

Energetyczno-ekonomiczna analiza porównawcza pomp ciepła: powietrznej, gruntowej i hybrydowej

A comparative analysis of the energy and economic aspects of air-source, ground-source and hybrid heat pumps

ROBERT SEKRET

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.07.05

W artykule przedstawiono analizę porównawczą efektywności energetycznej i ekonomicznej hybrydowej pompy ciepła (HSHP) względem dwóch rozwiązań konwencjonalnych: powietrznej pompy ciepła (ASHP) oraz gruntowej pompy ciepła (GSHP). Analizowany układ hybrydowy stanowiła powietrzna pompa ciepła z dualnym parownikiem, współpracująca z akumulatorem ciepła wykorzystującym przemianę fazową woda–lód jako dodatkowe niskotemperaturowe źródło energii. Do ładowania akumulatora wykorzystano ciepło ścieków szarych z budynku jednorodzinnego oraz energię elektryczną pochodzącą z instalacji PV (HSHP-PV), PVT (HSHP-PVT) i mikro siłowni wiatrowej (HSHP-mSW). Analizę przeprowadzono dla budynku jednorodzinnego o projektowym obciążeniu cieplnym 10 kW, uwzględniając potrzeby ogrzewania i chłodzenia. Wyniki badań wykazały, że wariant HSHP-PV może stanowić alternatywę dla gruntowej pompy ciepła zarówno w trybie ogrzewania, jak i chłodzenia budynku. Koszty inwestycyjne tego rozwiązania były o 11% niższe niż w przypadku GSHP. Jednocześnie, mimo że nakłady inwestycyjne dla HSHP-PV były o 49% wyższe niż dla ASHP, po 13 latach eksploatacji wariant ten okazał się również korzystniejszy ekonomicznie. W odniesieniu do pozostałych analizowanych wariantów uzyskane wyniki potwierdziły istotny potencjał energetyczny instalacji hybrydowych, szczególnie w porównaniu z powietrzną pompą ciepła.

Słowa kluczowe: magazynowanie ciepła, ciepło odpadowe, hybrydowe instalacje OZE, ogrzewanie i chłodzenie budynków

This paper presents a comparative analysis of the energy and economic efficiency of a hybrid heat source heat pump (HSHP), comparing it with two conventional solutions: an air-source heat pump (ASHP) and a ground-source heat pump (GSHP). The analysed hybrid system consisted of an air-source heat pump with a dual evaporator that worked in connection with a heat storage tank using the phase change of water to ice for energy storage. This storage tank acted as an additional low-temperature energy source. It was charged using greywater heat from a single-family home and electricity from photovoltaic (PV), photovoltaic-thermal (PVT) and micro wind turbine (mSW) installations. The analysis was carried out for a single-family house with a design heat load of 10 kW, taking into consideration both heating and cooling demands. The results showed that the HSHP-PV variant could be used as an alternative to a GSHP for heating and cooling the building. The investment costs of this solution were 11% lower than those of a GSHP. Although the HSHP-PV variant required 49% more capital expenditure than the ASHP, it proved to be more cost-effective after 13 years of operation. Compared with the other analysed options, the results confirmed the significant energy potential of hybrid systems, particularly in contrast to air-source heat pumps.

Keywords: thermal energy storage, waste heat, hybrid renewable energy systems, heating and cooling of buildings

Wykaz oznaczeń

CAPEX Capital Expenditure – koszty nabycia brutto (PLN)
COP współczynnik wydajności grzejnej (-)
E efekt energetyczny (%)
N zapotrzebowanie na energię elektryczną (kWh)
 $\dot{N}$ moc elektryczna (kW)
t temperatura (°C)

LCC Life Cycle Cost – koszt cyklu życia brutto (PLN)

OPEX Operational Expenditure – koszty posiadania brutto (PLN)

Greckie litery

η stopień doskonałości (odwracalności obiegu termodynamicznego) pompy ciepła (-)
 τ czas (s, min, h, rok)
 Φ moc cieplna/obciążenie cieplne (W)

Index dolny

acu akumulator ciepła
e powietrze zewnętrzne
CL całkowite obciążenie chłodnicze
g grunt
HL całkowite obciążenie cieplne
ins temperatura instalacji centralnego ogrzewania
T straty ciepła w wyniku przenikania
V wentylacyjna strata ciepła

prof. dr hab. inż. Robert Sekret ORCID ID 0000-0003-4694-2717, Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa, e-mail: robert.sekret@pcz.pl

Index górny

C	chłodzenie
DHW	ciepła woda użytkowa – cwu
H	ogrzewanie

Skróty

ASHP	powietrzna pompa ciepła
DHW	ciepła woda użytkowa
GSHP	gruntowa pompa ciepła
GWC	gruntowy wymiennik ciepła
HSHP	hybrydowa pompa ciepła
mSW	mikro siłownia wiatrowa
PV	instalacja fotowoltaiczna
PVT	instalacja fotowoltaiczno-ciepłna
SE	sieć elektroenergetyczna

Wprowadzenie

Pompy ciepła należą obecnie do kluczowych technologii wspierających transformację energetyczną w sektorze komunalnym. Wynika to przede wszystkim z dążenia do maksymalnego wykorzystania lokalnych zasobów energii, w tym odnawialnych źródeł energii oraz niskotemperaturowego ciepła odpadowego. Klasyczne rozwiązania w zakresie pomp ciepła obejmują przede wszystkim powietrzne pompy ciepła (ASHP) oraz gruntowe pompy ciepła (GSHP). Jak wskazano w badaniach [1], wyższą efektywność energetyczną charakteryzują się gruntowe pompy ciepła, co wynika z wykorzystania względnie stabilnej temperatury gruntu. Z kolei powietrzne pompy ciepła cechują się niższymi kosztami inwestycyjnymi oraz większą łatwością montażu, co w dużej mierze tłumaczy ich dominującą pozycję rynkową. Ich główną wadą pozostaje jednak silna zależność efektywności energetycznej od temperatury zewnętrznej.

