

dr inż. Joanna Piotrowska-Woroniak^{1*)}

ORCID: 0000-0001-7858-231X

dr inż. Tomasz Szul, prof. URK²⁾

ORCID: 0000-0003-0346-2289

dr hab. inż. Grzegorz Woroniak¹⁾

ORCID: 0000-0002-2162-7123

prof. dr hab. inż. Józef Krilek³⁾

ORCID: 0000-0002-8349-5269

Evaluation of the performance of a hybrid heating system, integrated with a photovoltaic system, in a single-family building in use

Ocena działania hybrydowego systemu grzewczego, współpracującego z systemem fotowoltaicznym, w eksploatowanym budynku jednorodzinny

DOI: 10.15199/33.2025.01.04

Abstract. The article presents the results of research on the energy efficiency of a hybrid heating system integrated with a photovoltaic installation. The system was implemented in an existing single-family house with an area of 175 m², which underwent comprehensive thermal modernization. The hybrid system consists of an air-source heat pump and a gas boiler. The heat pump serves as the primary heat source during the transitional period, down to a temperature of -1°C, while the boiler is used during the coldest months. The photovoltaic installation generates electricity to power the heating system devices. The research demonstrated that the hybrid system is highly efficient, particularly when combined with the ability to store excess electricity in the grid. This solution enables coverage of over 90% of the energy demand of the heat pump-based system.

Keywords: hybrid heating systems; energy efficiency of buildings; photovoltaic systems; prosumer system.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań efektywności energetycznej hybrydowego systemu grzewczego współpracującego z instalacją fotowoltaiczną. System został wdrożony w budynku jednorodzinny o powierzchni 175 m², który poddano gruntownej modernizacji. Hybrydowy system składa się z powietrznej pompy ciepła i kotła gazowego. Pompa ciepła pełni rolę głównego źródła ciepła w okresie przejściowym, do temperatury -1°C, natomiast kocioł jest wykorzystywany w miesiącach najchłodniejszych. Instalacja fotowoltaiczna wytwarza energię elektryczną, która zasila urządzenia systemu grzewczego. Badania wykazały, że system hybrydowy jest bardzo efektywny, zwłaszcza w połączeniu z możliwością magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w sieci. Takie rozwiązanie pozwala pokryć ponad 90% zapotrzebowania energetycznego systemu bazującego na pompach ciepła.

Słowa kluczowe: hybrydowe systemy grzewcze; efektywność energetyczna budynków; systemy fotowoltaiczne; system prosumenta.

The energy efficiency of buildings is the ability of a structure to ensure user comfort with minimal energy consumption. Despite numerous efforts to improve building energy efficiency, many still consume more energy than anticipated. The use of fossil fuels as the primary energy source contributes to environmental pollution and climate change [1]. In response to these challenges, **hybrid heating systems combining** air-source heat pumps, photovoltaic panels, and auxiliary heat sources such as gas boilers are gaining popularity [2 ÷ 6]. These systems are often supplemented by air-source heat pumps for domestic hot water heating.

Efektywność energetyczna budynku to zdolność do zapewnienia komfortu użytkownika przy minimalnym zużyciu energii. Mimo licznych działań na rzecz poprawy energooszczędności budynków, wiele z nich wciąż zużywa więcej energii, niż zakładano. Zastosowanie paliw kopalnych jako głównego źródła energii przyczynia się do zanieczyszczenia środowiska i zmian klimatycznych [1]. W odpowiedzi na te wyzwania coraz większą popularność zyskują **hybrydowe systemy grzewcze**, łączące powietrzne pompy ciepła, panele fotowoltaiczne i dodatkowe źródła ciepła, takie jak np. kotły gazowe [2 ÷ 6]. Systemy te często uzupełniane są powietrznymi pompami ciepła do podgrzewania wody użytkowej.

Modelowanie matematyczne oraz symulacje komputerowe wspierają proces podejmowania decyzji dotyczących wdrożenia rozwiązań w określonych warunkach atmosferycznych i środowiskowych [7 ÷ 12]. Różnice w wydajności systemów hybrydowych zależą od warunków ich użytkowania, co wskazuje na znaczenie doboru odpowiedniej strategii sterowania każdego

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

²⁾ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

³⁾ Faculty of Technology, Technical University in Zvolen, Slovakia

*) Correspondence address: j.piotrowska@pb.edu.pl

Mathematical modeling and computer simulations support decision-making for implementing solutions under specific atmospheric and environmental conditions [7 ÷ 12]. Hybrid systems' performance differences depend on operating conditions, underscoring the importance of selecting appropriate control strategies for each case. Research [13] shows that integrated hybrid renewable energy systems (HRES) using at least two renewable energy sources (RES), such as solar and wind, solar and geothermal, or solar alone, hold significant potential in residential construction. Researchers focus on optimizing such systems, aiming to enhance energy conversion efficiency in residential buildings [14]. Results indicate increased performance of air-source heat pumps during cold seasons, especially in climates with high relative humidity and significant heating demands. A study [15] analyzed the compatibility of photovoltaic systems with a double-skin facade (PV-DSF) and air-source heat pumps serving as heat sources for central heating and domestic hot water. Empirical correlations between meteorological conditions and heat demand are often sought to estimate the heat consumption in buildings. Among the basic meteorological parameters, the outside air temperature and solar radiation are the most significant factors in calculating the heat demand, which is the basis for designing the building heat supply system, selecting the heat source, and the power of the photovoltaic installation cooperating with the heating system [16 ÷ 22].

