



Hybrydowe węzły ciepłne

Hybrid district heating substations



Mgr inż. Łukasz Trzcinski

ORCID ID: [0000-0002-6064-2633](https://orcid.org/0000-0002-6064-2633)
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Politechnika Częstochowska
lukasz.trzcinski@pcz.pl



Dr hab. inż. Michał Turski

ORCID ID: [0000-0002-4341-3062](https://orcid.org/0000-0002-4341-3062)
Wydział Infrastruktury i Środowiska,
Politechnika Częstochowska
michal.turski@pcz.pl

Słowa kluczowe: miejskie systemy ciepłownicze 4G, hybrydowe węzły ciepłne, efektywny energetycznie system ciepłowniczy i chłodniczy, transformacja energetyczna

Streszczenie

Integracja odnawialnych źródeł energii z sieciami ciepłowniczymi trzeciej generacji i starszymi stanowi istotne wyzwanie technologiczne z uwagi na ich wysokotemperaturowy i jednokierunkowy charakter przesyłu ciepła. Elementem nowoczesnych systemów ciepłowniczych, łączącym ich rozszerzone funkcje, są hybrydowe węzły ciepłne. Literatura wskazuje, że zastosowanie hybrydowych węzłów ciepłnych pozwala obniżyć zużycie ciepła o 35-65%. Definicje hybrydowych węzłów ciepłnych często są niejednoznaczne, z tej przyczyny w niniejszym artykule przeanalizowano definicje i funkcje hybrydowych węzłów ciepłnych, obejmujące integrację odnawialnych źródeł energii, magazynowanie ciepła, dwukierunkową wymianę ciepła, chłodzenie oraz inteligentne zarządzanie. Najczęściej stosowane funkcje to integracja źródeł i magazynowanie, natomiast chłodzenie i wymiana dwukierunkowa nie są jeszcze stosowane w praktycznych rozwiązaniach, z tej przyczyny zaproponowano kompleksowe uwzględnienie wszystkich funkcji jako równoważnych oraz rozszerzenie i ujednolicenie definicji hybrydowego węzła ciepłnego.

Keywords: 4G district heating systems, hybrid district heating substations, energy-efficient heating and cooling systems, energy transformation

Abstract

Integrating renewable energy sources with third-generation and older district heating networks causes a significant technological challenge due to their high-temperature and one-way heat transfer characteristics. Hybrid district heating substations are a component of modern district heating systems that combine their expanded functions. Literature indicates that the use of hybrid district heating substations can reduce heat consumption by 35-65%. Definitions of hybrid district heating substations are often ambiguous. Therefore, we analysed the definitions and functions of hybrid district heating substations, including the integration of renewable energy sources, heat storage, two-way heat exchange, cooling, and intelligent management. The most frequently developed functions are source integration and heat storage, while cooling and two-way heat exchange are not yet implemented in practical solutions. Therefore, a comprehensive consideration of all functions as equivalent and an expansion and unification of the definition of a hybrid district heating substation were proposed.

Wstęp

Integracja odnawialnych źródeł energii (OZE) z systemami ciepłowniczymi obecnej – trzeciej generacji (3G), stanowi szereg wyzwań technologicznych i organizacyjnych (Lund et al., 2021). Systemy te były projektowane w czasach, gdy głównym celem było dostarczanie ciepła w sposób scentralizowany, w strukturze hierarchicznej (Kreft, 2010, Simpson et al., 2024). Z tego powodu dostosowanie ich do współczesnych wymagań związanych z dekarbonizacją i efektywnością energetyczną jest niezwykle trudne (Baba et al., 2023). Problemy te dotyczą przede wszystkim wysokotemperaturowych parametrów pracy sieci ciepłowniczych, które nie są dostosowane do współpracy z rozproszonymi i niskotemperaturowymi źródłami ciepła (Østergaard et al., 2022). Innymi czynnikami hamu-

jącymi rozwój systemów ciepłowniczych są: jednokierunkowy przepływ ciepła (Østergaard et al., 2022, Stokowiec et al., 2023), duża skala systemów ciepłowniczych (David et al., 2017), problemy z regulacją temperatury powrotu (Henrik et al., 2021), brak magazynowania ciepła w starszych systemach (Turski, 2023).