W warunkach zimowych obserwuje się spadek współczynnika COP, a tym samym wzrost zużycia energii elektrycznej. Jak wykazano w [1, 2], problem ten jest szczególnie istotny w klimacie chłodnym i umiarkowanym, natomiast w regionach o dużych amplitudach temperatur powietrza zewnętrznego korzystniejsze okazują się systemy gruntowe. Stabilna temperatura gruntu pozwala bowiem utrzymać wysoką efektywność pracy, zwłaszcza w sezonie grzewczym [3]. Jak wskazują badania [4], główną barierą rozwoju gruntowych pomp ciepła pozostają wysokie koszty inwestycyjne związane z wykonaniem dolnego źródła ciepła (pionowych lub poziomych wymienników ciepła), przy czym w długim okresie eksploatacji systemy GSHP często osiągają korzystniejszy całkowity koszt cyklu życia niż systemy powietrzne [1]. Wysokie koszty początkowe GSHP mogą być kompensowane przez niższe zapotrzebowanie na energię elektryczną, większą trwałość systemu oraz stabilność pracy

w długim okresie [5]. Zgodnie z analizami kosztów środowiskowych i ekonomicznych, systemy gruntowe często okazują się bardziej opłacalne w całym cyklu życia budynku, szczególnie w chłodnym klimacie [4]. Niemniej jednak w wielu przypadkach, zwłaszcza w budynkach poddawanych termomodernizacji oraz zlokalizowanych w gęstej zabudowie miejskiej, nie ma wystarczającej ilości miejsca na wykonanie klasycznego dolnego źródła ciepła dla GSHP.

W ostatnich latach coraz większe zainteresowanie wzbudzają układy hybrydowe, łączące różne źródła energii i technologie, które wspomagają proces termomodernizacji istniejących budynków oraz mogą stanowić atrakcyjne źródło ciepła i chłodu dla nowych obiektów. Systemy hybrydowe stanowią rozwinięcie klasycznych instalacji pomp ciepła i najczęściej integrują pompę ciepła z dodatkowymi źródłami energii, takimi jak instalacja fotowoltaiczna, kolektory słoneczne, instalacja fotowoltaiczno-ciepłna czy kotły gazowe [2]. Jak wykazały badania [2], rozwiązania te pozwalają na poprawę efektywności sezonowej oraz redukcję kosztów eksploatacyjnych. Integracja systemów fotowoltaiczno-ciepłych z gruntową pompą ciepła może znacząco zwiększyć efektywność całego układu poprzez regenerację ciepłą gruntu, pełniąc rolę magazynu ciepła, oraz ograniczenie zużycia energii elektrycznej. Układy hybrydowe umożliwiają również redukcję szczytowego zapotrzebowania na moc ciepłą. Ich wadą pozostają jednak większa złożoność instalacji oraz wyższy koszt inwestycyjny. Konieczne staje się także stosowanie zaawansowanych algorytmów sterowania [6]. Istotnym zagadnieniem pozostaje również standard energetyczny budynku. W budynkach energooszczędnych różnice w zapotrzebowaniu na energię elektryczną pomiędzy poszczególnymi technologiami są mniejsze, natomiast w obiektach o dużym zapotrzebowaniu cieplnym przewagę uzyskują systemy wykorzystujące stabilne magazyny ciepła [1]. Badania [4] wskazują ponadto, że odpowiedni dobór dolnego źródła oraz integracja z odnawialnymi źródłami energii mogą istotnie poprawić parametry eksploatacyjne pomp ciepła.

Rozwój hybrydowych pomp ciepła stanowi obecnie jeden z ważniejszych kierunków badań. Podstawowym celem projektowania takich układów nie jest już wyłącznie poprawa sezonowej efektywności, lecz także zapewnienie wysokiej elastyczności operacyjnej, ograniczenie kosztów cyklu życia oraz zwiększenie odporności systemu na zmienność warunków klimatycznych i cen energii [7-10]. W literaturze szczególną uwagę poświęca się układom integrującym pompy ciepła z magazynami ciepła.

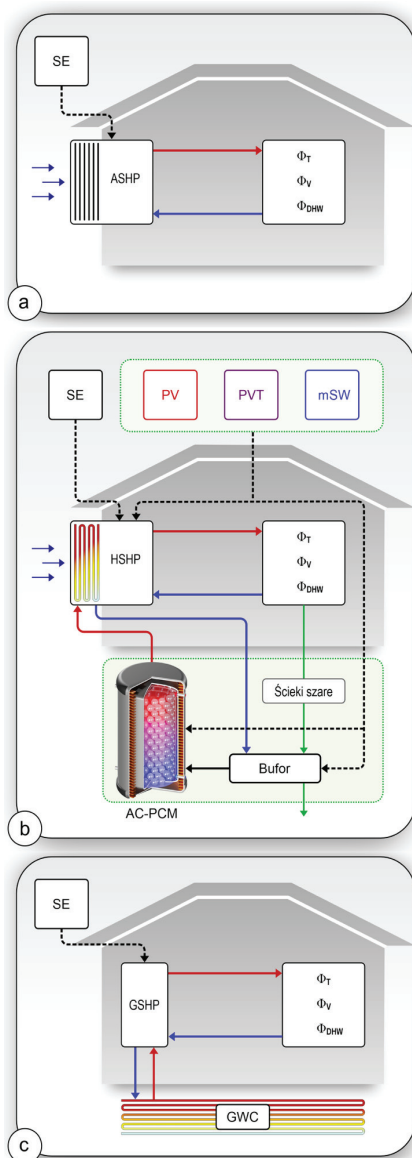
Wykazano, że dobór geometrii, sposobu sterowania oraz pojemności magazynów ciepła może mieć większy wpływ na wyniki ekonomiczne niż sama nominalna sprawność pompy ciepła. Oznacza to, że ocena technologii hybrydowej wymaga podejścia systemowego, obejmującego nie tylko parametry termodynamiczne, lecz także architekturę całej instalacji [8, 10-12]. Budynkowe huby energii stanowią jeden z istotnych kierunków transformacji energetycznej w kierunku neutralności klimatycznej [13]. Rozwój tej technologii wymaga opracowania i wdrożenia nowych technologii m.in. pomp ciepła. Powietrzne pompy ciepła dominują obecnie na rynku ze względu na relatywnie niskie koszty inwestycyjne, jednak ich efektywność obniża się wraz ze spadkiem temperatury zewnętrznej. Z kolei gruntowe pompy ciepła zapewniają wyższą efektywność energetyczną oraz większą stabilność pracy, lecz wymagają poniesienia większych nakładów inwestycyjnych. Na podstawie przeglądu aktualnego stanu wiedzy można stwierdzić, że nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie w zakresie systemów hybrydowych.