In addition to simulation studies, a crucial aspect is the analysis of the efficiency of systems in used buildings, which allows for the assessment of the impact of various projects on improving energy efficiency, especially in the context of multi-energy systems, where the heating system cooperates with a photovoltaic installation. The article analyzes the energy efficiency of a hybrid system for heating and preparation of domestic hot water cooperating with a photovoltaic system in the example of a single-family building in use.

Analyzed Building

The analyzed single-family building, localized in Białystok in northeastern Poland, was constructed in 1973. It has two above-ground stories and a usable attic. The total heated area is 175 m², and the building volume is 617 m³. The building underwent extensive thermal modernization, including insulation of external walls, the basement, and the roof, as well as the replacement of windows with triple-glazed units, meeting current technical requirements WT 2021.

The hybrid heating system consists of three heat sources: an air-source heat pump and a condensing gas boiler. The air-source heat pump operates in an alternative bivalent system, functioning down to an outdoor temperature of -1°C. Below this temperature, the building is heated using a gas boiler. The central heating system was replaced with a new pumped system featuring convective panel radiators sized for lower heating medium temperatures. The lower heating medium parameters of 40/30°C are maintained when the air-source

przydadku. Badania naukowe [13] pokazują, że zintegrowane hybrydowe systemy energii odnawialnej (HRES), wykorzystujące co najmniej dwa odnawialne źródła energii (OZE), takie jak słoneczna i wiatrowa, słoneczna i geotermalna czy słoneczna, mają duży potencjał w budownictwie mieszkaniowym. Badacze koncentrują się na optymalizacji takich systemów przez poprawę efektywności konwersji energii w budynkach mieszkalnych [14]. Wyniki wskazują na zwiększoną wydajność powietrznych pomp ciepła w zimnych porach roku, zwłaszcza w klimacie o dużej wilgotności względnej oraz w przypadku dużego zapotrzebowania na moc do ogrzewania. W pracy [15] analizowano możliwości współpracy systemu paneli fotowoltaicznych z dwuwarstwową fasadą (PV-DSF) oraz powietrznej pompy ciepła, stanowiącej źródło ciepła dla centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. Aby oszacować ilość ciepła zużywanego w budynkach, analizy często poszukują empirycznej korelacji pomiędzy warunkami meteorologicznymi a zapotrzebowaniem na ciepło. Spośród podstawowych parametrów meteorologicznych, temperatura powietrza zewnętrznego oraz nasłonecznienie są najważniejszymi czynnikami w obliczaniu zapotrzebowania na ciepło, co stanowi podstawę projektowania systemu zaopatrzenia budynku w ciepło, doboru źródła ciepła, a także mocy instalacji fotowoltaicznej współpracującej z systemem grzewczym [16 ÷ 22].

Oprócz badań symulacyjnych, istotnym aspektem jest analiza efektywności systemów w eksploatowanych budynkach, co umożliwia ocenę wpływu różnych przedsięwzięć na poprawę efektywności energetycznej, szczególnie w kontekście systemów wieloenergetycznych, gdzie system grzewczy współpracuje z instalacją fotowoltaiczną. W artykule analizowano efektywność energetyczną systemu hybrydowego do ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej współpracującego z systemem fotowoltaicznym na przykładzie użytkowanego budynku jednorodzinnego.

Analizowany budynek

Analizowany budynek jednorodzinny zlokalizowany jest w Białymstoku w północno-wschodniej Polsce i został wybudowany w 1973 r. Ma dwie kondygnacje nadziemne oraz poddasze użytkowe. Całkowita powierzchnia przestrzeni ogrzewanej wynosi 175 m², a kubatura 617 m³. Budynek przeszedł gruntowną termomodernizację, obejmującą docieplenie ścian zewnętrznych, piwnicy oraz dachu, a także wymianę okien na trzyszybowe, dzięki czemu spełnia aktualne wymagania techniczne WT 2021.

Hybrydowy system grzewczy składa się z trzech źródeł ciepła: powietrznej pompy ciepła i kondensacyjnego kotła gazowego. Powietrzna pompa ciepła pracuje w układzie biwalentnym alternatywnym, a więc do temperatury zewnętrznej -1°C, a poniżej tej wartości, budynek ogrzewany jest za pomocą kotła gazowego. W budynku wymieniono instalację centralnego ogrzewania na nową pompową z płytowymi grzejnikami konwekcyjnymi, które wielkością zostały dostosowane do temperatury czynnika grzewczego wynoszącej 40/30°C utrzymywanej w budynku, podczas ogrzewania za pomocą powietrznej pompy ciepła. W przypadku ogrzewania budynku za pomocą kotła gazowego temperatura wody zasilającej instalację centralnego

heat pump operates. When heating with the gas, the water temperature in the central heating system reaches 60/40°C. The building's calculated design heat load is 11 kW, while the annual heat energy demand for heating purposes is 23,759 kWh. To achieve optimal heat pump operation cycle length and improve the annual performance coefficient, a 220 dm³ buffer tank was installed. This tank provides hydraulic separation between the heat pump circuit and the heating circuits, ensuring smoother operation when the heat pump's heating power does not match the building's momentary heat demand. The buffer tank also maintains the necessary minimum flow for the heat pump. Following modernization, domestic hot water is heated by an individual internal air-source heat pump located in the building's basement. The energy demand for domestic hot water heating is 2,725 kWh.

The heating system is supplemented by a photovoltaic installation with a capacity of 4.96 kWp. The energy generated powers the heat pumps and other electrical devices in the building. The system comprises 16 panels, each with a capacity of 310 Wp, installed on the roof at a 40° angle facing south. The simulated annual electricity production by the PV system is 4,852 kWh/year. The installation is managed under a prosumer net-metering program with an energy value ratio of 1 : 0.8.

