



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

HYBRYDOWE WĘZŁY CIEPLNE

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. Historyczny rozwój i rola hybrydowych węzłów ciepłych w transformacji energetycznej	3
2.1. Podstawowe komponenty i funkcje hybrydowego węzła ciepłego	
3. Klasyfikacja hybrydowych węzłów ciepła.....	9
4. Technologie i schematy działania hybrydowych węzłów ciepłych.....	13
4.1. Grupowe/lokalne hybrydowe węzły ciepłe integrowane z OZE i magazynami ciepła	13
4.2. Koncepcja dwukierunkowego hybrydowego węzła ciepłego zintegrowanego z OZE i miejskim systemem ciepłowniczym.....	16
4.3. Indywidualne hybrydowe węzły ciepłe integrowane z pompą ciepła, magazynem energii, panelami fotowoltaicznymi i miejskim systemem ciepłowniczym.....	18
4.4. Sieci ciepłownicze niskotemperaturowe i podstacje z hybrydowymi węzłami ciepła	20
4.5. Koncepcja działania i elementy technologiczne hybrydowego węzła ciepłego zintegrowanego z systemem ciepłowniczym czwartej generacji.....	22
5. Zasady projektowania hybrydowych węzłów ciepłych	25
5.1. Optymalizacja integracji wielu źródeł ciepła.....	25
5.2. Dopasowanie wytwarzania ciepła do profili zapotrzebowania	26
5.3. Strategie sterowania zapewniające efektywne przełączanie i działanie różnych komponentów.....	27
6. Algorytm projektowania hybrydowych węzłów ciepłych	27
7. Spis literatury.....	28



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

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



1. Wstęp

Współczesne systemy grzewcze dążą do maksymalizacji wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE) w celu redukcji emisji gazów cieplarnianych i zwiększenia efektywności energetycznej. Kluczowym elementem takiej transformacji są hybrydowe węzły ciepła, stanowiące innowacyjne rozwiązanie integrujące różne źródła energii cieplnej, zarówno konwencjonalne, jak i odnawialne. Ich rola w kontekście rozwijających się systemów ciepłowniczych, w tym sieci ciepłowniczych czwartej (4GDH) i piątej generacji (5GDH), jest fundamentalna dla osiągnięcia celów zrównoważonego rozwoju (Sarbu, 2022).

2. Historyczny rozwój i rola hybrydowych węzłów ciepłych w transformacji energetycznej

Ewolucja systemów grzewczych, a w szczególności węzłów ciepłych, jest ściśle związana z postępowaniem technologicznym, rosnącą świadomością ekologiczną i dążeniem do optymalizacji zużycia energii.

Idea integracji zróżnicowanych źródeł energii w systemach grzewczych nie jest nowa, jednak jej systematyczny rozwój i wdrożenie nabrały tempa wraz z rosnącą świadomością ekologiczną i potrzebą optymalizacji zużycia energii.

Wczesne formy rozwiązań ogrzewania hybrydowego, datowane drugą połowę XX wieku, koncentrowały się na podstawowej integracji systemów solarnych z konwencjonalnymi kotłami grzewczymi. Ich głównym celem było wspomaganie podgrzewania ciepłej wody użytkowej (CWU) energią słoneczną, co umożliwiała częściowe ograniczenie zużycia paliw kopalnych. Charakteryzowały się one prostą konstrukcją i ograniczeniami technologicznymi w zakresie sterowania oraz efektywnego wykorzystania energii słonecznej.

Rozwój technologii pomp ciepła otworzył drogę do wykorzystania ich potencjału w systemach hybrydowych. W latach osiemdziesiątych XX wieku pojawiły się tak zwane „systemy biwalentne”, w których pompa ciepła pełniła funkcję podstawowego źródła ciepła w umiarkowanych warunkach klimatycznych, natomiast kocioł gazowy lub olejowy uruchamiał się jako rezerwa lub dodatkowe źródło ciepła przy niskich temperaturach zewnętrznych. Wczesne systemy biwalentne charakteryzowały się prostymi progami temperaturowymi, determinującymi przełączanie między źródłami. Istotny postęp w rozwoju hybrydowych węzłów ciepłych nastąpił na początku XXI wieku, dzięki dynamicznemu rozwojowi i obniżeniu kosztów technologii Odnawialnych Źródeł Energii (OZE), takich jak fotowoltaika i pompy ciepła (np. gruntowe). Kluczową rolę odegrała również integracja inteligentnych systemów



sterowania. Umożliwiły one optymalne zarządzanie pracą zróżnicowanych źródeł ciepła w zależności od aktualnych warunków meteorologicznych, temperatury zewnętrznej, cen energii elektrycznej i paliw, dostępności energii z OZE (np. produkcji z instalacji fotowoltaicznych) oraz bieżącego zapotrzebowania na ciepło obiektu. Koncepcja „hybrydowości” znalazła swoje odzwierciedlenie w ewolucji systemów ciepłowniczych. W tym okresie zaczęto obserwować integrację lokalnych, rozproszonych odnawialnych źródeł energii (OZE), takich jak pompy ciepła czy wysokosprawne jednostki kogeneracyjne zasilane biomasą, z istniejącą infrastrukturą scentralizowanych sieci ciepłowniczych. W wyniku tego zaczęły powstawać hybrydowe systemy ciepłownicze, w których tradycyjne węzły ciepne przeszły znaczącą transformację. Ich zadaniem stało się nie tylko efektywna dystrybucja ciepła do odbiorców, lecz także aktywne zarządzanie strumieniami energii cieplnej pochodzącymi z różnorodnych źródeł, w tym OZE i konwencjonalnych. Ponadto, coraz powszechniejszym elementem stała się integracja lokalnych systemów magazynowania ciepła z węzłami ciepła, co umożliwiało lepsze wykorzystanie niestabilnych źródeł OZE i zarządzanie szczytowym zapotrzebowaniem.

2.1. Podstawowe komponenty i funkcje hybrydowego węzła cieplnego

Hybrydowy węzeł cieplny definiuje się jako system ogrzewania integrujący co najmniej dwa odrębne źródła ciepła w celu optymalizacji efektywności energetycznej, zmniejszenia zależności od pojedynczego źródła oraz zwiększenia odporności systemu. Aby w pełni zrozumieć istotę hybrydowych węzłów cieplnych, niezbędne jest zestawienie ich z tradycyjnymi węzłami cieplnymi. Węzeł cieplny albo tradycyjna podstacja cieplna (ang. district substation) to podstawowy element sieci



ciepłowniczej, którego głównym zadaniem jest pośrednictwo w dostarczaniu ciepła od głównej magistrali do lokalnej instalacji grzewczej budynku lub grupy budynków. Kluczowe funkcje, które definiują zarówno węzeł cieplny, jak i podstawę cieplną:

- przekazywanie energii cieplnej od głównego źródła (sieci ciepłowniczej) do instalacji odbiorcy;
- transformacja parametrów temperatury i/lub ciśnienia czynnika grzewczego, aby odpowiadały wymaganiom wewnętrznej instalacji budynku;
- regulacja przez dostosowywanie ilości dostarczanego ciepła do aktualnego zapotrzebowania budynku (np. w zależności od temperatury zewnętrznej);
- pomiar i rejestracja ilości zużytej energii cieplnej przez odbiorcę w celu rozliczeń;
- zabezpieczenie instalacji wewnętrznej i sieci przed niepożądanymi zjawiskami (np. nadmiernym ciśnieniem).

Węzeł cieplny, jak i podstacja cieplna pełni zatem rolę pasywnego interfejsu. Przetwarza i dostosowuje parametry ciepła dostarczanego z sieci, nie wpływając aktywnie na jego generację ani optymalizację źródeł. Charakteryzuje się relatywną prostotą konstrukcyjną i niższymi kosztami inwestycyjnymi.

W przeciwieństwie do tego, hybrydowe węzły cieplne charakteryzują się różnorodnością konfiguracji i zastosowanych technologii. Do jego kluczowych elementów i funkcjonalności należą:

- integracja różnorodnych źródeł ciepła (na przykład hybrydowy węzeł cieplny zintegrowany z tradycyjnym źródłem z sieci ciepłowniczej i lokalnymi odnawialnymi źródłami energii (OZE), takimi jak pompy ciepła (powietrzne, gruntowe), kolektory słoneczne, a także systemy odzysku ciepła.
- wbudowane lub zintegrowane magazyny energii cieplnej (gromadzenie energii w okresach niższych cen lub większej dostępności OZE (np. z fotowoltaiki) i wykorzystywanie jej w okresach szczytowego zapotrzebowania;
- inteligentne systemy sterowania, które optymalizują wykorzystanie poszczególnych źródeł ciepła w zależności od warunków, cen energii i zapotrzebowania, biorąc pod uwagę aktualne warunki pogodowe, ceny energii, dostępność OZE oraz indywidualne zapotrzebowanie odbiorcy.

W niektórych zaawansowanych koncepcjach (np. "prosument ciepła"), hybrydowe węzły mogą nie tylko pobierać ciepło z sieci, ale również oddawać nadwyżki energii do systemu, zwiększając jego elastyczność i stabilność. Elementy składowe typowego hybrydowego węzła cieplnego mogą obejmować dwa lub więcej źródeł ciepła; system dystrybucji ciepła; magazyny ciepła; inteligentne systemy sterowania,



które optymalizują wykorzystanie poszczególnych źródeł ciepła w zależności od warunków, cen i zapotrzebowania na energię.

W Tabeli 1 przedstawiono syntetyczne zestawienie kluczowych cech tradycyjnych i hybrydowych węzłów ciepłych.

