems. *International Journal of Refrigeration*, 31(4), 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.12.006>
- Park, W. Y., Shah, N., Vine, E., Blake, P., Holuj, B., Kim, J. H., & Kim, D. H. (2021). Ensuring the climate benefits of the Montreal Protocol: Global governance architecture for cooling efficiency and alternative refrigerants. *Energy Research & Social Science*, 76, 102068. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102068>
- Piao, C. cheng, & Noguchi, M. (2001). Thermodynamic properties of HFC-32 (difluoromethane). *International Journal of Refrigeration*, 24(6), 519–530. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00047-5)
- Ravindran, R. V., Cotter, D., Wilson, C., Jun Huang, M., & Hewitt, N. J. (2024). Experimental investigation of a small-scale reversible high-temperature heat pump – organic Rankine cycle system for industrial waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 257, 124237. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124237>
- Sayegh, M. A. (2025). Odzysk ciepła odpadowego w przemyśle w UE: Potencjał i wdrożenie technologii – analiza porównawcza. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 56(12). <https://doi.org/10.15199/9.2025.12.1>
- Shen, B., Li, Z., & Gluesenkamp, K. R. (2022). Experimental study of R452B and R454B as drop-in replacement for R410A in split heat pumps having tube-fin and microchannel heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 204, 117930. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117930>
- Słowikowski, J., Skiba, M., & Klimczak, M. (2025). Transformacja energetyczna zabytkowej kamienicy – porównanie wariantów modernizacji i źródeł ciepła. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 56(9).

- <https://doi.org/10.15199/9.2025.9.2>
United Nations. (1997). *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. https://unfccc.int/kyoto_protocol
- Uusitalo, A., Jaatinen-Värri, A., Turunen-Saaresti, T., Honkakukia, J., & Tiainen, J. (2024). Centrifugal compressor design and cycle analysis of large-scale high temperature heat pumps using hydrocarbons. *Applied Thermal Engineering*, 247, 123035. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123035>
- Volt, J., Toleikyte, A., Roca Reina, J. C., Mountraki, A., Letout, S., Georgakaki, A., Ince, E., Wegener, M., & Schmitz, A. (2025). *Clean Energy Technology Observatory, Heat pumps in the European Union – Status report on technology development, trends, value chains and markets – 2024* (C. Black, Ed.). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2760/3976212>
- Woźniak, A., & Zając, A. (2025). Potencjał odzysku i wykorzystania kondensatu z systemu klimatyzacyjnego na przykładzie budynku biurowego – studium przypadku. *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*, 56(12). <https://doi.org/10.15199/9.2025.12.5>
- Wu, D., Hu, B., & Wang, R. (2021). Vapor compression heat pumps with pure Low-GWP refrigerants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110571. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110571>
- Zhang, Y., Yang, Z., Chen, Y., He, H., & Zhao, Y. (2024). Life cycle climate performance of R410A and its environmentally friendly alternative working fluids in a heat pump system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 71, 104020. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104020>
- Zheng, N., Song, W., & Zhao, L. (2013). Theoretical and experimental investigations on the changing regularity of the extreme point of the temperature difference between zeotropic mixtures and heat transfer fluid. *Energy*, 55, 541–552. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.029>

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 jakiegokolwiek 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.*

COLD-TECH Poland

2.EDYCJA

BRANŻOWE TARGI TECHNOLOGII CHŁODZENIA

PARTNER TARGÓW I KONFERENCJI

**Chłodnictwo
& Klimatyzacja**

ZESKANUJ KOD KQ
I ODBIERZ
DARMOWY BILET



9 - 11 | 06 | 2026

**COOLING
TECH
Summit**

WARSZAWA | PTAK WARSAW EXPO

**PTAK
WARSAW
EXPO**