In the analyzed building, the hybrid system includes an air-source heat pump type HPA-0 8 CS Plus with an 8 kW heating capacity and a condensing gas boiler type VC146/5-5 with a 14 kW capacity. The gas boiler is used when out-door temperatures drop below -1°C. The air-source heat pump operates alternately

in the bivalent system, switching off at lower temperatures when the auxiliary heat source takes over.

Figure 1 illustrates the operational range of the air-source heat pump between -1°C and +15°C, with additional heat source activated below -1°C. At a bivalent point of -1°C, the air-source heat pump operates for 3,870 hours/year, including 1,637 hours/year at full load. At a bivalent point of 0°C, operational time decreases

ogrzewania wynosi 60/40°C. Obliczeniowe projektowe obciążenie cieplne budynku to 11 kW, natomiast zapotrzebowanie na energię cieplną w budynku na cele grzewcze 23 759 kWh. W celu osiągnięcia optymalnej długości cyklu pracy pompy ciepła i związanego z tym lepszego wskaźnika pracy rocznej, zainstalowany został jeden zbiornik buforowy o pojemności 220 dm³. Zapewnia on rozdział hydrauliczny w obiegu pompy ciepła i obiegach grzewczych oraz bardziej wyrównaną pracę urządzeń w momencie, gdy ich moc grzewcza nie będzie identyczna z chwilowym zapotrzebowaniem na ciepło budynku. Zbiornik buforowy utrzymuje również konieczny minimalny przepływ dla pompy ciepła. Po modernizacji instalacji ciepła woda użytkowa podgrzewana jest za pomocą indywidualnej wewnętrznej powietrznej pompy ciepła zlokalizowanej w piwnicy budynku. Zapotrzebowanie na energię do podgrzewania ciepłej wody użytkowej wynosi 2725 kWh.

System grzewczy wspomagany jest instalacją fotowoltaiczną o mocy 4,96 kWp, której energia jest wykorzystywana do zasilania pomp ciepła oraz innych urządzeń elektrycznych w budynku. Składa się ona z 16 paneli o mocy 310 Wp każdy, zainstalowanych na dachu budynku pod kątem 40° w kierunku południowym. Symulacyjna roczna ilość wyprodukowanej energii elektrycznej przez instalację PV wynosi 4852 kWh/rok. Instalacja rozliczana jest z dostawcą energii w ramach programu prosumenta na podstawie net-meteringu. Wartość energii w systemie opustów wynosi 1 : 0,8.

W analizowanym budynku w układzie hybrydowym na cele grzewcze pracuje powietrzna pompa ciepła typu HPA-0 8 CS Plus o mocy grzewczej 8 kW i kondensacyjny kocioł gazowy typu VC146/5-5 o mocy 14 kW. Kocioł gazowy wykorzystywany jest przez użytkowników przy temperaturze powietrza zewnętrznego

poniżej -1°C. Po przekroczeniu tej temperatury zewnętrznej następuje wyłączenie powietrznej pompy ciepła i ogrzewanie budynku przejmują dodatkowe źródło ciepła.

Na rysunku 1 pokazano zakres pracy powietrznej pompy ciepła w temperaturze od -1°C do +15°C i dodatkowego źródła ciepła, które załączane jest po przekroczeniu temperatury powietrza zewnętrznego -1°C. Czas pracy powietrznej pompy ciepła dla punktu bivalentnego -1°C wynosi 3870 h/rok, w tym 1637 h/rok przy pełnym obciążeniu. Natomiast czas pracy przy punkcie bivalentnym w temperaturze 0°C byłby krótszy i wynosiłby 3523 h/rok, w tym 1442 h/rok przy pełnym obciążeniu. W Bia-

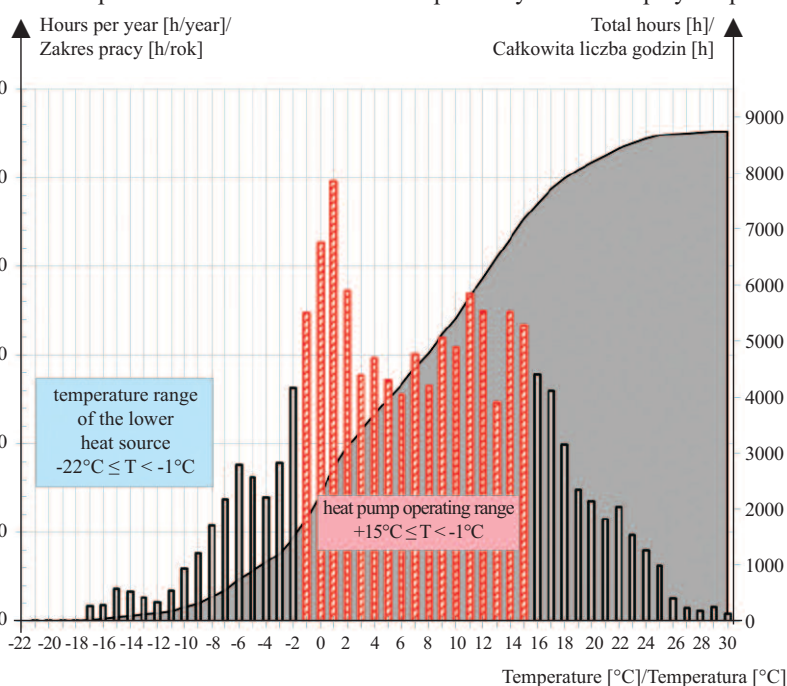


Fig. 1. Temperature range of operation of the hybrid heating system for heating the building and the number of occurrence of hours of a given outdoor temperature

Fig. compiled from [23, 24]

Rys. 1. Zakres temperaturowy pracy hybrydowego systemu grzewczego na cele ogrzewania budynku i liczba występowania godzin danej temperatury zewnętrznej

Rys. opracowano na podstawie [23, 24]

to 3,523 hours/year, with 1,442 hours/year at full load. In Białystok, the most frequent out-door temperature is +1°C, lasting 495.9 hours annually. At an outdoor temperature of -1°C, the air-source heat pump's average energy efficiency is COP = 3.66. The average seasonal SCOP for the studied heat pump, operating between -1°C and +15°C, is 4.31.