Wybór odpowiedniego wariantu powinien uwzględniać warunki klimatyczne, charakterystykę energetyczną budynku, lokalną dostępność źródeł ciepła odpadowego oraz zasobów odnawialnych nośników energii pierwotnej, a także koszty inwestycyjne, przewidywany okres eksploatacji i oczekiwany czas zwrotu nakładów. Istotność rzeczywistej lokalizacji budynku i charakterystyki zastosowanych urządzeń jest duża [14]. W związku z tym celem niniejszych badań było wskazanie możliwości do zastosowania wariantów hybrydowych instalacji pomp ciepła, które mogłyby stanowić alternatywę dla gruntowej pompy ciepła przy założeniu akceptowalnych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Obiekt i metodyka badań

Do badań wybrano trzy systemy: ASHP, GSHP oraz HSHP z czterema instalacjami wspomagającymi pracę akumulatora ciepła, tj.: instalacja odzysku ciepła ze ścieków szarych, instalacja PV, instalacja PVT i instalacja mikro siłowni wiatrowej mSW. Schematy ideowe systemów przedstawiono na rysunku 1.

Pierwszy z analizowanych wariantów (rys. 1a) obejmuje zastosowanie powietrznej pompy ciepła. Drugi wariant (rys. 1b) stanowi hybrydową pompę ciepła z dualnym parownikiem, wykorzystującą zarówno ciepło otoczenia (powietrze atmosferyczne), jak i akumulator ciepła oparty na przemianie fazowej woda–lód, pełniący funkcję dodatkowego źródła energii.



Rys. 1. Schematy systemów przyjętych do analizy:
a) ASHP, b) HSHP, c) GSHP.
Fig. 1. Schematic diagrams of the systems used for analysis: a) ASHP, b) HSHP, c) GSHP

W instalacji HSHP zastosowano dwa akumulatory o objętości 0,03 m³ każdy. Rozwiązanie to umożliwia ciągłą pracę układu, ponieważ podczas rozładowywania jednego akumulatora drugi może być jednocześnie ładowany. Przyjęto, że proces ładowania akumulatora zachodzi w wyniku jego rozmrażania z wykorzystaniem ciepła ścieków szarych lub technologii Power-to-Heat, zintegrowanej z instalacją PV, PVT oraz mSW. Należy podkreślić, że dla wariantu HSHP-mSW założono warunki sprzyjające jego zastosowaniu, obejmujące korzystną lokalizację instalacji mSW oraz średnioroczny stopień wykorzystania mocy elektrycznej równy 0,29. Średnie prędkości wiatru przyjęto dla wysokości 10 m nad poziomem terenu. Instalacja hybrydowa

zakłada zastosowanie dualnego parownika powietrznej pompy ciepła zgodnie z wynikami przedstawionymi w pracach [15, 16]. Opis wyników badań prototypowego akumulatora ciepła zaproponowanego jako element instalacji hybrydowej przedstawiono w pracach [17, 18]. Trzeci system (rys. 1c) stanowi gruntowa pompa ciepła, w której dolne źródło ciepła stanowi gruntowy wymiennik ciepła. Analizę przeprowadzono dla budynku jednorodzinnego zlokalizowanego w warunkach klimatycznych Europy Środkowej (Warszawa). Podstawowe dane przyjęte do analizy porównawczej przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane przyjęte do analizy porównawczej
Table 1. Data used for the comparative analysis

Parametr	Wartość
Powierzchnia zabudowy (m ²)	150
Projektowe obciążenie grzewcze Φ _{HL-max} (kW)	10
Projektowe obciążenie grzewcze Φ _{CL-max} (kW)	8
Projektowa temperatura zasilania systemu centralnego ogrzewania, t _{ins-max} (°C)	35
Liczba mieszkańców	4
Dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową [l/(osobę i dobę)]	50
Projektowa temperatura ciepłej wody użytkowej (°C)	45
Temperatura początku sezonu grzewczego (°C)	12
Obliczeniowa temperatura powietrza wewnętrznego (°C)	20
Obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego (°C)	-20
Temperatura ścieków szarych (°C)	35
Moc instalacji PV (kW)	2,2
Moc elektryczna/ciepna instalacji PVT (kW)	2,2/4,2
Moc elektryczna mSW (kW)	3
Stopień doskonałości powietrznej pompy ciepła η _{ASHP} (-)	0.42-0.47
Stopień doskonałości gruntowej pompy ciepła η _{GSHP} (-)	0.52

Analizę energetyczną rozpatrywanych wariantów przeprowadzono na podstawie godzinowego bilansu energetycznego budynku, godzinowych wartości współczynnika COP oraz rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną pobieraną z sieci elektroenergetycznej (SE). Na wartość współczynnika COP pomp ciepła istotnie wpływa stopień doskonałości, rozumiany jako miara odwracalności obiegu termodynamicznego. W analizie przyjęto wartości stopnia doskonałości η_{ASHP} oraz η_{GSHP} odpowiadające najlepszym obecnie dostępnym technologiom pomp ciepła na rynku europejskim oraz warunkom pracy trzech wariantów przedstawionych na rysunku 1. Dla GSHP przyjęto stałą wartość

stopnia doskonałości równą 0,52. W przypadku ASHP parametr ten zależy w znacznym stopniu od zmienności temperatury powietrza zewnętrznego. W obliczeniach przyjęto jego wartość w zakresie od 0,42 do 0,47. Okres grzewczy zdefiniowano jako czas od 15 września do 15 maja, przy temperaturze powietrza zewnętrznego niższej niż 12 °C, natomiast okres letni jako czas od 16 maja do 14 września. Roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną wyznaczono na podstawie następujących zależności:

$$N_{ASHP} = \sum_{\tau=1}^{8760} (\dot{N}_{ASHP}^H(t_e) + \dot{N}_{ASHP}^{DHW}(t_e)) \cdot \tau, \quad (1)$$

$$N_{GSHP} = \sum_{\tau=1}^{8760} (\dot{N}_{GSHP}^H(t_g) + \dot{N}_{GSHP}^{DHW}(t_g)) \cdot \tau, \quad (2)$$

$$N_{HSHP} = \sum_{\tau=1}^{8760} (\dot{N}_{HSHP}^H(t_e, t_{acu}) + \dot{N}_{HSHP}^{DHW}(t_e, t_{acu})) \cdot \tau, \quad (3)$$

