



Analiza efektywności energetycznej i emisji CO₂ w cyklu życia układu gruntowej pompy ciepła zintegrowanej z mikroinstalacją PV

Life-cycle analysis of energy efficiency and CO₂ emissions in a ground-source heat pump system integrated with a PV micro-installation



Dr inż. Sylwia Wciślik

ORCID ID: [0000-0003-2152-9686](https://orcid.org/0000-0003-2152-9686)
Wydział Inżynierii Środowiska,
Geodezji i Energetyki Odnawialnej
Politechnika Świętokrzyska
sylwiazw@tu.kielce.pl



Inż. Alicja Kokosza

Wydział Inżynierii Środowiska,
Geodezji i Energetyki Odnawialnej
Politechnika Świętokrzyska
alicia.kokosza@gmail.com

Słowa kluczowe: pompa ciepła, instalacja fotowoltaiczna, charakterystyka energetyczna budynku, autokonsumpcja energii, ślad węglowy, energia użytkowa

Streszczenie

Celem pracy jest określenie rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną kotłowni z gruntową pompą ciepła w budynku jednorodzinnym oraz ocena, w jakim stopniu instalacja fotowoltaiczna może pokryć to zapotrzebowanie. Metodyka opiera się na obliczeniach energii użytkowej, końcowej i pomocniczej zgodnie z obowiązującymi normami oraz na analizie parametrów technicznych budynku i pompy ciepła.

Wyniki wskazują, że budynek charakteryzuje się niskim zapotrzebowaniem na energię użytkową (68,6 kWh/m²rok) oraz wysoką efektywnością systemów technicznych. Roczne zużycie energii końcowej przez kotłownię wynosi ok. 6900 kWh. Aby pokryć 50% tego zapotrzebowania, wystarczą cztery moduły PV o mocy 450 Wp. Zastosowanie fotowoltaiki obniża wskaźnik EP z 67,6 do 33,4 kWh/(m²rok) i redukuje emisję CO₂ o ok. 50%.

Wnioski potwierdzają, że integracja pompy ciepła z instalacją PV znacząco poprawia efektywność energetyczną, zmniejsza ślad węglowy i zwiększa niezależność energetyczną budynku.

Keywords: ground-source heat pump, photovoltaic installation, building energy performance, energy self-consumption, carbon footprint, useful energy

Abstract

The aim of the study is to determine the annual electricity demand of a boiler room equipped with a ground-source heat pump in a single-family house, and to assess the extent to which a photovoltaic installation can cover this demand. The methodology is based on calculations of useful, final, and auxiliary energy in accordance with applicable standards, as well as an analysis of the technical parameters of the building and the heat pump.

The results show that the building has a low useful energy demand (68.6 kWh/m²year) and high efficiency of its technical systems. The annual final energy consumption of the boiler room is approximately 6900 kWh. To cover 50% of this demand, four PV modules with a capacity of 450 Wp each are sufficient. The use of photovoltaics reduces the EP indicator from 67.6 to 33.4 kWh/(m²year) and lowers CO₂ emissions by around 50%. The conclusions confirm that integrating a heat pump with a PV installation significantly improves energy efficiency, reduces emissions, and increases the building's energy independence. fessional insights derived from practical field experience.

Wstęp oraz zarys problemu

Dynamiczny wzrost zainteresowania pompami ciepła jako podstawowym źródło ciepła sprawia, że precyzyjna ocena ich zapotrzebowania na energię elektryczną staje się kluczowa zarówno na etapie projektowym, jak i eksploatacyjnym. W przeciwieństwie do urządzeń spalających, koszty pracy pomp ciepła wynikają bezpośrednio z poboru energii elektrycznej, który zależy od warunków pracy, sprawności systemu oraz charakterystyki energetycznej budynku. Istotnym czynnikiem jest także rodzaj zastosowanego dolnego źródła ciepła, którym jest powietrze, grunt, woda, ale coraz częściej także i ścieki (Stokowiec & Berezowska-Kominek, 2025).