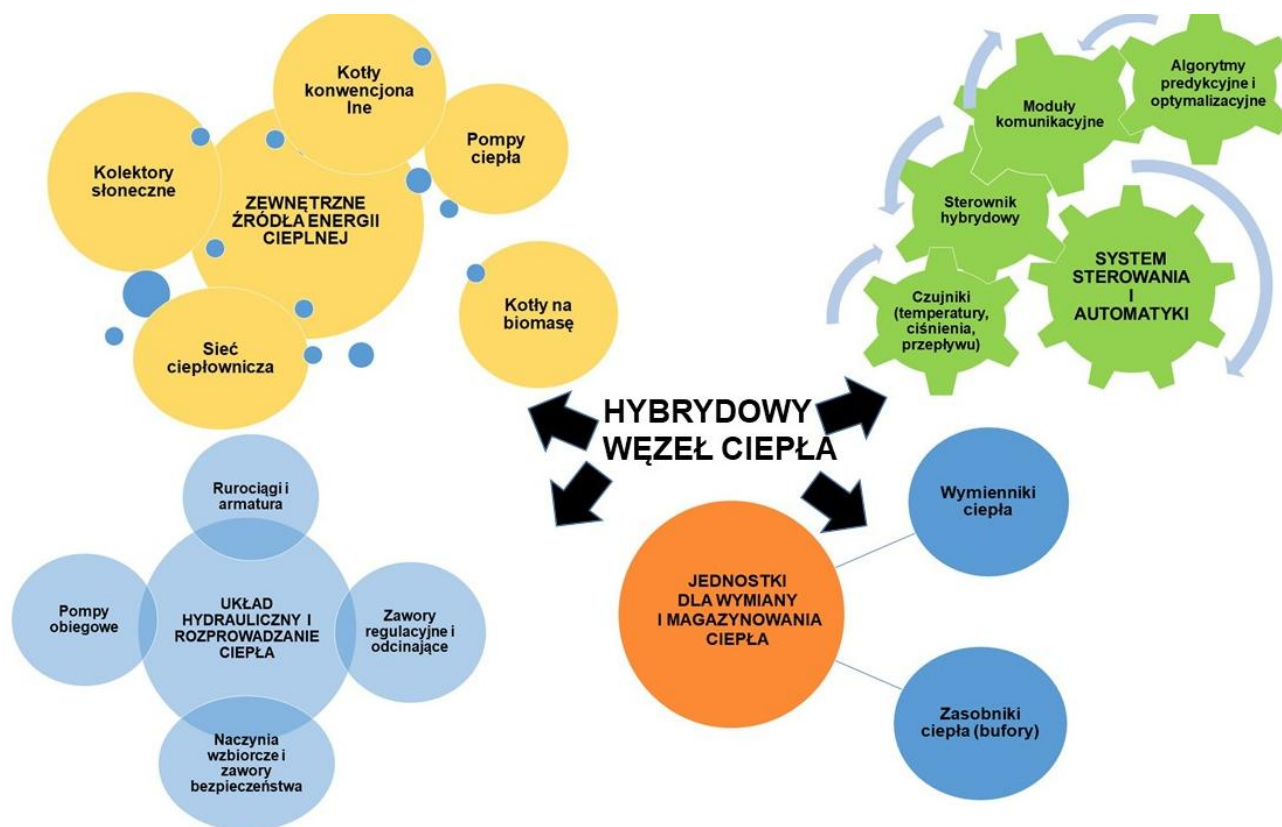
Tabela 1. Porównanie kluczowych cech tradycyjnych podstawic ciepłych i hybrydowych węzłów ciepłych

Cecha	Hybrydowy węzeł ciepły	Tradycyjny węzeł ciepły
źródła ciepła	wiele (sieć + lokalne OZE + odzysk ciepła)	przeważnie jedno źródło – sieć ciepłownicza
technologie	różnorodne (wymenniki, pompy ciepła, magazyny, kogeneracja)	przeważnie wymenniki ciepła
elastyczność	wysoka (możliwość optymalizacji kosztów i emisji)	niższa (zależna od parametrów sieci)
funkcjonalność	dostarczanie, magazynowanie, transformacja parametrów, optymalizacja, aktywna rola w zarządzaniu siecią	dostarczanie, transformacja parametrów, pomiar, zabezpieczenie
inteligencja	zaawansowane systemy sterowania i optymalizacji	proste układy regulacji

Schemat ideowy hybrydowego węzła ciepła został zamieszczony na rysunku 1.

[Tekst alternatywny. Rysunek przedstawia schemat funkcjonalny hybrydowego węzła ciepła. Schemat jest podzielony na cztery główne obszary, które zbiegają się w centralnym punkcie. W centralnym polu, otoczonym czarnymi strzałkami wskazującymi na wzajemne powiązania, widnieje napis „HYBRYDOWY WĘZEŁ CIEPŁA”. Wokół tego pola, w czterech głównych obszarach, rozmieszczono połączone z nim elementy składowe. W górnym lewym obszarze, w kolorze żółtym, widnieje napis "ZEWNĘTRZNE ŹRÓDŁA ENERGII CIEPLNEJ". Ta grupa obejmuje: kolektory słoneczne, sieć ciepłowniczą, kotły konwencjonalne i inne, pompy ciepła oraz kotły na biomasę. Są to różnorodne sposoby pozyskiwania ciepła, które mogą zasilać hybrydowy węzeł. W dolnym lewym obszarze, w kolorze niebieskim widnieje napis "UKŁAD HYDRAULICZNY I ROZPROWADZANIE CIEPŁA". Ta grupa obejmuje: pompy obiegowe, naczynia wzbiornicze i zawory bezpieczeństwa, rurociągi i armatura, a także zawory regulacyjne i odcinające. Te elementy są kluczowe dla

transportu i regulacji ciepła w całym systemie. W dolnym prawym obszarze, w kolorze pomarańczowym, zamieszczono napis "JEDNOSTKI DLA WYMIANY I MAGAZYNOWANIA CIEPŁA". W tej grupie znajdują się wymienniki ciepła oraz zasobniki ciepła (bufory). Służą one do efektywnego przekazywania i przechowywania zgromadzonego ciepła. W górnym prawym obszarze, w kolorze zielonym, zamieszczono napis "SYSTEM STEROWANIA I AUTOMATYKI". Jest to dynamiczny schemat w kształcie kół zębatach, symbolizujący ciągłą pracę i optymalizację. Do jego składu wchodzi sterownik hybrydowy, czujniki (temperatury, ciśnienia, przepływu), moduły komunikacyjne oraz algorytmy predykcyjne i optymalizacyjne. Wszystkie te elementy, współpracując ze sobą, tworzą inteligentny SYSTEM STEROWANIA AUTOMATYKI, który zarządza całym węzłem. Hybrydowy węzeł ciepła integruje te wszystkie komponenty.



Rys. 1. Schemat ideowy hybrydowego węzła ciepła.

Wśród powszechnie spotykanych rozwiązań wyróżnia się systemy łączące ciepło sieciowe z odnawialnymi źródłami energii (takimi jak energia słoneczna termiczna, pompy ciepła), układy wykorzystujące pompy ciepła w połączeniu z kotłami na paliwa kopalne (gaz, olej), a także systemy oparte na energii słonecznej (termicznej i



fotowoltaicznej) wspomagane przez dodatkowe źródła ciepła (pompy ciepła, kotły, grzałki elektryczne) oraz inne konfiguracje, na przykład biomasę z energią słoneczną.

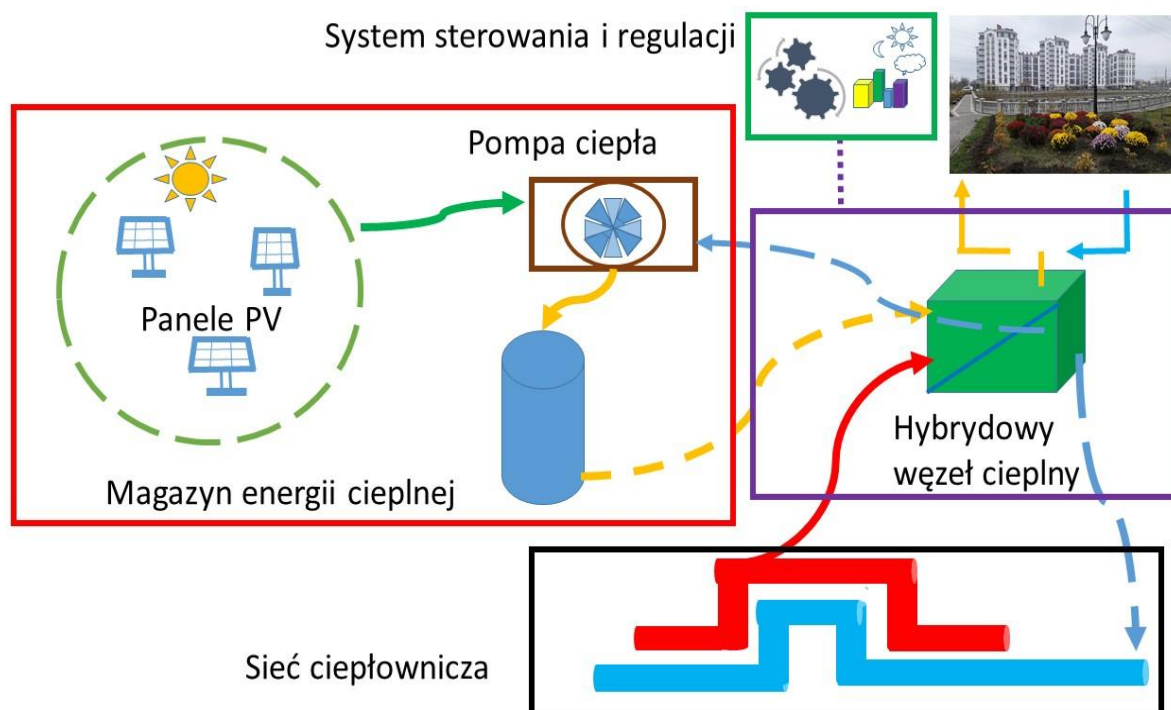
Przykładowo, w ciągu słonecznego dnia kolektory słoneczne efektywnie podgrzewają wodę w zasobniku buforowym, natomiast w okresach zwiększonego zapotrzebowania, w nocy, lub gdy dostępność energii słonecznej jest ograniczona, inteligentny sterownik aktywuje pompę ciepła lub uruchamia pobór ciepła z miejskiej sieci ciepłowniczej. Taki sposób współdziałania umożliwia zaawansowane zarządzanie priorytetami źródeł, gdzie sterownik węzła autonomicznie decyduje o tym, które źródło energii jest w danym momencie najbardziej efektywne i ekonomiczne. Zazwyczaj, zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, priorytet mają odnawialne źródła energii (OZE), a dopiero w przypadku ich niewystarczającej wydajności lub niższej opłacalności aktywowane są źródła uzupełniające, takie jak kocioł gazowy czy ciepło sieciowe. Co więcej, hybrydowe węzły ciepłownicze są odpowiedzialne za regulację parametrów medium grzewczego, co oznacza, że dostosowują temperaturę i ciśnienie dostarczanego ciepła do specyficznych wymagań instalacji odbiorczych – na przykład, ogrzewanie podłogowe wymaga znacznie niższych temperatur niż tradycyjne grzejniki. W przypadku integracji z siecią ciepłowniczą, węzeł efektywnie obniża temperaturę zasilania z sieci do poziomu wymaganego przez instalację wewnętrzną budynku, co znacząco zwiększa ogólną efektywność całego systemu ciepłowniczego. Niezwykle istotne jest również pomiar i monitorowanie pracy węzła, ponieważ są one wyposażone w precyzyjne liczniki ciepła, wody i energii elektrycznej. Pozwala to na dokładne śledzenie zużycia i produkcji energii, dostarczając kluczowych danych do bieżącej optymalizacji, analizy efektywności operacyjnej oraz precyzyjnego rozliczania kosztów. Dodatkowo, inteligentne sterowniki zapewniają diagnostykę i alarmowanie, monitorując pracę wszystkich elementów węzła, identyfikując potencjalne usterki i generując odpowiednie alarmy, co umożliwia szybką interwencję i minimalizację przestojów. Wreszcie, nowoczesne hybrydowe węzły ciepła oferują możliwości zdalnego sterowania i nadzoru. Dzięki łączności internetowej lub sieciom mobilnym, personel techniczny może monitorować ich pracę, zmieniać ustawienia operacyjne oraz przeprowadzać diagnostykę na odległość, eliminując konieczność fizycznej obecności i zwiększając elastyczność zarządzania systemem. Integracja sieci ciepłowniczych z pompami ciepła staje się coraz popularniejsza. Działanie takiego systemu grzewczego opiera się na wykorzystaniu powietrznych lub gruntowych pomp ciepła jako komplementarnego źródła ciepła. Takie rozwiązanie jest szczególnie efektywne w przypadku zapotrzebowania na niższe temperatury zasilania lub w celu maksymalizacji udziału lokalnych odnawialnych źródeł energii. Rysunek 2 prezentuje przykładowy schemat technologiczny hybrydowego węzła



ciepła integrowanego z pompą ciepła, kolektorami słonecznymi oraz siecią ciepłowniczą.

