Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego | Rzeczpospolita Polska | Dofinansowane przez Unię Europejską

Politechnika Świętokrzyska
Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energetyki Odnawialnej

Kierunek studiów:
**Odnawialne Źródła Energii**

**Hanna Koshlak**

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

# INSTALACJE HYBRYDOWE Z POMPAMI CIEPŁA

opracowane w ramach realizacji Projektu
„**Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki**”
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025

# Spis treści

1. Wstęp ..... 2
2. Rodzaje instalacji hybrydowej z pompą ciepła ..... 2
3. Klasyfikacja instalacji hybrydowej ..... 8
3.1. Systemy zintegrowane (typu „all-in-one”) ..... 8
3.2. Systemy typu „split” ..... 10
4. Projektowanie instalacji hybrydowej z pompą ciepła ..... 11
4.1. Przykład obliczenia punktu biwalencyjnego ..... 14
5. Przykładowe rozwiązania hybrydowej instalacji z pompą ciepła ..... 18
6. Spis literatury ..... 34

Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

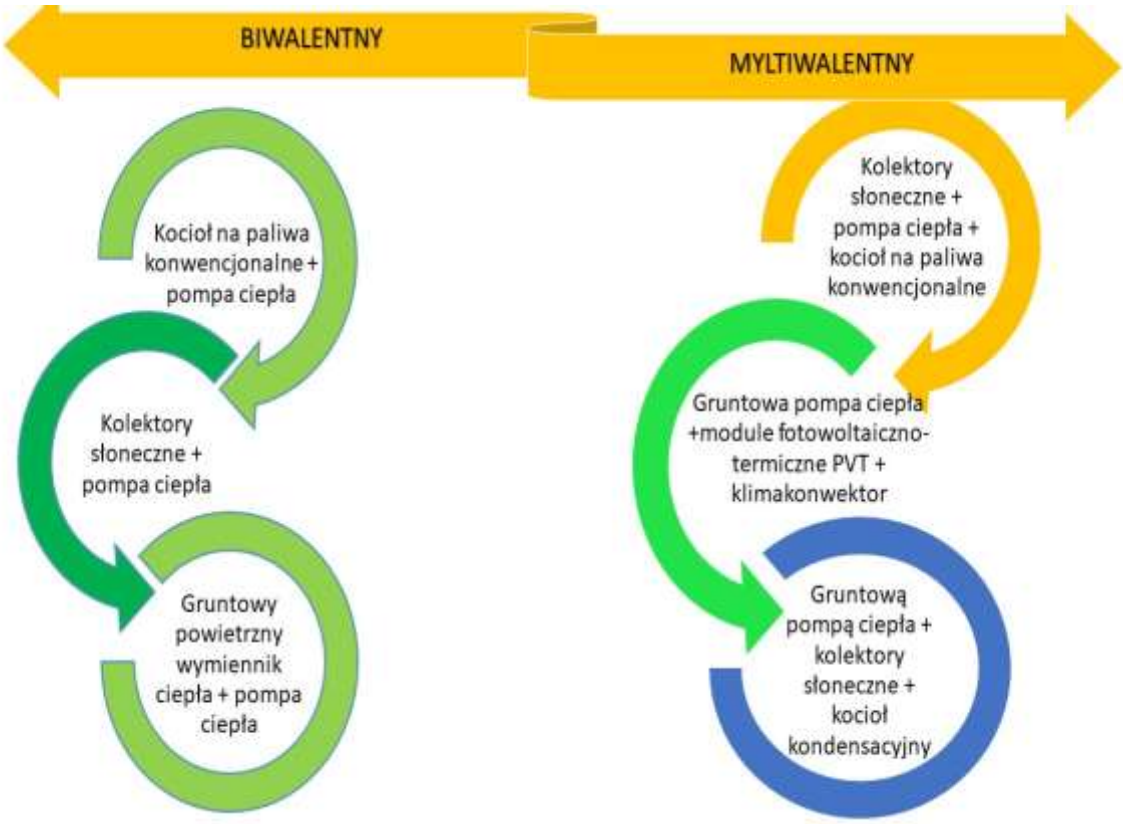
# 1. Wstęp

W kontekście dynamicznej transformacji energetycznej, ukierunkowanej na zwiększenie efektywności oraz redukcję emisji zanieczyszczeń, hybrydowe systemy grzewcze nabierają coraz większego znaczenia. Stanowią one racjonalną odpowiedź na wyzwania współczesnej energetyki, integrując zalety odnawialnych źródeł energii (OZE) z technologiami konwencjonalnymi. Instalacja hybrydowa to układ, który wykorzystuje przynajmniej dwa źródła energii, aby dostarczyć ciepło na potrzeby centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. Zazwyczaj jest to połączenie pompy ciepła, która wykorzystuje energię elektryczną do transportu ciepła, z dodatkowym, tradycyjnym źródłem, takim jak kocioł gazowy, kocioł na biomasę lub, coraz częściej, kolektory słoneczne. Głównym zadaniem takich systemów jest kompensowanie ograniczeń poszczególnych źródeł, które często mają niestabilną dostępność, zależną od czynników pogodowych, takich jak nasłonecznienie, stopień zachmurzenia i siła wiatru. Zjawisko to można porównać do korzystania z dwóch map podczas podróży. Jedna jest bardzo szczegółowa, ale ma luki informacyjne, podczas gdy druga, choć mniej dokładna, obejmuje cały obszar. Użycie obu map jednocześnie minimalizuje ryzyko zgubienia drogi.
Zastosowanie hybrydowych instalacji grzewczych z pompami ciepła ma wiele istotnych korzyści. Zapewniają one ciągłość dostaw ciepła niezależnie od warunków zewnętrznych, optymalizują koszty operacyjne, priorytetowo wykorzystując najbardziej efektywne źródło energii, oraz przyczyniają się do redukcji emisji dwutlenku węgla i innych zanieczyszczeń. Jest to kluczowe w kontekście globalnej polityki dekarbonizacji, ponieważ według Międzynarodowej Agencji Energetycznej pompy ciepła mają potencjał zaoszczędzić 50% emisji dwutlenku węgla w sektorze budowlanym i 5% w sektorze przemysłowym.

# 2. Rodzaje instalacji hybrydowej z pompą ciepła

Instalacje grzewcze z pompą ciepła, przeznaczone do ogrzewania budynków mieszkalnych i produkcji ciepłej wody użytkowej, mogą efektywnie współpracować z kotłami gazowymi, olejowymi lub na biomasę. Przy projektowaniu takiej instalacji konieczne jest określenie trybu jej pracy. System grzewczy, który ma dodatkowe źródła ciepła obok głównego, jest określany jako system biwalentny (gdy zawiera dwa urządzenia) lub multiwalentny (gdy wyposażony jest w większą liczbę urządzeń). (rys1).
[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia hybrydowe systemy grzewcze. Pozioma, gruba, żółta linia u góry dzieli rysunek na dwie sekcje: „biwalentny” po lewej oraz „multiwalentny” po prawej stronie. Sekcja „biwalentny” zawiera pionowy układ trzech

połączonych ze sobą elementów, symbolizujących systemy dwuskładnikowe. Każdy element jest owalny, przypominający literę „C”, a układy połączone są zielonymi strzałkami. Górny element (jasnozielony) zawiera napis „Kocioł na paliwa konwencjonalne + pompa ciepła”. Środkowy element (intensywnie zielony) zawiera napis „Kolektory słoneczne + pompa ciepła”. Dolny element (jasnozielony) zawiera napis „Gruntowy powietrzny wymiennik ciepła + pompa ciepła”. Sekcja „multiwalentny” zawiera podobny pionowy układ trzech owalnych elementów, które symbolizują układy z trzema lub więcej urzadzeniemi. Każdy element ma inny kolor, co odróżnia go od sekcji biwalentnej. Górny element (jasnopomarańczowy) zawiera napis „Kolektory słoneczne + pompa ciepła + kocioł na paliwa konwencjonalne”. Środkowy element (jasnozielony) zawiera napis „Gruntowa pompa ciepła + moduły fotowoltaiczno-termiczne + klimakonwektor”. Dolny element (niebieski) zawiera napis „Gruntowa pompa ciepła + kolektory słoneczne + kocioł kondensacyjny”.]
]




Rys. 1. Konfiguracji hybrydowych instalacji z pompą ciepła.

System biwalentny integruje dwa urządzenia grzewcze, które mogą współpracować w różnych konfiguracjach (Tytko, 2021):

1. **System biwalentny – alternatywny.** Pompa ciepła pokrywa całkowite zapotrzebowanie na energię cieplną aż do osiągnięcia określonej temperatury zewnętrznej, zwanej temperaturą punktu biwalentnego ($T_{bw}$), na przykład -5°C. Po osiągnięciu tej temperatury, pompa ciepła wyłącza się, a całe obciążenie grzewcze przejmuje drugie urządzenie, na przykład kocioł gazowy, olejowy lub kominek. Układ ten jest stosowany w instalacjach o temperaturze zasilania do +90°C, a jako dolne źródło dla pompy ciepła służy grunt, woda lub powietrze.
2. **System biwalentny – równoległy.** W tym systemie dwa urządzenia grzewcze pracują równolegle. Pompa ciepła zaspokaja zapotrzebowanie energetyczne do momentu osiągnięcia temperatury punktu biwalentnego ($T_{bwł}$), na przykład -5°C, kiedy to włącza się drugie urządzenie (np. kocioł na biomasę). Od tej chwili oba urządzenia pracują równocześnie. Preferowane dolne źródła ciepła to grunt, woda lub powietrze.
3. **System biwalentny – częściowo-równoległy.** Układ ten, stosowany w instalacjach o temperaturze zasilania powyżej +65°C, również obejmuje dwa urządzenia. Pompa ciepła działa do temperatury $T_{bwł}$, po czym włącza się drugie urządzenie. Następnie oba urządzenia pracują równolegle. Gdy temperatura zewnętrzna spadnie o kilka stopni, pompa ciepła wyłącza się w punkcie $T_{bw}$, a całe obciążenie grzewcze przejmuje drugie źródło ciepła, np. kocioł.

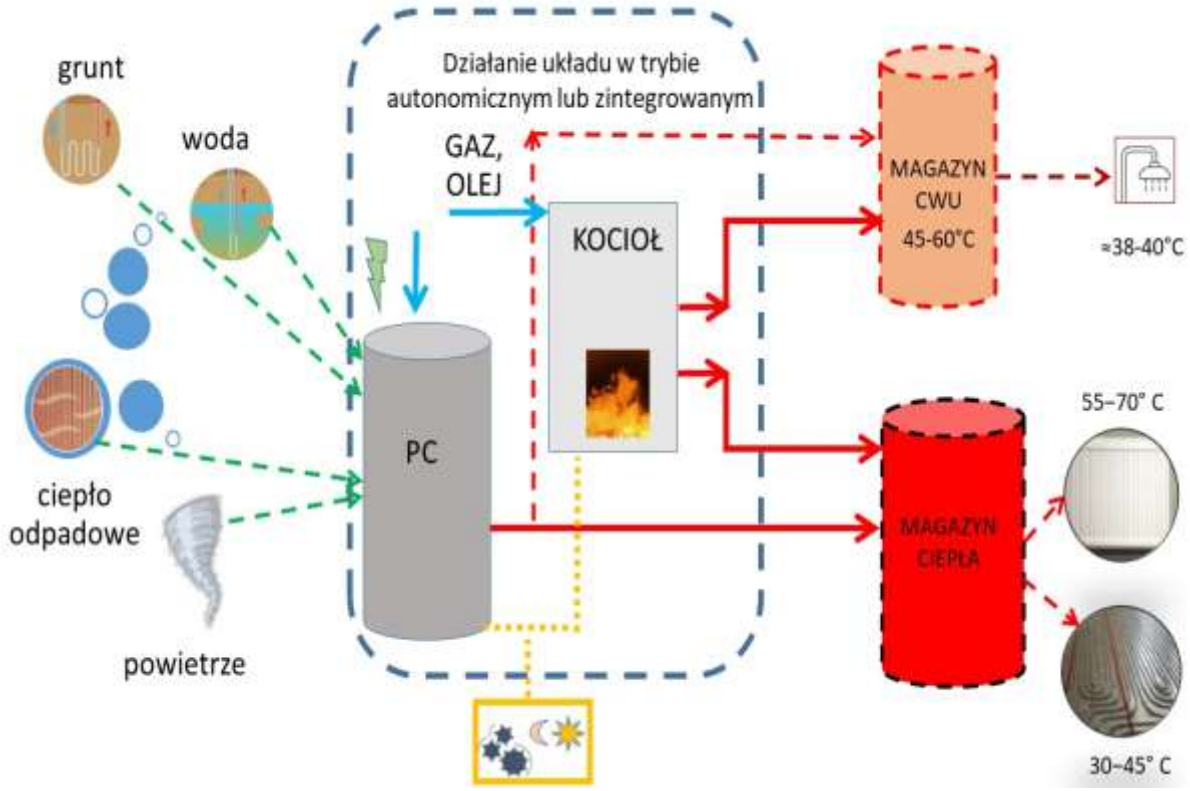
W obliczu dynamicznego rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) i rosnącej złożoności współczesnych systemów grzewczych, precyzyjne definiowanie pojęć technicznych jest kluczowe. Literatura fachowa i normy branżowe rozróżniają dwa pojęcia, często używane zamiennie, chociaż istotnie się różnią: hybrydową pompę ciepła i instalację hybrydową z pompą ciepła.

Zgodnie z normą EN 14825:2018, ***hybrydowa pompa ciepła*** to zintegrowany system grzewczy, łączący pompę ciepła zasilaną energią elektryczną z konwencjonalnym źródłem ciepła, np. kotłem na paliwo kopalne. Jest to zazwyczaj jedna, fabrycznie zmontowana jednostka, w której oba źródła są ze sobą zintegrowane. Taka konstrukcja zapewnia pełną optymalizację pracy obu komponentów za pomocą jednego, dedykowanego systemu sterowania (Beccali, 2022). Główną zaletą takiego rozwiązania jest inteligentne przełączanie między dwoma źródłami ciepła, co optymalizuje koszty eksploatacji, zużycie energii pierwotnej oraz redukuje emisję dwutlenku węgla ($CO_2$) (EN 14825:2018, European Heat Pump Association). W przeciwieństwie do tradycyjnych pomp ciepła, w tego typu systemach funkcja grzania uzupełniającego jest realizowana przez drugą jednostkę, czyli kocioł (Tihana, 2023).

Poniższy schemat (rys. 2) przedstawia ogólny układ hybrydowej pompy ciepła, w którym pompa ciepła (PC) jest podstawową jednostką. Chociaż teoretycznie w takim układzie można zastosować każdy rodzaj pompy ciepła, w praktyce najczęściej wykorzystuje się pompy ciepła typu powietrze-woda. Ich popularność wynika z

elastyczności, łatwości instalacji oraz stosunkowo niskich kosztów inwestycyjnych (Beccali, 2022).