Jednym ze sposobów na dostosowanie funkcjonalności systemów ciepłowniczych do osiągnięcia standardu nowszej generacji 4G (Henrik et al., 2021) lub standardu efektywnego energetycznie systemu ciepłowniczego lub chłodniczego (UE, 2023) jest wykorzystanie technologii hybrydowych węzłów ciepłnych (HWC).

Hybrydowe węzły ciepłne

HWC są coraz częściej analizowane w kontekście mo-

dernizacji systemów ciepłowniczych i poprawy efektywności energetycznej, a także dostosowania wykorzystania OZE do idei miast przyszłości oraz inteligentnego zarządzania ciepłem (Maier, 2016). Jednak autorzy publikacji naukowych oraz przedsiębiorstwa ciepłownicze definiują HWC w niejednolity sposób, dlatego uznaje się za celowe poszerzenie wiedzy w tym zakresie.

HWC w przedsiębiorstwach ciepłowniczych

HWC według Okręgowego Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej sp. z o.o. (OPEC) to nowoczesny układ technologiczny łączący różne źródła ciepła. Połączenie dotyczy przede wszystkim miejskiej sieci ciepłowniczej z OZE oraz pomp ciepła, kolektorów słonecznych, paneli fotowoltaicznych (PV), czy kotłów elektrycznych. Jego podstawowym zadaniem jest zapewnienie efektywnego, bezpiecznego i elastycznego dostarczania ciepła przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia ciepła sieciowego oraz redukcji emisji CO₂. System taki wyposażony jest w zaawansowaną automatykę umożliwiającą dynamiczne przełączanie między źródłami ciepła w zależności od warunków pogodowych, zapotrzebowania użytkowników i efektywności pracy poszczególnych urządzeń. Integralnym elementem układu jest akumulator ciepła (bufor) umieszczony po stronie wtórnej instalacji, który może być ładowany zarówno z sieci ciepłowniczej, jak i z OZE, a rozładowywany na potrzeby centralnego ogrzewania, ciepłej wody użytkowej lub wentylacji. HWC powinien być kompatybilny z systemami zarządzania energią budynków (Building Energy Management Systems, BEMS), wyposażony w układy monitoringu i raportowania oraz dostosowany do pracy w różnych warunkach eksploatacyjnych. OPEC zaleca, by jego projektowanie obejmowało analizę cieplną obiektu, dobór źródeł ciepła, opracowanie systemu sterowania, zabezpieczeń i monitoringu oraz wykonanie analiz ekonomicznych i środowiskowych. Kluczowe założenia projektowe obejmują minimalną ingerencję w istniejący układ hydrauliczny, maksymalne wykorzystanie OZE, modularną budowę ułatwiającą prefabrykację i modernizację oraz elastyczność konfiguracji akumulatorów ciepła. W przypadku nowych budynków przewiduje się rezerwację miejsca na dachu lub na działce pod instalację OZE, zapewnienie odpowiednich tras kablowych i rurociągów, a także zaprojektowanie pomieszczenia węzła cieplnego o odpowiednich wymiarach i dostępności serwisowej. HWC w ujęciu OPEC stanowi więc zintegrowany, inteligentny system dystrybucji ciepła, który łączy niezawodność miejskiej sieci ciepłowniczej z efektywnością i ekologicznym potencjałem OZE (OPEC, 2025).

Veolia Energia Warszawa definiuje HWC nazywany „ciepłomatem” jako innowacyjny system zarządzania ciepłem, łącząc ciepło systemowe z lokalnymi odnawialnymi źródłami energii. Taki system podnosi budynek odbiorcy końcowego do rangi prosumenta, tym samym zapewniając redukcję kosztów eksploatacji budynku, komfort użytkowników oraz dostosowanie się do coraz bardziej restrykcyjnych wymagań środowiskowych. System ten umożliwia redukcję zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną o 32%, w porównaniu do tradycyjnych budynków. Według szacunków modernizowany biurowiec „Office House” zasili warszawską sieć ciepłowniczą taką ilością ciepła, jakiej rocznie potrzeba do ogrzania około

800 mieszkań (Veolia, 2025).