[Tekst alternatywny. Poniższy rysunek przedstawia przykładowe elementy składowe i koncepcje działania typowego hybrydowego węzła ciepła integrowanego z siecią ciepłowniczej. W centralnej części schematu, w dużym czerwonym prostokącie znajduje się napis "Magazyn energii cieplnej" wraz z komponentami go zasilającymi: Wewnątrz przerywanej zielonej linii w tym prostokącie, w górnej części, widoczne jest słońce oraz symbol paneli fotowoltaicznych (Panele PV). Zielona strzałka prowadzi od tego obszaru do pompy ciepła, wskazując na zasilanie energią słoneczną lub elektryczną z panele fotowoltaicznych. "Pompa ciepła" jest reprezentowana przez brązowy prostokąt z okrągłym symbolem wentylatora. Od pompy ciepła odchodzą dwie żółte, przerywane strzałki, prowadzące do pionowego, niebieskiego cylindra symbolizującego magazyn energii cieplnej. Strzałki te wskazują na magazynowanie ciepła. Poniżej czerwonego prostokąta, wzdłuż dolnej krawędzi schematu, znajduje się napis "Sieć ciepłownicza", przedstawiona jako dwie równoległe, falujące linie – jedna czerwona (zasilanie) i jedna niebieska (powrót). Z sieci ciepłowniczej odchodzą dwie czarne strzałki, kierujące się w górę do zielonego sześcianu. W prawej środkowej części schematu, otoczony fioletowym prostokątem z przerywaną linią, znajduje się napis "Hybrydowy węzeł cieplny", symbolizowany przez zielony sześcian. Do tego węzła prowadzą strzałki z różnych kierunków: czerwona, ciągła strzałka od sieci ciepłowniczej (od linii czerwonej), wskazująca na dopływ ciepła z sieci; niebieska, ciągła strzałka od sieci ciepłowniczej (od linii niebieskiej), wskazująca na powrót do sieci; dwie żółte, przerywane strzałki od magazynu energii cieplnej, wskazujące na dopływ ciepła z magazynu; dwie zielone, ciągłe strzałki wychodzą z hybrydowego węzła cieplnego, kierując się w górę i w prawo, do grupy budynków mieszkalnych (widocznych na zdjęciu w prawym górnym rogu). W prawym górnym rogu schematu, w zielonym prostokącie z przerywaną linią, znajduje się napis "System sterowania i regulacji". Jest on przedstawiony graficznie poprzez symbole kół zębatych, wykresów słupkowych i ikon chmury, sugerujące analitykę, optymalizację i komunikację. Z tego systemu odchodzi przerywana fioletowa linia z kropkami, prowadząca do hybrydowego węzła cieplnego, co oznacza, że system sterowania i regulacji zarządza pracą hybrydowego węzła. Z systemu sterowania

odchodzą również przerywane żółte strzałki do pompy ciepła i paneli fotowoltaicznych, wskazując na monitorowanie i kontrolę tych źródeł energii.



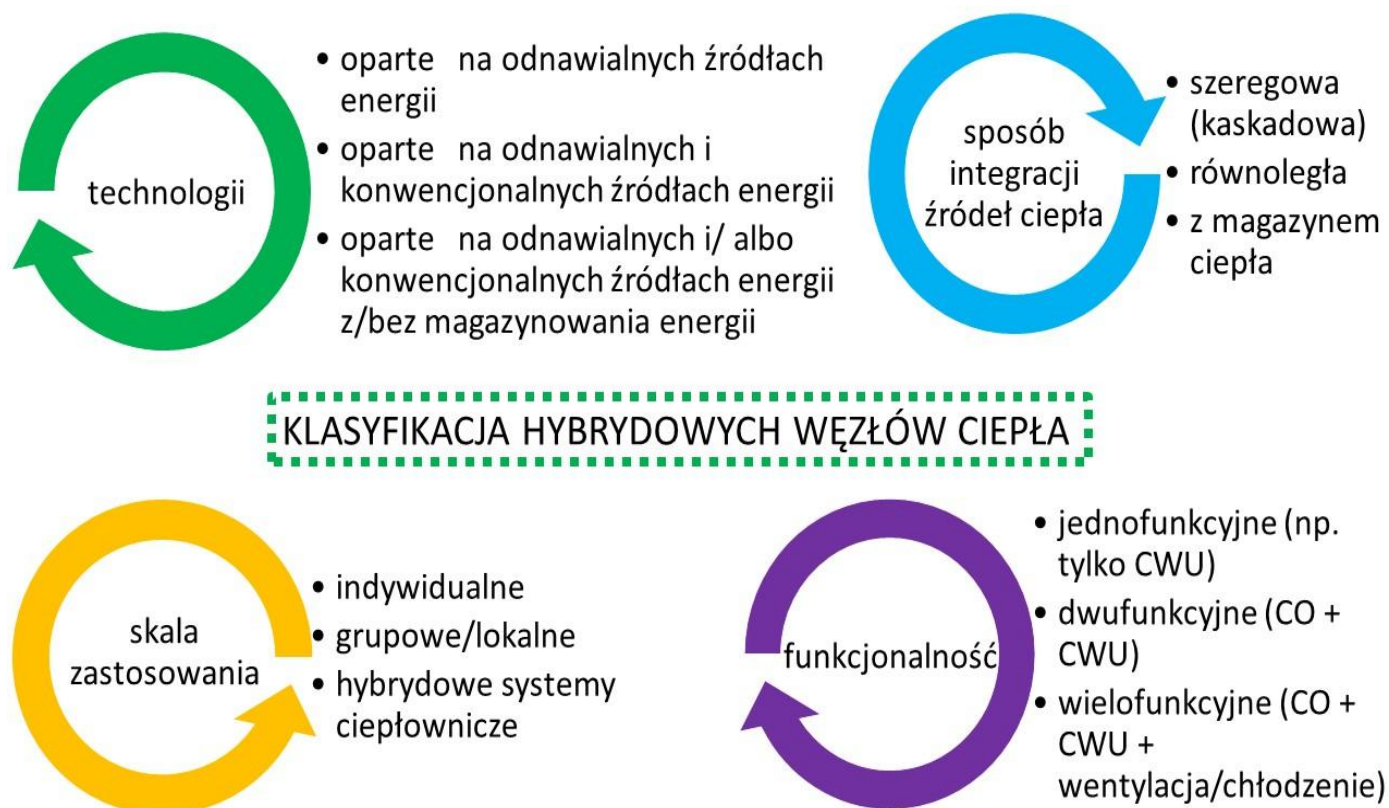
Rys. 2. Koncepcja działania przykładowego węzła hybrydowego zintegrowanego z pompą ciepła, magazynem energii cieplnej i siecią ciepłowniczą.

3. Klasyfikacja hybrydowych węzłów cieplnych

Hybrydowe węzły cieplne to są złożone systemy, które można klasyfikować według wielu kryteriów, odzwierciedlających ich funkcję, skalę zastosowania, wykorzystywane technologie (rys. 3).

[Tekst alternatywny. Poniższy rysunek przedstawia klasyfikację hybrydowych węzłów ciepła, gdzie strzałka koloru zielonego znajduje się w lewym górnym rogu rysunku i oznacza klasyfikację według technologii. Strzałka koloru pomarańczowego jest umieszczona w prawym górnym rogu rysunku i oznacza klasyfikację według skali zastosowania. Strzałka koloru fioletowego znajduje się w prawym dolnym rogu rysunku, odnosi się do zakresu potrzeb cieplnych, jakie węzeł hybrydowy jest w stanie pokryć i oznacza klasyfikację według funkcjonalności. Strzałka koloru niebieskiego znajduje się w prawym górnym rogu rysunku. Niebieska okrągła strzałka wskazuje na trzy główne typy integracji: szeregową (kaskadową), gdzie źródła ciepła

są połączone jedno za drugim; równoległa, gdzie różne źródła ciepła działają niezależnie; z magazynem ciepła, uwzględniająca wykorzystanie zbiorników akumulacyjnych].



Rys. 3. Klasyfikacja hybrydowych węzłów ciepła.

Węzły hybrydowe mogą łączyć źródła ciepła w różny sposób, wpływając na ich efektywność i elastyczność. Przy integracji źródeł ciepła w konfiguracji szeregowej medium grzewcze (np. woda) przepływa przez jedno źródło, a następnie, w razie potrzeby, jest dogrzewane przez kolejne. Klasycznym przykładem jest system, w którym pompa ciepła (PC) wstępnie podgrzewa wodę do temperatury T_{PC} , a następnie, w razie potrzeby, kocioł gazowy lub źródło ciepła z sieci ciepłowniczej (SC) podnosi temperaturę do wymaganej wartości $T_{zadana} > T_{PC}$. Taka kaskadowa struktura pozwala na maksymalne wykorzystanie efektywności każdego źródła w jego optymalnym zakresie pracy. Pompa ciepła, pracując przy niższych temperaturach zasilania, osiąga wyższy współczynnik efektywności (COP), podczas gdy źródło szczytowe działa tylko w warunkach zwiększonego zapotrzebowania na moc lub ekstremalnie niskich temperatur zewnętrznych.



W przeciwieństwie do konfiguracji szeregowej, hybrydowy węzeł działa w warunkach równoległego połączenia źródeł ciepła. W takim układzie źródła ciepła działają niezależnie i mogą jednocześnie dostarczać energię do wspólnego systemu. Kluczową rolę odgrywa zaawansowana strategia sterowania, która dynamicznie decyduje, które źródło jest w danym momencie najbardziej ekonomiczne lub efektywne. Decyzje te są podejmowane na podstawie bieżących warunków operacyjnych, takich jak temperatura zewnętrzna, ceny energii elektrycznej i paliw, a także dostępność zasobów odnawialnych. Przykładowo, w okresach niskiego zapotrzebowania lub wysokiej dostępności energii słonecznej, głównym źródłem może być kolektor słoneczny, natomiast w okresach szczytowego zapotrzebowania włączane są dodatkowe kotły.

Integracja hybrydowych węzłów z magazynami ciepła jest kluczowym sposobem zwiększającym elastyczność, odporność i efektywność ekonomiczną systemu grzewczego. Magazynowanie ciepła umożliwia rozdzielenie w czasie produkcji od zużycia, co jest szczególnie istotne w kontekście nie stabilności odnawialnych źródeł energii. Ten typ integracji obejmuje zbiornik akumulacyjny, który służy do gromadzenia energii cieplnej z różnych źródeł (np. nadwyżek energii elektrycznej z instalacji PV które zostały wykorzystane w kotle elektrycznym, ciepła z pompy ciepła w tańszej taryfie, kolektorów słonecznych w sezonie letnim). Zmagazynowane ciepło jest uwalniane w okresach zwiększonego zapotrzebowania, co znacznie zwiększa elastyczność systemu i umożliwia efektywniejsze wykorzystanie odnawialnych źródeł energii.