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia hybrydowy system grzewczy składający się z pompy ciepła i kotła. Układ, przedstawiony w widoku blokowym, składa się z elementów połączonych liniami symbolizującymi przepływ energii. Lewa strona schematu ukazuje szarą, pionową kolumnę, oznaczoną jako "PC" (pompa ciepła). Zielone, przerywane linie wskazują na różne źródła, z których pompa może czerpać ciepło: grunt, woda, ciepło odpadowe, powietrze. Nad pompą widoczna jest niebieska, ciągła linia z symbolem błyskawicy, symbolizująca zasilanie energią elektryczną. W środku schematu znajduje się szary prostokąt, oznaczony jako "KOCIOŁ". Wewnątrz widoczny jest pomarańczowy płomień, symbolizujący proces spalania. Do kotła prowadzi niebieska, ciągła strzałka oznaczona jako "GAZ, OLEJ". Zarówno kocioł, jak i pompa ciepła, są otoczone dużą, niebieską, przerywaną linią w kształcie prostokąta, z napisem "Działanie układu w trybie autonomicznym lub zintegrowanym". Z kotła wychodzą dwie ciągłe czerwone strzałki, które symbolizują rozprowadzanie ciepła do dwóch magazynów. Górna linia prowadzi do jasnopomarańczowego cylindra, oznaczonego jako "MAGAZYN C.W.U." (ciepłej wody użytkowej). Obok magazynu znajduje się ikona prysznica i zakres temperatury "≈ 38-40°C". Do magazynu c.w.u. doprowadzona jest również czerwona linia od kotła oraz przerywana linia od pompy ciepła, wskazująca na opcjonalne połączenie. Dolna czerwona linia od pompy ciepła prowadzi do dużego, czerwonego cylindra, oznaczonego jako "MAGAZYN CIEPŁA". Z tego magazynu wychodzą czerwone, przerywane linie prowadzące do kaloryfera (z zakresem temperatury "55-70°C") lub do ogrzewania podłogowego. Wszystkie linie przerywane (zielone, niebieskie, czerwone, żółte) symbolizują opcjonalne elementy w systemie. Żółty prostokąt, połączony przerywaną linią z pompą ciepła i kotłem, wskazuje na optymalizację pracy urządzeń w zależności od pory dnia i roku. ]




Rys. 2. Schemat hybrydowej pompy ciepła i kotła kondensacyjnego (elementy oznaczone linią przerywaną są opcjonalne).

W hybrydowym systemie grzewczym pompa ciepła, poza podstawową funkcją ogrzewania pomieszczeń, może również zapewnić dostarczanie ciepłej wody użytkowej (c.w.u.), co wymaga zastosowania odpowiedniego zasobnika. Kluczową rolę w takim układzie pełni kocioł. Jego zadaniem jest nie tylko uzupełnianie mocy pompy ciepła w przypadku braku możliwości samodzielnego zaspokojenia zapotrzebowania na energię, lecz także dostarczanie ciepła, gdy jego praca staje się bardziej opłacalna. Kocioł przejmuje również funkcję ogrzewania c.w.u.
Integracja magazynu ciepła jest kluczowym elementem optymalizacji działania systemów grzewczych z pompami ciepła. Korzyści z tego rozwiązania to poprawa stabilności termicznej systemu oraz redukcja częstotliwości włączania i wyłączania pompy ciepła. Takie podejście znacząco wydłuża żywotność sprężarki, a tym samym całego urządzenia, redukując jednocześnie zużycie energii elektrycznej i minimalizując obciążenie mechaniczne. Systemy hybrydowe nie ograniczają się do instalacji niskotemperaturowych, takich jak ogrzewanie podłogowe. W praktyce, przez większość sezonu grzewczego, nawet w starszych budynkach, temperatura czynnika grzewczego jest na tyle niska, iż pompa ciepła może pracować efektywnie, osiągając wysoki współczynnik efektywności (COP). Kocioł staje się bardziej opłacalny pod względem kosztów i emisji $CO_2$ dopiero w skrajnie niskich temperaturach. W związku

z tym, modernizacja starszych budynków poprzez instalację pompy ciepła staje się możliwa.
Chociaż hybrydowe pompy ciepła stanowią perspektywne rozwiązanie w kierunku niskoemisyjnego ogrzewania, ich pełna implementacja napotyka na szereg istotnych barier. Kluczowym wyzwaniem jest brak kompleksowych regulacji prawnych tej technologii w przepisach budowlanych, co stanowi przeszkodę dla jej powszechnego wdrożenia. Niezbędne jest także wprowadzenie odpowiednich norm testowych oraz stworzenie zachęt finansowych na poziomie unijnym i lokalnym, wspierających instalację odnawialnych źródeł energii w systemach grzewczych (Bogdanovičs, 2018). Głównym ograniczeniem dla systemów hybrydowych jest ich optymalna wydajność, osiągana głównie w klimacie umiarkowanym. W chłodniejszych strefach ich efektywność może spadać, prowadząc do zwiększonego zapotrzebowania na tradycyjne źródła energii (np. kotły). Ponadto, początkowe nakłady inwestycyjne na hybrydowe pompy ciepła mogą być wyższe w porównaniu do systemów konwencjonalnych, co wydłuża okres zwrotu. Wyzwania stanowią również kwestie techniczne: systemy te wymagają bardziej zaawansowanej konserwacji z uwagi na większą liczbę komponentów, a także mogą generować wyższy poziom hałasu w porównaniu do tradycyjnych pomp ciepła.
*Termin instalacja hybrydowa z pompą ciepła* (ang. hybrid heat pump system) jest pojęciem znacznie szerszym, opisującym cały system grzewczy, który składa się z co najmniej dwóch odrębnych, fizycznie oddzielnych urządzeń, połączonych w spójny układ hydrauliczny i sterowniczy. W tej konfiguracji pompa ciepła może być zintegrowana z różnorodnymi źródłami, niekoniecznie tylko z kotłem konwencjonalnym, ale również z innymi systemami wykorzystującymi odnawialne źródła energii (OZE). W przeciwieństwie do hybrydowej pompy ciepła, komponenty instalacji hybrydowej nie są fabrycznie zintegrowane w jednej obudowie, lecz montuje się je oddzielnie i zarządza poprzez wspólny system sterowania. Tego typu instalacje, często nazywane układami typu „split" lub „add-on", są szczególnie popularne przy modernizacji istniejących budynków, ponieważ pozwalają na dodanie pompy ciepła do wcześniej zaprojektowanego kotła (Kieft, 2021). W takich układach konieczne jest zastosowanie nadrzędnego, zewnętrznego sterownika, który koordynuje pracę poszczególnych, niezależnych urządzeń. Rodzaje hybrydowych systemów grzewczych , w zależności od zastosowanych technologii i sposobu ich integracji zmieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Rodzaje hybrydowych systemów grzewczych z pompami ciepła

| **Cecha** | **Hybrydowa pompa ciepła** | **Instalacja hybrydowa z pompą ciepła** |
|---|---|---|
| forma | jedno zintegrowane urządzenie typu "all-in-one". | system złożony z dwóch lub więcej oddzielnych urządzeń. |
| integracja | fabrycznie połączona jednostka. | montowana i łączona w miejscu instalacji. |
| sterowanie | wbudowany, dedykowany sterownik. | zewnętrzny, nadrzędny sterownik. |
| zastosowanie | nowe instalacje, rzadziej modernizacje. | modernizacje (typ "add-on"), nowe instalacje. |

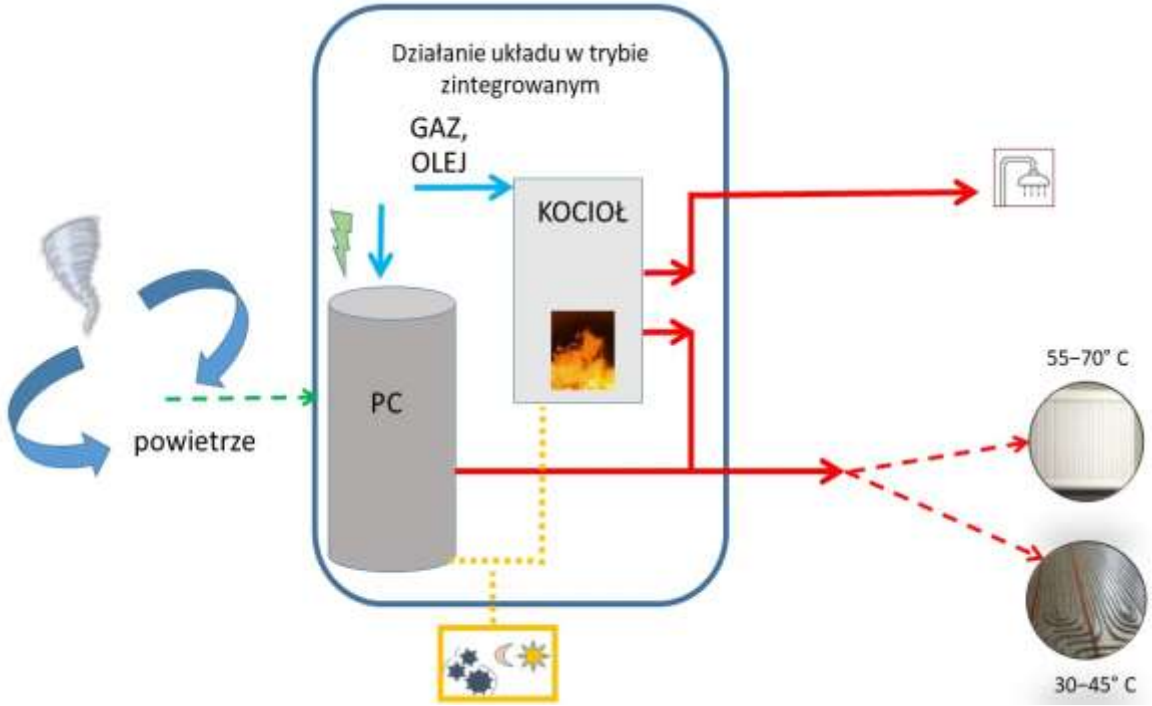
| | | |
|---|---|---|
| przykładowa konfiguracja | pompa ciepła + kocioł w jednej obudowie. | pompa ciepła + kocioł + panele pv. |

# 3. Klasyfikacja instalacji hybrydowej

## 3.1. Systemy zintegrowane (typu „all-in-one”)

Zgodnie z definicją normy EN 14825:2018, systemy te stanowią "zabudowany zespół lub zespoły zaprojektowane jako jedna jednostka". Oznacza to, że pompa ciepła i drugie źródło ciepła (najczęściej kocioł gazowy) są fizycznie połączone w jednej, kompaktowej obudowie fabrycznej. Takie rozwiązanie znacznie upraszcza proces montażu, ponieważ układ zintegrowany nie wymaga skomplikowanego montażu instalacji hydraulicznej i elektrycznej, a jedynie podłączenia do istniejącej instalacji grzewczej.
Zintegrowane systemy charakteryzują się szeregiem korzyści, jednak wiążą się również z pewnymi ograniczeniami, które należy uwzględnić w projekcie. Integracja poszczególnych komponentów w jeden moduł niesie ze sobą liczne zalety. Należą do nich kompaktowa konstrukcja i oszczędność miejsca. Kolejnym atutem jest uproszczony montaż, gdyż jednostka dostarczana jest jako kompletny moduł. Rozwiązanie to znacząco skraca czas instalacji, minimalizując ryzyko błędów montażowych, co przekłada się na niezawodność systemu. Dodatkową zaletą jest wspólne sterowanie za pomocą zintegrowanego sterownika fabrycznego, który automatycznie optymalizuje pracę obu źródeł ciepła.
Mimo wielu korzyści, systemy te posiadają również pewne wady. Do najważniejszych należy wyższy koszt początkowy, gdyż zintegrowane jednostki są zazwyczaj droższe w zakupie niż dwa oddzielne urządzenia o podobnych parametrach. Inną istotną wadą jest mniejsza elastyczność – trudniej jest dostosować taki system do specyficznych wymagań, na przykład do już istniejącego kotła o dużej mocy, co może ograniczać możliwości modernizacji. Ponadto, w przypadku awarii jednej jednostki, mogą pojawić się potencjalne trudności z serwisem. Naprawa może być bardziej skomplikowana, a w skrajnych przypadkach konieczna może okazać się wymiana całej jednostki, co może generować znacznie wyższe wydatki.
System zintegrowany został zamieszczony na rysunku 3.
[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia działanie zintegrowanego systemu grzewczego, składającego się z pompy ciepła (PC) i kotła. Elementy te są ujęte w niebieskim prostokącie, co symbolizuje zintegrowany tryb pracy urządzeń. Po lewej stronie schematu, pionowy, szary cylinder oznaczony jako PC (pompa ciepła) jest połączony zieloną, przerywaną linią ze stylizowanym rysunkiem wiru powietrza i napisem "powietrze". Wskazuje to, że pompa ciepła pobiera energię z powietrza. Z pompy ciepła wychodzą dwie czerwone, ciągłe linie: jedna prowadzi do symbolu ogrzewania wysokotemperaturowego (55-70°C), a druga do symbolu ogrzewania niskotemperaturowego (30-45°C). Nad pompą widoczna jest niebieska, ciągła linia z symbolem błyskawicy, symbolizująca zasilanie energią elektryczną. Obok pompy ciepła znajduje się szary prostokąt, symbolizujący kocioł. Do kotła skierowana jest

niebieska, ciągła strzałka oznaczona jako "GAZ, OLEJ". Z kotła wychodzą dwie czerwone, ciągłe linie. Jedna prowadzi do symbolu prysznica, co oznacza dostarczanie ciepłej wody użytkowej, a druga do systemu ogrzewania. Żółty prostokąt, połączony żółtą, przerywaną linią z pompą ciepła i kotłem, wskazuje na optymalizację pracy urządzeń w zależności od pory dnia i roku.]



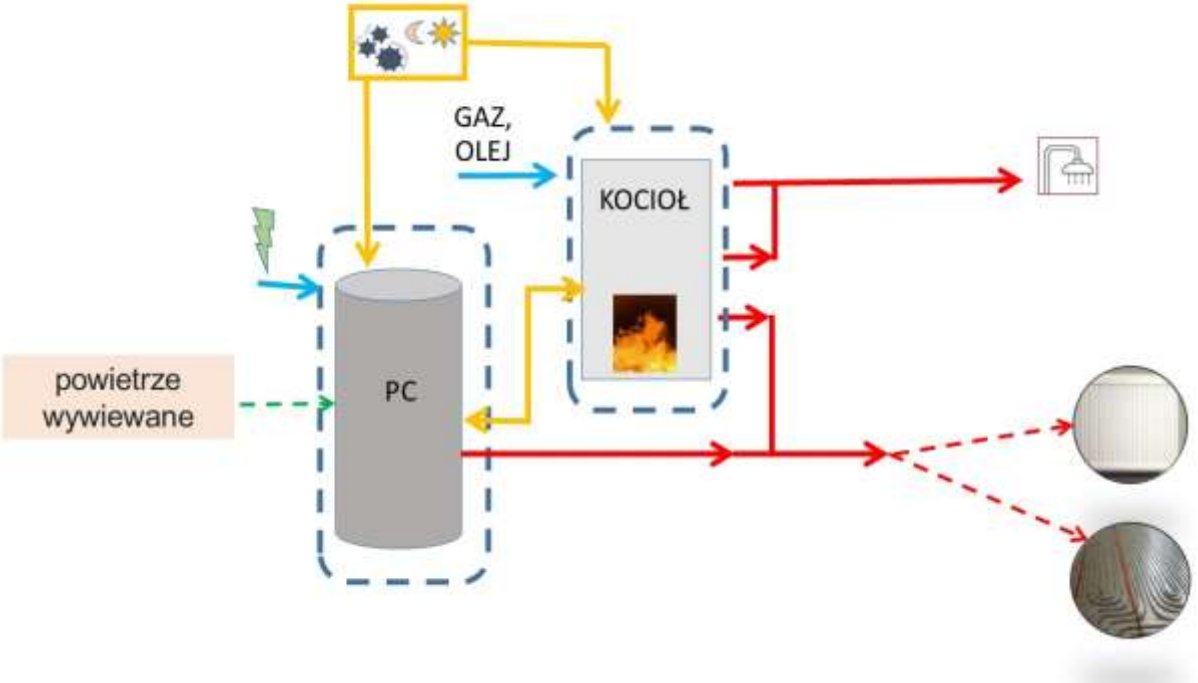

Rys. 3. Schemat hybrydowej pompy ciepła i kotła kondensacyjnego w układzie zintegrowanym (elementy oznaczone linią przerywaną są opcjonalne).