Głównym kryterium wyboru dolnego źródła ciepła dla hybrydowej pompy ciepła w danej godzinie pracy systemu, tj. powietrza zewnętrznego lub akumulatora ciepła, była wyższa wartość współczynnika COP obliczana w oparciu o temperaturę powietrza zewnętrznego lub nośnika ciepła na wyjściu z akumulatora ciepła. Współczynnik COP obliczono zgodnie z następującymi zależnościami:

$$COP_{HSHP}^H(t_{acu}, t_e) = \frac{273.15 + t_{ins}(t_e)}{t_{ins}(t_e) - t_{acu}, t_e} \quad (4)$$

$$COP_{HSHP}^{DHW}(t_{acu}, t_e) = \frac{273.15 + t_{DHW}}{t_{DHW} - t_{acu}, t_e} \quad (5)$$

Efekt energetyczny wyznaczono na podstawie rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną. Efekt energetyczny hybrydowej pompy ciepła w porównaniu z układem ASHP obliczono według następującej zależności:

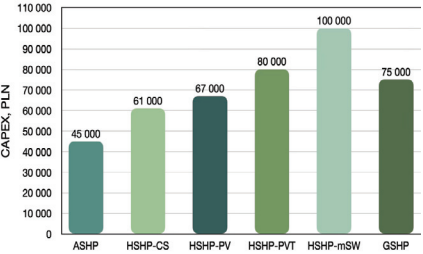
$$E_{HP-ASHP} = \frac{N_{ASHP} - N_{HSHP}}{N_{ASHP}} \cdot 100\% \quad (6)$$

Efekt energetyczny hybrydowej pompy ciepła w porównaniu z układem GSHP obliczono zgodnie z następującą zależnością:

$$E_{HP-GSHP} = \frac{N_{GSHP} - N_{HSHP}}{N_{GSHP}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Istotnym kryterium oceny analizowanych wariantów był również efekt ekonomiczny. W tym celu zastosowano rachunek

kosztu cyklu życia (LCC), powszechnie wykorzystywany w analizach ekonomicznych. Metoda ta uwzględnia koszty ponoszone w całym okresie eksploatacji instalacji, obejmujące zarówno koszty nabycia (CAPEX), jak i koszty posiadania (OPEX). Koszty nabycia dla poszczególnych wariantów instalacji pomp ciepła przedstawiono na rysunku 2. Nakłady inwestycyjne CAPEX przyjęto na podstawie średnich rynkowych cen obecnie dostępnych technologii w Polsce, odpowiadających zaproponowanym wariantom instalacji pomp ciepła. Wartości te określono jako średnie kwoty brutto dla roku 2025. Koszty posiadania obejmowały koszty energii elektrycznej pobieranej z sieci elektroenergetycznej, a także średnioroczne koszty ponoszone w całym cyklu życia urządzeń, związane z pracami serwisowymi, naprawami oraz wymianą podzespołów. Zestawienie średniorocznych kosztów prac serwisowych, napraw i wymiany podzespołów przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 2. Koszty brutto nabycia CAPEX dla analizowanych wariantów instalacji pomp ciepła
Fig. 2. Gross capital expenditure (CAPEX) for the analyzed heat pump installation variants

Tabela 2. Zestawienie średnich rocznych kosztów brutto w całym cyklu życia prac serwisowych, napraw i wymiany podzespołów dla analizowanych wariantów instalacji pomp ciepła
Table 2. Summary of average annual gross costs over the lifetime of maintenance, repairs, and component replacement for the analyzed heat pump installation variants

Wariant instalacji	Średnie roczne koszty brutto, PLN
ASHP	700
GSHP	600
HSHP-CS	800
HSHP-PV	1100
HSHP-PVT	1200
HSHP-mSW	1500

W analizie ekonomicznej przyjęto metodę złożoną, opartą na zdyskontowanych przepływach pieniężnych w całym okresie użytkowania systemu. Obliczenia wartości brutto LCC przeprowadzono na podstawie następującej zależności:

$$LCC = CAPEX + \sum_{n=1}^T \frac{OPEX}{(1+i)^n} \tag{8}$$

gdzie:
i – stopa dyskontowa wynosząca 7,5%,
n – kolejny rok eksploatacji,
T – okres eksploatacji wynoszący 20 lat,
koszt energii elektrycznej przyjęto 1,2 (PLN brutto)/kWh,
roczny wzrost cen energii elektrycznej przyjęto 10%.

Na potrzeby ogólnej ekonomicznej analizy porównawczej przyjęto aktualny średni koszt 1 kWh energii elektrycznej dla gospodarstw domowych w Polsce, obowiązujący w jednотaryfowej grupie G11, na poziomie 1,2 PLN brutto. Koszt ten obejmuje cenę energii elektrycznej, opłaty za jej przesył i dystrybucję, a także opłaty stałe. Istotnym parametrem wpływającym na efekt ekonomiczny analizowanych rozwiązań jest również roczne tempo wzrostu cen energii elektrycznej. W analizie przyjęto średni wzrost cen dla gospodarstw domowych na poziomie 10%. Należy jednak podkreślić, że wyższe tempo wzrostu cen energii elektrycznej, przy jednoczesnym uzyskaniu efektu energetycznego polegającego na ograniczeniu zapotrzebowania danego rozwiązania na energię elektryczną, prowadzi do poprawy efektu ekonomicznego, a co za tym idzie skrócenia okresu zwrotu inwestycji.

Wyniki i analiza
Efekt energetyczny

Tabela 3 oraz rysunek 3a podsumowuje zapotrzebowanie na energię elektryczną z sieci elektroenergetycznej do ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej dla wybranych instalacji pomp ciepła pracujących w trybie grzewczym, tj. ogrzewania w sezonie zimowym i przygotowania ciepłej wody użytkowej w sezonie zimowym i letnim.