Following measurements, the air-source heat pump's (PC-c.o.) electricity consumption for heating purposes from September 2021 to September 2023 was recorded over two heating seasons. In the 2021/2022 heating season, the air-source heat pump consumed 3,804.34 kWh of electricity, while in 2022/2023, it consumed 3,480.31 kWh. The measured electricity consumption by the PC-c.o. solely for heating purposes during this period, as shown in Figure 2.

It should be noted that the PC-c.o. operated only down to -1°C. Temperatures below this occur in Białystok for up to 62 days annually, approximately two months of the heating season. A typical heating season in Białystok lasts 232 days, about 7.5 months annually, with a heating degree-days total of 4,559.4°C·d. During the 2021/2022 and 2022/2023 heating seasons, auxiliary heat sources accounted for about 30% of the energy demand, with the air-source heat pump meeting the remaining energy needs.

In the analyzed hybrid system, the second air-source heat pump (PC-c.w.u.) operates year-round exclusively for domestic hot water preparation for a family of four. The total electricity consumption for domestic hot water heating, including disinfection of the water storage tank, was 926.94 kWh in 2021/2022 and 1,174.32 kWh in 2022/2023. The average monthly electricity consumption by the heat pump was approximately 55 kWh.

W Białymstoku najczęściej występuje temperatura zewnętrzna +1°C i utrzymuje się 495,9 h w roku. Przy temperaturze zewnętrznej -1°C efektywność energetyczna powietrznej pompy ciepła wynosi średnio COP = 3,66. Średni sezonowy SCOP w przypadku badanej pompy ciepła w zakresie jej pracy -1°C ÷ +15°C wynosi 4,31.

Po opomiarowaniu powietrznej pompy ciepła (PC-c.o.) pracującej na cele ogrzewania pomieszczeń zmierzono pobór energii elektrycznej przez pompę od września 2021 r. do września 2023 r., obejmujący dwa sezony grzewcze. W sezonie grzewczym 2021/2022 powietrzna pompa ciepła zużyła 3804,34 kWh energii elektrycznej, zaś w sezonie grzewczym 2022/2023 – 3480,31 kWh. Zmierzone zużycie energii elektrycznej przez PC-c.o. wyłącznie na cele grzewcze od września 2021 r. do września 2023 r. przedstawiono na rysunku 2.

Należy zaznaczyć, że PC-c.o. pracowała tylko do temperatury zewnętrznej -1°C. Niższe temperatury występują w Białymstoku maksymalnie przez 62 dni w roku, czyli przez ok. 2 miesiące sezonu grzewczego. Typowy sezon grzewczy w Białymstoku trwa 232 dni, tj. ok. 7,5 miesiąca w roku, przy liczbie stopniodni sezonu grzewczego 4559,4°C·d. W sezonach grzewczych 2021/2022 i 2022/2023 udział drugiego źródła ciepła wynosił ok. 30%, resztę potrzeb energetycznych realizowała powietrzna pompa ciepła.

W analizowanym układzie hybrydowym, druga powietrzna pompa ciepła (PC-c.w.u.), pracuje cały rok wyłącznie na potrzeby przygotowania ciepłej wody dla czteroosobowej rodziny. Całkowity pobór energii elektrycznej na cele podgrzewania ciepłej wody wraz z uwzględnieniem dezynfekcji zbiornika c.w.u. w sezonie 2021/2022 wynosi 926,94 kWh, a w sezonie 2022/2023 – 1174,32 kWh. Średni miesięczny pobór energii elektrycznej przez pompę ciepła to ok. 55 kWh.