Analiza przedstawionego schematu wskazuje, iż kluczową cechą omawianego systemu jest możliwość pracy bez dodatkowych zbiorników akumulacyjnych. Rozwiązanie to jest szczególnie popularne w krajach, w których dominują kotły dwufunkcyjne (tzw. kotły kompaktowe), charakteryzujące się przepływowym podgrzewaniem wody użytkowej, co zapewnia jej natychmiastową dostępność.
Chociaż rozwiązanie to wiąże się z pewnymi zaletami, takimi jak redukcja kosztów początkowych instalacji oraz kompaktowe wymiary, jego wdrożenie niesie ze sobą również istotne wady. Główną z nich jest całkowite uzależnienie procesu podgrzewania ciepłej wody użytkowej od kotła, co eliminuje udział pompy ciepła w tym procesie. Do podgrzewania wody wykorzystuje się paliwa kopalne, co skutkuje podwyższeniem kosztów eksploatacyjnych oraz emisji substancji szkodliwych.
Ponadto, brak bufora ciepła, który jest niezbędny do optymalizacji pracy pompy ciepła, uniemożliwia magazynowanie energii wytworzonej w okresach jej największej efektywności. W rezultacie, pompa ciepła musi działać w trybie ciągłym, co prowadzi do jej częstego włączania i wyłączania. Zjawisko to nie tylko zmniejsza sprawność urządzenia, ale także może prowadzić do skrócenia jego żywotności (Beccali, 2022).

## 3.2. Systemy typu „split”

Instalacja hybrydowa w wariancie „split” to rozwiązanie, w którym pompa ciepła oraz drugie źródło ciepła stanowią oddzielne urządzenia, łączone w jeden układ hydrauliczny w miejscu montażu. Rozwiązanie to jest szczególnie korzystne w procesie modernizacji budynków, ponieważ umożliwia integrację pompy ciepła z już istniejącym kotłem. Podstawową cechą tych systemów jest ich elastyczność, która pozwala na dowolne łączenie jednostek od różnych producentów. Dzięki temu projektant może łatwo dobrać moc i typ urządzeń – na przykład połączyć pompę ciepła powietrze-woda z kondensacyjnym kotłem gazowym o wyższej mocy – optymalnie dopasowując układ do zapotrzebowania energetycznego budynku. Zasadniczą wadą tego rozwiązania jest złożony montaż, ponieważ wymaga on precyzyjnego połączenia hydraulicznego i elektrycznego dwóch niezależnych jednostek. Konieczne jest również zastosowanie nadrzędnego sterownika, który koordynuje pracę obu źródeł, zapewniając spójne i efektywne działanie całego systemu. Z drugiej strony, zaletą jest łatwość serwisu: w przypadku awarii jednej jednostki, druga może nadal działać, a naprawa lub wymiana uszkodzonego elementu nie wymaga ingerencji w cały system. Przykładem tego typu rozwiązań są instalacje, które zyskały popularność w Holandii (Kieft, 2021). Najbardziej popularnym układem hybrydowym w tym kraju jest zestaw z pompą ciepła zasilaną powietrzem zewnętrznym, choć coraz częściej spotykane są rozwiązania, w których pompy ciepła zasilane są powietrzem wywiewanym z systemu wentylacji mechanicznej. W takich układach możliwe jest osiągnięcie wysokiej sprawności pompy ciepła, zwłaszcza gdy dolne źródło ciepła charakteryzuje się stosunkowo wysoką temperaturą, a budynek jest dobrze ocieplony i wykorzystuje niskotemperaturowy system ogrzewania (rys. 4).

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia hybrydową instalację grzewczą w konfiguracji typu "add-on", co oznacza, że urządzenia są dodawane do istniejącej instalacji. W przykładowym schemacie pompa ciepła (PC) jest zintegrowana z istniejącym kotłem. Pompa ciepła (PC) jest przedstawiona na rysunku jako szary, pionowy cylinder, otoczony niebieską, przerywaną linią. Po lewej stronie od pompy ciepła widoczna jest zielona, przerywana linia z napisem "powietrze wywiewane", co wskazuje, że pompa pobiera energię cieplną z powietrza wentylacyjnego. Nad pompą widoczna jest niebieska, ciągła linia z symbolem błyskawicy, symbolizująca zasilanie energią elektryczną. Obok pompy ciepła znajduje się szary prostokąt, symbolizujący kocioł, który także jest otoczony niebieską, przerywaną linią. Do górnej części kotła prowadzi niebieska, ciągła linia z napisem "GAZ, OLEJ", co wskazuje na źródło zasilania. Niezależną pracę pompy ciepła na potrzeby ogrzewania wskazuje czerwona, ciągła linia, która wychodzi z pompy ciepła i prowadzi bezpośrednio do systemu grzewczego. Z kolei czerwona, ciągła linia wychodząca bezpośrednio z kotła wskazuje, że urządzenie to może działać niezależnie, dostarczając ciepło do ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) lub na ogrzewanie. Żółty prostokąt, połączony żółtą, przerywaną linią z pompą ciepła i kotłem, wskazuje na optymalizację pracy urządzeń w zależności od pory dnia i roku.]




Rys. 4. Schemat instalacji hybrydowej z pompą ciepła zasilaną powietrzem wentylacyjnym typu "add-on".

W zaprezentowanym układzie (rys. 4) wydajność pompy ciepła jest ograniczona objętością powietrza wywiewanego z pomieszczeń, mimo że ma ono stosunkowo wysoką temperaturę (około 20°C). Z tego powodu pompa ciepła jest w stanie wyprodukować około 1,5 kW ciepła, co zaspokaja około jednej trzeciej zapotrzebowania na ciepło przeciętnego budynku w Holandii. Rozwiązanie hybrydowe w konfiguracji modernizacyjnej zapewnia znaczącą redukcję emisji dwutlenku węgla oraz redukcję kosztów eksploatacyjnych. Warto również podkreślić, że pompa ciepła zasilana powietrzem zewnętrznym charakteryzuje się wyższą efektywnością w ujęciu rocznym, co przekłada się na lepsze wyniki w zakresie emisji $CO_2$, ponieważ jest w stanie dostarczyć większą moc grzewczą.

# 4. Projektowanie instalacji hybrydowej z pompą ciepła

Projektowanie instalacji hybrydowej obejmuje wiele etapów, które wymagają precyzyjnej analizy i kalkulacji. Błędy popełnione na wczesnym etapie mogą prowadzić do problemów eksploatacyjnych w przyszłości. Kluczowe jest nie tylko prawidłowe dopasowanie mocy urządzeń, ale również ich integracja z pozostałymi elementami instalacji, co zapewnia wysoką efektywność i niezawodność przez cały okres eksploatacji. Etapy projektowania.

*1. Analiza obciążenia cieplnego budynku* ($Q_{budynku}$). Podstawą doboru każdego systemu grzewczego jest określenie zapotrzebowania cieplnego budynku, czyli mocy niezbędnej do pokrycia strat ciepła. Wartość tę należy wyliczyć precyzyjnie, zgodnie z

normą PN-EN 12831, uwzględniając stopień izolacji budynku, strefę klimatyczną oraz wszelkie straty ciepła przez przegrody zewnętrzne, dach, podłogę i wentylację. W celu wstępnej oceny można posłużyć się uproszczonymi wskaźnikami jednostkowego zapotrzebowania, które są zależne od typu i roku budowy budynku.

*2. Dobór mocy urządzeń.*

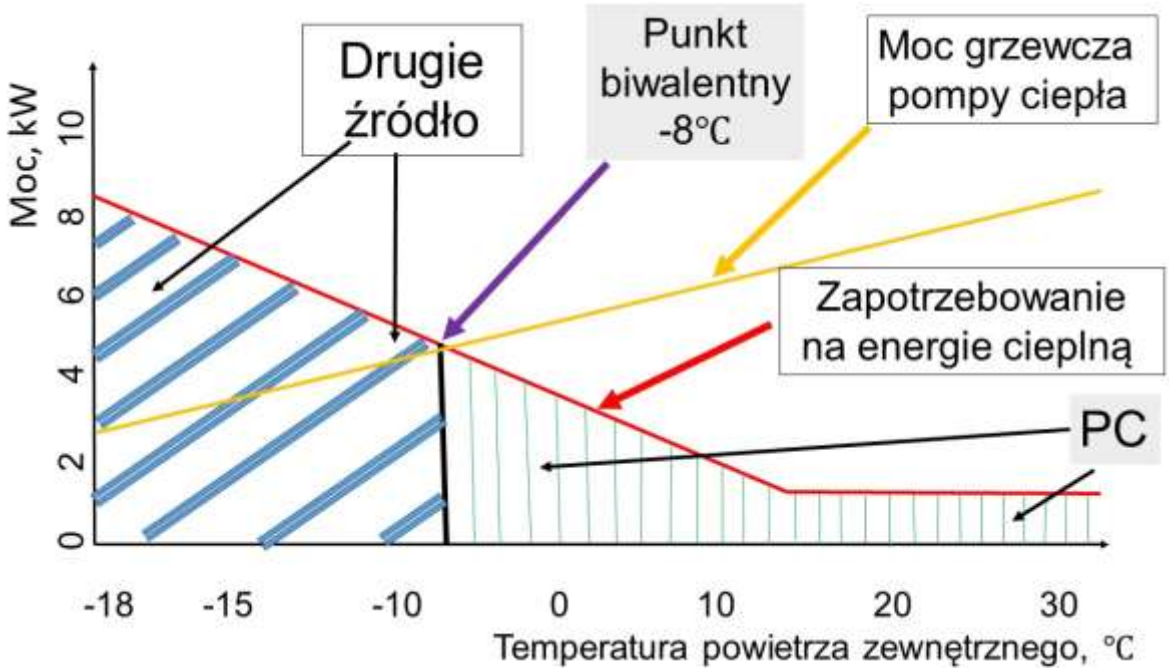
Projektowanie instalacji hybrydowych z pompą ciepła wymaga uwzględnienia i optymalizacji współpracy urządzenia z innymi źródłami ciepła, takimi jak kocioł gazowy, olejowy czy na paliwo stałe. Odpowiedni dobór tych komponentów pozwala na osiągnięcie maksymalnej efektywności całego systemu. W przypadku pomp gruntowych instalacja dolnego źródła (np. kolektory pionowe lub poziome) musi być zwymiarowana w sposób optymalny, aby zapewnić stabilną i wystarczającą ilość energii cieplnej przez cały okres grzewczy, nawet przy największym obciążeniu cieplnym budynku.

*3. Dobór instalacji wewnętrznej (górne źródło).* W celu maksymalizacji współczynnika wydajności (COP), niezbędne jest zaprojektowanie instalacji grzewczej jako niskotemperaturowej (np. ogrzewanie podłogowe lub ścienne). Niskie temperatury zasilania pozwalają pompie ciepła na pracę z najwyższą sprawnością. Ponadto, zastosowanie odpowiedniego zasobnika ciepłej wody użytkowej oraz bufora grzewczego jest kluczowe dla optymalizacji pracy urządzenia, redukując częstotliwość załączeń i wydłużając jego żywotność.

*3. Określenie systemu pracy układu grzewczego. Strategia sterowania.* Pompy ciepła są projektowane do pracy w trybie monoenergetycznym, biwalentnym lub multiwalentnym. W układzie hybrydowym moc pompy ciepła dobiera się tak, aby pokrywała około 70-80% rocznego zapotrzebowania na ciepło. Pozostałą część uzupełnia źródło szczytowe, czyli drugie urządzenie grzewcze. Dobór mocy dodatkowego źródła jest ściśle powiązany z wybranym trybem pracy układu. W trybie alternatywnym (szeregowym) włączenie drugiego, konwencjonalnego źródła ciepła (np. kotła gazowego) następuje w momencie, gdy temperatura zewnętrzna spadnie poniżej punktu biwalencyjnego (rys.5). Wówczas pompa ciepła jest wyłączana, a za ogrzewanie odpowiada wyłącznie kocioł. Ten wariant jest szczególnie efektywny w instalacjach z grzejnikami o wysokiej temperaturze zasilania, gdzie praca pompy ciepła w niskich temperaturach zewnętrznych byłaby nieefektywna ekonomicznie.

[Tekst alternatywny. Wykres przedstawia graficzną analizę mocy grzewczej w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego. Schemat jest podzielony na dwie strefy, symbolizujące pracę poszczególnych urządzeń grzewczych, a granica podziału wyznacza punkt biwalentny. Na osi poziomej oznaczono temperaturę zewnętrzną w stopniach Celsjusza, natomiast oś pionowa reprezentuje moc w kilowatach. Żółta linia, opadająca od prawej do lewej strony wykresu, przedstawia moc grzewczą pompy ciepła (PC). Zapotrzebowanie na energię cieplną oznaczono łamaną, czerwoną linią. Zapotrzebowanie to wzrasta wraz ze spadkiem temperatury zewnętrznej. Punktem biwalentnym jest punkt przecięcia się czerwonej linii (zapotrzebowania na ciepło) oraz żółtej (mocy pompy ciepła). W tym miejscu znajduje się czarna, pionowa linia. Fioletowa strzałka wskazuje, że wartość punktu biwalentnego wynosi -8°C i 4,5 kW. Strefa po prawej stronie od czarnej linii jest wypełniona jasnozielonymi pasami, a

biegnąca w niej czarna linia opisana jest jako "Pompa ciepła PC". Wskazuje to, że w temperaturach powyżej -8°C całe zapotrzebowanie na ciepło jest pokrywane wyłącznie przez pompę ciepła. Strefa po lewej stronie od czarnej linii jest wypełniona niebieskimi, ukośnymi kreskami, a biegnąca w niej czarna linia opisana jest jako "Drugie źródło". Oznacza to, że w temperaturach poniżej -8°C pompa ciepła jest wyłączana, a całe zapotrzebowanie na ciepło pokrywa wyłącznie drugie źródło, na przykład kocioł.]

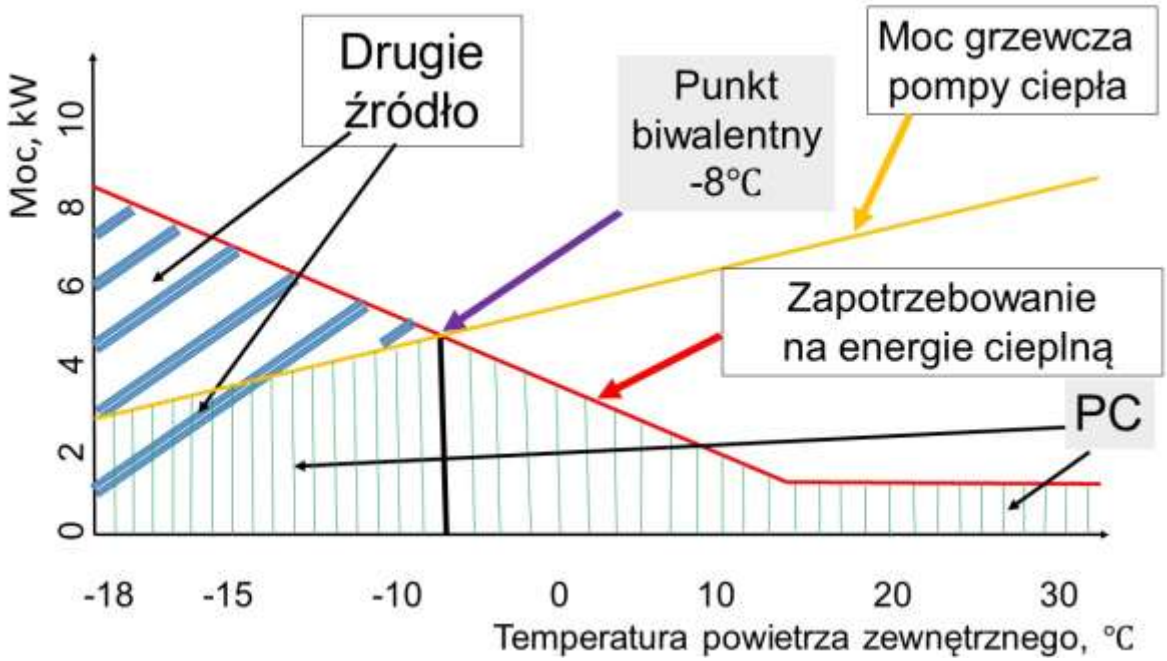



Rys. 5. System biwalentny alternatywny.