Tabela 3. Zapotrzebowanie na energię elektryczną z SE dla analizowanych wariantów instalacji pomp ciepła – ogrzewanie i ciepła woda użytkowa
Table 3. Electricity demand from the grid for the analyzed heat pump system variants – heating and domestic hot water

Wariant instalacji	Zapotrzebowanie na energię elektryczną z SE, N (kWh)		
	Zima	Lato	Cały rok
ASHP	4694	321	5015
GSHP	3744	533	4278
HSHP-CS	3923	310	4232
HSHP-PV	3478	10	3488
HSHP-PVT	3289	10	3299
HSHP-mSW	1963	10	1973

W tabeli 4 oraz rysunek 3b przedstawiono natomiast zapotrzebowanie na energię elektryczną z sieci elektroenergetycznej dla wybranych instalacji pomp ciepła pracujących w trybie grzewczym i chłodzenia, tj. ogrzewania w sezonie zimowym, przygotowania ciepłej wody użytkowej w sezonie zimowym i letnim oraz chłodzenia w okresie letnim.

Tabela 4. Zapotrzebowanie na energię elektryczną z SE dla analizowanych wariantów instalacji pomp ciepła – ogrzewanie, ciepła woda użytkowa oraz chłodzenie
Table 4. Electricity demand from the grid for the analyzed heat pump system variants-heating, domestic hot water, and cooling

Wariant instalacji	Zapotrzebowanie na energię elektryczną z SE, N (kWh)		
	Zima	Lato	Cały rok
ASHP	4694	1821	6515
GSHP	3744	603	4348
HSHP-CS	3923	1810	5732
HSHP-PV	3478	1484	4962
HSHP-PVT	3289	1474	4763
HSHP-mSW	1963	522	2484

W przypadku wariantu HSHP z odzyskiem ciepła ze ścieków szarych redukcja zapotrzebowania wyniosła 16% względem ASHP oraz 1% względem GSHP. Dla wariantu HSHP-PV wartości te wyniosły odpowiednio 30% i 18%. Dla wariantu HSHP-PVT zapotrzebowanie na energię elektryczną obniżyło się o 34% w porównaniu do ASHP i o 23% w stosunku do GSHP, natomiast dla wariantu z mikro siłownią wiatrową odpowiednio o 61% i 54%. Z perspektywy wykorzystania niskotemperaturowego ciepła rozwiązanie HSHP-CS należy uznać za interesujące w kontekście rozbudowy układu powietrznej pompy ciepła. Należy jednak podkreślić, że w analizie wariantu HSHP-CS przyjęto zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową odpowiadające jedynie czteroosobowemu gospodarstwu domowemu.

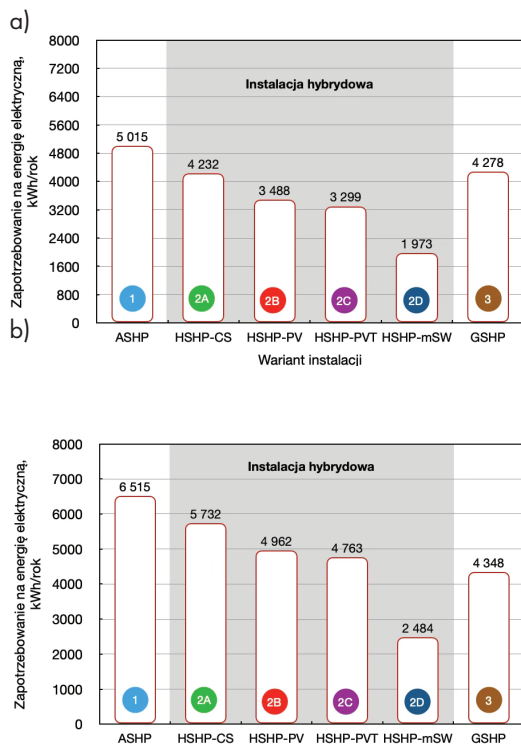
W przypadku zastosowania technologii Power-to-Heat uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdziły istotny potencjał energetyczny instalacji hybrydowych, zarówno w odniesieniu do systemu ASHP, jak i GSHP. W trybie pracy obejmującym ogrzewanie i chłodzenie wykazano, że proponowane instalacje HSHP zintegrowane z magazynowaniem ciepła charakteryzują się niższym zapotrzebowaniem na energię elektryczną z sieci elektroenergetycznej w porównaniu z powietrzną pompą ciepła. W odniesieniu do gruntowej pompy ciepła jedynie wariant wykorzystujący

mikro siłownię wiatrową wykazał obniżenie zapotrzebowania na energię elektryczną pobieraną z SE. Uzyskane efekty energetyczne względem ASHP i GSHP wyniosły odpowiednio: 12% i -32% dla wariantu z odzyskiem ciepła ze ścieków szarych, 24% i -14% dla wariantu z instalacją PV, 27% i -10% dla wariantu z instalacją PVT oraz 62% i 43% dla wariantu z instalacją mSW.

z akumulatorem ciepła oraz układem odzysku ciepła ze ścieków szarych lub instalacją PV, przy czym wartość LCC dla wariantu z instalacją PV była niższa, korzystniejsza, niż dla wariantu wykorzystującego odzysk ciepła ze ścieków szarych. Zastosowanie układu HSHP-PV wiązało się ze wzrostem kosztów CAPEX o 49% w porównaniu z ASHP, jednak całkowita wartość LCC po 20 latach eksploatacji była o 7% niższa.

Okres zwrotu dodatkowych nakładów inwestycyjnych w tym przypadku wyniósł 13 lat. Z kolei zastosowanie ścieków szarych do regeneracji akumulatora ciepła powodowało wzrost kosztów CAPEX o 36% względem ASHP, jednak po 20 latach eksploatacji całkowita wartość LCC była w tym przypadku o 3% niższa.

Okres zwrotu dodatkowych kosztów inwestycyjnych wyniósł 16 lat.