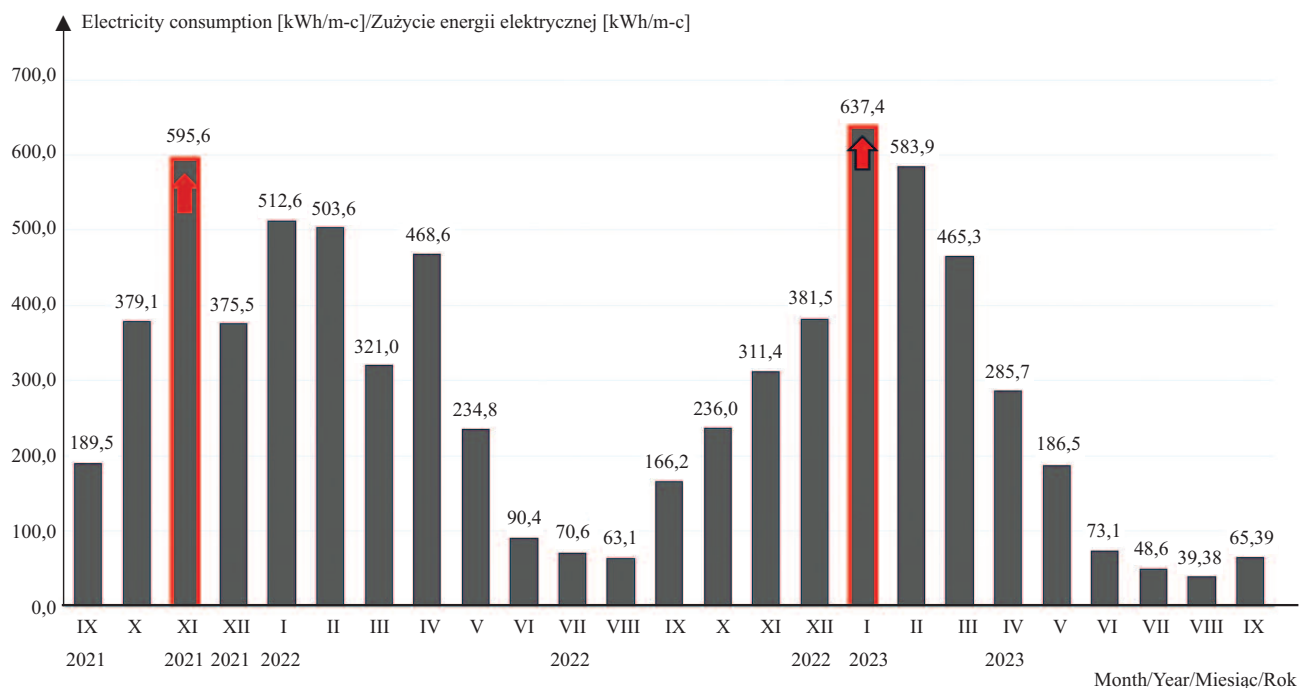


Fig. 2. Measured electricity consumption of an air source heat pump for heating purposes from September 2021 to September 2023
Rys. 2. Zmierzone zużycie energii elektrycznej przez powietrzną pompę ciepła na cele grzewcze od września 2021 r. do września 2023 r.

Evaluation of the Hybrid Heating System

The contribution of the photovoltaic installation to the energy needs of devices such as the air-source heat pump for space heating (PC-c.o.), the air-source heat pump for domestic hot water (PC-c.w.u.), and the gas boiler (KG-Gas) from September 2021 to September 2023, as well as the amount of electricity produced by the PV installation, is shown in Figure 3. The analysis shows that the PV installation, integrated with the hybrid heating system, designed solely for the building's own needs (i.e., the annual PV production does not exceed the building's total annual electricity consumption) without energy storage, cannot supply sufficient electricity to meet heating demands during the heating season. In 2021, the highest energy demand coverage occurred in September when the PV installation supplied 463.2 kWh of energy, meeting 174.2% of demand (265.9 kWh). Energy production from PV remained relatively high in September, while heating demand was low. As PV energy production decreased in subsequent months, demand coverage also dropped. In November and December, production was 90.8 kWh and 50.4 kWh, covering only 13.5% and 11.1% of energy demand, respectively.

In 2022, the PV installation produced significantly more energy than needed during summer. Production reached 794.1 kWh in June, covering 458.3% of demand (173.3 kWh). 481.5% and 533.2% of demand surpluses occurred in July and August, respectively. In winter months

Ocena działania hybrydowego systemu grzewczego

Udział instalacji fotowoltaicznej w pokryciu potrzeb energetycznych powietrznej pompy ciepła na cele ogrzewania pomieszczeń (PC-c.o.), powietrznej pompy ciepła do podgrzewania ciepłej wody użytkowej (PC-c.w.u.) i kotła gazowego (KG-Gas) w okresie od września 2021 r. do września 2023 r., a także ilość wyprodukowanej energii elektrycznej przez instalację PV przedstawiono na rysunku 3. Z analizy wynika, że instalacja fotowoltaiczna współpracująca z hybrydowym systemem grzewczym, zaprojektowana wyłącznie na potrzeby własne budynku (tj. produkcja roczna z instalacji fotowoltaicznej nie przekracza całkowitego rocznego zużycia energii elektrycznej w budynku) bez magazynowania energii nie jest w stanie zapewnić odpowiedniej ilości energii elektrycznej, aby na bieżąco zaspokoić potrzeby grzewcze w okresie sezonu grzewczego. W 2021 r. największe pokrycie zapotrzebowania energetycznego miało miejsce we wrześniu, kiedy instalacja PV dostarczyła 463,2 kWh energii, co stanowiło 174,2% zapotrzebowania (265,9 kWh). We wrześniu produkcja energii z PV była jeszcze stosunkowo duża, podczas gdy zapotrzebowanie na ogrzewanie nie było duże. W kolejnych miesiącach, wraz ze spadkiem produkcji energii z PV, zmniejszał się również stopień pokrycia potrzeb energetycznych. W listopadzie i grudniu produkcja wyniosła odpowiednio 90,8 kWh i 50,4 kWh, co pokryło jedynie 13,5% i 11,1% zapotrzebowania na energię.

W 2022 r. instalacja PV w okresie letnim produkowała znacznie więcej energii, niż wynosiło zapotrzebowanie.