W trybie równoległym (wspomagającym) (rys.6), gdy temperatura zewnętrzna spada poniżej punktu biwalencyjnego, pompa ciepła kontynuuje pracę, a jej wydajność jest wspomagana przez drugie źródło ciepła. Oba urządzenia pracują jednocześnie, dostarczając niezbędną moc grzewczą. Działanie systemu w takim trybie pozwala na optymalne wykorzystanie pompy ciepła nawet w trudnych warunkach, zaś drugie źródło jedynie uzupełnia brakującą moc. Jest to najczęściej stosowane rozwiązanie w nowoczesnych instalacjach hybrydowych.

[Tekst alternatywny. Wykres przedstawia graficzną analizę mocy grzewczej w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego. Schemat jest podzielony na dwie strefy, symbolizujące pracę poszczególnych urządzeń grzewczych. Granicę podziału wyznacza punkt biwalentny. Na osi poziomej oznaczono temperaturę zewnętrzną w stopniach Celsjusza, natomiast oś pionowa reprezentuje moc w kilowatach. Żółta linia, wznosząca się od prawej do lewej strony wykresu, przedstawia moc grzewczą pompy ciepła (PC). Zapotrzebowanie na energię cieplną oznaczono łamaną,

czerwoną linią, które wzrasta wraz ze spadkiem temperatury zewnętrznej. Punktem biwalentnym jest punkt przecięcia się czerwonej linii (zapotrzebowania na ciepło) oraz żółtej (mocy pompy ciepła). W tym miejscu znajduje się czarna, pionowa linia. Fioletowa strzałka wskazuje, że wartość punktu biwalentnego wynosi -8°C i 4,5 kW. Strefa po prawej stronie od czarnej linii, wypełniona jasnozielonymi pasami, jest opisana jako "pompa ciepła PC". Wskazuje to, że w temperaturach powyżej -8°C całe zapotrzebowanie na ciepło jest pokrywane wyłącznie przez pompę ciepła. W strefie po lewej stronie od czarnej linii (temperatury poniżej -8°C) oba źródła działają jednocześnie. Pompa ciepła dostarcza część mocy (reprezentowaną przez dolną część wykresu, poniżej żółtej linii), a drugie źródło (obszar oznaczony niebieskimi pasami, znajdujący się między czerwoną a żółtą linią) uzupełnia brakującą energię.]

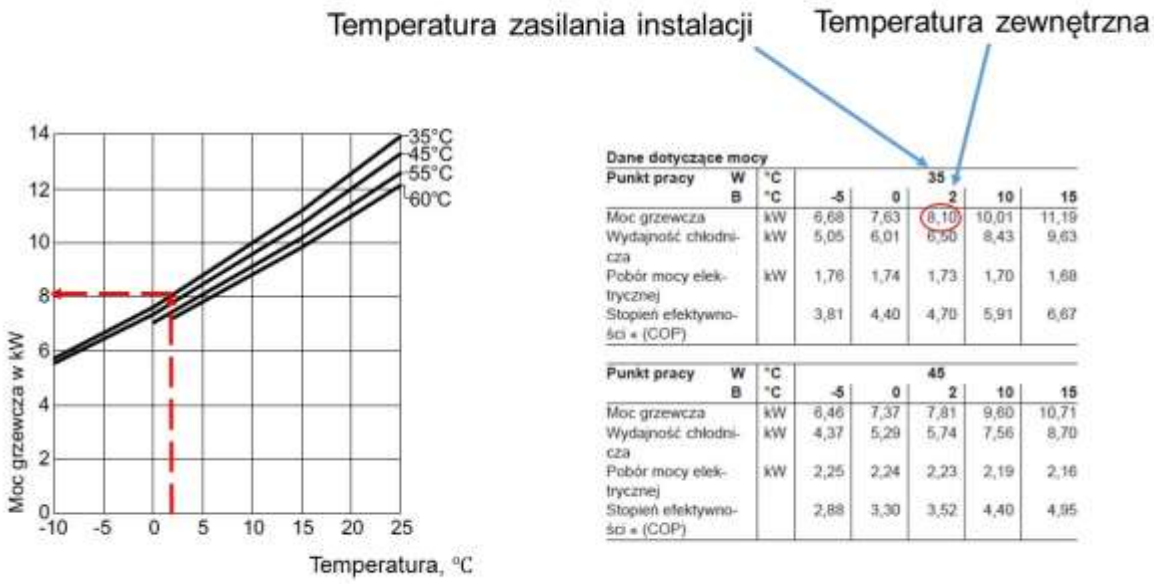



Rys. 6. System biwalentny równoległy.

## 4.1. Przykład obliczenia punktu biwalencyjnego

Wybór metody wyznaczania punktu biwalencyjnego zależy od dostępności danych, złożoności projektu oraz wymaganej dokładności obliczeń. Zarówno metoda graficzna, jak i analityczna, są stosowane w praktyce projektowej. *Metoda graficzna* jest szczególnie przydatna w wstępnych analizach, gdy dysponujemy danymi katalogowymi producenta w formie tabelarycznej lub wykresów. Umożliwia ona szybkie określenie, w jakim zakresie temperatur pompa ciepła będzie pracować samodzielnie, a kiedy będzie wymagała wsparcia. *Metoda analityczna* jest stosowana w profesjonalnym projektowaniu instalacji, w którym dokładne

wyznaczenie punktu biwalencyjnego jest kluczowe dla optymalnego doboru mocy dodatkowego źródła oraz oceny ekonomicznej opłacalności całego systemu.
*1. Metoda graficzna.* Metoda graficzna polega na naniesieniu dwóch krzywych na jeden wykres, co umożliwia wizualne określenie punktu biwalencyjnego.
***Krzywa zapotrzebowania na ciepło*** to linia prosta, która wskazuje, jak zapotrzebowanie na energię cieplną budynku wzrasta wraz ze spadkiem temperatury zewnętrznej. Maksymalne zapotrzebowanie na ciepło, tzw. moc szczytowa, przypada na obliczeniową temperaturę zewnętrzną (np. −20°C). W tak zwanym punkcie zerowym zapotrzebowanie wynosi 0 kW, co odpowiada temperaturze, przy której ogrzewanie nie jest potrzebne (np. +15°C).
***Krzywa mocy pompy ciepła*** przedstawia zależność mocy grzewczej pompy ciepła od temperatury zewnętrznej. Dane do tej krzywej pochodzą z kart katalogowych producentów pomp ciepła.
***Punkt biwalencyjny*** to punkt przecięcia obu krzywych. W tym punkcie moc pompy ciepła jest idealnie dopasowana do zapotrzebowania budynku. Poniżej tej temperatury (na lewo od punktu przecięcia) moc pompy jest niewystarczająca i system musi być wspomagany przez inne źródło ciepła.
*2. Metoda analityczna (obliczeniowa).*
Metoda analityczna jest stosowana w profesjonalnym projektowaniu instalacji, gdzie dokładne wyznaczenie punktu biwalencyjnego jest kluczowe. Przykładowo, projektuje się system grzewczy z powietrzną pompą ciepła dla nowo wybudowanego domu jednorodzinnego w III strefie klimatycznej (np. Warszawa), dla której obliczeniowa temperatura zewnętrzna wynosi −20°C. Dane dotyczące mocy pomp ciepła solanka-woda (B/W) pochodzą bezpośrednio z kart katalogowych i specyfikacji technicznych podanych przez producentów (np. Viessmann, Daikin, Nibe). Wartość nominalna, często podawana w katalogach i materiałach marketingowych (np. "pompa ciepła 6 kW"), jest mierzona w standardowych warunkach laboratoryjnych. Na przykład (rys. 7), w temperaturze zewnętrznej 2°C (tabela 2, kolumna 2) i odpowiedniej temperaturze zasilania instalacji, moc grzewcza pompy ciepła wynosi 8.10 kW.
[Tekst alternatywmy. Rysunek przedstawia wykres wydajności pompy ciepła wraz z dwiema tabelami danych technicznych. Na wykresie oś pozioma odpowiada temperaturze zewnętrznej w stopniach Celsjusza, natomiast oś pionowa reprezentuje moc w kilowatach. Czarne linie na wykresie odpowiadają różnym temperaturom zasilania instalacji: 35°C, 45°C, 55°C i 60°C. Zaznaczony na wykresie punkt pracy przy 2°C odpowiada danym z tabeli: przy temperaturze zasilania 35°C, moc grzewcza wynosi 8.10 kW, a współczynnik efektywności (COP) 4.40. W przypadku zasilania o wyższej temperaturze, 45°C, moc grzewcza przy tej samej temperaturze zewnętrznej spada do 7.37 kW, a COP do 3.30.]




Rys. 7. Dane katalogowe pompy ciepła Vitocal solanka/woda typ BWC 201.A06 producenta Viessmann (Katalog firmy Viessmann).

*1. Zapotrzebowanie cieplne budynku (Q budynku):*
Powierzchnia budynku (*A*): 150 m$^2$
Jednostkowe zapotrzebowanie na ciepło(*q*): 40 W/m$^2$
Określenie szacunkowego zapotrzebowania budynku na energię:

$$Q_{budynku} = q \cdot A = 40 \cdot 150 = 6\ kW. \tag{1}$$

Szacunkowe zapotrzebowanie na cieplną wodę użytkową dla czterech osób wynosi $Q_{cwu}$= 1 kW.
Całkowite zapotrzebowanie szczytowe:

$$Q_{max} = Q_{budynku} + Q_{cwu} = 6 + 1 = 7\ kW. \tag{2}$$

*2. Krzywa zapotrzebowania na ciepło jest liniową funkcją temperatury zewnętrznej.*
W temperaturze obliczeniowej zewnętrznej dla zimy −20 °C zapotrzebowanie szczytowe na energię cieplną wynosi 7 kW.
W tzw. "punkcie zerowym" (temperatura, przy której nie ma zapotrzebowania na ogrzewanie, zazwyczaj +15 °C), zapotrzebowanie na energię cieplną wynosi 0 kW.
Zapotrzebowanie na ciepło możemy opisać równaniem:

$$y = ax + b, \tag{3}$$

gdzie $a, b$ – współczynniki określające nachylenie prostej.
$x$ – temperatura zewnętrzna.
Z uwzględnieniem (3) możemy zapisać układ równań:

$$\begin{aligned} 0 &= a \cdot 15 + b \\ 7 &= a(-20) + b. \end{aligned} \tag{4}$$

Otrzymujemy: $a = -0.2\ \frac{kW}{°C}$, *b=3 kW.*

Zatem, krzywa zapotrzebowania na ciepło ($Q_{zapotrzebowania}$):

$$Q_{zapotrzebowania}(T) = -0.2 \cdot T + 3. \tag{5}$$

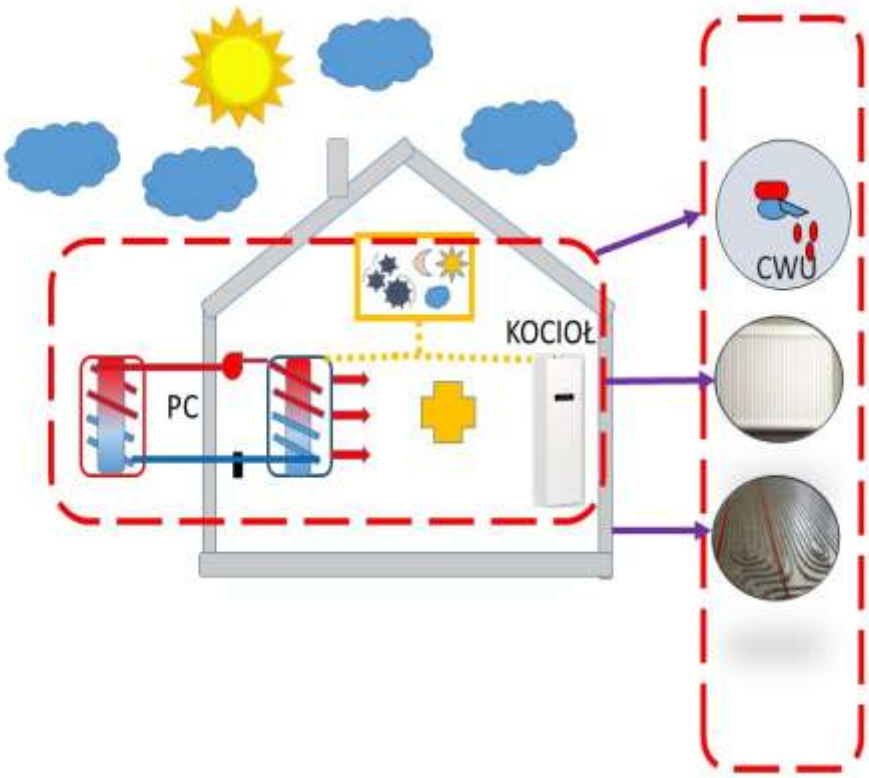
*3. Krzywa mocy pompy ciepła ($Q_{pompy}$).* Moc pompy powietrznej maleje wraz ze spadkiem temperatury zewnętrznej. Załóżmy, że moc pompy o nominalnej mocy 6 kW (przy +7 °C) zmienia się w następujący sposób:
$Q_{pompy}\ (T) = 6\ kW$ przy $T = +7°C$;
$Q_{pompy}\ (T) = 5\ kW$ przy $T = 0°C$;
$Q_{pompy}\ (T) = 3.5\ kW$ przy $T = -10°C$;
$Q_{pompy}\ (T) = 2.5\ kW$ przy $T = -20°C$;
*4. Wyznaczenie punktu biwalencyjnego.* Punkt biwalencyjny $T_{biw}$ to jest temperatura, w której $Q_{pompy}\ (T) = Q_{zapotrzebowania}(T)$.
Zgodnie z ustaleniami, moc pompy wynosi 3.5 kW w temperaturze −10 °C. Zapotrzebowanie budynku w tej temperaturze wynosi:

$$Q_{zapotrzebowania}(T) = -0.2 \cdot (-10) + 3 = 5\ kW$$

Zgodnie z obliczeniami punkt biwalencyjny leży poniżej −10°C, ponieważ $3.5\ kW < 5kW$.
Jeśli jednak dobierzemy pompę o mocy $7\ kW$ (przy $T = +7°C$), to jej moc w temperaturze $T = -10°C$ wyniesie około $Q_{pompy} = 5.5\ kW$, co nadal nie spełnia zapotrzebowania.
Przyjmując inną krzywą mocy pompy ciepła, która przechodzi przez punkt o mocy 4 kW w temperaturze $T = 0°C$ oraz $Q_{pompy} = 2.5\ kW$ w temperaturze $T = -20°C$, możemy obliczyć, że punkt biwalencyjny występuje w temperaturze około $T = -5°C$. Dokładne wartości można odczytać z wykresu, gdzie krzywe mocy pompy ciepła i zapotrzebowania na ciepło się przecinają.