„PGE Energia Ciepła” zrealizowało dwie pilotażowe instalacje HWC w Toruniu i Zgierzu. W ujęciu PGE HWC to inteligentny, zintegrowany system umożliwiający sterowanie i bilansowanie ciepła pomiędzy centralnym źródłem ciepła a lokalnymi źródłami odnawialnymi, wspierający transformację w kierunku niskoemisyjnego i elastycznego systemu ciepłowniczego. Jego głównym zadaniem jest integracja tradycyjnego węzła cieplnego z rozproszonymi źródłami OZE oraz lokalnym magazynem ciepła, działającym w oparciu o inteligentny system automatycznego sterowania. System ten pozwala na inteligentne zarządzanie produkcją i dostawami ciepła do odbiorców końcowych, łączenie ciepła systemowego z lokalnymi źródłami, takimi jak pompy ciepła, instalacje fotowoltaiczne i magazyny ciepła, zwiększenie bezpieczeństwa i elastyczności dostaw, optymalizację efektywności energetycznej poprzez minimalizację strat w sieci, a także wykorzystanie lokalnych źródeł ciepła w celu redukcji zużycia energii pierwotnej i emisji CO₂, zgodnie z wymaganiami WT2021 i krajową polityką dekarbonizacji (PGE, 2025).

HWC w literaturze naukowej

W literaturze naukowej istnieje kilka podejść do definiowania HWC. Klimaczak, Kołek i in. określają HWC jako inteligentny system integrujący akumulator ciepła, współpracujący z różnymi źródłami energii, takimi jak system ciepłowniczy, kolektory słoneczne oraz pompy ciepła zasilane ogniwami fotowoltaicznymi (Klimczak et al., 2022). Petela oraz Szlek rozszerzają definicję, podkreślając dwukierunkową hybrydyzację, która łączy systemy grzewcze, chłodnicze i magazynowania ciepła, umożliwiając odzysk ciepła odpadowego (Petela et al., 2019). Hassine oraz Eicker postrzegają HWC jako elementy sieci ciepłowniczej zdolne do dostosowania potencjału energii słonecznej do zasilania systemów grzewczych i chłodniczych (Hassine et al., 2013). Andersen, Chen i in. podkreślają inteligentne zarządzanie ciepłem, wykorzystując różne źródła ciepła i technologie magazynowania w celu optymalizacji kosztów (Andersen et al., 2014). Z kolei Han, Sun i in. skupiają się na integracji systemów chłodniczych, w tym hybrydowych chłodziarek absorpcyjno-sprężarkowych (Han et al., 2013). Siddiqui, El-Shaarawi i in. wskazują na połączenie technologii magazynowania ciepła i chłodu, co prowadzi do zwiększenia efektywności cyklu chłodniczego (Siddiqui et al., 2014). Perez-Mora, Bava i in. traktują HWC jako funkcjonalny odpowiednik transformatorów w sieci elektroenergetycznej, realizujący w tym przypadku dwukierunkowy transfer ciepła (Perez-Mora et al., 2018). Yang, Li i in. podkreślają zastosowanie HWC w zdecentralizowanych systemach niskotemperaturowych (Yang et al., 2016), natomiast (Sdringola et al., 2023) opisują je jako podstację wymiany ciepła, wspierającą integrację lokalnych źródeł ciepła z siecią ciepłowniczą.

Możliwe jest zatem wyodrębnienie kilku kluczowych funkcji HWC: integracja ciepła sieciowego i OZE, magazynowanie ciepła, dwukierunkowa wymiana ciepła, chłodzenie i inteligentne zarządzanie.