Projektowanie kotłowni i pomieszczeń technicznych musi odbywać się zgodnie z wytycznymi producentów

oraz normami (Polski Komitet Normalizacyjny, 2017a, 2017b, 2019) oraz Warunkami Technicznymi (Minister Rozwoju i Technologii, 2022).

W literaturze dotyczącej projektowania nowoczesnych systemów grzewczych coraz większy nacisk kładzie się na precyzyjne określanie zapotrzebowania na energię elektryczną w instalacjach wykorzystujących pompy ciepła. Artykuł (Siergiejuk & Gajewski, 2012) przedstawia szczegółową analizę pracy pompy ciepła w kontekście bilansowania energii w budynkach o zabudowie szeregowej. Autorzy analizują obiekt o zapotrzebowaniu na moc cieplną 148,97 kW dla 63 użytkowników ciepłej wody użytkowej. Dobrano tam cztery jednostki grzewcze Vaillant geoTHERM VWS 460/2, każda o mocy grzewczej 42,5 kW. Energia końcowa potrzebna do pracy sprężarek i pomp obiegowych wyniosła 145036,39 kWh/rok, co przełożyło

się na koszt eksploatacyjny 69990,18 zł rocznie w taryfie G11, która jest najpopularniejsza dla większości gospodarstw domowych w Polsce. Analiza wykazała, że mimo niższych kosztów eksploatacyjnych pompy ciepła, jej koszt inwestycyjny jest ponad dwukrotnie wyższy niż w przypadku kotłowni na pelety.

Z kolei w opracowaniu (Kwestar & Kostrzevska, 2023) zwraca się uwagę na to, że analiza zapotrzebowania na energię elektryczną dla pomp ciepła powinna obejmować nie tylko pracę sprężarki, lecz także wpływ elementów pomocniczych oraz współpracę z innymi źródłami energii. Autorzy analizują budynek jednorodzinny o powierzchni użytkowej 204,3 m², wyposażony w ogrzewanie podłogowe oraz instalację CWU z wymiennikiem pojemnościowym. Roczne zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania wynosi 18343,0 kWh, natomiast zapotrzebowanie na ciepło do przygotowania CWU dla 4-osobowej rodziny – 2470,2 kWh/rok. W tym hybrydowym układzie zastosowano pompę ciepła powietrze–woda Termet Heat Platinum 13 EVI o mocy grzewczej 13,5 kW, współpracującą z indywidualnym zasobnikiem ciepła ITES o pojemności 11,45 m³ i mocy 395 kWh, co pozwala na pokrycie potrzeb cieplnych budynku przez około 2,5 doby w okresie najniższych temperatur. W artykule zwrócono również uwagę na znaczenie analizy profilu zużycia energii elektrycznej w ciągu roku. Roczne zużycie energii elektrycznej przez pompę ciepła i grzałkę wspomagającą wynosi 13564,81 kWh, natomiast pozostałe odbiorniki domowe zużywają około 2500,0 kWh/rok. Łączne zużycie energii elektrycznej gospodarstwa domowego wynosi zatem ok. 16065,0 kWh/rok. W związku z tym dobrano 70 paneli fotowoltaicznych o sumarycznej mocy 27,65 kWp. Roczna produkcja energii elektrycznej z instalacji PV, przy optymalnej orientacji wschód–zachód, wynosi 22220,90 kWh. Oznacza to, że teoretycznie instalacja jest w stanie pokryć całkowite roczne zużycie energii elektrycznej budynku, a w miesiącach letnich generuje znaczną nadwyżkę energii oddawaną do sieci w systemie net-billingu (Ustawa o odnawialnych źródłach energii, 2015). Takie podejście umożliwia ocenę efektywności energetycznej całego układu oraz stanowi podstawę do optymalizacji doboru mocy fotowoltaiki w zależności od przewidywanej autokonsumpcji. Włączenie tych zagadnień do obliczeń jest istotne przy projektowaniu kotłowni wyposażonej w pompę ciepła, ponieważ pozwala na precyzyjne określenie rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz ocenę opłacalności zastosowanych rozwiązań. Ponadto, literatura potwierdza, że taki zintegrowany układ pompy ciepła oraz instalacji fotowoltaicznej redukuje koszty eksploatacyjne oraz emisję CO₂, co dąży do wzrostu niezależności energetycznej (Kłobus, 2025).