# 5. Przykładowe rozwiązania hybrydowej instalacji z pompą ciepła

*Układ oparty na pompie ciepła powietrze-woda w połączeniu z konwencjonalnym źródłem energii, takim jak kocioł kondensacyjny lub olejowy,* jest najbardziej popularnym rozwiązaniem, zwłaszcza w budynkach jednorodzinnych poddawanych modernizacji (rys. 8). Tego typu konfiguracja może występować w dwóch wariantach: jako urządzenie zintegrowane („all-in-one”), w którym wszystkie komponenty są umieszczone w jednej obudowie, lub jako oddzielne jednostki.
[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia ogólny schemat instalacji hybrydowej z pompą ciepła typu powietrze-woda i kotłem gazowym. Wewnątrz domu, po lewej stronie, znajduje się jednostka powietrznej pompy ciepła, oznaczona jako "PC". Od pompy ciepła wychodzą trzy czerwone strzałki, symbolizujące rozprowadzanie ciepła. Po prawej stronie od pompy ciepła znajduje się kocioł. Oba urządzenia są otoczone dużą, czerwoną, przerywaną linią, co wskazuje na ich zintegrowane działanie. Ciepło jest rozprowadzane przez fioletowe strzałki, które prowadzą do trzech różnych odbiorników ciepła, umieszczonych po prawej stronie schematu. Żółty prostokąt, połączony żółtą, przerywaną linią z pompą ciepła i kotłem, wskazuje na optymalizację pracy urządzeń w zależności od pory dnia i roku.]

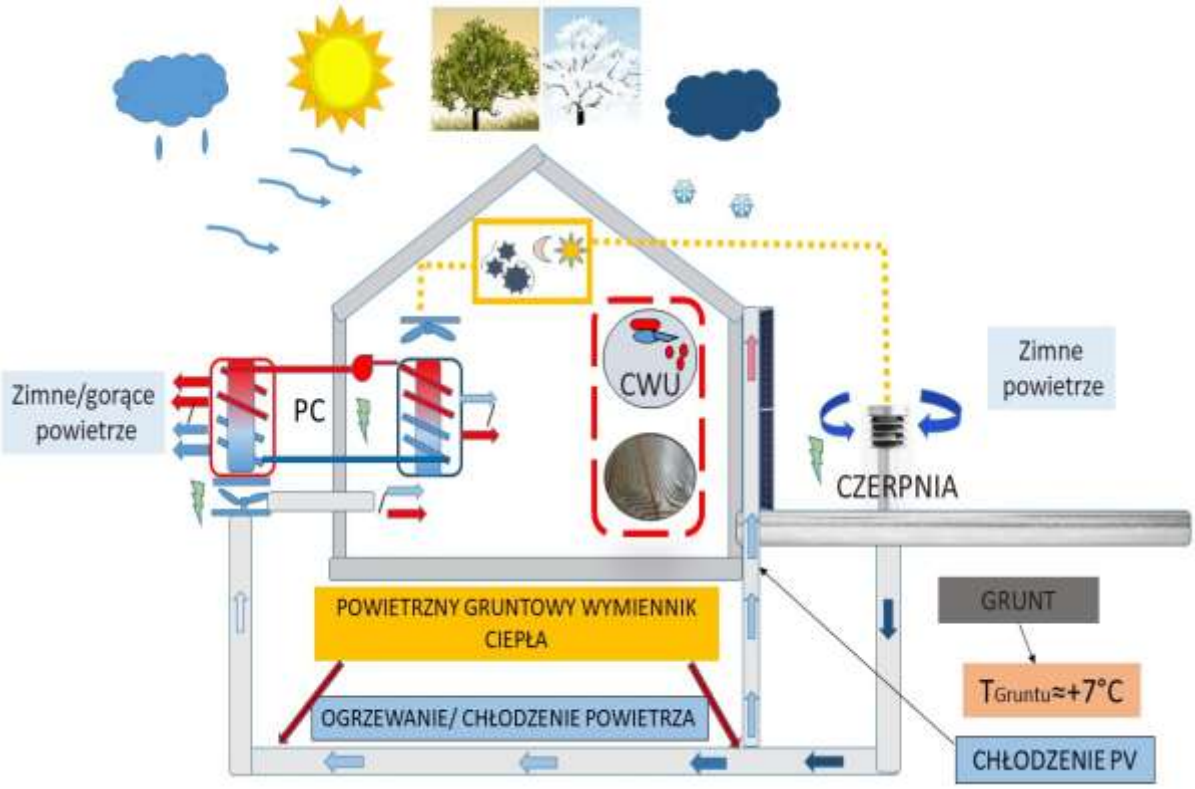



Rys. 8. Ogólny schemat instalacji hybrydowej z pompą ciepła powietrze-woda i kotłem gazowym kondensacyjnym.

W układzie hybrydowym pompa ciepła pełni funkcję źródła podstawowego, gdy temperatury zewnętrzne są umiarkowane, a jej współczynnik wydajności (COP) jest wysoki. Z kolei drugie źródło, zazwyczaj kocioł gazowy kondensacyjny (rzadziej na paliwo stałe), działa jako źródło szczytowe (Uche, 2024). Jego zadaniem jest wspomaganie lub produkcja ciepła w okresach największego zapotrzebowania, czyli przy niskich temperaturach zewnętrznych, gdy COP pompy ciepła znacząco spada, a jej eksploatacja przestaje być ekonomicznie lub technicznie uzasadniona. Głównym czynnikiem decydującym o wydajności całego systemu jest strategia sterowania, która zapewnia optymalne współdziałanie obu urządzeń. W zależności od potrzeb, system może działać w różnych trybach: biwalentnym, alternatywnym albo równoległym. W trybie biwalentnym system dynamicznie przełącza się między pracą pompy ciepła a kotła. W trybie alternatywnym pompa ciepła działa samodzielnie do momentu osiągnięcia granicznej temperatury zewnętrznej, poniżej której zostaje wyłączona, a całe obciążenie grzewcze przejmuje kocioł. W trybie równoległym, poniżej określonej temperatury granicznej, oba źródła mogą pracować jednocześnie, wspierając się wzajemnie, co pozwala na pokrycie zapotrzebowania na ciepło w najbardziej wydajny sposób. Elastyczność sterowania pozwala na wybór optymalnej strategii, która minimalizuje koszty eksploatacji, jednocześnie maksymalizując sezonową efektywność całego systemu (SCOP).
*Instalacja hybrydowa, w skład której wchodzi powietrzna pompa ciepła, gruntowy wymiennik ciepła (GWC) oraz panele fotowoltaiczne*, stanowi jedno z najbardziej efektywnych rozwiązań. W takim układzie GWC wykorzystuje stabilne temperatury gruntu, co pozwala na optymalizację pracy całej instalacji, minimalizując wpływ zmiennych warunków zewnętrznych. Jak przedstawiono na schemacie (rys. 9), GWC w takim układzie może działać samodzielnie albo pełnić funkcję wstępnego przygotowania powietrza (Koshlak, 2025).

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia hybrydowy system grzewczy, który łączy powietrzną pompę ciepła z gruntowym powietrznym wymiennikiem ciepła (GPWC). Na górze rysunku widoczne jest słońce, chmury i drzewa, co symbolizuje działanie systemu w różnych porach roku. Po prawej stronie domu znajduje się pionowa czerpnia, która pobiera powietrze zewnętrzne. Na dachu budynku umieszczono panele fotowoltaiczne, które zasilają układ energią elektryczną. Powietrze z czerpni przepływa przez podziemną, szarą rurę do poziomego gruntowego wymiennika ciepła. U dołu rysunku znajduje się napis "GRUNT" z wartością "T Gruntu ≈ +7°C". W gruntowym wymienniku powietrze jest wstępnie podgrzewane zimą lub chłodzone latem. Po wstępnym przygotowaniu powietrze (oznaczone niebieskimi strzałkami) jest kierowane do pompy ciepła (PC) albo do systemu wentylacji mechanicznej. Pompa ciepła jest zasilana energią elektryczną z paneli fotowoltaicznych. W trybie grzania powietrze po przejściu przez pompę jest cieplejsze (czerwone strzałki), a w trybie chłodzenia jest zimniejsze (niebieskie strzałki). System jest wyposażony w

układ sterujący. Żółty prostokąt z symbolami słońca i księżyca symbolizuje sterowanie pracą w zależności od pory dnia i roku.]




Rys. 9. Hybrydowy system grzewczy, który łączy pompę ciepła powietrze-woda i gruntowy powietrzny wymiennik ciepła.

Wybór powietrznej pompy ciepła w tym układzie podyktowany jest stosunkowo niskimi kosztami instalacji oraz brakiem konieczności wykonywania skomplikowanych odwiertów, które są niezbędne w przypadku pomp gruntowych. Sprawność powietrznej pompy ciepła jest jednak bezpośrednio uzależniona od temperatury zewnętrznej – im niższa, tym mniejsza jej efektywność. Integracja z gruntowym powietrznym wymiennikiem ciepła (GPWC) minimalizuje ten negatywny wpływ, pozwalając pompie działać w korzystniejszym zakresie temperatur. Dzięki temu cały system staje się bardziej efektywny i ekonomiczny, a pompa ciepła może pracować z optymalną sprawnością, co przekłada się na znaczne oszczędności energetyczne.
Zasada działania tego układu opiera się na prostym mechanizmie. W sezonie zimowym zimne powietrze jest zasysane z zewnątrz przez czerpnię, a następnie przepływa przez podziemne rury GPWC. Tam ulega wstępnemu podgrzaniu dzięki stabilnej temperaturze gruntu, utrzymującej się na poziomie około +7°C. Wstępnie podgrzane powietrze jest następnie kierowane do jednostki zewnętrznej pompy ciepła, a stamtąd przekazywane jest do jednostki wewnętrznej. Latem, w trybie chłodzenia,

proces jest odwrócony: gorące powietrze zewnętrzne jest wstępnie schładzane podczas przepływu przez GPWC, co obniża jego temperaturę przed wejściem do pompy ciepła. W zależności od warunków pogodowych i bieżącego zapotrzebowania na ciepło, system może działać w trybie monowalentnym. W zaprezentowanym układzie energia elektryczna wytwarzana przez panele fotowoltaiczne może zasilać zarówno wentylatory, jak i pompę ciepła, co sprawia, że cały system staje się niemal samowystarczalny energetycznie.

*Instalacje hybrydowe z pompą ciepła i kolektorami słonecznymi.*

Kolektory słoneczne mogą być z powodzeniem integrowane z różnymi źródłami ciepła, takimi jak kotły gazowe, olejowe, na biomasę oraz z urządzeniami zasilanymi energią elektryczną, w tym z pompami ciepła. Nowe regulacje prawne, promujące odnawialne źródła energii, czynią instalacje hybrydowe z kolektorami słonecznymi atrakcyjnym rozwiązaniem, które nie tylko spełnia wymogi prawne, ale także realnie obniża koszty eksploatacji i emisję CO2. Rozwiązania te są szczególnie korzystne w modernizowanych budynkach, gdzie całkowite przejście na źródła odnawialne może przekraczać możliwości finansowe użytkowników.

Hybrydowe systemy grzewcze z kolektorami słonecznymi mogą przynieść znaczące oszczędności finansowe i energetyczne w porównaniu z systemami opartymi na pojedynczych źródłach ciepła. Na przykład, zgodnie z badaniami (Jin, 2023), hybrydowy system ogrzewania z kolektorami słonecznymi może przynieść oszczędności od 10% do 30% całkowitych kosztów, a w sprzyjających warunkach nawet do 40%. Oszczędności te będą wzrastać wraz z cenami nośników energii.

Choć w Polsce instalacje kolektorów słonecznych tradycyjnie służą głównie do przygotowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.), coraz częściej, dzięki połączeniu z buforem ciepła, wykorzystuje się je do wspomagania ogrzewania pomieszczeń. Przykładem jest rynek niemiecki, gdzie początkowo kolektory również były przeznaczone wyłącznie do c.w.u., a obecnie ponad połowa takich instalacji wspiera także ogrzewanie centralne. Energia słoneczna jest obecnie wykorzystywana w czterech głównych obszarach: produkcja c.w.u., wspomaganie systemu grzewczego, podgrzewanie basenów oraz wspomaganie wytwarzania ciepła procesowego w przemyśle.

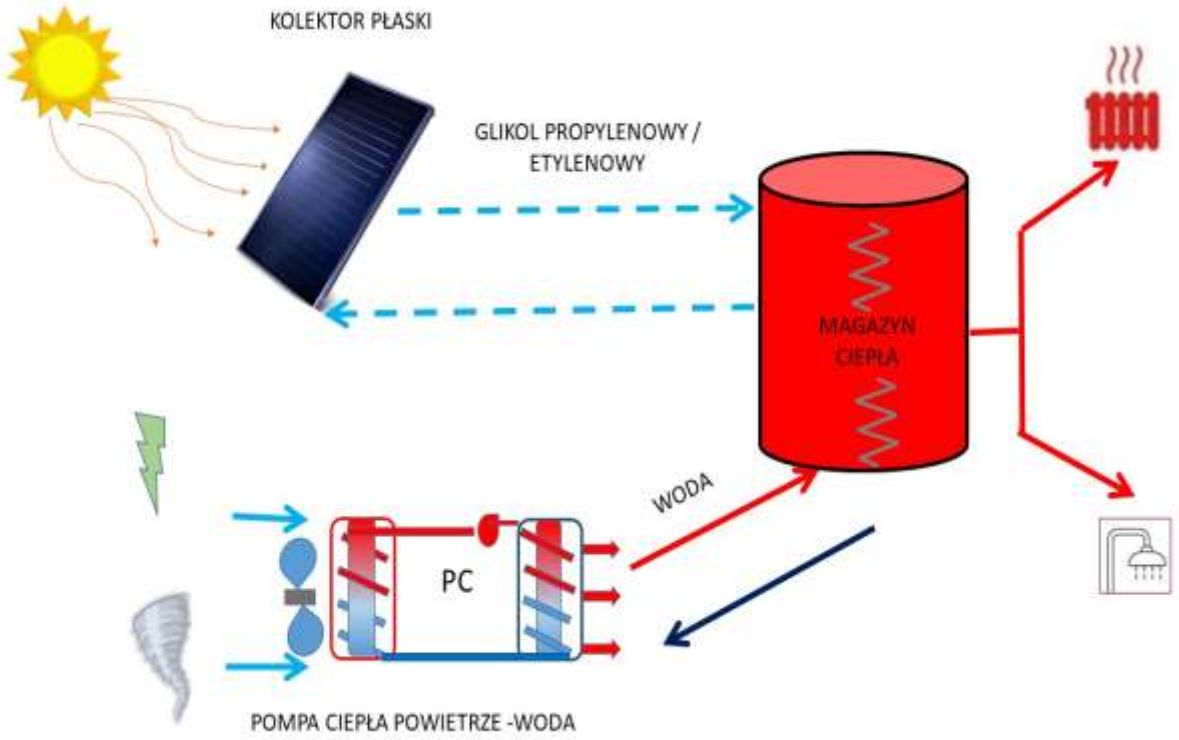
Instalacje hybrydowe z pompami ciepła i kolektorami słonecznymi mają duży potencjał w pokrywaniu zapotrzebowania na ciepło, szczególnie w okresach przejściowych i podczas łagodnych zim. W lecie system solarny może w pełni pokryć zapotrzebowanie na c.w.u. Należy jednak pamiętać, że efektywne działanie systemu wymaga odpowiedniej lokalizacji budynku, jego zorientowania względem stron świata oraz zastosowania bufora ciepła o odpowiednio dużej pojemności, a energia słoneczna w takim układzie powinna być traktowana jako źródło dodatkowe. Głównym celem hybrydowych układów z kolektorami słonecznymi jest zwiększenie efektywności energetycznej poprzez połączenie różnych technologii wytwarzania energii, w tym z odnawialnych źródeł energii. W hybrydowych układach z kolektorami słonecznymi współpraca pompy ciepła i kolektorów odbywa się na cztery sposoby (IEA, 2018).