Klimaczak i Kołek wdrożyli HWC w szkole, zastępując zasobnik c.w.u. 1000 litrów buforem ciepła o pojemności 2000 litrów. System o mocy 250 kW dla CO i 50 kW dla CWU ładowano z sieci ciepłowniczej oraz z kolektorów

słonecznych i pomp ciepła. Uzyskano oszczędności zakupu ciepła na poziomie 35–65%. Wdrożenie technologii Przemysł 4.0, obejmujących automatyzację, Internet rzeczy (Internet of things, IoT) i analizę danych w chmurze, umożliwiło redukcję kosztów eksploatacji ograniczenie szczytowego poboru mocy i poprawę stabilności sieci (Klimczak et al., 2022).

Hassine i Eicker opracowali model sieci ciepłowniczej i chłodniczej do symulacji hydrauliczno-termicznej z wykorzystaniem teorii grafów i algorytmu Newtona. Walidację przeprowadzono w Scharnhauser Park w Niemczech dla systemu zasilanego w 66% biomasą. Uzyskano współczynnik Primary Energy Factor (PEF) na poziomie 0,4 oraz straty ciepła na poziomie 13%. Optymalizacja rozmieszczenia odbiorców ciepła miała niewielki wpływ na zużycie energii pierwotnej i emisję CO₂. Przyjęto strategię polegającą na dostarczaniu ciepła z kolektorów słonecznych do rury powrotnej blisko źródła ciepła, zwiększono uzysk ciepła z kolektorów, jednak konieczność zastosowania dodatkowych pomp obiegowych zwiększyła koszty operacyjne (Hassine et al., 2013).

Perez-Mora i Bava przeanalizowali system SDH w Braedstrup w Danii z kolektorami słonecznymi o powierzchni 18 600 m² i sezonowym magazynem 19 000 m³, pokrywający 15% rocznej produkcji ciepła (435 kWh/m²a). Zastosowanie pompy ciepła o mocy 1,2 MW zwiększyło efektywność wykorzystania energii słonecznej, a optymalna konfiguracja magazynów i integracja pomp ograniczyły zużycie paliw kopalnych i poprawiły bilans ekonomiczny systemu. Autorzy wykazali, że optymalna konfiguracja magazynów oraz integracja pomp ciepła pozwalają na dalszą redukcję zużycia paliw kopalnych i poprawę bilansu ekonomicznego systemu ciepłowniczego (Perez-Mora et al., 2018).

Carpaneto, Lazzeroni i in. opracowali optymalizację zarządzania magazynem ciepła w systemach hybrydowych, obejmujących kogenerację (CHP), kocioł gazowy, kolektory słoneczne i magazyn ciepła. Model matematyczny uwzględniał 15 795 zmiennych, w tym 504 binarne oraz 11 092 ograniczenia, a optymalizacja była przeprowadzana w skali tygodniowej z podziałem godzinowym. Wyniki wykazały, że roczny udział energii słonecznej w systemie wyniósł 6,33%, podczas gdy bez magazynu realnie wykorzystano jedynie 2,63%, co potwierdza kluczową rolę magazynowania w pełnym zagospodarowaniu dostępnej energii odnawialnej. Analiza kosztowa wskazała, że energia słoneczna bez magazynu obniżyła koszty operacyjne o 4,8%, natomiast zastosowanie magazynu zwiększyło oszczędności do 12,5%, podkreślając jego znaczenie dla optymalizacji kosztowej i efektywności energetycznej (Carpaneto et al., 2015).

W odrębnym badaniu, Szczęśniak, Bujalski i in. zintegrowali adsorpcyjną pompę ciepła SORTECH eCoo 2.0 z magazynem ciepła opartym na materiałach zmiennofazowych (PCM), co umożliwiło trzykrotne zwiększenie dostępności chłodu. Analiza przeprowadzona dla warunków klimatycznych Poznania wykazała, że system pozwalał na zwiększenie zużycia ciepła latem bez konieczności modernizacji infrastruktury sieciowej, co znacząco poprawiło efektywność ekonomiczną. Kluczowym wyzwaniem była niska temperatura w sieci latem (~60°C), którą skutecznie kompensowały instalacje fotowoltaiczne oraz magazyny

PCM, co sugeruje możliwość zastosowania tej technologii w modernizacji istniejących systemów ciepłowniczych w celu poprawy ich efektywności i stabilności pracy (Szczęśniak et al., 2021).