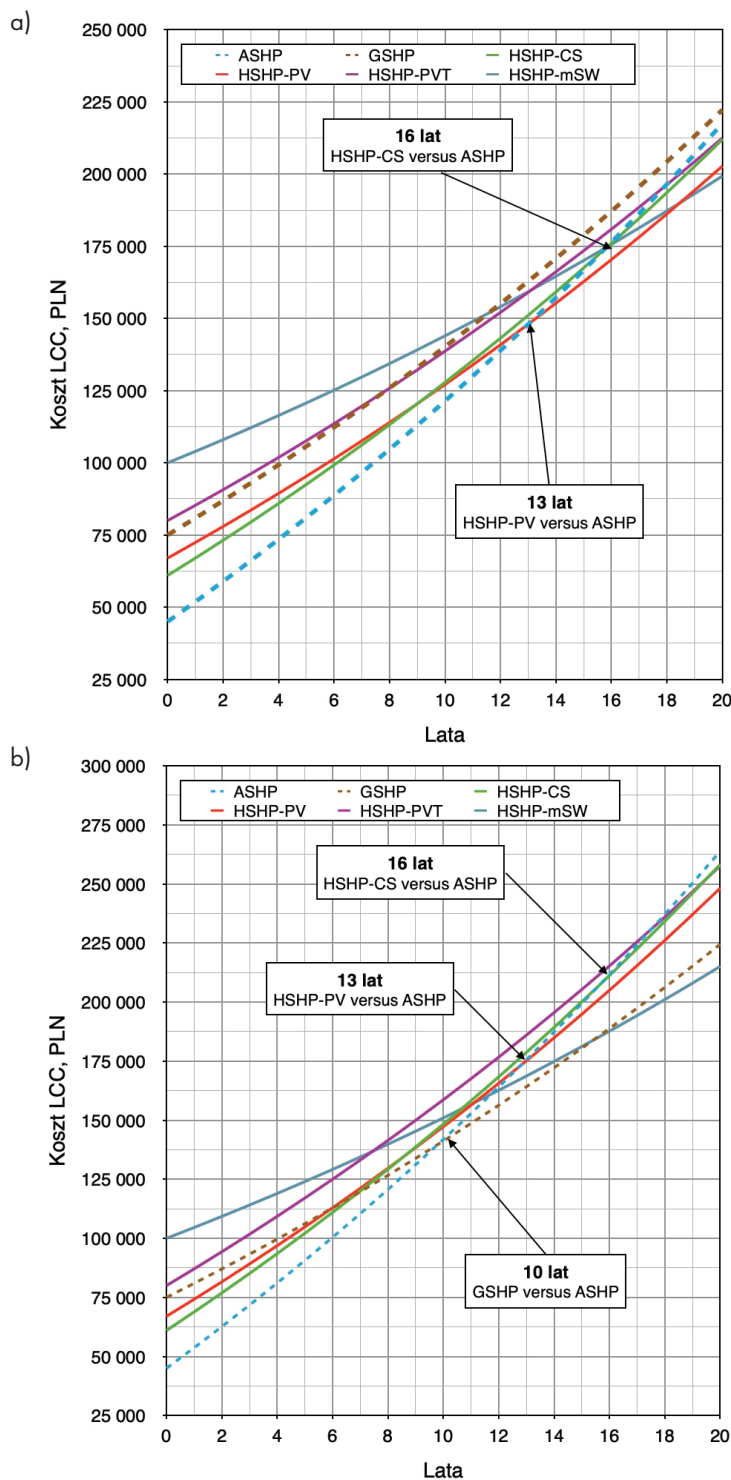


Rys. 3. Efekt energetyczny zastosowania HSHP w stosunku do systemów ASHP i GSHP: (a) ogrzewanie i ciepła woda użytkowa, (b) ogrzewanie, ciepła woda użytkowa oraz chłodzenie

Fig. 3. Energy performance of HSHP compared to ASHP and GSHP systems: (a) heating and domestic hot water, (b) heating, domestic hot water, and cooling

Efekt ekonomiczny

Uzyskane efekty energetyczne często wskazują na istotny potencjał praktycznego zastosowania analizowanych rozwiązań, jednak koszty nabycia danej instalacji mogą stanowić główną barierę ich dalszego rozwoju i wdrażania. Na rysunku 4 przedstawiono porównanie kosztów cyklu życia LCC wybranych wariantów instalacji pomp ciepła z uwzględnieniem kosztów CAPEX i OPEX dla 20-letniego okresu eksploatacji. Jak pokazano na rysunku 4a, dla instalacji pracujących wyłącznie w trybie grzewczym wszystkie analizowane układy hybrydowe charakteryzowały się niższymi kosztami LCC niż systemy ASHP i GSHP. Niższe koszty CAPEX w porównaniu z GSHP wykazywały instalacje hybrydowe zintegrowane



Rys. 4. Efekt ekonomiczny zastosowania HSHP w stosunku do systemów ASHP i GSHP: (a) ogrzewanie ciepła woda użytkowa, (b) ogrzewanie, ciepła woda użytkowa oraz chłodzenie

Fig. 4. Economic performance of HSHPs compared to ASHPs and GSHPs: (a) heating and domestic hot water, (b) heating, domestic hot water, and cooling

Pozostałe analizowane instalacje hybrydowe charakteryzowały się wyższymi kosztami CAPEX niż gruntowa pompa ciepła. Należy jednak podkreślić, że po 16 latach eksploatacji koszty LCC dla instalacji HSHP-mSW, a po 18 latach dla instalacji HSHP-PVT, były już niższe niż w przypadku ASHP i odpowiednio po 11,5 roku dla HSHP-mSW oraz po 8 latach dla HSHP-PVT wartości te stały się również niższe niż dla GSHP.

Jak przedstawiono na rysunku 4b, w przypadku pracy analizowanych instalacji zarówno w trybie grzewczym, jak i chłodzenia uzyskane wartości LCC uległy zmianie w porównaniu do trybu grzewczego. Spośród zaproponowanych instalacji hybrydowych, które charakteryzowały się niższą wartością CAPEX w porównaniu z GSHP, żadna z nich po 20 latach nie osiągnęła wartości LCC niższej lub zbliżoną do systemu GSHP.

Jedynym rozpatrywanym wariantem instalacji hybrydowej, dla którego po 15,5 roku eksploatacji wartość LCC była niższa niż dla GSHP, okazał się układ z instalacją mSW. Należy jednak zaznaczyć, że koszty CAPEX instalacji HSHP-mSW były o 33% wyższe niż w przypadku GSHP. Uwzględniając konieczność pracy instalacji zarówno w trybie grzewczym, jak i chłodzenia, a także zakładając brak możliwości zastosowania klasycznej gruntowej pompy ciepła, za akceptowalny wariant instalacji hybrydowej można uznać układ HSHP-PV, którego wartość CAPEX była o 11% niższa niż dla GSHP, natomiast wartość LCC po 20 latach eksploatacji była wyższa o 15%.