W pracy (Perzyński et al., 2024) pojawiają się również opracowania oparte na danych rzeczywistych, które pozwalają ocenić, jak praca pompy ciepła wpływa na bilans energii elektrycznej w budynku oraz na stopień wykorzystania energii produkowanej lokalnie. Artykuł dostarcza szczegółowych danych dotyczących energii wygenerowanej (E_g), oddanej do sieci (E_{exp}) oraz zużytej na miejscu (E_a). W roku 2022, kiedy budynek ogrzewany był jeszcze kotłem, instalacja PV wyprodukowała 12957,0 kWh, z czego 10914,0 kWh oddano do sieci, a jedynie 2043,0 kWh zużyto lokalnie. Odpowiadało to współczynnikowi auto-

konsumpcji 15,77%. Po wymianie źródła ciepła na pompę ciepła w roku 2023 produkcja PV wyniosła 13784,0 kWh, z czego 10436,0 kWh oddano do sieci, a 3348,0 kWh zużyto na miejscu, co podniosło autokonsumpcję do 24,29%. Oznacza to wzrost o 8,52 punktu procentowego, wynikający bezpośrednio ze zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną przez pompę ciepła. Wyniki badań pokazują, że po zastąpieniu tradycyjnego źródła ciepła pompą ciepła znacząco wzrasta zapotrzebowanie na energię elektryczną, co przekłada się na wyższy poziom autokonsumpcji energii z instalacji PV. W miesiącach zimowych 2023 roku współczynnik autokonsumpcji osiągał wartości rzędu 40–45%, podczas gdy latem spadał do 18–20%, co odzwierciedla sezonową zmienność obciążeń cieplnych i pracy pompy ciepła. W artykule obliczono również współczynnik wykorzystania energii z modułów PV (WPV). W 2022 roku wynosił on średnio 74,7%, natomiast w 2023 roku wzrósł do 77,3%, co oznacza poprawę o 2,6 punktu procentowego. W miesiącach zimowych WPV przekraczał 80%, co wynikało z większego zapotrzebowania na energię elektryczną w okresie grzewczym.

Włączenie tych wyników do procesu obliczeniowego pozwala lepiej oszacować energię użytkową, końcową i pomocniczą potrzebną do pracy pompy ciepła oraz ocenić, w jakim stopniu instalacja PV może pokryć to zapotrzebowanie.

Współczynnik autokonsumpcji k_{ak} określa udział energii elektrycznej wytworzonej w instalacji fotowoltaicznej, która została zużyta bezpośrednio na potrzeby własne odbiorcy, bez wprowadzania jej do sieci elektroenergetycznej, podczas gdy współczynnik samopokrycia k_{sk} wyraża stopień, w jakim energia ta pokrywa roczne zapotrzebowanie obiektu na energię elektryczną (Luthander et al., 2015), co zapisuje się wzorami (1) i (2).

$$k_{ak} = \frac{E_{PV \rightarrow load}}{E_{PV}} \quad (1)$$

gdzie:

$E_{PV \rightarrow load}$ – ilość energii elektrycznej wytworzonej przez instalację fotowoltaiczną, która została zużyta bezpośrednio w obiekcie, kWh

E_{PV} – całkowita energia wyprodukowana przez instalację PV w danym okresie, kWh

$$k_{sk} = \frac{E_{PV \rightarrow load}}{E_{load}} \quad (2)$$

gdzie:

$E_{PV \rightarrow load}$ – ilość energii elektrycznej wytworzonej przez instalację fotowoltaiczną, która została zużyta bezpośrednio w obiekcie, kWh

E_{load} – całkowite zapotrzebowanie energetyczne obiektu na energię elektryczną, kWh

Jak się okazuje, wysoka wartość autokonsumpcji nie oznacza samowystarczalności energetycznej, nawet przy zastosowaniu magazynu energii elektrycznej, co wynika z sezonowości produkcji energii z instalacji fotowoltaicznej w warunkach klimatu umiarkowanego oraz niskiej ilości godzin słonecznych w sezonie grzewczym (patrz Tabela 1).

Niniejszy artykuł przedstawia analizę energetyczną jednorodzinny budynek mieszkalny wyposażony w kotłownię z gruntową pompą ciepła oraz określenie

Tabela 1. Współczynnik autokonsumpcji i samopokrycia energii elektrycznej systemowej w instalacjach PV współpracujących z pompą ciepła, Źródło: opracowanie własne

Table 1. The self-consumption and self-sufficiency coefficient of system electrical energy in PV installations operating with a heat pump, Source: authors' own study

Układ energetyczny	Współczynnik autokonsumpcji (k_{ak})	Współczynnik samokonsumpcji (k_{sk})	Komentarz techniczny
PV + zapotrzebowanie bytowe (bez PC*)	0,25–0,35	0,15–0,25	Typowy profil dzienny, wysoka nadprodukcja w południe
PV + pompa ciepła (bez magazynu)	0,30–0,45	0,25–0,40	PC zwiększa zużycie w ciągu dnia, ale sezonowość nadal istotna
PV + PC + bufor ciepła (sterowanie PV-first)	0,40–0,55	0,35–0,50	Bezładność cieplna pozwala przesunąć pracę sprężarki
PV + PC + magazyn energii (5–10 kWh)	0,55–0,70	0,45–0,65	Magazyn przesunął energię z dnia na noc
PV + PC + magazyn energii (10–15 kWh)	0,65–0,80	0,55–0,75	Ograniczenie przez sezonowość produkcji PV
PV + PC + magazyn + sterowanie prognostyczne	0,70–0,85	0,60–0,80	Wysoki poziom optymalizacji, nadal brak sezonowej autonomii

*PC – pompa ciepła

rocznego zużycia energii elektrycznej przez cały system grzewczy na potrzeby CO oraz CWU. W opracowaniu obliczono kolejno energię użytkową potrzebną do ogrzewania oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej, a następnie energię końcową i pomocniczą zużywaną przez pompę ciepła i urządzenia współpracujące. Wyniki te pozwoliły wyznaczyć rzeczywiste roczne zapotrzebowanie kotłowni na energię elektryczną, z uwzględnieniem współczynnika efektywności SCOP/COP oraz pracy pomp obiegowych, automatyki i pozostałej infrastruktury technicznej. Analizę rozszerzono o możliwości pokrycia połowy tego zapotrzebowania energią z instalacji fotowoltaicznej. W tym celu dobrano moc systemu PV z uwzględnieniem liczby godzin słonecznych w sezonie oraz poza sezonem grzewczym (Wciślik i Kotrys-Działak, 2021). Opracowanie stanowi więc kompleksowe wyznaczenie bilansu energetycznego kotłowni z pompą ciepła oraz ocenę, w jakim stopniu instalacja fotowoltaiczna może ograniczyć pobór energii z sieci i poprawić efektywność całego układu. Wykonano ponadto obliczenia śladu węglowego w 25 letnim cyklu życia instalacji PV.