1. Układ równoległy (rys. 10) (ang. parallel concept). Układ równoległy stanowi najczęściej spotykane rozwiązanie, gdzie zarówno kolektor słoneczny, jak i pompa ciepła działają samodzielnie. Oba źródła energii są połączone równolegle z instalacją

grzewczą budynku, dostarczając ciepło w zależności od bieżących potrzeb i warunków pogodowych:

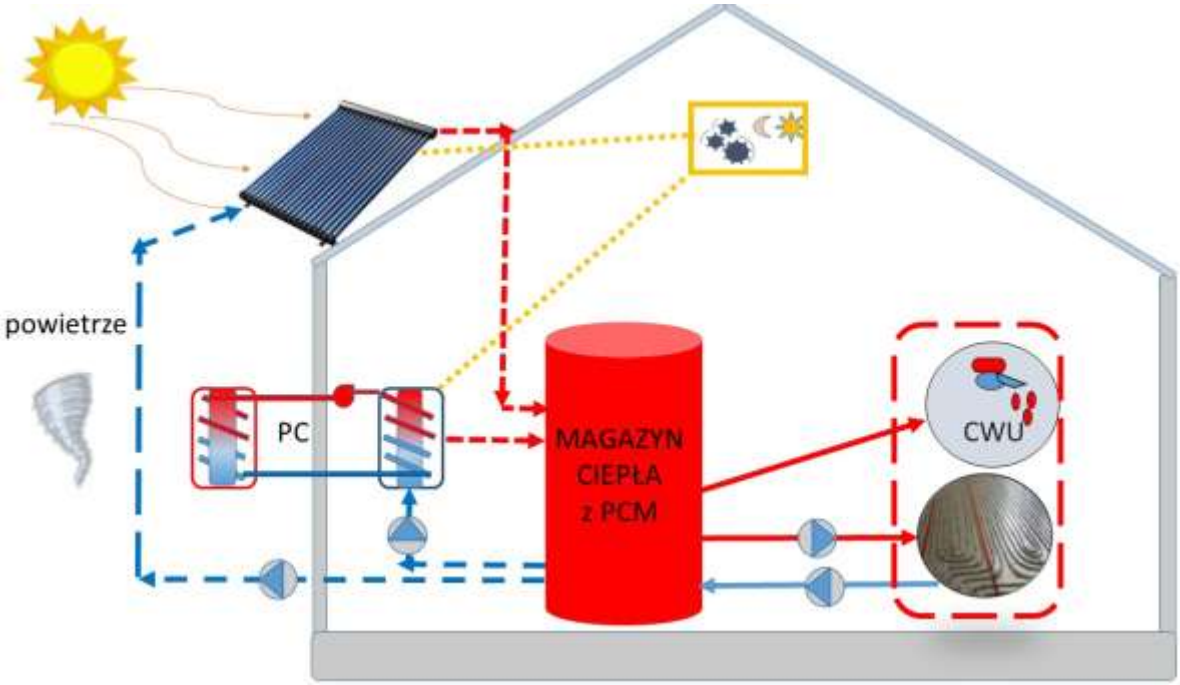
- pompa ciepła produkuje ciepło na bieżące potrzeby ogrzewania i ciepłej wody użytkowej.
- kolektory słoneczne pozyskują energię z promieniowania słonecznego. W sprzyjających warunkach pogodowych energia ta jest wykorzystywana do zasilania instalacji grzewczej lub do podgrzewania wody w zasobniku, co odciąża pompę ciepła.

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia układ równoległy, w którym pompa ciepła powietrze-woda oraz kolektor słoneczny dostarczają ciepło do magazynu ciepła. Odbiorniki końcowe (grzejniki i prysznic) są zasilane bezpośrednio z tego magazynu. W górnej, lewej części schematu widoczne jest słońce, od którego do kolektora słonecznego odchodzą pomarańczowe strzałki, symbolizujące pozyskiwanie energii. Od kolektora odchodzą dwie niebieskie, przerywane linie z napisem "GLIKOL PROPYLENOWY / ETYLENOWY". Linie te prowadzą do dużego, czerwonego cylindra, który pełni funkcję magazynu ciepła. W dolnej części schematu znajduje się powietrzna pompa ciepła (PC). Do jej zewnętrznej jednostki prowadzą dwie niebieskie strzałki z symbolem wiru, co symbolizuje pobieranie ciepła z powietrza. Z wewnętrznej jednostki wychodzi czerwona linia ciągła z napisem "WODA", która prowadzi do magazynu ciepła. Zielona strzałka z symbolem błyskawicy wskazuje, że pompa ciepła jest zasilana energią elektryczną. W prawej części rysunku znajduje się magazyn ciepła, będący dużym, czerwonym cylindrem. Wewnątrz niego umieszczono poziome, czerwone, faliste linie, symbolizujące wymiennik ciepła. Do magazynu doprowadzone są obie linie zasilania: z kolektora słonecznego i z pompy ciepła. Z magazynu ciepła wychodzą dwie czerwone linie, które doprowadzają ciepło do systemu ogrzewania oraz ciepłej wody użytkowej (c.w.u.).]




Rys. 10. Koncepcja: układ równoległy.

W klasycznych instalacjach hybrydowych ciepło jest wytwarzane zarówno przez kolektory słoneczne, jak i przez pompy ciepła (rys. 11). Taka konfiguracja, oparta na dwóch niezależnych obiegach, zapewnia wyższą ogólną efektywność energetyczną. Co istotne, eliminuje potrzebę korzystania z tradycyjnego systemu centralnego ogrzewania, przynajmniej w okresie letnim i przejściowym.
[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia hybrydową instalację, która łączy powietrzną pompę ciepła z kolektorami słonecznymi. W lewej górnej części schematu umieszczono płaski kolektor słoneczny. Słońce symbolizuje źródło energii. Czerwona, przerywana linia biegnie z kolektora do czerwonego cylindra, czyli magazynu ciepła z PCM (materiałem zmiennofazowym). Służy on do gromadzenia energii cieplnej zarówno z kolektora słonecznego, jak i z pompy ciepła. Po lewej stronie znajduje się pompa ciepła, oznaczona jako PC. Pobiera ona ciepło z powietrza zewnętrznego, co symbolizują niebieskie strzałki z symbolem wiru. Z pompy ciepła wychodzi czerwona, przerywana linia, która również prowadzi do magazynu ciepła. Z magazynu ciepła wychodzą dwie czerwone linie, które doprowadzają ciepło do systemu ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. System jest wyposażony w układ sterujący. Żółty prostokąt z symbolami słońca i księżyca symbolizuje sterowanie pracą w zależności od pory dnia i roku.]

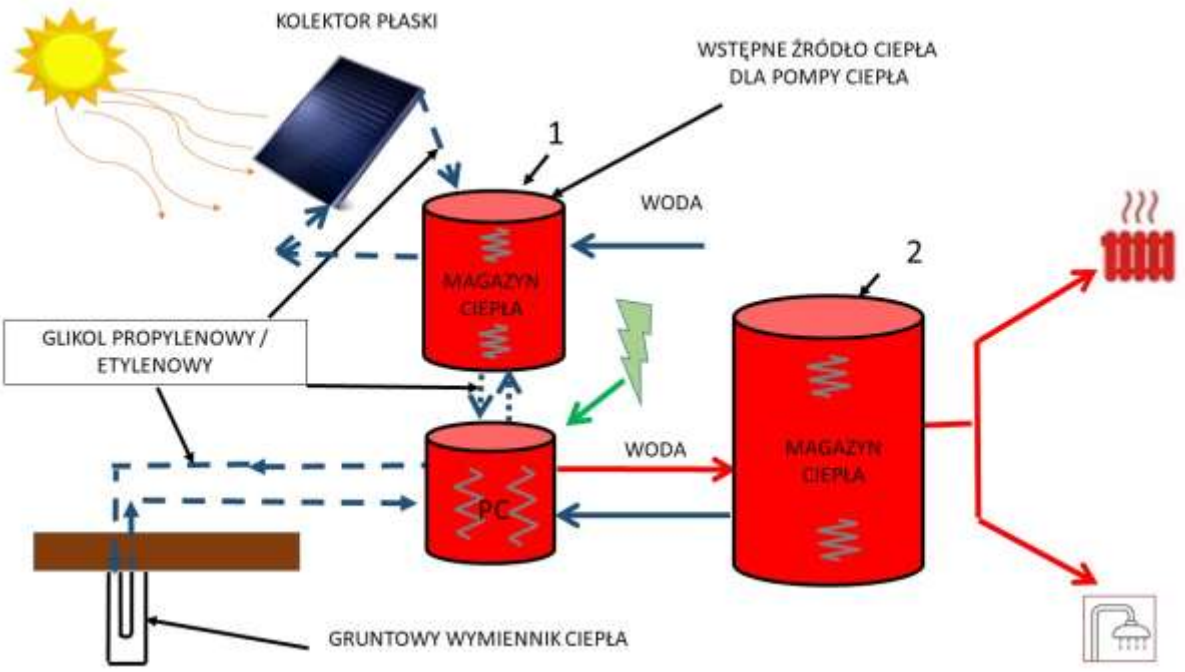



Rys. 10. Instalacja hybrydowa z powietrznej pompą ciepła i kolektorami słonecznymi.

Zgodnie z rysunkiem 11, w kolektorze słonecznym odbywa się konwersja energii promieniowania słonecznego na ciepło. Działa on jako pierwsze i najbardziej oszczędne źródło energii. Drugim istotnym komponentem jest powietrzna pompa ciepła, której rola polega na pozyskiwaniu energii cieplnej z powietrza zewnętrznego i przekazywaniu jej do obiegu grzewczego. Taka konfiguracja zapewnia stabilne działanie systemu niezależnie od warunków pogodowych. Za cyrkulację nośnika ciepła, czyli wody, odpowiada pompa obiegowa. Energia cieplna, wytworzona w kolektorze słonecznym i pompie ciepła, jest kierowana do zasobnika buforowego z materiałem zmiennofazowym (PCM). W zasobniku buforowym odbywa się podgrzewanie wody oraz przekazywanie energii cieplnej do PCM. W momencie, gdy materiał osiągnie temperaturę topnienia, zaczyna topnieć, przechodząc z fazy stałej w ciekłą. Podczas tej zmiany stanu skupienia energia cieplna gromadzi się w PCM bez znaczącego wzrostu temperatury materiału. Gdy instalacja grzewcza potrzebuje ciepła, a jego dostawy z podstawowych źródeł są niewystarczające, temperatura wody w zbiorniku zaczyna spadać. Wówczas PCM zaczyna oddawać zgromadzone ciepło do wody, przechodząc w procesie krzepnięcia z powrotem w stan stały. Uwalniane w tym procesie ciepło utajone pozwala na stabilne utrzymanie temperatury wody w zbiorniku przez dłuższy czas. Instalacja hybrydowa z pompą ciepła i kolektorami słonecznymi jest zaprojektowana tak, aby automatycznie dostosowywać się do warunków pogodowych i zapotrzebowania na ciepło, przełączając się między trzema głównymi trybami pracy. W słoneczne dni system działa w trybie solarnym, gdzie kolektor słoneczny samodzielnie podgrzewa wodę, zapewniając maksymalną oszczędność energii. W nocy lub w dni pochmurne, system przechodzi w tryb pracy pompy ciepła, która, pozyskując ciepło z powietrza, niezależnie od słońca dostarcza

energię do zbiornika. Gdy jednak nasłonecznienie jest niskie, a pompa ciepła nie jest wystarczająco wydajna, system pracuje w trybie hybrydowym, w którym oba źródła współpracują, aby zapewnić optymalną wydajność i ciągłość dostaw ciepła.
2. *Układ szeregowy* to system, w którym w okresach wysokiego nasłonecznienia ciepło z kolektora słonecznego jest wstępnie wykorzystywane do podgrzania czynnika roboczego, zanim trafi on do parownika pompy ciepła (rys. 12). Zamiast pobierać energię bezpośrednio z gruntu, co jest typowe dla gruntowych pomp ciepła, ciepło z kolektora słonecznego jest wstępnie wykorzystywane do podgrzania czynnika roboczego dla pompy ciepła. Dopiero po tym procesie, pompa ciepła pobiera dodatkową energię z gruntu lub wody. Takie rozwiązanie zapewnia stabilność działania w przypadku braku słońca.
Koncepcja działania takiego układu polega na tym, że kolektor płaski podgrzewa ciecz roboczą, najczęściej roztwór glikolu, która za pomocą wężownicy przekazuje ciepło do zbiornika. Wewnątrz zbiornika znajduje się woda, która jest podgrzewana za pomocą wężownicy przez ciepło dostarczone z kolektora słonecznego. Typowy zbiornik akumulacyjny (buforowy) może zawierać jedną lub więcej wężownic, w zależności od liczby źródeł ciepła. Na przykład, jedna wężownica może służyć do odbioru ciepła z kolektora, a druga do przekazania go dalej do pompy ciepła. Zbiornik buforowy w tym przypadku pełni funkcję magazynu cieplnego. Podgrzana przez pompę ciepła woda jest dostarczana do magazynu ciepła, a następnie dystrybuowana do instalacji ogrzewania oraz do podgrzewania ciepłej wody użytkowej.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia układ hybrydowy, w którym kolektor słoneczny jest połączony szeregowo z gruntową pompą ciepła. W lewej górnej części schematu umieszczono płaski kolektor słoneczny. Energia słoneczna jest symbolizowana przez pomarańczowe strzałki. Z kolektora słonecznego wychodzą dwie niebieskie, przerywane linie z napisem "GLIKOL PROPYLENOWY / ETYLENOWY". Ciepło wytwarzane w kolektorze jest transportowane do pierwszego, górnego zbiornika (*1*), który jest oznaczony jako "MAGAZYN CIEPŁA" i pełni rolę wstępnego źródła ciepła dla pompy ciepła. W dolnej, lewej części schematu znajduje się gruntowy wymiennik ciepła w postaci pionowej rurki, umieszczonej w ziemi. Połączony jest on z pompą ciepła (PC) za pomocą niebieskich, przerywanych linii. Pompa ciepła pobiera ciepło zarówno ze zbiornika (*1*), jak i z gruntowego wymiennika. Zielona błyskawica obok PC wskazuje na zasilanie elektryczne. Od pompy ciepła wychodzą dwie linie (oznaczone jako "WODA"). Linia czerwona prowadzi do drugiego, większego, czerwonego zbiornika (*2*), pełniącego funkcję głównego magazynu ciepła, natomiast ciągła niebieska linia symbolizuje powrót wody o niższej temperaturze z instalacji grzewczej.]

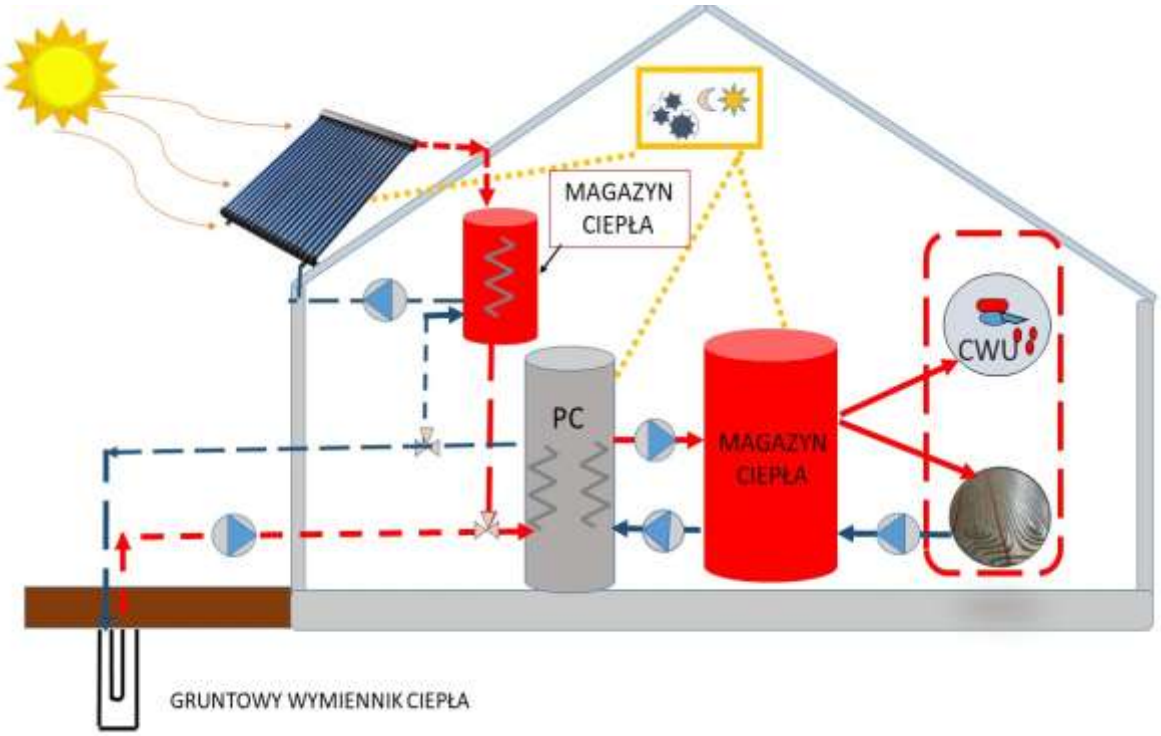



Rys. 12. Układ szeregowy: kolektor słoneczny połączony szeregowo z obiegiem dolnego źródła ciepła: 1 – zbiornik akumulacyjny (buforowy); 2 – magazyn ciepła.