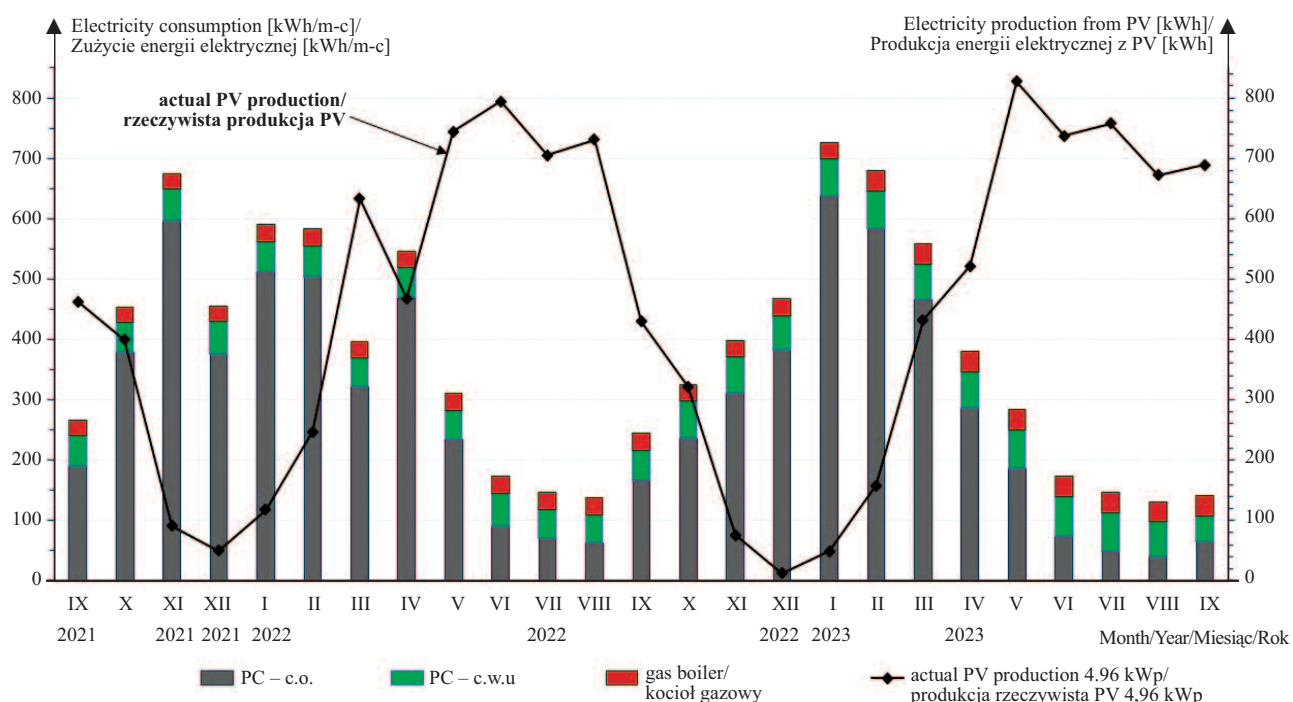


Figure 3: Total electricity consumption of two air-source heat pumps and a gas-fired boiler (auxiliary energy), along with the actual electricity production of a 4.89 kWp photovoltaic system. Designations: PC-c.o. – air heat pump for heating; PC-c.w.u. – air heat pump for hot water; gas boiler – condensing gas boiler; PV-4.98 kWp – actual electricity production of electricity by the PV system [25]

Rys. 3. Całkowite zużycie energii elektrycznej przez dwie powietrzne pompy ciepła i kocioł gazowy (energia pomocnicza) wraz z rzeczywistą produkcją energii elektrycznej przez instalację fotowoltaiczną o mocy 4,89 kWp. Oznaczenia: PC-c.o. – powietrzna pompa ciepła na ogrzewanie; PC-c.w.u. – powietrzna pompa na ciepłą wodę; kocioł gazowy – kocioł gazowy kondensacyjny; PV-4.98 kWp – rzeczywista produkcja energii elektrycznej przez instalację PV [25]

like November and December, energy demand coverage dropped significantly to 19% and 2.7%, highlighting the PV installation's inability to meet the building's energy needs during winter.

Data from 2023 shows a similar trend. In January, the PV installation covered only 6.8% of energy demand due to low winter production (49.5 kWh against 726.5 kWh demand). In summer months like May and June, PV energy production sufficed to meet demand, with June production reaching 426%. In August, the PV installation supplied 672.3 kWh of energy, covering 511.6% of demand.

Considering the total annual PV production of 4.89 kWp, which was 5,444.9 kWh in 2021/2022 and 5,684.8 kWh in 2022/2023, along with the surplus stored in the power grid, the installation is deemed sufficient. The total annual electricity consumption in the analyzed building averaged about 4,692 kWh, encompassing heating, domestic hot water preparation, and gas boiler readiness. The PV system's average annual production of about 5,560 kWh meets approximately 92% of the total annual energy demand for heating and domestic hot water preparation in the building, assuming summer surpluses were stored in the grid and retrieved (1 : 0.8) in winter months.

Summary and Conclusions

The performance of a hybrid heating system supported by a photovoltaic installation was evaluated in an operational single-family building in Białystok, which underwent thermal modernization. The heating system comprises an air-source heat pump and a gas boiler as the peak source. The heat pump operates in an alternative bivalent mode up to -1°C , after which auxiliary heat sources are activated.

The photovoltaic system, with a capacity of 4.96 kWp and an analyzed production of about 5,560 kWh, meets the building's energy needs, including powering heat pumps and other electrical devices for heat production. The analysis revealed that the PV system is highly effective during summer, producing the required energy several times. However, when energy demand is higher in winter, the PV system cannot fully meet heating needs.

The scale of savings from operating the heat pump with the PV installation depends on the type of boiler used for comparison, the type of heat pump, the efficiency of the heat source, the supply temperature (distribution system), and the building's energy standard.

Despite the PV system's limited efficiency during winter, the hybrid system provides efficient heating and domestic hot water preparation with low operating costs. The ability to store energy in the power grid under the prosumer program enables surplus PV energy to cover 92% of the annual thermal energy demand in the analyzed building.