Yang, Li i in. badali zdecentralizowane podstacje w systemach niskotemperaturowego ciepłownictwa (LTDH, 55°C), gdzie redukcja strat ciepła o 30% rocznie była możliwa dzięki eliminacji cyrkulacji c.w.u., a zastosowanie wężla bezpośredniego (in-line) i pompy ciepła zmniejszyło straty o 12%. Dodatkowo, koszty operacyjne systemu spadły o 18%, co potwierdziło skuteczność zdecentralizowanych węzłów w poprawie efektywności energetycznej (Yang et al., 2016).

Sdringola, Ricci i in. badali modelowanie dwukierunkowej podstacji wymiany ciepła dla sieci ciepłowniczych, umożliwiającej integrację prosumentów termicznych. Ich celem było opracowanie dynamicznego modelu podstacji wykorzystującego język Modelica i oprogramowanie Dymola, a następnie jego walidacja na podstawie eksperymentalnych danych. Przeprowadzili symulacje pracy podstacji w różnych warunkach, analizując m.in. zmienną efektywność wymienników ciepła, regulację temperatur i przepływów oraz zdolność systemu do odprowadzania nadmiaru ciepła do sieci. Wyniki badań wykazały wysoką zgodność modelu numerycznego z rzeczywistą pracą systemu, co potwierdziło jego przydatność do dalszych analiz, szczególnie w kontekście modernizacji sieci ciepłowniczych i integracji rozproszonych źródeł energii odnawialnej (Sdringola et al., 2023).

Petela i Szlek przeprowadzili modelowanie systemów chłodniczych zintegrowanych z OZE w TRNSYS, obejmujących kolektory słoneczne, chłodziarkę absorpcyjną LiBr-H₂O (20 kW), hybrydową chłodziarkę adsorpcyjno-sprężarkową (50 kW) oraz magazyny ciepła (70–90°C, ~8°C, ~36°C), wykazując, że dynamiczna regulacja przepływów ciepła znacząco zwiększa efektywność chłodzenia i redukuje zapotrzebowanie na energię pomocniczą, przy poprawie COP chłodziarki absorpcyjnej z 0,8 do 0,87 i osiągnięciu 0,826 dla chłodziarki adsorpcyjnej (Petela et al., 2019).

Han, Sun i in. opracowali hybrydowy system chłodniczy absorpcyjno-sprężarkowy (NH₃-H₂O) wykorzystujący kaskadowo ciepło jawne spalin. Ciepło wysokotemperaturowe (350–204,8°C) służy do wytwarzania pary NH₃-H₂O i produkcji energii elektrycznej, a ciepło niskotemperaturowe (204,8–118°C) do wytwarzania chłodu. W porównaniu z konwencjonalnym układem NH₃-H₂O ARS, różnica temperatur w wymiennikach spalin zmniejszyła się o 110°C, co zwiększyło sprawność systemu. Współczynnik COP wynosi 0,71, czyli o 41,9% więcej niż w systemie tradycyjnym. COP wzrasta z 0,67 do 0,71 przy wzroście temperatury spalin z 300°C do 350°C oraz z 0,71 do 1,04 przy spadku temperatury wody chłodzącej z 30°C do 10°C. Nie stwierdzono istotnych przeszkód technologicznych we wdrożeniu systemu (Han et al., 2013).

Siddiqui, El-Shaarawi i in. przeprowadzili analizę egzergoeconomiczną hybrydowego cyklu magazynowania chłodu (HSAR), stanowiącego zintegrowany układ akumulacji i odzysku energii chłodniczej, w którym procesy magazynowania ciepła, absorpcji i generacji są połączone w jeden cykl termodynamiczny. Autorzy skoncentrowali się na stratach egzergii, sprawności egzergetycznej kom-

ponentów i całego systemu oraz wpływie kluczowych parametrów operacyjnych, takich jak temperatura skraplacza/absorbera ($28^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$), temperatura parownika (5°C) i temperatura generatora (120°C), wykazując, że optymalizacja temperatur skraplacza i generatora poprawia efektywność systemu, a największe straty egzergii występują w wymiennikach ciepła, co przełożyło się na wzrost sprawności egzergetycznej o 12% oraz zwiększenie efektywności energetycznej dzięki lepszemu zarządzaniu energią w cyklu chłodzenia (Siddiqui et al., 2014).