Klasyfikacja hybrydowych węzłów ciepła ze względu na rodzaj wykorzystywanych technologii wytwarzania energii cieplnej odzwierciedla konkretne układy źródeł ciepła współdziałających z węzłem hybrydowym. Przykładem systemu grzewczego opartego tylko na odnawialnych źródłach energii jest system w którym jako główne źródło energii występuje pompa ciepła, a energia słoneczna jest wykorzystywana do wspomaganie ogrzewania pomieszczeń lub podgrzewania (CWU). Takie systemy charakteryzują się minimalnym śladem węglowym i wysoką niezależnością energetyczną.

Najbardziej rozpowszechnionym sposobem integracji hybrydowego węzła ciepła jest układ z odnawialnymi i konwencjonalnymi źródłami energii. Jednym z często stosowanych połączeń jest integracja węzeł – kolektory słoneczne - kocioł gazowy/olejowy – magazyn ciepła. W takim układzie priorytetowymi źródłami ciepła występują kolektory słoneczne i magazyn energii cieplnej, podczas gdy kocioł gazowy/olejowy stanowi rezerwę mocy na wypadek szczytowego zapotrzebowania lub ekstremalnie niskich temperatur, zapewniając niezawodne dostawy ciepła. Kryterium klasyfikacji hybrydowych węzłów ciepła ze względu na funkcjonalność określa zakres potrzeb cieplnych i klimatyzacyjnych, jakie węzeł hybrydowy jest w



stanie pokryć w budynku. Hybrydowe węzły jednofunkcyjne przeznaczone wyłącznie do podgrzewania ciepłej wody użytkowej (CWU) albo (CO). W kontekście budownictwa mieszkalnego oraz komercyjnego, hybrydowe węzły dwufunkcyjne (CO + CWU) stanowią dominujące rozwiązanie. Ich podstawową funkcją jest jednocześnie pokrycie zapotrzebowania zarówno na ogrzewanie pomieszczeń (CO), jak i na przygotowanie ciepłej wody użytkowej (CWU). Konfiguracje te integrują różnorodne źródła energii oraz technologie grzewcze, efektywnie zaspokajając podstawowe potrzeby cieplne obiektów.

Wielofunkcyjne hybrydowe węzły ciepła (CO + CWU + wentylacja/chłodzenie) stanowią najbardziej zaawansowaną kategorię systemów grzewczych. Ich funkcjonalność wykracza poza podstawowe zapewnienie ogrzewania pomieszczeń (CO) i przygotowania ciepłej wody użytkowej (CWU), obejmując również zaawansowane funkcje wentylacji z odzyskiem ciepła oraz aktywnego chłodzenia. To ostatnie często realizowane jest poprzez rewersyjną pracę pomp ciepła, wykorzystujących cykl termodynamiczny.

Klasyfikacja ze względu na skalę zastosowania hybrydowego węzła cieplnego określa sposób oddziaływania oraz moc cieplną węzła hybrydowego w przypadku integracji z domem jednorodzinnym, osiedlem albo ze złożonym systemem grzewczym sieci ciepłowniczych.

Indywidualne węzły hybrydowe projektowane są dla pojedynczych jednostek budowlanych, takich jak domy jednorodzinne, niewielkie obiekty komercyjne czy punkty usługowe. Ich konfiguracja jest precyzyjnie dostosowywana do specyficznych wymagań cieplnych, profilu zużycia energii oraz dostępności lokalnych zasobów, co zapewnia autonomiczną i zoptymalizowaną operacyjność. Hybrydowe węzły ciepła na poziomie budynku są powszechnie spotykane w budynkach mieszkalnych i komercyjnych. Systemy te zazwyczaj łączą elektryczną pompę ciepła (powietrzną lub gruntową) z tradycyjnym piecem lub kotłem zasilanym gazem (gazem ziemnym lub propanem), olejem, a nawet biomasą. W takich konfiguracjach pompa ciepła zazwyczaj służy jako główny system ogrzewania i chłodzenia w łagodniejszych porach roku, wykorzystując swoją wydajność w umiarkowanych temperaturach. Piec lub kocioł przejmuje wówczas funkcję głównego ogrzewania w chłodniejszych okresach, gdy wydajność pompy ciepła może spadać.

Grupowe/lokalne węzły hybrydowe przeznaczone do zaspokajania zapotrzebowania na ciepło większych obiektów, takich jak osiedla mieszkaniowe, kampusy czy wydzielone obszary miejskie. Te systemy integrują bardziej zróżnicowany wachlarz źródeł ciepła na dużą skalę, w tym elektrownie kogeneracyjne (CHP), kotły na biomasę, przemysłowe pompy ciepła, energię słoneczną, energię geotermalną i systemy odzyskiwania ciepła odpadowego. Aby zoptymalizować wykorzystanie nieregularnych odnawialnych źródeł energii i zarządzać zmiennym



zapotrzebowaniem na ciepło, te systemy często zawierają obiekty do magazynowania energii cieplnej.

Technologie oparte na odnawialnych źródłach energii mogą być integrowane do istniejących systemów ciepłowniczych przy przeprowadzeniu niewielkich modyfikacji, takich jak dostosowanie do niższych temperatur pracy i sieci o minimalnych stratach ciepła. Należy jednak zaznaczyć, że systemy ciepłownicze bazujące wyłącznie na odnawialnych źródłach energii (OZE) są rzadkością. Ze względu na zmienność dostaw energii wytwarzanej w OZE, systemy hybrydowe zazwyczaj łączą tradycyjne źródła energii z różnymi OZE oraz magazynami energii. Możliwe sposoby integracji OZE z sieciami ciepłowniczymi obejmują tryb centralizowany i rozproszony. W trybie centralizowanym ciepło wytwarzane z OZE jest skierowane do głównego źródła ciepła, które współdziała dużymi sezonowymi magazynami ciepła. Dla trybu rozproszonego charakterystycznym jest lokalne rozmieszczenie OZE i bezpośredni sposób integracji z siecią ciepłowniczej. Hybrydowe podgrzewacze wody stanowią szczególne zastosowanie ukierunkowane na produkcję ciepłej wody użytkowej. Te jednostki zazwyczaj łączą pompę ciepła z konwencjonalnymi grzałkami elektrycznymi w jednym urządzeniu. Pompa ciepła zapewnia wydajne podgrzewanie wody w normalnych warunkach pracy, podczas gdy grzałka służy jako źródło szczytowe, aby zapewnić wystarczającą ilość ciepłej wody w okresach dużego zapotrzebowania lub gdy wydajność pompy ciepła może być ograniczona z powodu bardzo niskich temperatur otoczenia (w przypadku powietrznych pomp ciepła).

4. Technologie i schematy działania hybrydowych węzłów ciepłych

4.1. Grupowe/lokalne hybrydowe węzły ciepłne integrowane z OZE i magazynami ciepła

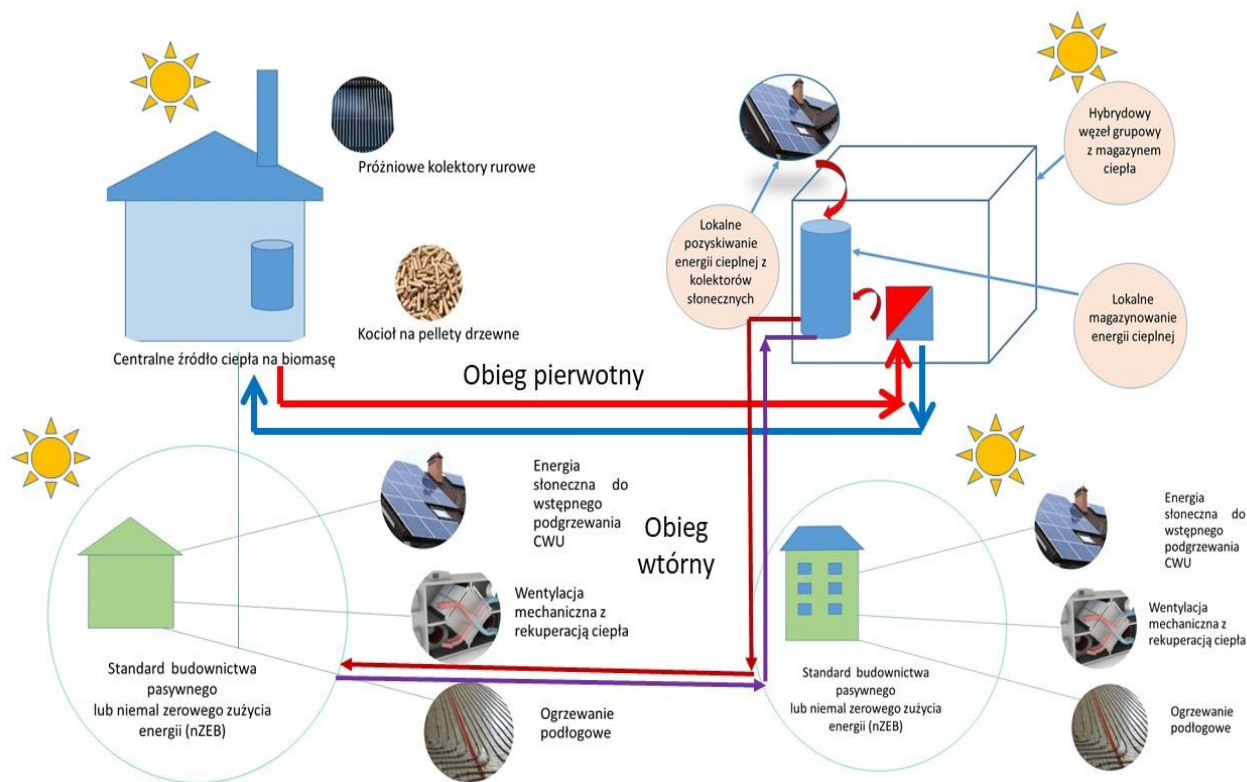
Projektowanie i wdrażanie zeroemisyjnych systemów grzewczych dla budynków mieszkalnych stanowi istotne wyzwanie w inżynierii energetycznej. Systemy grzewcze z hybrydowymi węzłami ciepła charakteryzują się złożoną, lecz efektywną architekturą. Celem takich systemów grzewczych jest efektywne zaspokajanie zmiennego zapotrzebowania na ciepło budynków, minimalizowanie wpływu na środowisko oraz optymalizacja parametrów ekonomicznych eksploatacji systemu. Strategiczne cele funkcjonowania omawianych systemów grzewczych obejmują:



- zapewnienie 100% pokrycia zapotrzebowania na ciepło ze źródeł odnawialnych;
- decentralizacja magazynowania energii oraz optymalizacja wykorzystania źródeł odnawialnych;
- uzyskanie znaczącego udziału energii słonecznej (np. rzędu 40%) w bilansie energetycznym, wspierane przez inne OZE.
- integracja z budynkami spełniającymi standardy pasywne lub o niemal zerowym zużyciu energii (nZEB).
- redukcja strat i kosztów związanych z przesyłem ciepła.

Poniżej przedstawiono kluczowe zasady funkcjonowania hybrydowych grupowych węzłów ciepła (rys. 4).