W czerwcu wyprodukowano 794,1 kWh, co stanowiło 458,3% zapotrzebowania (173,3 kWh), a w lipcu i sierpniu znacznie więcej energii, niż było potrzebne, co skutkowało jej nadwyżką równą 481,5% i 533,2% zapotrzebowania. W miesiącach zimowych, takich jak listopad i grudzień, pokrycie potrzeb energetycznych było znacznie mniejsze i wynosiło odpowiednio 19% i 2,7%. Oznacza to, że zimą instalacja PV nie była w stanie w pełni zaspokoić potrzeb energetycznych budynku.

Dane z 2023 r. pokazują podobny trend. W styczniu instalacja PV pokryła jedynie 6,8% zapotrzebowania na energię, co wynikało z niewielkiej produkcji w okresie zimowym (49,5 kWh w stosunku do 726,5 kWh zapotrzebowania). W miesiącach letnich, takich jak maj i czerwiec, produkcja energii z PV była wystarczająca, aby pokryć zapotrzebowanie – w czerwcu wyniosła aż 426%. W sierpniu instalacja PV dostarczyła 672,3 kWh energii, co stanowiło 511,6% zapotrzebowania.

Biorąc pod uwagę całkowitą roczną produkcję instalacji PV o mocy 4,89 kWp, która w sezonie 2021/2022 wynosiła 5444,9 kWh, a w sezonie 2022/2023 – 5684,8 kWh oraz fakt, że nadprodukcja była magazynowana w sieci elektroenergetycznej, można stwierdzić, że zainstalowana instalacja jest wystarczająca. Całkowite zużycie energii elektrycznej w analizowanym budynku wynosiło średnio ok. 4692 kWh rocznie, co obejmuje zarówno zapotrzebowanie na ogrzewanie, przygotowanie ciepłej wody, jak i podtrzymanie w gotowości do pracy kotła gazowego. Instalacja PV w badanym okresie produkowała średnio ok. 5560 kWh rocznie, co oznacza, że jest w stanie pokryć ok. 92% całkowitego zapotrzebowania na energię do ogrzewania i przygotowania c.w.u. w budynku, przy założeniu, że nadwyżka energii wytworzona w miesiącach letnich była magazynowana w sieci i odbierana (1 : 0,8) w miesiącach zimowych.

Podsumowanie i wnioski

Oceniano działanie hybrydowego systemu grzewczego wspomaganego instalacją fotowoltaiczną w eksploatowanym budynku jednorodzinnym w Białymstoku, który poddano termomodernizacji. System grzewczy składa się z powietrznej pompy ciepła i kotła gazowego będącego źródłem szczytowym. Pompa ciepła pracuje w trybie biwalentnym alternatywnym do temperatury -1°C , potem załączane jest dodatkowe źródło ciepła.

System fotowoltaiczny o mocy 4,96 kWp, którego produkcja w analizowanym okresie wynosiła ok. 5560 kWh energii elektrycznej, pokrywa potrzeby energetyczne budynku, w tym zasilanie pomp ciepła i innych urządzeń elektrycznych służących do produkcji ciepła. Analiza wykazała, że system PV jest skuteczny w miesiącach letnich, dostarczając nawet kilkukrotnie więcej energii, niż potrzeba. Natomiast w sezonie zimowym, kiedy zapotrzebowanie na energię jest większe, PV nie jest w stanie w pełni pokryć potrzeb grzewczych. Skala oszczędności wynikających z eksploatacji pompy ciepła w układzie z instalacją fotowoltaiczną zależy od rodzaju kotła, z którym porównujemy pompę ciepła, typu pompy ciepła, sprawności źródła ciepła oraz temperatury zasilania (instalacji odbiorczej), a także – od standardu energetycznego budynku. ►

The research was carried out within the framework of the Rector's Activation of URK, in accordance with Rector's Order: 107/2022 of November 18, 2022, the Subsidy of the Coordinator of the Discipline of Mechanical Engineering at the H. Kollataj University of Agriculture in Cracow, and within the framework of work No. WZ/WBiIS/6/2023 and WZ/WBiIS/7/2023 at the Białystok University of Technology.

Received: 06.12.2024

Revised: 02.01.2025

Published: 24.01.2025

Pomimo ograniczonej wydajności PV zimą, system hybrydowy zapewnia efektywne ogrzewanie i przygotowanie ciepłej wody użytkowej przy niewielkich kosztach eksploatacyjnych. Możliwość magazynowania energii w sieci elektroenergetycznej w ramach programu prosument umożliwia wykorzystanie nadprodukcji energii elektrycznej (PV), co pozwala na pokrycie 92% rocznego zapotrzebowania na energię ciepłą w analizowanym budynku.

Badania wykonano w ramach Aktywizacji Rektora URK, zgodnie z Zarządzeniem Rektora: 107/2022 z 18 listopada 2022 r., Dofinansowania Koordynatora Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna na Uniwersytecie Rolniczym im. H. Kollataja w Krakowie oraz w ramach prac nr WZ/WBiIS/6/2023 i WZ/WBiIS/7/2023 na Politechnice Białostockiej.

Artykuł wpłynął do redakcji: 06.12.2024 r.

Otrzymał poprawiony po recenzjach: 02.01.2025 r.

Opublikowano: 24.01.2025 r.