Wnioski

Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość efektywnego wykorzystania hybrydowego, niskotemperaturowego źródła ciepła dla powietrznej pompy ciepła, zaproponowanego w postaci akumulatora wykorzystującego przemianę fazową woda-lód i regenerowanego ciepłem ze ścieków szarych, a także energią elektryczną pochodzącą z instalacji: fotowoltaicznej, fotowoltaiczno-ciepłej oraz mikro siłowni wiatrowej. Analizowane instalacje stanowią realną alternatywę dla systemów GSHP i ASHP, pod warunkiem spełnienia określonych uwarunkowań technicznych i ekonomicznych.

Należy jednak podkreślić, że istotny wpływ na wybór wariantu instalacji hybrydowej ma przyjęty tryb jej pracy. Wariantem, który zarówno w trybie grzewczym, jak i w trybie grzewczym oraz chłodzenia charakteryzował się niższymi kosztami nabycia oraz niższymi lub porównywalnymi kosztami LCC w odniesieniu do GSHP była instalacja HSHP-PV.

W trybie grzewczym koszty cyklu życia tego rozwiązania po 20 latach eksploatacji były o 9% niższe niż w przypadku GSHP, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów CAPEX o 11%. Dodatkowo wartość LCC dla tego wariantu była o 7% niższa niż dla instalacji ASHP, mimo że koszty nabycia były o 49% wyższe. W przypadku pracy obejmującej zarówno cele grzewcze, jak i chłodzenie, wartość LCC dla układu HSHP-PV po 20 latach eksploatacji była o 11% wyższa niż dla GSHP, przy jednocześnie niższych kosztach CAPEX o 11%. W porównaniu z ASHP wartość LCC dla układu HSHP-PV była natomiast o 6% niższa, pomimo wzrostu kosztów CAPEX o 49%. Wyższe koszty nabycia HSHP-PV w porównaniu do ASHP zwracały się po 13 latach eksploatacji. W przypadku pozostałych wariantów wykorzystujących technologię Power-to-Heat uzyskane wyniki potwierdziły istotny potencjał energetyczny instalacji hybrydowych, zwłaszcza w porównaniu z powietrzną pompą ciepła.

Na podstawie przedstawionych wyników analiz można stwierdzić, że integracja ASHP z akumulatorem ciepła woda-lód, regenerowanym ciepłem odpadowym ze ścieków szarych lub energią elektryczną przekształcaną w ciepło na potrzeby regeneracji akumulatora, stwarza możliwość poprawy standardu energetycznego budynku jednorodzinnego przy wykorzystaniu lokalnych zasobów odnawialnych nośników energii oraz ciepła odpadowego. Instalacja hybrydowa HSHP zintegrowana z akumulatorem ciepła i instalacją PV może być rozpatrywana zarówno w trybie pracy grzewczej, jak i w trybie ogrzewania oraz chłodzenia, jako rozwiązanie alternatywne względem gruntowej pompy ciepła, a w dłuższej perspektywie eksploatacyjnej również względem powietrznej pompy ciepła.

Należy podkreślić, że uzyskane wyniki odnoszą się do przyjętych warunków klimatycznych Warszawy, charakterystyki przykładowego budynku oraz założeń ekonomicznych przyjętych w analizie, dlatego nie powinny być bezpośrednio uogólniane na inne lokalizacje ani odmienne przypadki obliczeniowe.

Celem badań było wskazanie możliwych do zastosowania wariantów hybrydowych instalacji pomp ciepła, które mogłyby stanowić alternatywę dla gruntowej pompy ciepła przy założeniu akceptowalnych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Uzyskane wyniki potwierdziły, że systemy hybrydowe stanowią perspektywiczny kierunek rozwoju źródeł ciepła, chłodu energii elektrycznej dla instalacji HVAC.

Podziękowania

Badania naukowe sfinansowano z subwencji statutowej Wydziału Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej: BSPB-400-301/26.

Literatura

- [1] Blázquez, C. S., Nieto, I. M., García, J. C., García, P. C., Martín, A. F., González-Aguilera, D. (2023). Comparative Analysis of Ground Source and Air Source Heat Pump Systems under Different Conditions and Scenarios. *Energies*, 16, 1289. <https://doi.org/10.3390/en16031289>
- [2] Tian, Y., Wei, W., Hongxing, Y., Jiankun, L., Xianting, L. (2021). Hybrid photovoltaic/thermal and ground source heat pump: Review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111569>
- [3] Christodoulides, P., Christou, C., Florides, G. A. (2024). Ground Source Heat Pumps in Buildings Revisited and Prospects. *Energies*, 17, 3329. <https://doi.org/10.3390/en17133329>
- [4] Zelazna, A., Gołębiowska, J., Kosaryha, D. (2024). Multi-Criteria Study on Ground Source Heat Pump with Different Types of Heat Exchangers. *Energies*, 17, 602. <https://doi.org/10.3390/en17030602>
- [5] Menegazzo, D., Lombardo, G., Bobbo, S., De Carli, M., Fedele, L. (2022). State of the Art, Perspective and Obstacles of Ground-Source Heat Pump Technology in the European Building Sector: A Review. *Energies*, 15, 2685. <https://doi.org/10.3390/en15072685>
- [6] Wang, J. L., Yan, T., Tang, X., Pan, W. G. (2025). Design and operation of hybrid ground source heat pump systems: A review. *Energy*, 316, 134537. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134537>
- [7] Ji, Q., Li, Y., Yin, Y., Che, C., Huang, G. (2026). Compression-absorption hybrid heat pumps operating wide temperature ranges: A review and perspectives for large temperature lift. *Applied Energy*, 405, 127217. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127217>
- [8] Lebbi, M., Touafek, K., Boutina L. (2025). Solar photovoltaic thermal hybrid systems – detailed reviews. *Applied Thermal Engineering*, 279, Part E, 127867. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127867>
- [9] Wüllhorst, F., Schwarz, S., Fuchs, N., Maier, L., Monti, A., Müller, D. (2025). Impact of hybrid heat pump shares and building envelope retrofit rates on load penetration in German low-voltage grids. *Applied Energy*, 388, 125530. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125530>
- [10] Ju, Y., Hu, X., Jokisalo, J., Kosonen, R., Xue, T., Meriläinen, A., Kosonen, A. (2025). Cost-optimal dimensioning of hybrid heat pump systems utilizing waste heat from hydrogen production for a kindergarten in cold climate. *Energy and Buildings*, 332, 15430. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115430>
- [11] Ngunzi, V., Njoka, F., Mureithi, N. W., Kinyua, R., Pearce, J. M. (2026). Advanced modeling and performance analysis of a photovoltaic-thermal double compression heat pump for industrial thermal applications. *Renewable Energy*, 256, Part F, 124347. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124347>
- [12] Kurses, M., Olympios, A. V., Harraz, A. A., Xu, J. (2025). Comparative analysis of heating and cooling solutions for residential use: Energy, environmental, and economic perspectives. *Applied Energy*, 399, 126511. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126511>