[Tekst alternatywny. Poniższy rysunek przedstawia koncepcję działania zintegrowanego systemu ciepłowniczego dla obszarów mieszkalnych. W lewej części rysunku znajduje się centralne źródło ciepła na biomasę, reprezentowane przez niebieski budynek z kominem, obok którego widoczny jest kocioł na pellet drzewny oraz próżniowe kolektory rurowe (panele solarne). Kocioł na pellet drzewny przedstawiony jest jako stos granulatu drzewnego, a kolektory rurowe jako ciemne cylindry. W prawej części rysunku zamieszczono dwa identyczne bloki standardowego budownictwa pasywnego lub niemal zerowego zużycia energii (nZEB), symbolizowane przez zielony dom jednorodzinny i niebieski budynek wielorodzinny. Od każdego z tych budynków odchodzą trzy strzałki skierowane w prawo, wskazujące na komponenty wewnętrzne i związane z nimi technologie. Pierwsza strzałka (u góry) wskazuje na energię słoneczną do wstępnego podgrzewania (CWU) (cieplej wody użytkowej), symbolizowaną przez płaskie kolektory słoneczne zainstalowane na dachu (panele dachowe). Druga strzałka (środkowa) wskazuje na wentylację mechaniczną z rekuperacją ciepła, przedstawioną jako jednostka wentylacyjna z rurami. Trzecia strzałka (na dole) wskazuje na ogrzewanie podłogowe, symbolizowane przez schemat rur grzewczych ułożonych w podłodze. Ciepło z centralnego źródła jest rozprawdane do hybrydowych węzłów ciepła, które są częścią opisywanego systemu].



Rys. 4. Koncepcja działania zintegrowanego systemu grzewczego osiedlowego.

Podstawowym elementem systemu jest zazwyczaj centralny kocioł opalany biomasą, np. pelletem drzewnym. Jego główną funkcją jest zapewnienie stabilnego i odnawialnego źródła ciepła, zdolnego do pokrycia zarówno bazowego, jak i szczytowego zapotrzebowania, szczególnie w okresach niskiej dostępności innych odnawialnych źródeł energii. Wytworzone ciepło jest przesyłane do pierwotnej sieci dystrybucyjnej, która zasila szereg hybrydowych węzłów ciepła, funkcjonujących jako zdecentralizowane podstawce. Każda z tych podstawki wyposażona jest w lokalny magazyn ciepła (zbiornik akumulacyjny). Rozproszenie sumarycznej pojemności magazynowej ma kluczowe znaczenie dla efektywnego zarządzania intermitencyjnością energii słonecznej, ponieważ umożliwia magazynowanie ciepła i zwiększa elastyczność operacyjną całego systemu.



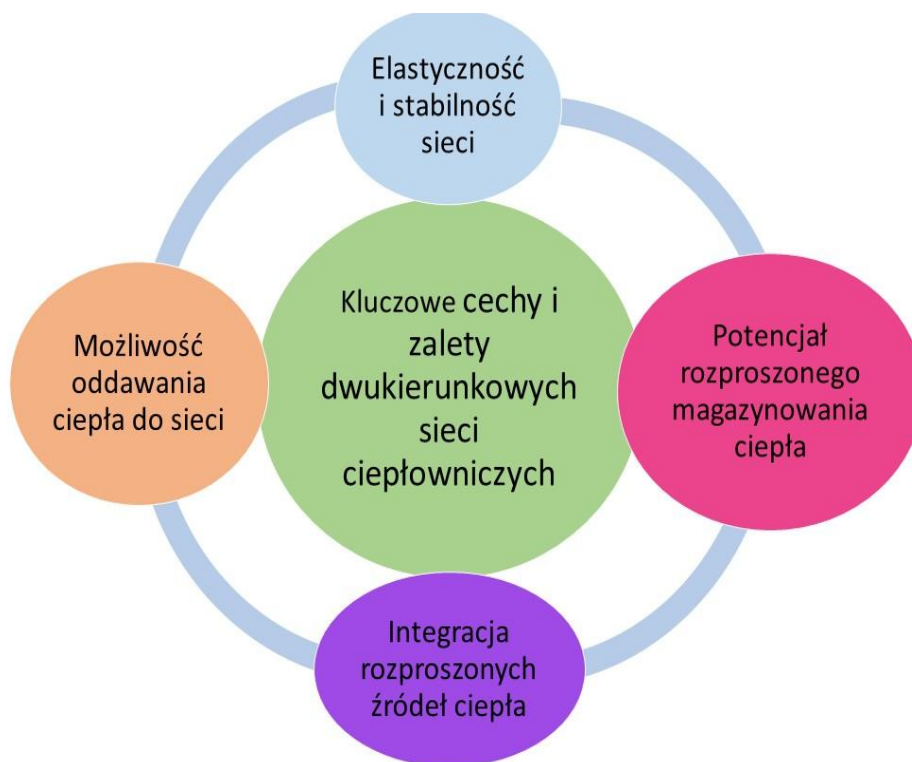
4.2. Koncepcja dwukierunkowego hybrydowego węzła ciepłego zintegrowanego z OZE i miejskim systemem ciepłowniczym

Współczesne wyzwania związane z efektywnością energetyczną oraz wzrostem cen na energię skłaniają odbiorców do poszukiwania alternatywnych źródeł ciepła, nawet w przypadku istniejących budynków podłączonych do sieci ciepłowniczych. W warunkach klimatycznych, gdzie odnawialne źródła energii, takie jak energia słoneczna, charakteryzują się zmienną dostępnością, niezbędne staje się zastosowanie systemów hybrydowych. W odróżnieniu od tradycyjnych, jednokierunkowych systemów, w których ciepło jest produkowane i dystrybuowane wyłącznie do odbiorców, dwukierunkowa sieć umożliwia przepływ energii cieplnej w obu kierunkach między różnymi punktami systemu. Taka funkcjonalność umożliwia efektywną integrację rozproszonych źródeł ciepła i znacząco poszerza możliwości operacyjne sieci w porównaniu do konwencjonalnych układów jednokierunkowych. Integracja dwukierunkowego przepływu ciepła w sieciach ciepłowniczych niesie ze sobą szereg istotnych korzyści, niezbędnych dla transformacji energetycznej sektora grzewczego. Zdecentralizowane źródła energii cieplnej u odbiorców końcowych, w tym oparte na OZE (np. kolektory słoneczne, pompy ciepła) zdolne do generowania nadwyżek, mogą aktywnie oddawać wyprodukowane ciepło do sieci dystrybucyjnej. Dzięki możliwości przepływu ciepła w obu kierunkach, sieć staje się bardziej odporna na wahania zapotrzebowania i zależność od lokalnej produkcji energii. Nadwyżki ciepła z jednego segmentu sieci mogą być efektywnie wykorzystane w miejscach, gdzie występuje chwilowy deficyt, stabilizując parametry operacyjne systemu. Ponadto, rozwiązanie to sprzyja optymalizacji wykorzystania zasobów energetycznych, umożliwiając lepsze zagospodarowanie lokalnie dostępnej energii oraz potencjalną redukcję strat przesyłowych, gdyż ciepło może być produkowane bliżej miejsca jego konsumpcji i dynamicznie rozprowadzane.

Koncepcja działania systemu grzewczego zintegrowanego z hybrydowym węzłem ciepła i dwukierunkową siecią ciepłowniczą został zamieszczony na rys. 5.

[Tekst alternatywny. Diagram przedstawia cztery kluczowe cechy i zalety dwukierunkowych sieci ciepłowniczych, z centralnym elementem informacyjnym i czterema powiązanymi z nim obszarami. W centralnym polu, w kolorze jasnozielonym, widnieje się napis „Kluczowe cechy i zalety dwukierunkowych sieci ciepłowniczych” od którego rozchodzą się połączenia do pozostałych czterech okręgów. Wokół tego centralnego pola, w czterech połączonych z nim okręgach, wymienione są kolejno napisy, zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Górny okrąg, w kolorze jasnoniebieskim, zawiera tekst: „Elastyczność i stabilność sieci”. Prawy okrąg, w kolorze różowym, zawiera tekst: „Potencjał rozproszonego magazynowania ciepła”. Dolny okrąg, w kolorze fioletowym, zawiera tekst: „Integracja rozproszonych

źródeł ciepła”. Lewy okrąg, w kolorze pomarańczowym, zawiera tekst: „Możliwość oddawania ciepła do sieci”. Wszystkie cztery zewnętrzne okręgi są połączone z centralnym polem za pomocą jasnoniebieskich, zakrzywionych linii, co symbolizuje ich bezpośredni związek z kluczowymi cechami i zaletami dwukierunkowych sieci ciepłowniczych].



Rys. 5. Koncepcja działania dwukierunkowego hybrydowego węzła ciepłego zintegrowanego systemu z ogrzewaniem miejskim.

Funkcjonowanie hybrydowego węzła ciepłego (rys. 5) polega na preferencyjnym wykorzystaniu lokalnych odnawialnych źródeł energii oraz efektywnej dwukierunkowej wymianie ciepła z siecią ciepłowniczej.

Zasada działania dwukierunkowego hybrydowego węzła ciepłego zintegrowanego z OZE i miejskim systemem ciepłowniczym. Podstawowym źródłem energii cieplnej w takim układzie mogą występować kolektory słoneczne termiczne. Ciepło słoneczne jest w pierwszej kolejności wykorzystywane na potrzeby budynku (ogrzewanie pomieszczeń i podgrzewanie ciepłej wody użytkowej). W okresach niewystarczającego nasłonecznienia lub zwiększonego zapotrzebowania na ciepło, system jest uzupełniany przez piec na drewno oraz ciepło z sieci ciepłowniczej. Sieć ciepłownicza pełni funkcję niezawodnego źródła szczytowego i rezerwowego.