Literatura

- [1] Usman M, Jonas D, Frey G. A methodology for multi-criteria assessment of renewable integrated energy supply options and alternative HVAC systems in a household. *Energy Build.* 2022; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112397>.
- [2] Neubert D, Glück C, Schnitzius J, et al. Analysis of the Operation Characteristics of a Hybrid Heat Pump in an Existing Multifamily House Based on Field Test Data and Simulation. *Energies.* 2022; <https://doi.org/10.3390/en15155611>.
- [3] Ren XY, Li LL, Ji BX, Liu JQ. Design and analysis of solar hybrid combined cooling, heating and power system: A bi-level optimization model. *Energy.* 2024; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130362>.
- [4] Da J, Li M, Li G, et al. Simulation and experiment of a photovoltaic – air source heat pump system with thermal energy storage for heating and domestic hot water supply. *Build Simul.* 2023; <https://doi.org/10.1007/s12273-023-0999-5>.
- [5] Chhugani B, Pärish P, Helmling S, Giovannetti F. Comparison of PVT – heat pump systems with reference systems for the energy supply of a single-family house. *Sol Energy Adv.* 2023; <https://doi.org/10.1016/j.seja.2023.100031>.
- [6] Szul T, Lis S, Tomasik M. Ocena efektywności energetycznej i ekonomicznej instalacji grzewczej opartej na pompach ciepła typu powietrze-woda współpracujących z mikroinstalacjami fotowoltaicznymi. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2020; <https://doi.org/10.15199/48.2020.04.19>.
- [7] Herrería-Alonso S, Suárez-González A, Rodríguez-Pérez M, et al. A Solar Altitude Angle Model for Efficient Solar Energy Predictions. *Sensors.* 2020; <https://doi.org/10.3390/s20051391>.
- [8] Mayer MJ, Gróf G. Extensive comparison of physical models for photovoltaic power forecasting. *Appl Energy.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116239>.
- [9] Rijvers L, Rindt C, de Keizer C. Numerical Analysis of a Residential Energy System That Integrates Hybrid Solar Modules (PVT) with a Heat Pump. *Energies.* 2022; <https://doi.org/10.3390/en15010096>.
- [10] Zukowski M, Woroniak G. Estimation of energy savings resulting from the cooperation of an air to water heat pump with a solar air heater. *Sol Energy.* 2023; <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.049>.
- [11] Roccatello E, Prada A, Baggio P, Baratieri M. Analysis of the Influence of Control Strategy and Heating Loads on the Performance of Hybrid Heat Pump Systems for Residential Buildings. *Energies.* 2022; <https://doi.org/10.3390/en15030732>.
- [12] Piotrowska-Woroniak J, Baranowski B. Analiza techniczno-ekonomiczna wyboru pomp ciepła dla zaspokojenia potrzeb cieplnych w budynku jednorodinnym. *Rynek Instalacyjny.* 2017; 4: 28–34.
- [13] Canale L, Di Fazio AR, Russo M, Frattolillo A, Dell'Isola M. An Overview on Functional Integration of Hybrid Renewable Energy Systems in Multi-Energy Buildings. *Energies.* 2021; <https://doi.org/10.3390/en14041078>.
- [14] Vialto G, Noro M, Rokini M. Studying a hybrid system based on solid oxide fuel cell combined with an air source heat pump and with a novel heat recovery. *J Electrochem Energy Convers Storage.* 2019; <https://doi.org/10.1115/1.4042895>.
- [15] Martin-Escudero K, Salazar-Herran E, Campos-Celador A, Diarce-Belloso G, Gomez-Arriaran I. Solar energy system for heating and domestic hot water supply by means of a heat pump coupled to a photovoltaic ventilated façade. *Sol Energy.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.037>.
- [16] Thieblemont H, Haghghat F, Ooka R, Moreau A. Predictive control strategies based on weather forecast in buildings with energy storage system: A review of the state-of-the art. *Energy Build.* 2017; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.010>.
- [17] Hou J, Li H, Nord N, Huang G. Model predictive control under weather forecast uncertainty for HVAC systems in university buildings. *Energy Build.* 2022; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111793>.
- [18] Adegbenro A, Short M, Angione C. An Integrated Approach to Adaptive Control and Supervisory Optimisation of HVAC Control Systems for Demand Response Applications. *Energies.* 2021; <https://doi.org/10.3390/en14082078>.
- [19] Piotrowska-Woroniak J, Szul T, Cieśliński K, Krilek J. The Impact of Weather-Forecast-Based Regulation on Energy Savings for Heating in Multi-Family Buildings. *Energies.* 2022; <https://doi.org/10.3390/en15197279>.
- [20] Nasouri M, Delgarm N. Numerical Modelling, Energy-Exergy Analyses, and Multi-objective Programming of the Solar-assisted Heat Pump System Using Genetic Algorithm Coupled with the Multi-criteria Decision Analysis. *Arab J Sci Eng.* 2023; <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07125-2>.
- [21] Famiglietti J, Toppi T, Bonalumi D, Motta M. Heat pumps for space heating and domestic hot water production in residential buildings, an environmental comparison in a present and future scenario. *Energy Convers Manag.* 2023; <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116527>.
- [22] Naumann G, Schropp E, Gaderer M. Life Cycle Assessment of an Air-Source Heat Pump and a Condensing Gas Boiler Using an Attributional and a Consequential Approach. *Procedia CIRP.* 2022; <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.058>.
- [23] Statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków (stacja Białystok). 2024. <https://dane.gov.pl/pl/dataset/797>.
- [24] Materiały do projektowania firmy Stiebel Eltron. Mini Plama HPA-O CS Plus. 2024. <https://www.stiebeltron.pl> (dostęp 10 grudnia 2024).
- [25] Woroniak G, Piotrowska-Woroniak J, Woroniak A, Owczarek E, Giza K. Analysis of the Hybrid Power-Heating System in a Single-Family Building, along with Ecological Aspects of the Operation. *Energies.* 2024; <https://doi.org/10.3390/en17072601>.