Przykładowy schemat hybrydowej instalacji w układzie szeregowym został przedstawiony na rysunku 13. W tej konfiguracji kolektor słoneczny połączono z obiegiem dolnego źródła pompy ciepła, na przykład z sondą gruntową. Energia słoneczna jest wykorzystywana do wstępnego podgrzewania płynu krążącego w tym obiegu, co podnosi temperaturę dolnego źródła ciepła, a tym samym pozwala pompie działać ze znacznie wyższym współczynnikiem wydajności (COP).
Chociaż prezentowany układ zapewnia znaczący wzrost efektywności, jego wydajność jest mniejsza niż w konfiguracjach, w których kolektory słoneczne są wykorzystywane do bezpośredniego podgrzewania ciepłej wody użytkowej. Niemniej jednak, układ szeregowy jest wyjątkowo korzystnym rozwiązaniem w przypadku niedowymiarowanych gruntowych wymienników ciepła, ponieważ wspomaga ich regenerację, co w konsekwencji wydłuża ich żywotność.

[Tekst alternatywny. Schemat ilustruje zintegrowany system, w którym energia słoneczna jest wykorzystywana do wstępnego podgrzewania czynnika roboczego, co odciąża pompę ciepła i zwiększa efektywność całego układu, szczególnie w okresach przejściowych. W górnej części schematu znajduje się kolektor słoneczny, który pozyskuje energię ze słońca. W lewym dolnym rogu, pod ziemią, umieszczono gruntowy wymiennik ciepła, który pobiera ciepło z gruntu. Ciepło z kolektora słonecznego jest dostarczane (czerwona linia przerywana) do małego, górnego zbiornika na wodę, oznaczonego jako "MAGAZYN CIEPŁA". Pompa ciepła może pobierać energię cieplną zarówno z małego wymiennika ciepła, jak i z gruntowego

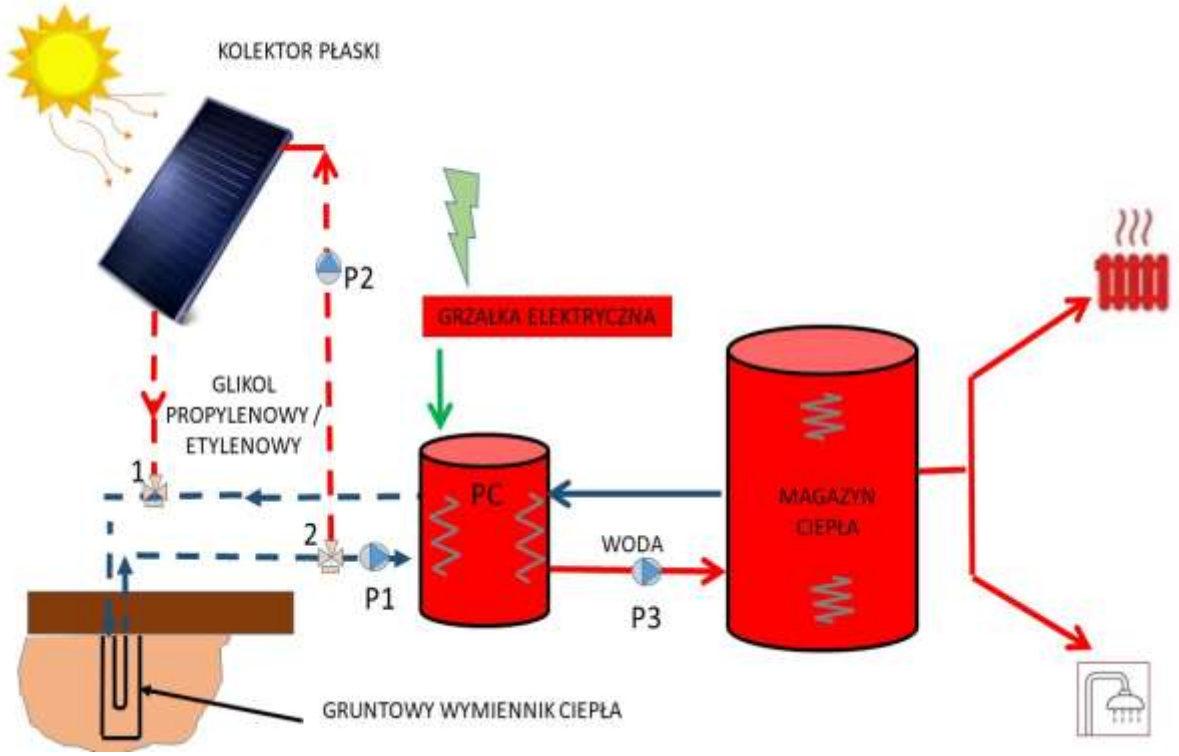
wymiennika, na co wskazuje czerwona, przerywana linia. Czerwona strzałka, wychodząca bezpośrednio z pompy ciepła, prowadzi do drugiego, większego, czerwonego zbiornika, pełniącego funkcję głównego magazynu ciepła. Z kolei niebieska strzałka symbolizuje powrót wody o niższej temperaturze z instalacji grzewczej. Z głównego magazynu ciepła wychodzą dwie czerwone strzałki, które prowadzą do systemu ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. System jest wyposażony w układ sterujący. Żółty prostokąt z symbolami słońca i księżyca symbolizuje sterowanie pracą w zależności od pory dnia i roku.]




Rys. 13. Instalacja hybrydowa z gruntową pompą ciepła i kolektorami słonecznymi.

3. *Układ regeneracyjny (ang. regenerative concept)* o system hybrydowy, w którym energia słoneczna jest wykorzystywana do regeneracji gruntu, czyli do podnoszenia jego temperatury. Systemy grzewcze oparte na gruntowych pompach ciepła charakteryzują się wysoką efektywnością energetyczną i niezawodnością, co wynika z ich zdolności do wykorzystywania stabilnej temperatury gruntu. Pomimo tych zalet, ich wdrożenie jest często utrudnione przez wysokie koszty początkowe, zwłaszcza związane z koniecznością wykonania kosztownych odwiertów. Jednym ze sposobów na zniwelowanie tej wady jest integracja gruntowej pompy ciepła z kolektorami słonecznymi, co pozwala na częściowe pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną, a w efekcie – na obniżenie długoterminowych kosztów eksploatacji systemu. Koncepcja działania takiego układu polega na zwiększeniu wydajności pompy ciepła poprzez wykorzystanie energii słonecznej do regeneracji cieplnej gruntu. Jak przedstawiono na rysunku 14, kolektor słoneczny może funkcjonować jako

bezpośrednie źródło dla pompy ciepła lub pośrednio, poprzez magazynowanie ciepła w gruncie.
[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia hybrydowy system grzewczy, który łączy gruntową pompę ciepła z kolektorem słonecznym. W górnej części schematu widoczny jest kolektor słoneczny, który pozyskuje energię ze słońca. Pomarańczowe strzałki symbolizują promienie słoneczne, które dostarczają energię. Ciepło z kolektora jest transportowane czerwoną, przerywaną linią do zaworów 1 i 2. Wytworzona energia cieplna może być wykorzystana do regeneracji gruntu lub bezpośrednio do podgrzewania dolnego źródła ciepła. W lewej, dolnej części, pod ziemią, umieszczono gruntowy wymiennik ciepła w kształcie pionowej sondy. W centralnej części schematu znajduje się pompa ciepła, oznaczona jako "PC". Do jej dolnej części doprowadzone są dwie niebieskie, przerywane linie od gruntowego wymiennika ciepła, połączone z dwoma zaworami trójdrogowymi. Zielona błyskawica wskazuje na zasilanie pompy ciepła energią elektryczną. Nad pompą ciepła znajduje się czerwony prostokąt z napisem "GRZAŁKA ELEKTRYCZNA", która może wspomagać pracę pompy ciepła, gdy jej wydajność jest niewystarczająca. Ciepło podgrzane przez pompę ciepła jest transportowane czerwoną, ciągłą linią (oznaczoną jako "WODA") do głównego magazynu ciepła. Pompa obiegowa P3 zapewnia cyrkulację wody między pompą ciepła a magazynem. Z głównego magazynu ciepło jest rozprowadzane czerwonymi, ciągłymi liniami do systemu ogrzewania (symbol grzejnika) oraz ciepłej wody użytkowej (symbol prysznica).]




Rys. 14. Koncepcja: układ regeneracyjny.

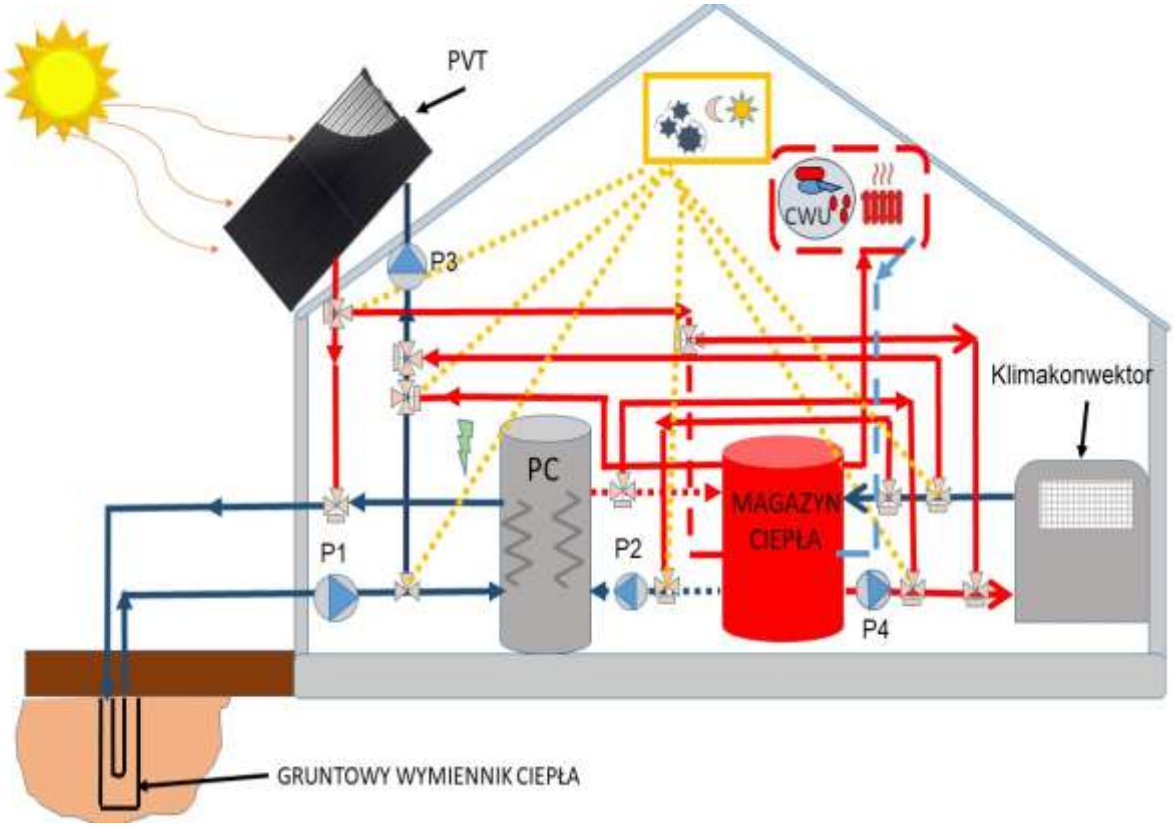


Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology
*Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki"*
*nr FERS.01.05-IP.08-0234/23*

W okresie letnim, gdy zapotrzebowanie na ogrzewanie jest minimalne, system przechodzi w tryb regeneracji gruntu. W tym czasie aktywowana jest pompa obiegowa P2, co umożliwia transport podgrzanego przez energię słoneczną płynu roboczego (stanowiącego mieszaninę glikolu i wody) bezpośrednio z kolektora płaskiego do gruntowego wymiennika ciepła. Poprzez odpowiednie ustawienie zaworów 1 i 2, płyn oddaje nagromadzone ciepło do gruntu, podnosząc jego temperaturę i przygotowując system do wydajniejszej pracy w nadchodzących miesiącach.
W sezonie grzewczym system automatycznie przełącza się w tryb ogrzewania. Dzięki podwyższonej temperaturze dolnego źródła ciepła, pompa ciepła (PC) może pracować ze zwiększoną wydajnością. Aktywacja pompy obiegowej P1 inicjuje obieg, w którym solanka pobiera ciepło z gruntu, a następnie jest kierowana do pompy ciepła, gdzie jej temperatura zostaje podniesiona. Uzyskane ciepło jest transportowane do magazynu, skąd za pomocą pompy obiegowej P3 podgrzana woda jest kierowana do instalacji centralnego ogrzewania oraz na potrzeby ciepłej wody użytkowej. W przypadku niewystarczającej mocy pompy ciepła, system może być wspomagany przez grzałkę elektryczną, która pełni rolę dodatkowego źródła ciepła.
4. *Układ kombinowany* to zaawansowane rozwiązanie w instalacjach hybrydowych, które łączy w sobie jednostki różnych urządzeń w celu osiągnięcia maksymalnej wydajności i elastyczności energetycznej. Taki układ wymaga jednak bardziej zaawansowanego sterowania, co jest przedmiotem licznych badań naukowych prowadzonych między innymi przez Międzynarodową Agencję Energetyczną (IAE, 2018). Przykładem takiego rozwiązania jest układ łączący gruntową pompę ciepła z modułami fotowoltaiczno-termicznymi (PVT) (Tripanagnostopoulos, 2002). Zasada działania tej instalacji opiera się na wzajemnym uzupełnianiu się źródeł ciepła, co prowadzi do stworzenia budynku niezależnego energetycznie. Systemy PVT są w stanie jednocześnie produkować energię elektryczną i cieplną, natomiast pompa ciepła dostarcza ciepło do ogrzewania, chłodzenia oraz przygotowywania ciepłej wody użytkowej. Połączenie tych dwóch technologii pozwala na pełne pokrycie zapotrzebowania energetycznego budynku z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Na rysunku 15 został zamieszczony schemat instalacji hybrydowej w układzie kombinowanym.