Skagestad i Mildenstein opracowali koncepcję inteligentnych algorytmów sterowania które optymalizują zużycie energii. Obejmują one automatyczną regulację zużycia energii w zależności od aktualnych cen energii elektrycznej, umożliwiając działanie w okresach tańszej taryfy w celu minimalizacji kosztów. Predyktoryjne sterowanie opiera się na prognozach produkcji ciepła z kolektorów słonecznych oraz przewidywanym zapotrzebowaniu na ciepło, co pozwala na dynamiczne dostosowanie parametrów pracy systemu. Integracja technologii IoT, czujników i algorytmów analitycznych umożliwia bieżące monitorowanie i zarządzanie systemem grzewczym w sposób zautomatyzowany i zoptymalizowany (Skagestad et al., 2022). Natomiast Andersen, Chen i in. potwierdzili, że inteligentne sterowanie w systemach ogrzewania słonecznego, obejmujących kolektory 9 m^2 i zbiorniki 750 litrów, obniża koszty produkcji ciepła o 25% poprzez dostosowanie zużycia do zmiennej taryfy cen energii elektrycznej, zwiększając efektywność wykorzystania energii odnawialnej (Andersen et al., 2014).

Podsumowanie i wnioski

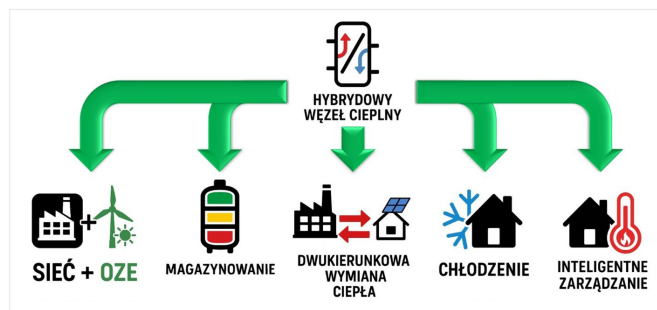
Obecne interpretacje oraz realizacje HWC wskazują je jako kluczowy element integracji odnawialnych źródeł energii z systemem ciepłowniczym, a tym samym stanowią podstawę transformacji systemów ciepłowniczych w kierunku zwiększenia efektywności energetycznej oraz wdrażania koncepcji systemów ciepłowniczych nowej generacji. HWC umożliwiają efektywne dostarczanie, odbiór i magazynowanie ciepła, co stabilizuje pracę całego systemu i zwiększa jego elastyczność operacyjną. Dostosowanie systemów ciepłowniczych do współpracy z HWC umożliwia redukcję strat przesyłowych, zwiększenie sprawności źródeł oraz efektywne wykorzystanie pomp ciepła, kolektorów słonecznych i odzysku ciepła odpadowego.

Pomimo dostrzegania kluczowej roli HWC, zarówno przez przedsiębiorstwa ciepłownicze, jak również środowisko naukowe, dochodzi do marginalizowania ich funkcji. Spośród dostępnych rozwiązań koncepcyjnych i pilotaży można wyróżnić wiodące funkcje HWC, do których zalicza się: integrację ciepła sieciowego i OZE, magazynowanie ciepła, dwukierunkową wymianę ciepła, chłodzenie oraz inteligentne zarządzanie. Do najczęściej stosowanych rozwiązań należą funkcje integracji ciepła sieciowego i OZE, krótkoterminowego magazynowania ciepła oraz lokalnej automatyzacji w ograniczonym zakresie. Brak koordynacji i komunikacji między węzłami ciepłnymi ogranicza efektywność całego systemu. Funkcje pełnej dwukierunkowej wymiany ciepła z siecią oraz chłodzenia wciąż są rzadko stosowane, co ogranicza praktyczne wykorzystanie potencjału technologicznego HWC. Ponadto wprowadzenie

zaawansowanej automatyki predykcyjnej i komunikacji pomiędzy węzłami jest kluczowe dla umożliwienia dynamicznej, dwukierunkowej wymiany ciepła oraz optymalnego wykorzystania nadwyżek energii cieplnej.