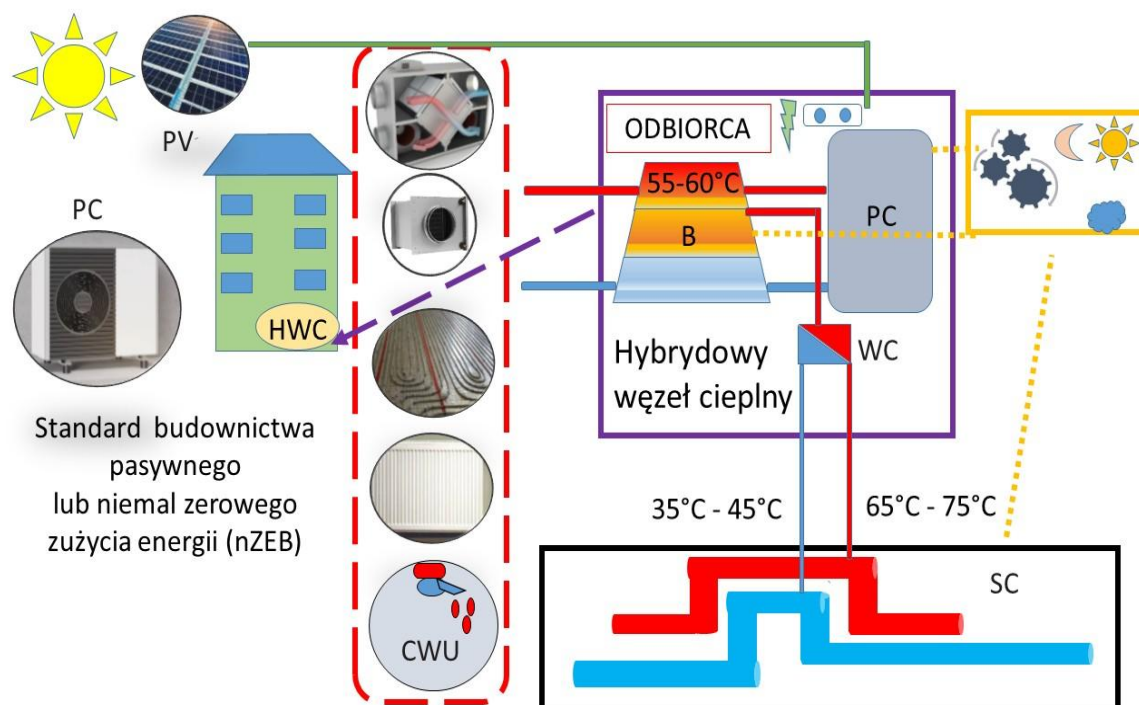
Kluczową funkcją dwukierunkowego węzła hybrydowego jest możliwość oddawania nadwyżki ciepła słonecznego do sieci ciepłowniczej. Warunki techniczne takiego transferu obejmują zazwyczaj osiągnięcie odpowiednio wysokiej temperatury (np. $>75^{\circ}\text{C}$) oraz podwyższenie ciśnienia czynnika grzewczego za pomocą pompy, aby zapewnić efektywny przepływ do sieci. W tym konkretnym przykładzie, system nie posiada własnego magazynu ciepła (zbiornika akumulacyjnego). Sama sieć ciepłownicza, wraz ze zintegrowanymi z nią budynkami i hybrydowymi systemami, może pełnić rolę rozproszonych magazynów ciepła. Wynika to z faktu, że zadaniem sieci ciepłowniczej jest zapewnienie niezbędnej elastyczności systemu grzewczego. Istotnym elementem układu jest system pomiarowy umożliwiający monitorowanie przepływu energii w obu kierunkach. Cena za energię ciepłą wprowadzaną do sieci jest równa cenie, którą odbiorca płaci za ciepło z sieci ciepłowniczej, co stymuluje produkcję lokalną.

4.3. Indywidualne hybrydowe węzły ciepłne integrowane z pompą ciepła, magazynem energii, panelami fotowoltaicznymi i miejskim systemem ciepłowniczym

Projektowanie hybrydowych węzłów ciepłnych jest szczególnie istotne w kontekście zdecentralizowanych systemów grzewczych, gdzie pojedyncze budynki lub grupy budynków stają się aktywnymi uczestnikami lokalnych systemów energetycznych. Takie podejście umożliwia zwiększenie elastyczności zarządzania energią, oraz przyczynia się do tworzenia bardziej zrównoważonych i odpornych na wahania rynkowe sieci ciepłowniczych. Na rysunku 6 został zamieszczony schemat funkcjonalny hybrydowego węzła ciepłnego w budynku użyteczności publicznej zintegrowanego z OZE i wspartego źródłem szczytowym z sieci ciepłowniczej. [Tekst alternatywny. Poniższy rysunek przedstawia schemat ideowy hybrydowego węzła ciepłnego (oznaczonego jako "Hybrydowy węzeł ciepły" na środku obrazu) w budynku o wysokim standardzie energetycznym (standard budownictwa pasywnego lub niemal zerowego zużycia energii - nZEB). Ilustracja wskazuje, jak różne źródła energii są integrowane, aby efektywnie zaspokoić potrzeby ciepłne odbiorców. Linie czerwone reprezentują przepływ ciepłej wody (zasilanie), a niebieskie – zimnej lub powrotnej wody (powrót). Linia zielona symbolizuje przepływ energii elektrycznej, a fioletowa wskazuje, że hybrydowy węzeł ciepły znajduje się w budynku. Żółta przerywana linia z ikonami słońca, chmur i księżyca znajduje się w prawym górnym rogu i oznacza system inteligentnego sterowania. W lewej górnej części schematu widoczne źródła energii odnawialnej. Słońce i panele fotowoltaiczne (PV) symbolizują wykorzystanie energii słonecznej. Panele PV (widoczne jako ciemnoniebieskie prostokąty) przekształcają energię słoneczną w energię



elektryczną. Pompa ciepła (PC) (widoczna jako zewnętrzna jednostka pompy ciepła, kolor szary), pobiera energię z otoczenia. Jej zasilanie elektryczne (linia zielona) pochodzi częściowo z instalacji PV. Zielony budynek, symbolizuje obiekt o wysokiej efektywności energetycznej (nZEB) i jest on odbiorcą ciepła. Napis „Hybrydowy węzeł cieplny” (HWC) zamieszczony na beżowym tle w zielonym budynku. Jest to centralny punkt, w którym następuje integracja i dystrybucja różnych źródeł ciepła do odbiorców. W prawej górnej części schematu widoczny fioletowy kwadrat, który symbolizuje elementy hybrydowego węzła cieplnego. W prawej części fioletowego kwadratu znajduje się prostokąt z napisem „PC” (pompa ciepła) w kolorze szarym, a po lewej stronie widoczna jest warstwa oznaczona literą „B” (kolor pomarańczowo-żółty), która symbolizuje magazyn ciepła (bufor). Hybrydowy węzeł cieplny zawiera wymiennik ciepła (kolor czerwono-niebieski), który umożliwia wymianę ciepła między siecią ciepłowniczą a wewnętrznym obiegiem instalacji budynku. W dolnej części schematu została zamieszczona sieć ciepłownicza (SC). Na rysunku sieć ciepłownicza przedstawiona jako podziemne rurociągi (kolor czerwony dla zasilania, niebieski dla powrotu). Woda zasilająca sieć ma temperaturę 65°C - 75°C, a woda powracająca do sieci ma niższą temperaturę 35°C - 45°C. Instalacja wewnętrzna budynku znajduje się po prawej stronie schematu i została otoczona czerwoną linią przerywaną. W środku czerwonej linii przerywanej znajdują się elementy instalacji wewnętrznej. Od góry do dołu: rekuperator wentylacyjny, nagrzewnica wodna kanałowa, ogrzewanie podłogowe, ogrzewanie grzejnikowe i instalacja CWU]. Przedstawiony schemat ilustruje kompleksowy system hybrydowego ogrzewania budynku, który integruje odnawialne źródła energii z tradycyjnymi, w celu zapewnienia efektywnego i niezawodnego dostarczania ciepła. System jest zaprojektowany z myślą o budynkach spełniających standardy pasywnego budownictwa lub o niemal zerowym zużyciu energii (nZEB). Działanie węzła hybrydowego opiera się na dynamicznej priorytetyzacji źródeł ciepła, zależnej od warunków zewnętrznych i bieżącego zapotrzebowania na energię. System składa się z kilku współpracujących ze sobą kluczowych elementów. Panele fotowoltaiczne (PV) przekształcają energię słoneczną w energię elektryczną, stanowiąc podstawowe źródło zasilania dla pompy ciepła (PC). Wytworzone ciepło w PC (np. w zakresie temperatur 55°C - 65°C) jest następnie kierowane do instalacji wewnętrznej budynku dla zasilania systemu centralnego ogrzewania, przygotowania CWU i nagrzewnicy systemu wentylacji w sposób bezpośredni lub pośredni. Sieć ciepłownicza (SC) pełni rolę źródła szczytowego i uzupełniającego. W okresach największego zapotrzebowania na ciepło (np. w bardzo mroźne dni, gdy wydajność pompy ciepła spada lub zapotrzebowanie przekracza jej moc) lub w przypadku awarii, SC dostarcza energię cieplną o zoptymalizowanych parametrach (np. 65°C - 75°C).



Rys. 6. Schemat funkcjonalny hybrydowego węzła cieplnego z pompą ciepła powietrze-woda, panelami fotowoltaicznymi i ciepłem sieciowym.

Ciepło sieciowe jest również wykorzystywane do wspomagania wytwarzania ciepłej wody użytkowej. HWC jest wyposażony w inteligentny system sterowania, który optymalizuje pracę poszczególnych źródeł ciepła w zależności od pory dnia, warunków pogodowych (temperatura zewnętrzna, nasłonecznienie) oraz bieżącego zapotrzebowania na ciepło. Ciepła woda użytkowa (CWU) jest magazynowana w zbiorniku magazynowania energii cieplnej i dostępna na bieżąco. HWC również dostarcza ciepło do centrali wentylacyjnej.

4.4. Sieci ciepłownicze niskotemperaturowe i podstacje z hybrydowymi węzłami ciepła

Transformacja sektora ciepłowniczego w kierunku zrównoważonych i efektywnych energetycznie rozwiązań stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnej inżynierii energetycznej. W tym kontekście, niskotemperaturowe sieci ciepłownicze (NSC), wspierane przez hybrydowe węzły cieplne (HWC), odgrywają fundamentalną rolę w realizacji celów dekarbonizacji i zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w bilansie energetycznym miast i regionów. Rozwój systemów ciepłowniczych przeszedł przez kilka odrębnych generacji, z



których każda wprowadzała znaczące innowacje w zakresie parametrów pracy, materiałów, czy zastosowań. Zrozumienie tych etapów jest kluczowe dla oceny aktualnego stanu techniki oraz perspektyw dalszej dekarbonizacji sektora ciepłownictwa. W tabeli 2 zostały zamieszczone główne kluczowe cechy pięciu generacji sieci ciepłowniczych.

Tabela 2. Podział sieci ciepłowniczych według generacji (Buffa (2020)).

Generacja	Typowy zakres temperatur zasilania (°C)	Dominująca technologia / medium	Główne ograniczenia / wyzwania techniczne	Typowe zastosowanie / urządzenia końcowe	Charakterystyka w kontekście dekarbonizacji
1 NSC	160–210	para wodna	bardzo wysokie straty, niebezpieczeństwo, złożone zarządzanie kondensatem	grzejniki rurowe wysokociśnieniowe	niska efektywność, nie ekologiczna
2 NSC	100–125	ciepła woda pod ciśnieniem	potrzebne zbiorników ciśnieniowych, wysokie temperatury	grzejniki rurowe	poprawa bezpieczeństwa, wciąż wysokie temperatury
3 NSC	65–95	ciepła woda / preizolowane rury	wciąż wysoka temperatura dla CWU (65°C), mniejsza elastyczność	grzejniki	normy prawne, dalsze ograniczenie strat
4 NSC	50–60 (Niska) / 35–45 (Bardzo niska)	woda niskotemperaturowa	wymagania co do adaptacji budynków i instalacji wewnętrznych (CWU, ogrzewanie podłogowe)	ogrzewanie podłogowe, grzejniki, ścienne, sufitowe	efektywna dla OZE, pompy ciepła, obniżenie strat
5 NSC	0–30	temperatura otoczenia	wymaga indywidualnych pomp ciepła w węzłach prosumenckich;	ogrzewanie podłogowe, systemy działające na zasadzie podczerwieni	aktywna rola prosumentów, magazynowanie energii, wysoka



			aktywne zarządzanie		efektywność OZE
--	--	--	------------------------	--	--------------------

Głównym celem niskotemperaturowych sieci ciepłowniczych (NSC) jest praca z parametrami temperaturowymi zasilania i powrotu znacząco niższymi niż w systemach konwencjonalnych.