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia złożony system grzewczy w układzie kombinowanym, który wykorzystuje kilka źródeł energii: gruntowy wymiennik ciepła, gruntową pompę ciepła, moduły fotowoltaiczno-termiczne (PVT) oraz klimakonwektor. W górnej części dachu umieszczono kolektor fotowoltaiczno-termiczny (PVT), który pozyskuje energię ze słońca. Czerwona strzałka, wychodząca z kolektora PVT, symbolizuje zasilanie obiegu gruntowego wymiennika ciepła, magazynu ciepła oraz klimakonwektora. Niebieska strzałka symbolizuje powrót czynnika roboczego. Od pompy ciepła wychodzą dwie przerywane strzałki (czerwona i niebieska), symbolizujące zasilanie magazynu ciepła (czerwony cylinder) i powrót czynnika grzewczego. Magazyn ciepła służy do gromadzenia nadwyżek ciepła wyprodukowanego przez pompę ciepła i kolektor PVT. System może działać w różnych

trybach, sterowanych przez pompy obiegowe P1, P2, P3 oraz zawory trójdrogowe. Z głównego magazynu ciepła wychodzą dwie czerwone strzałki, które prowadzą do systemu ogrzewania i ciepłej wody użytkowej (c.w.u.). System jest wyposażony w układ sterujący. Żółty prostokąt z symbolami słońca i księżyca symbolizuje sterowanie pracą w zależności od pory dnia i roku.]



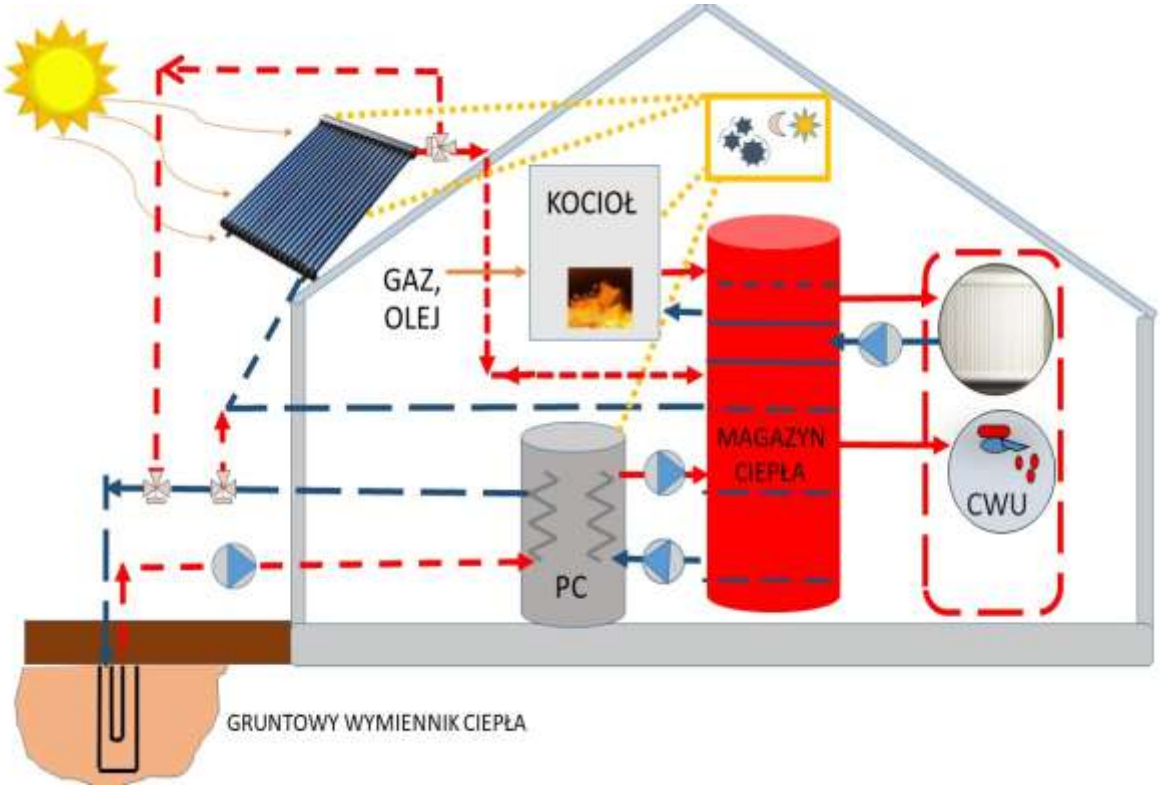

Rys. 15. Koncepcja systemu instalacji hybrydowej z gruntową pompą ciepła, modułami fotowoltaiczno-termicznymi PVT i klimakonwektorem.

Hybrydowy system składa się z gruntowego wymiennika ciepła, pompy ciepła, modułów fotowoltaiczno-termicznych (PVT), magazynu ciepła oraz klimakonwektora. Koncepcja działania tego układu opiera się na priorytetowym pokrywaniu zapotrzebowania na energię cieplną przez gruntową pompę ciepła. Jednocześnie moduły PVT oraz zasobnik ciepła pełnią rolę pomocniczych źródeł, które mogą być aktywowane w okresach szczytowego zapotrzebowania, co zwiększa elastyczność i wydajność całego systemu.
W modułach PVT dochodzi do jednoczesnego pozyskiwania energii elektrycznej i cieplnej z ogniw fotowoltaicznych oraz powierzchni kolektora. Kolejnym źródłem energii jest gruntowy wymiennik ciepła, który dzięki stabilnej temperaturze gruntu

stanowi niezawodne źródło ciepła w okresie zimowym i pozwala na odprowadzanie nadmiaru energii w okresie letnim. Za cyrkulację czynnika roboczego w tym obiegu odpowiada pompa obiegowa P1.
Pompa ciepła stanowi podstawową jednostkę układu, zdolną do przekazywania ciepła o niskiej temperaturze (pobranego z kolektora PVT lub z gruntu) do czynnika o wyższej temperaturze, który następnie jest dostarczany do odbiorników ciepła lub zbiornika akumulacyjnego. W zbiorniku akumulacyjnym odbywa się magazynowanie nadwyżek wytworzonej energii cieplnej przez gruntową pompę ciepła i kolektor PVT, co pozwala na wykorzystanie ciepła zgromadzonego w zbiorniku w okresach obniżonej produkcji ciepła (np. w nocy) oraz zapewnia ciągłość dostaw.
Odbiorcą końcowym energii cieplnej jest klimakonwektor, zainstalowany wewnątrz budynku. Ciepło z pompy ciepła lub zbiornika akumulacyjnego może być wykorzystane w tej jednostce do ogrzewania lub chłodzenia pomieszczeń. System charakteryzuje się wysoką elastycznością operacyjną, umożliwiającą optymalizację pracy w zależności od warunków zewnętrznych i bieżącego zapotrzebowania.
W trybie poboru ciepła z kolektora PVT czynnik roboczy napędzany przez pompę obiegową P3 jest kierowany bezpośrednio do pompy ciepła. Przy odpowiednio wysokiej temperaturze może jednak ominąć pompę, zasilając bezpośrednio zbiornik lub klimakonwektor. W trybie poboru ciepła z gruntu, pompa ciepła pozyskuje energię cieplną z gruntowego wymiennika, która następnie jest przekazywana do zbiornika akumulacyjnego lub bezpośrednio do klimakonwektora. Nadmiar energii zgromadzonej w zbiorniku jest z kolei dystrybuowany przez pompę obiegową P4 do klimakonwektora, natomiast za cyrkulację między pompą ciepła a zbiornikiem odpowiada pompa obiegowa P2.
*Tryby pracy systemu i algorytm sterowania.* W zależności od warunków pogodowych i bieżącego zapotrzebowania na ciepło, system może działać w różnych trybach, obejmujących grzanie, chłodzenie, akumulację oraz regenerację ciepła. Chłodzenie w systemie realizowane jest wyłącznie za pomocą pompy ciepła. Tryby pracy grzewczej zależą natomiast od temperatury źródła ciepła oraz aktualnego zapotrzebowania budynku. W algorytmie sterowania, gdy temperatura w pomieszczeniu spadnie poniżej 20°C, system priorytetowo uruchamia ogrzewanie z wykorzystaniem energii zgromadzonej w magazynie ciepła. Jeśli temperatura w zasobniku jest zbyt niska, system automatycznie przełącza się na ogrzewanie energią słoneczną, dostarczaną bezpośrednio z modułu PVT. Dopiero gdy oba te źródła okażą się niewystarczające, uruchamiana jest gruntowa pompa ciepła, która zapewnia pełne pokrycie zapotrzebowania na ciepło. Dodatkowe tryby pracy, takie jak akumulacja ciepła, aktywują się, gdy temperatura w zasobniku spadnie poniżej 50°C. Akumulacja może odbywać się z modułu PVT (w sytuacji, gdy jego temperatura jest wyższa niż w zasobniku) lub z pompy ciepła. Ponadto, system

wyposażony jest w tryb podziemnej akumulacji ciepła, który służy do zapobiegania spadkowi wydajności modułów PVT oraz do regeneracji temperatury gruntu poprzez kierowanie do niego nadmiaru ciepła. Ten specyficzny tryb jest aktywny, gdy temperatura na wylocie z modułu PVT przekracza temperaturę gruntu, a nie ma jednoczesnego zapotrzebowania na ogrzewanie ani akumulację w zasobniku. Na rysunku 16 zamieszczono schemat hybrydowego systemu grzewczego w układzie kombinowanym, który został zaprojektowany w celu optymalizacji kosztów eksploatacyjnych poprzez inteligentną integrację różnych źródeł ciepła: gruntową pompę ciepła, kolektory słoneczne i kocioł gazowy.

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia hybrydowy system grzewczy w układzie kombinowanym, który integruje trzy źródła ciepła: gruntowy wymiennik ciepła, kolektory słoneczne oraz kocioł. Na dachu domu umieszczono kolektor słoneczny. Pomarańczowe strzałki symbolizują energię promieniowania słonecznego, która jest transportowana czerwoną, przerywaną linią do zaworów. Część tej energii może być wykorzystana do regeneracji gruntu lub bezpośrednio do podgrzewania wody w zasobniku. W dolnej części schematu, wewnątrz domu, widoczna jest szara, pionowa kolumna, oznaczona jako "PC" (pompa ciepła). Do tej kolumny prowadzą czerwone i niebieskie przerywane linie, które wskazują na zasilanie i powrót czynnika roboczego. Nad pompą ciepła znajduje się szary prostokąt, oznaczony jako "KOCIOŁ". Z jego wnętrza wychodzi pomarańczowy płomień, symbolizujący proces spalania. Do kotła jest skierowana pomarańczowa strzałka, oznaczona jako "GAZ, OLEJ". Od kotła wychodzą dwie strzałki, symbolizujące zasilanie magazynu ciepła (czerwona) i powrót (niebieska). Kocioł pełni funkcję wspomagającą, włączając się w okresach szczytowego zapotrzebowania, gdy podstawowe źródła są niewystarczające. W centralnej części schematu znajduje się duży, czerwony cylinder, który pełni rolę magazynu ciepła. Gromadzi on energię z pompy ciepła i kolektora słonecznego. Z magazynu ciepła wychodzą czerwone strzałki, które rozprowadzają ciepło do systemu ogrzewania i ciepłej wody użytkowej (c.w.u.). System jest wyposażony w układ sterujący. Żółty prostokąt z symbolami słońca i księżyca symbolizuje sterowanie pracą w zależności od pory dnia i roku.]




Rys. 16. Instalacja hybrydowa z gruntową pompą ciepła, kolektorami słonecznymi i kotłem kondensacyjnym.

Działanie takiego układu opiera się na tym, że gruntowa pompa ciepła stanowi podstawowe źródło ciepła, wykorzystujące stabilną temperaturę gruntu. Kolektory słoneczne w tym systemie pełnią funkcję wspomagającą. Energia cieplna wytworzona w kolektorach słonecznych może być wykorzystana na dwa sposoby.

1. **Do regeneracji gruntu.** W okresach wysokiego nasłonecznienia, szczególnie latem, nadmiar ciepła z kolektorów może być wykorzystany do regeneracji dolnego źródła ciepła, czyli gruntu wokół sondy gruntowej pompy ciepła.
2. **Do bezpośredniego podgrzewania wody**: W sprzyjających warunkach, energia słoneczna może być również bezpośrednio wykorzystywana do podgrzewania ciepłej wody użytkowej w zasobniku warstwowym.

W sytuacjach, gdy podstawowe źródła są niewystarczające, system może być dodatkowo wspierany przez kocioł gazowy.

# 6. Spis literatury


- ✓ Materiały zwarte
  - Tytko, R. (2021). *Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej*. Eco Investment.
- ✓ Artykuły naukowe
  - Beccali, M., Bonomolo, M., Martorana, F., Catrini, P., & Buscemi, A. (2022). Electrical hybrid heat pumps assisted by natural gas boilers: A review. *Applied Energy*, 322, 119466.
  - Bogdanovičs, R., Borodinecs, A., Zajacs, A., & Šteinerte, K. (2018). Review of Heat Pumps Application Potential in Cold Climate. Adv. *Intell. Syst. Comput*., 692, 543–554. [Google Scholar] [CrossRef]
  - Kieft, A., Harmsen, R., & Hekkert, M. P. (2021). Heat pumps in the existing Dutch housing stock: An assessment of its Technological Innovation System. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 101064.
  - Koshlak, H. (2025). A Review of Earth-Air Heat Exchangers: From Fundamental Principles to Hybrid Systems with Renewable Energy Integration. *Energies*, 18(5), 1017.
  - Tihana, J., Ali, H., Apse, J., Jekabsons, J., Ivancovs, D., Gaujena, B., & Dedov, A. (2023). Hybrid Heat Pump Performance Evaluation in Different Operation Modes for Single-Family House. *Energies*, 16(20), 7018. https://doi.org/10.3390/en16207018.
  - Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, T., Souliotis, M., & Yianoulis, P. (2002). Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems. *Sol. Energy*, 72, 217–234. [Google Scholar] [CrossRef].
  - Uche, J., Tajik Jamalabad, M., & Martínez, A. (2024). Configurational Design of a Hybrid System Based on an Air–Water Heat Pump and Biomass Boiler for a Rural Dwelling. *Applied Sciences*, 14(21), 9840. https://doi.org/10.3390/app14219840.
- ✓ Źródła internetowe
  - EN 14825:2018; Air Conditioners, Liquid Chilling Packages and Heat Pumps, with Electrically Driven. iTeh, Inc.: Newark, DE, USA, 2018. (dostęp online:

https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/304fe3bd-b611-4f34-8ca2-8ace2d476d89/en-14825-2018, dostępny 14. 08. 2025).
- European Heat Pump Association. Technology. Dostęp online: https://www.ehpa.org/about-heat-pumps/technology/.
- IEA. (2018). The Future of Cooling. IEA: Paris, France. (dostęp online: https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling, dostępny 15. 07. 2025).
- Katalog firmy Viessmann. (dostęp online: https://www.viessmann.pl/pl/produkty/pompy-ciepla/vitocal-200-g.html., dostępny 15. 07. 2025).

*Na etapie opracowywania niniejszych materiałów dydaktycznych wykorzystana zostało wiedza i doświadczenie nabyte w ramach wizyt studyjnych **w Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas** oraz **w KEZO Jabłonna – Centrum Badawcze Polskiej Akademii Nauk**, zrealizowanych w ramach projektu „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki" FERS.01.05-IP.08-0234/23. W szczególności dotyczy to zagadnień odnoszących się do najnowszych technologii, trendów badawczych oraz rozwiązań praktycznych stosowanych w obszarze integracji odnawialnych źródeł energii w hybrydowych systemach grzewczych i chłodniczych, z uwzględnieniem magazynowania energii, inteligentnego zarządzania oraz aspektów ekonomicznych i środowiskowych. ważnych dla studentów kierunków inżynierii środowiska oraz odnawialne źródła energii, pozwalających na lepsze zrozumienie zagadnień z jakimi spotkają się w pracy zawodowej jako inżynierowie, a także na świadome stosowanie innowacyjnych i prośrodowiskowych rozwiązań na każdym etapie procesu inwestycyjnego, zgodnych z ideą zrównoważonego rozwoju i zielonej transformacji.*

*Hanna Koshlak*