W naszej opinii najistotniejsze jest jednak kompleksowe uwzględnienie wszystkich funkcji HWC jako równoważnych. Aby usystematyzować informacje na temat HWC dostępne w literaturze proponujemy rozszerzenie i ujednolicenie ich definicji, co zostało zobrazowane na rys. 1.

Hybrydowy węzeł ciepłny należy definiować jako zintegrowany układ technologiczny, w którego skład wchodzi pompy, wymienniki ciepła, aparatura kontrolno-pomiarowa oraz system automatyki umożliwiający inteligentne zarządzanie pracą węzła, z dwukierunkową wymianą ciepła jako priorytetem. Węzeł ten powinien realizować wszystkie kluczowe funkcje nowoczesnych systemów ciepłowniczych, obejmujące: integrację ciepła sieciowego i odnawialnych źródeł energii, magazynowanie ciepła, dwukierunkową wymianę ciepła pomiędzy siecią a odbiorcą, chłodzenie oraz inteligentne zarządzanie oparte na automatyce predykcyjnej i komunikacji z innymi węzłami.



Rys. 1. Wiodące funkcje hybrydowego węzła ciepłnego Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Key functions of a hybrid heating substation Source: authors' own study

Źródło finansowania

Badania naukowe zostały sfinansowane z subwencji statutowej Wydziału Infrastruktury i Środowiska, Politechniki Częstochowskiej.

Bibliografia

- Andersen, E., Chen, Z., Fan, J., Furbo, S., & Perers, B. (2014). Investigations of intelligent solar heating systems for single family house. *Energy Procedia*, 48, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.002>
- Baba, F. M., Ge, H., Zmeureanu, R., & Wang, L. L. (2023). Optimizing overheating, lighting, and heating energy performances in Canadian school for climate change adaptation: Sensitivity analysis and multi-objective optimization methodology. *Building and Environment*, 237, 110336. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110336>
- Carpaneto, E., Lazzeroni, P., & Repetto, M. (2015). Optimal integration of solar energy in a district heating network. *Renewable Energy*, 75, 714-721. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.055>
- David, A., Mathiesen, B. V., Averfalk, H., Werner, S., & Lund, H. (2017). Heat roadmap Europe: large-scale electric heat pumps in district heating systems. *Energies*, 10(4), 578. <https://doi.org/10.3390/en10040578>