Zastosowanie niskotemperaturowych sieci ciepłowniczych niesie ze sobą szereg korzyści technicznych i ekonomicznych. Przede wszystkim, obniżenie temperatur dystrybucji przekłada się na minimalizację strat ciepła w całej sieci przesyłowej i dystrybucyjnej, co w konsekwencji zwiększa ogólną efektywność energetyczną całego systemu.

4.5. Koncepcja działania i elementy technologiczne hybrydowego węzła ciepłowniczego zintegrowanego z systemem ciepłowniczym czwartej generacji

Branża ciepłownictwa sieciowego ciągle się rozwija i obserwuje się tendencję do obniżania temperatur zasilania w celu zwiększenia efektywności i umożliwienia integracji szerszej gamy źródeł ciepła. Ewolucję tę często dzieli się na różne generacje sieci ciepłowniczych (Martinazzoli, 2023). Systemy ciepłownicze trzeciej generacji zazwyczaj działają przy temperaturach zasilania poniżej 100 °C i wykorzystują prefabrykowane, wstępnie izolowane rury, które są bezpośrednio zakopane w ziemi. Te niższe temperatury pomagają zmniejszyć straty ciepła w sieci dystrybucyjnej w porównaniu ze starszymi systemami o wysokiej temperaturze. Czwarta generacja systemów ciepłowniczych stanowi dalszy postęp, mający na celu dostarczanie ciepła o niskiej temperaturze (często około 50-70 °C) zarówno do istniejących, jak i nowych budynków. Systemy te są zaprojektowane tak, aby mieć niskie straty sieciowe, zdolność do recyklingu ciepła i integrowania dużych udziałów odnawialnych źródeł energii oraz zdolność do bycia zintegrowaną częścią odnawialnego systemu multienergetycznego, w tym chłodzenia. Systemy ciepłowniczo-chłodnicze piątej generacji, zwane także zimnymi systemami ciepłowniczymi, działają w jeszcze niższych temperaturach, często zbliżonych do temperatury otoczenia (około 10–25 °C). Systemy te wykorzystują sieć dwukierunkowych rur i polegają na rozproszonych pompach ciepła na poziomie budynku, aby wydobywać ciepło z sieci w celu ogrzewania lub odrzucać ciepło do niej w celu chłodzenia. Umożliwia to wysoce wydajną wymianę energii cieplnej między budynkami a siecią, minimalizując straty przesyłowe i umożliwiając wykorzystanie źródeł ciepła o bardzo niskiej jakości.



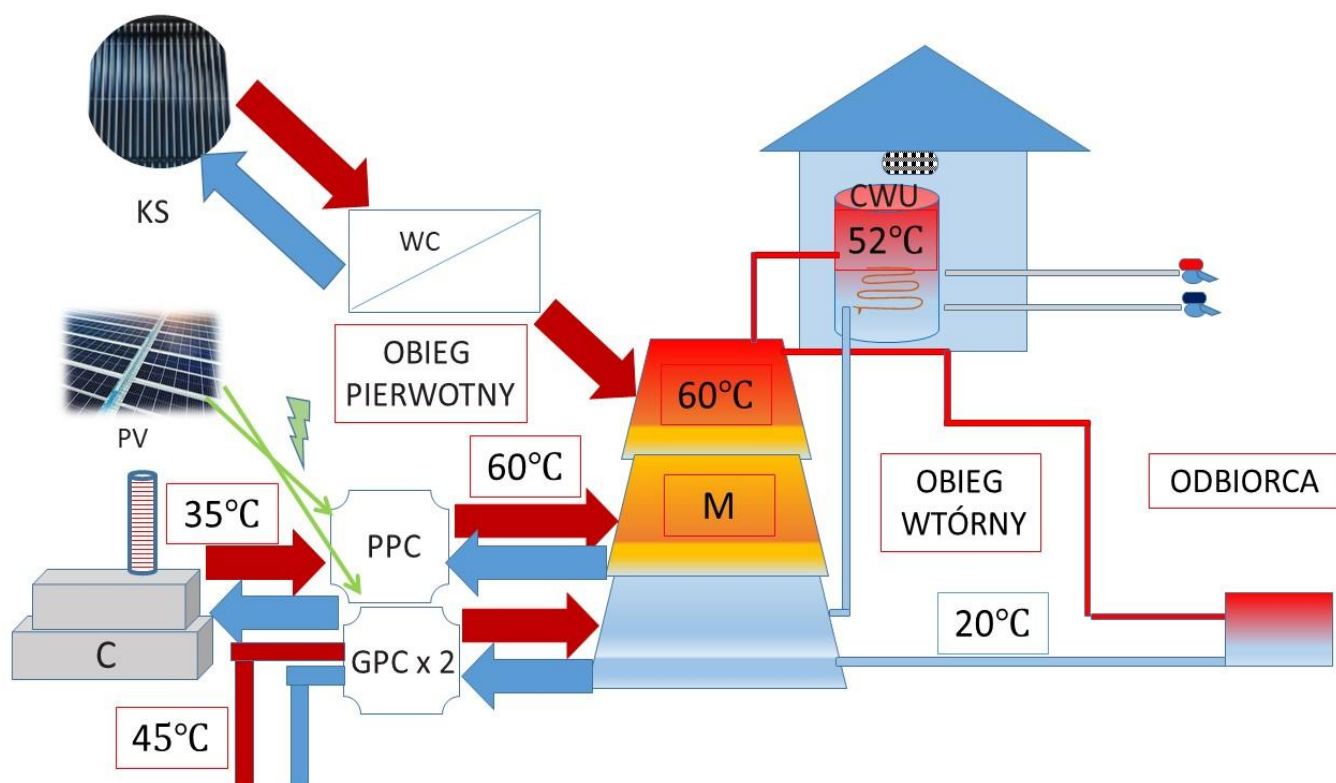
Projekt takich hybrydowych systemów grzewczych musi dokładnie uwzględniać wymagania dotyczące temperatury podłączonych budynków i zapewnić, że infrastruktura wytwarzania i dystrybucji ciepła jest zoptymalizowana pod kątem niższych temperatur roboczych.

Współczesne systemy ciepłownicze przechodzą ewolucję w kierunku wyższych generacji, w szczególności 4. i 5., które charakteryzują się znacznie obniżonymi parametrami temperaturowymi i zwiększoną zdolnością do integracji zróżnicowanych źródeł energii. Transformacja systemów ciepłowniczych do czwartej generacji wymaga znaczącej redukcji typowych temperatur wody zasilającej w obiegu pierwotnym (np. od 110°C do około 30°C) oraz temperatury wody powrotnej (np. od 60°C do około 20°C). Dla osiągnięcia takich niskich parametrów w strategicznych punktach sieci mogą być zainstalowane trójdrogowe zawory elektromagnetyczne. Głównym zadaniem zaworu trójdrogowego jest obniżenie temperatury wody zasilającej.

Schemat blokowy niskotemperaturowej sieci ciepłowniczej czwartej generacji zintegrowanej z hybrydowym węzłem ciepła został zamieszczony na rys. 7.

[Tekst alternatywny. Schemat blokowy niskotemperaturowej sieci ciepłowniczej czwartej generacji zintegrowanej z hybrydowym węzłem cieplnym. Moduły pozyskiwania energii (lewa część schematu). Kolektory Słoneczne (KS) umieszczone w lewym górnym rogu (ciemnogramatowe rury). Czerwona strzałka wskazuje przepływ ciepłego nośnika z kolektorów do wymiennika ciepła (WC), a niebieska strzałka to powrót schłodzonego nośnika do kolektorów. Panele fotowoltaiczne (PV) znajdują się poniżej KS. Symbolizują produkcję energii elektrycznej (zielona strzałka z błyskawicą), która zasila pompę ciepła. Pompa ciepła powietrze-woda (PPC) oznaczona jako "PPC". Pobiera ciepło z zewnętrznego źródła oznaczonego "C" (ciepłownia 35°C), podnosi jego temperaturę i przekazuje do obiegu pierwotnego (czerwona strzałka, 60°C). Gruntowe pompy ciepła (GPC x 2) oznaczone jako "GPC x 2" pobierają ciepło ze źródła geotermalnego (45°C), podnoszą temperaturę i również przekazują do obiegu pierwotnego (czerwona strzałka, 60°C). Obieg pierwotny i magazynowanie Ciepła (centralna część schematu). Wymiennik Ciepła (WC) odbiera ciepło z kolektorów słonecznych (KS) i przekazuje je do obiegu pierwotnego. Obieg Pierwotny (centralna lewa część schematu) zbiera ciepło ze wszystkich wymienionych źródeł (KS poprzez WC, PPC, GPC x 2). Ciepło to jest następnie kierowane do magazynu energii (M), przedstawionego jako duży, wielowarstwowy zbiornik. W magazynie, górne warstwy utrzymują temperaturę 60°C. Z magazynu (M) ciepło jest dystrybuowane do obiegu wtórnego i do produkcji ciepłej wody użytkowej (CWU) - w prawej części schematu. Do CWU (przedstawionego jako zbiornik) ciepło o temperaturze 60°C z górnej warstwy magazynu (M) jest przekazywane poprzez wężownicę, podgrzewając wodę użytkową do 52°C. Z CWU

odchodzą rury do poboru ciepłej i zimnej wody. Do obiegu wtórnego ciepło o temperaturze 60°C jest pobierane z wyższych warstw magazynu (M) i kierowane do odbiorcy końcowego. Odbiorca (przedstawiony jako prostokąt w prawym dolnym rogu) symbolizuje instalację grzewczą (np. grzejniki), która odbiera ciepło z Obiegu wtórnego. Woda powrotna z obiegu wtórnego ma temperaturę 20°C i wraca do magazynu (M). Niebieskie strzałki oznaczają przepływ chłodniejszego nośnika (powrót). Temperatuury w kluczowych punktach to 35°C (źródło dla PPC), 45°C (dolne źródło ciepła dla GPC), 60°C (temperatura w górnych warstwach magazynu), 52°C (temperatura CWU), 20°C (temperatura powrotu od odbiorcy w obiegu wtórnym)].



Rys. 7. Schemat blokowy niskotemperaturowej sieci ciepłowniczej czwartej generacji zintegrowanej z hybrydowym węzłem cieplnym.

Zgodnie ze schematem, woda o obniżonej temperaturze (np. 35 °C) z obiegu pierwotnego sieci ciepłowniczej (C) jest skierowana do powietrznej pompy ciepła (PPC). Pompa ciepła (PPC) podnosi temperaturę źródła grzewczego do poziomu 60 °C. Na kolejnym etapie czynnik grzewczy w postaci wody może być skierowany do zbiornika magazynu energii (M). Dodatkowo, w celu zwiększenia odporności systemu i wykorzystania lokalnych zasobów, hybrydowy węzeł cieplny jest zintegrowany z



geotermalnymi pompami ciepła (GPC) w których dolnym źródłem służy energia geotermalna o temperaturze około 45 °C. W GPC temperatura nośnika ciepła zostaje podniesiona do poziomu odpowiedniego do magazynowania i dystrybucji, np. do około 60 °C, a następnie jest efektywnie akumulowane w zbiorniku magazynowania energii cieplnej (M).