[13] Ner, M., Szulgowska-Zgrzywa, M. (2025). Wpływ warunków klimatycznych i metody określenia SCOP pompy ciepła powietrze/woda na wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną budynku jednorodzinnego– studium przypadku dla wybranych miast w Polsce. INSTAL, 11, 6-25. <https://doi.org/10.36119/15.2025.11.3>

[14] Pohl, W., Kalina, L. (2026). Rola budynkowych hubów energii w transformacji systemów energetycznych. INSTAL, 2, 20-28. <https://doi.org/10.17512/INSTAL.2026.02.02>

[15] Xu, J., Zhao, Y., Quan, Z., Wang, G., Wang, J. (2018). Air–water dual-source heat pump system with new composite evaporator. Appl. Therm. Eng., 141, 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.128>

[16] Nam, Y., Ooka, R., Shiba, Y. (2010). Development of dual-source hybrid heat pump system using groundwater and air. Energy Build., 42, 909-916. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.013>

[17] Sekret, R., Starzec, P. (2021). Developing a Cold Accumulator with a Capsule Bed Containing

Water as a Phase-Change Material. Energies, 14, 2703. <https://doi.org/10.3390/en14092703>

[18] Sekret, R., Starzec, P., Kotowicz, J. (2023). Research on water–ice heat accumulator and analysis of its potential use as hybrid source heat pump for building heating. Energy Build., 300, 113670. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113670>

Nadchodzące wydarzenia

WRZESIEŃ		
8-10.09.2026	NADARZYN	WodKan-Tech, Targi Technologii i Urządzeń Wodno-Kanalizacyjnych; PTAK Warsaw Expo
8-10.09.2026	NADARZYN	HEATING TECH, Branżowe Targi Technologii Grzewczych; PTAK Warsaw Expo
8-10.09.2026	NADARZYN	Targi Pomp Ciepła; PTAK Warsaw Expo
13-16.09.2026	MIĘDZYZDROJE	XXX Jubileuszowe Forum Ciepłowników Polskich; Izba Gospodarcza Ciepłownictwo Polskie
14-16.09.2026	GDYNIA	Konferencja „Branża wod.-kan. – Ochrona i bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej. Reagowanie w sytuacjach kryzysowych”
23-25.09.2026	WROCŁAW	XII Konferencja Naukowo-Techniczna oraz Jubileusz 75-lecia Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu
29.09-1.10.2026	NADARZYN	BIOPOWER, Branżowe Targi Biogazu, Biometanu, Biopaliw i Biomasy; PTAK Warsaw Expo
PAŹDZIERNIK		
8-9.10.2026	WARCHAŁY	XII Podlaska Konferencja Ciepłownicza
14-15.10.2026	WROCŁAW	Konferencja Bridge – Energy and Industry Dialogue, Energia w czasach niepewności
19-22.10.2026	BESKIDY	XV Międzynarodowa konferencja kotłów i transformacji energetycznej 2026; Politechnika Śląska
22-23.10.26	TRESNA	XIX Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna; Wentylacja, Klimatyzacja, Ogrzewnictwo, Środowisko PZITS Kraków
LISTOPAD		
4-6.11.2026	JOZEFÓW k. WARSZAWY	XXIII Konferencja Techniczna Izby Gospodarczej Ciepłownictwo Polskie (IGCP)
17-19.11.26	NADARZYN	FUTURE ENERGY, Targi Transformacji Energetycznej i Technologii Niskoemisyjnych; PTAK Warsaw Expo
24-26.11.26	NADARZYN	FIRE PROTECTION, Targi Technologii Zabezpieczeń Przeciwpożarowych; PTAK Warsaw Expo
GRUDZIEŃ		
1-4.12.2026	WARSZAWA	Konferencja Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, PBEC2026
2-4.12.2026	KRAKÓW	VI Międzynarodowa Konferencja; Strategie wdrażania Zielonego Ładu; Woda, Surowce i Energia w Zielonej Transformacji
9-11.12.2026	KRAKÓW	VI Seminarium „Geoenergetyka i Geotermalne Pompy Ciepła” Ogólnopolska Barbórka Geotermalna i pierwszy prąd z geotermii
2027		
STYCZEŃ		
12-14.01.27	NADARZYN	Solar Energy Expo, Największe Targi Przemysłu Odnawialnych Źródeł Energii w Europie Środkowo-Wschodniej; PTAK Warsaw Expo
LUTY		
9-11.02.27	NADARZYN	ECO, Targi ochrony środowiska, PTAK Warsaw Expo
23-25.02.27	NADARZYN	Targi HVAC; PTAK Warsaw Expo
KWIECIEŃ		
14-16.04.27	CZĘSTOCHOWA	Konferencja „Mikrozanieczyszczenia w środowisku człowieka”; XXX lat Wydziału Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej
CZERWIEC		
09-10.06.27	ZIELONA GÓRA	Zjazd Dziekanów kierunku Inżynieria Środowiska; Uniwersytet Zielonogórski; Instytut Inżynierii Środowiska
10-11.06.27	ZIELONA GÓRA	VIII Międzynarodowa Konferencja Inżynieria i Kształtowanie Środowiska oraz obchody Jubileuszu 50 lat Inżynierii Środowiska w Zielonej Górze
PAŹDZIERNIK		
13-15.10.27	BRENNA	XII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna; Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody; Politechnika Śląska