- European Parliament and Council. (2023). Directive (EU) 2023/1791 of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast). *Official Journal of the European Union*, L 231, 1–111. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:32023L1791> (Dostęp z 17.10.2025)
- Han, W., Sun, L., Zheng, D., Jin, H., Ma, S., & Jing, X. (2013). New hybrid absorption-compression refrigeration system based on cascade use of mid-temperature waste heat. *Applied energy*, 106, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.067>
- Hassine, I. B., & Eicker, U. (2013). Impact of load structure variation and solar thermal energy integration on an existing district heating network. *Applied thermal engineering*, 50(2), 1437–1446. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.037>
- Klimczak, M., Kołek, K., & Wierzbiński, M. (2022). Hybrydowy węzeł ciepłny z systemem IT wspomagającym zarządzanie zużyciem energii w budynkach. *Nowa Energia*, nr 4(85)/2022. <https://www.cire.pl/filemanager/Materia%C5%82y%20Problemove%20%28Wies%C5%82aw%20Drozdowski%29%20/9d36c7b8f911e11df934cb69a1677956a6819e13dc049dc061bd7a3079e579d8.pdf> (Dostęp z 17.10.2025)
- Kreft, W. (2010). Hierarchiczne i rozproszone sterowanie dystrybucją energii cieplnej. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 14, 61–67.
- Lund, H., Østergaard, P. A., Nielsen, T. B., Werner, S., Thorsen, J. E., Gudmundsson, O., Arabkoohsar, A. & Mathiesen, B. V. (2021). Perspectives on fourth and fifth generation district heating. *Energy*, 227, 120520. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>
- Maier, S. (2016). Smart energy systems for smart city districts: case study Reininghaus District. *Energy, Sustainability and Society*, 6(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s13705-016-0085-9>
- OPEC Spółka z o.o. (2025). Wytyczne do projektowania i budowy węzłów hybrydowych (Wydanie 1.1, obowiązuje od 01.03.2025). <https://opecgdy.com.pl/dokumenty/pdf/2025/wytyczne-do-projektowania-i-budowy-wezlow-hybrydowych-wydanie-1.1.pdf> (Dostęp z 17.10.2025)
- Østergaard, D. S., Smith, K. M., Tunzi, M., & Svendsen, S. (2022). Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review. *Energy*, 248, 123529. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123529>
- Perez-Mora, N., Bava, F., Andersen, M., Bales, C., Lennermo, G., Nielsen, C., Furbo, S., & Martínez-Moll, V. (2018). Solar district heating and cooling: A review. *International Journal of Energy Research*, 42(4), 1419–1441. <https://doi.org/10.1002/er.3888>
- Petela, K., & Szlek, A. (2019). Control algorithm for an advanced hybrid heating and cooling node—Analysis of its potential. *Energy Conversion and Management*, 201, 112087. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112087>
- PGE Energia Ciepła S.A. (2023, 22 listopada). PGE Energia Ciepła uruchomiła innowacyjną instalację Hybrydowego Węzła Ciepła. <https://pgeenergaciepla.pl/aktualnosci/pge-energia-ciepła-uruchomiła-innowacyjną-instalację-hybrydowego-wezła-ciepła> (Dostęp z 17.10.2025)
- Sdringola, P., Ricci, M., Ancona, M. A., Gianaroli, F., Capodaglio, C., & Melino, F. (2023). Modelling a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers. *Sustainability*, 15(6), 4938. <https://doi.org/10.3390/su15064938>
- Siddiqui, F. R., El-Shaarawi, M. A. I., & Said, S. A. M. (2014). Exergo-economic analysis of a solar driven hybrid storage absorption refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*, 80, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.029>
- Simpson, J. G., Long, N., & Zhu, G. (2024). Decarbonized district energy systems: Past review and future projections. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100726. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100726>
- Skagestad, B., & Mildenstein, P. (2002). District heating and cooling connection handbook. NOVEM, Netherlands Agency for Energy and the Environment. https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_VI/DHC_Connection_Handbook.pdf (Dostęp z 17.10.2025)
- Stokowiec, K., Wciślik, S., & Kotrys-Działak, D. (2023). Innovative modernization of building heating systems: the economy and ecology of a hybrid district-heating substation. *Inventions*, 8(1), 43. <https://doi.org/10.3390/inventions8010043>
- Szcześniak, A., Bujalski, W., Grzebielec, A., Futyma, K., Karwacki, J., & Rolka, P. (2021). A hybrid district heating substation with an adsorption chiller and PCM storage units: a concept and preliminary study. In E3S Web of Conferences (Vol. 321, p. 02009). *EDP Sciences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132102009>
- Turski, M. (2023). Magazynowanie ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych. *Instal*, (10), 4–8. DOI: 10.36119/15.2023.10.1.
- Veolia Energia Warszawa S.A. (2025, 8 września). Veolia Energia Warszawa wdraża innowacyjne rozwiązanie Ciepłomat w Office House na Towarowej 22. Energia dla Warszawy. <https://www.energiadlawarszawy.pl/veolia-energia-warszawa-wdraża-innowacyjne-rozwiazanie-cieplomat-w-office-house-na-towarowej22/> (Dostęp z 17.10.2025)
- Yang, X., Li, H., & Svendsen, S. (2016). Decentralized substations for low-temperature district heating with no Legionella risk, and low return temperatures. *Energy*, 110, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.073>

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

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