W celu zwiększenia efektywności i niezależności system grzewczy jest zintegrowany z dodatkowymi źródłami OZE (kolektorami słonecznymi oraz panelami fotowoltaicznymi (PV). Dodatkowym elementem zmodernizowanego systemu są kolektory słoneczne termiczne (KS). Produkcja energii elektrycznej niezbędnej do zasilania pomp ciepła i innych komponentów węzła jest wspierana przez panele fotowoltaiczne (PV), które mogą być rozmieszczone na odpowiednich powierzchniach.

Zgromadzona w zbiorniku (M) woda gorąca (np. o temperaturze 60 °C) jest następnie dystrybuowana do odbiorców końcowych. Może być ona kierowana do wewnętrznej instalacji ogrzewania pomieszczeń (np. ogrzewania podłogowego lub grzejnikowego). Równocześnie, poprzez węzownicę grzewczą, ciepło jest przekazywane do zasobnika ciepłej wody użytkowej (CWU). Cały system jest nadzorowany i optymalizowany przez inteligentne systemy sterowania i automatyki, takie jak modelowe sterowanie predykcyjne (MSP). MSP wykorzystuje dynamiczne modele do przewidywania zachowania systemu i optymalizowania działań, co pozwala na uzyskanie optymalnej decyzji. Na podstawie analizy zapotrzebowania na ciepło budynku, prognozy pogody i taryfy czasowe, kontroler MSP może decydować o bezpośrednim dostarczaniu energii z odnawialnych źródeł lub jej magazynowaniu.

5. Zasady projektowania hybrydowych węzłów cieplnych

Projektowanie hybrydowych węzłów cieplnych stanowi kompleksowe wyzwanie inżynierskie, wymagające starannego podejścia na każdym etapie. Jego nadrzędnym celem jest stworzenie zintegrowanego systemu, zdolnego do efektywnego łączenia co najmniej dwóch odmiennych źródeł energii, w celu optymalnego zaspokojenia zapotrzebowania na ciepło, a w zależności od konfiguracji, również na chłodzenie oraz ciepłą wodę użytkową.

5.1. Optymalizacja integracji wielu źródeł ciepła

W systemach grzewczych zintegrowanych z hybrydowymi węzłami cieplnymi na poziomie budynku najbardziej rozpowszechnionej strategią jest stosowanie pompy ciepła jako głównego źródła ciepła w wyższych temperaturach ze względu na jej efektywność w przenoszeniu ciepła. Gdy temperatura na zewnątrz spada do punktu,



w którym sprawność pompy ciepła też zaczyna spadać, system przełącza się na piec lub kocioł, który może skuteczniej generować ciepło w chłodniejszych warunkach. Określenie tego punktu przełączenia, często określanego jako punkt równowagi, jest krytycznym parametrem projektowym, który bezpośrednio wpływa na ogólną wydajność energetyczną i opłacalność systemu.

W przypadku systemów ciepłowniczych integracja wielu źródeł ciepła ma szerszy zakres. Systemy te często obejmują różnorodne technologie energetyczne, takie jak elektrociepłownie, kotły na biomasę i pompy ciepła, kolektory słoneczne. Na przykład elektrownie kogeneracyjne mogą zapewnić stabilne obciążenie podstawowe ciepła, jednocześnie wytwarzając energię elektryczną. Pompy ciepła w ciepłownictwie miejskim mogą wykorzystywać różne źródła niskotemperaturowe, takie jak przemysłowe ciepło odpadowe lub woda z otoczenia. Strategia integracji musi również uwzględniać, w jaki sposób te różne źródła mogą się wzajemnie uzupełniać. Skuteczna integracja wielu źródeł ciepła wymaga gruntownego zrozumienia jak będą zmieniać się sprawności i charakterystyki operacyjne w różnych warunkach. Na przykład pompy ciepła powietrzne doświadczają spadku wydajności wraz ze spadkiem temperatury zewnętrznej, podczas gdy kotły kondensacyjne osiągają najwyższą wydajność przy niższych temperaturach wody powrotnej. Projekt systemu hybrydowego musi uwzględniać te niuanse, aby opracować strategię sterowania, które mogą optymalnie rozdysponować każde źródło w oparciu o panujące warunki i ogólne zapotrzebowanie na ogrzewanie lub chłodzenie.

5.2. Dopasowanie wytwarzania ciepła do profili zapotrzebowania

Kolejną zasadą projektowania jest dokładne dopasowanie wydajności hybrydowych węzłów ciepłych do konkretnych profili obciążenia grzewczego i chłodniczego obsługiwanego przez nią budynku lub osiedla. Wymaga to szczegółowej analizy zapotrzebowania na energię, uwzględniającej takie czynniki, jak wielkość i poziom izolacji budynków, harmonogramy użytkowania oraz lokalny klimat. W przypadku poszczególnych budynków obejmuje to obliczenie szczytowego zapotrzebowania na ogrzewanie i chłodzenie, a także średniego zużycia energii w ciągu roku. Informacje te są kluczowe dla doboru komponentów o odpowiedniej wydajności i zaprojektowania systemu. W kontekście ciepłownictwa sieciowego obliczenie i analiza wykresu zapotrzebowania na ciepło wszystkich podłączonych budynków jest kluczowe dla określenia wielkości centralnych instalacji wytwarzających ciepło oraz wszelkich instalacji magazynujących energię cieplną. Zapotrzebowanie na ciepło w rejonowe może znacząco wahać się w zależności od pory dnia i sezonu, co wymaga połączenia źródeł generacji obciążenia podstawowego i szczytowego w celu zapewnienia niezawodnego i wydajnego zasilania.



5.3. Strategie sterowania zapewniające efektywne przełączanie i działanie różnych komponentów

Dla efektywnej pracy hybrydowych węzłów cieplnych niezbędne są zaawansowane systemy sterowania, które umożliwiają płynne przełączanie i skoordynowaną pracę wielu źródeł ciepła. Systemy te często wykorzystują inteligentne termostaty i zaawansowane algorytmy do monitorowania różnych parametrów, w tym temperatury wewnętrznej i zewnętrznej, cen energii i preferencji użytkowników, a następnie automatycznie wybierają najodpowiedniejsze źródło ciepła lub kombinację źródeł w celu zaspokojenia bieżącego zapotrzebowania.

W przypadku systemów ciepłowniczych wymagania dotyczące kontroli są jeszcze bardziej złożone ze względu na obecność wielu urządzeń wytwarzających ciepło i potencjalnie magazynujących energię cieplną. System sterowania musi zarządzać źródłami na podstawie takich czynników, jak ich sprawność, koszty operacyjne, dostępność i ogólne zapotrzebowanie sieci na ciepło. Musi również nadzorować ładowanie i rozładowywanie magazynów ciepła, aby zoptymalizować wykorzystanie nieregularnej energii odnawialnej i skutecznie zarządzać obciążeniami szczytowymi.

6. Algorytm projektowania hybrydowych węzłów cieplnych

Analiza wstępna i określenie celów. Na tym etapie ustala się, jakie są cele użytkownika w zakresie zapotrzebowania na ciepło, komfortu cieplnego, oszczędności energetycznych oraz ekologicznych. Przeprowadza się analizę dostępnych źródeł ciepła (oprócz sieci ciepłowniczej), takich jak pompy ciepła, kolektory słoneczne, systemy fotowoltaiczne, kotły gazowe lub na biomasę. Należy ustalić granice projektu (np. obszar budynku, zasięg sieci ciepłowniczej, zakres instalacji OZE).

Obliczenia bilansu cieplnego. Ten etap obejmuje określenie miesięcznego i rocznego zapotrzebowania na ciepło w zależności od rodzaju obiektu, jego wielkości, użytkowania i lokalizacji. Wykonuje się obliczenia zapotrzebowania na energię cieplną w różnych okresach roku. Uwzględnia się sezonowe zmiany zapotrzebowania na ciepło i wpływ warunków atmosferycznych, a także zmiany w użytkowaniu obiektu.

Dobór i wybór źródeł ciepła. Na podstawie wcześniejszej analizy dokonuje się doboru źródeł ciepła, które będą tworzyć system hybrydowy. Ważne jest dopasowanie tych źródeł do zapotrzebowania oraz dostępnych zasobów lokalnych (np. pompy ciepła, energia słoneczna, kotły, sieć ciepłownicza). Oblicza się moc poszczególnych źródeł ciepła oraz ich udział w całkowitym bilansie cieplnym, aby system mógł działać w



sposób optymalny. Analizuje się efektywność każdego źródła ciepła, a także wpływ jego zastosowania na koszty eksploatacji i ochronę środowiska.

Projektowanie systemu automatyki i sterowania. Na tym etapie ustala się, jak system będzie przełączał się między źródłami ciepła w zależności od zapotrzebowania, warunków pogodowych i dostępności źródeł. W zależności od wybranych źródeł ciepła tworzy się algorytmy, które pozwolą na automatyczne zarządzanie pracą systemu i optymalizację zużycia energii.

Projektowanie instalacji technologicznych i elektrycznych. W zależności od rodzaju dostępnych źródeł ciepła, dokonuje się dobór instalacji technologicznych (wymyenniki ciepła, pompy obiegowe, zbiorniki akumulacyjne) oraz dobiera odpowiednią średnicę rur i zawory. Należy zaprojektować sieć wewnętrzną dystrybucji ciepła, uwzględniając temperaturę czynnika grzewczego, długość i rodzaj rur oraz elementy zabezpieczające.

Projektowanie systemu monitoringu i diagnostyki. Na etapie projektowania systemów monitorujących parametry pracy, określa się, jakie dane będą zbierane w celu monitorowania efektywności systemu oraz identyfikowania potencjalnych problemów w działaniu węzła ciepłowniczego.

Optymalizacja kosztów i analiza ekonomiczna. Należy obliczyć koszty związane z realizacją projektu, w tym koszty urządzeń, materiałów, instalacji, a także koszty uruchomienia. Przeprowadza się analizę kosztów eksploatacji systemu hybrydowego, w tym koszty energii, konserwacji, oraz potencjalne oszczędności wynikające z zastosowania OZE.

Wykonanie montażu instalacji. Na tym etapie należy zamontować wszystkie elementy systemu, a po zakończeniu przeprowadzić testy i uruchomienie.

7. Spis literatury

Buffa, S., Soppelsa, A., Pipiciello, M., Henze, G., & Fedrizzi, R. (2020). Fifth-Generation District Heating and Cooling Substations: Demand Response with Artificial Neural Network-Based Model Predictive Control. *Energies*, 13(17), 4339. <https://doi.org/10.3390/en13174339>

Martinazzoli, G., Pasinelli, D., Lezzi, A. M., & Pilotelli, M. (2023). Design of a 5th Generation District Heating Substation Prototype for a Real Case Study. *Sustainability*, 15(4), 2972. <https://doi.org/10.3390/su15042972>

Sarbu, I., Mirza, M., & Muntean, D. (2022). Integration of Renewable Energy Sources into Low-Temperature District Heating Systems: A Review. *Energies*, 15(18), 6523. <https://doi.org/10.3390/en15186523>



*Na etapie opracowywania niniejszych materiałów dydaktycznych wykorzystano wiedzę 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