Materiały i metody

Do obliczenia rocznego zapotrzebowania na energię użytkową Q_u , według rozporządzenia (Minister Infrastruktury i Rozwoju, 2015), należy obliczyć $Q_{W,nd}$ roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz $Q_{H,nd}$ roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji.

$$Q_u = Q_{W,nd} + Q_{H,nd} \quad (3)$$

gdzie:

$Q_{W,nd}$ – roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do przygotowania ciepłej wody użytkowej, kWh/rok

$Q_{H,nd}$ – roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji, kWh/rok

Parametr $Q_{W,nd}$ pozwala określić, ile faktycznej energii potrzeba, aby podgrzać wymaganą ilość wody do temperatury użytkowej, niezależnie od zastosowanej techno-

logii czy rodzaju instalacji. Dzięki temu można w sposób porównywalny oceniać różne systemy przygotowania ciepłej wody, np. kotły gazowe, elektryczne, pompy ciepła, kolektory słoneczne czy ciepło z sieci. Wynik ten stanowi podstawę do dalszych obliczeń energii końcowej oraz energii pierwotnej, które ostatecznie decydują o wskaźniku zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP i klasie energetycznej budynku, której to obowiązek określenia wejdzie w życie jeszcze w 2026 r. Wyznacza się, w sposób określony wzorem (4).

$$Q_{W,nd} = \frac{V_{Wi} \cdot A_f \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot (\theta_w - \theta_0) \cdot k_R \cdot t_R}{3600}, \frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \quad (4)$$

gdzie:

V_{Wi} – jednostkowe dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową, dm³/(m²doła)

A_f – powierzchnia pomieszczeń o regulowanej temperaturze powietrza (powierzchnia ogrzewana), m²

c_w – ciepło właściwe wody (równe 4,19), kJ/(kg·K)

ρ_w – gęstość wody (równa 1), kg/dm³

θ_w – obliczeniowa temperatura ciepłej wody użytkowej w zaworze czerpalnym, °C

θ_0 – obliczeniowa temperatura wody przed podgrzaniem, °C

k_R – współczynnik korekcyjny ze względu na przerwę w użytkowaniu ciepłej wody użytkowej, –

t_R – liczba dni w roku (jest równa 365), doba

Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji stanowi podstawę oceny izolacyjności budynku w kontekście bilansu zysków oraz strat ciepła. Na tej podstawie wyznacza się energię końcową i pierwotną (5).

$$Q_{H,nd} = \sum_s Q_{H,nd,s}, \frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \quad (5)$$

gdzie:

$Q_{H,nd,s}$ – roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji w strefie ogrzewanej, kWh/rok

s – liczba stref ogrzewania, –

Kluczową rolę odgrywają tu również parametry wentylacji, zarówno naturalnej, jak i mechanicznej. Znajomość strumieni powietrza, rodzaju systemu oraz sprawności odzysku ciepła umożliwia określenie strat wynikających z wymiany powietrza. Dane te, ujęte w standardowych wartościach w metodologii, pozwalają na ograniczenie wielkości wymaganej energii użytkowej (Minister Infrastruktury i Rozwoju, 2015).

Obliczenia wymagają również klimatycznego profilu temperatury zewnętrznej, przyjmowanego zgodnie ze standardowym klimatem referencyjnym, oraz podziału budynku na strefy cieplne o określonych parametrach eksploatacyjnych. Dopiero zestawienie wszystkich tych informacji umożliwia sporządzenie rocznego bilansu energetycznego stref ogrzewanych, którego wynikiem jest właśnie wartość $Q_{H,nd}$.

Aby jednak przejść od energii użytkowej do energii końcowej, niezbędne jest uwzględnienie charakterystyki zastosowanych systemów technicznych, takich jak ogrzewanie, wentylacja, przygotowanie ciepłej wody czy chłodzenie. Na tym etapie analizuje się ich sprawność, sposób regulacji oraz straty towarzyszące procesowi dostarczania energii do poszczególnych stref budynku.

Wyznaczenie rocznego zapotrzebowania na energię końcową dostarczoną do budynku lub części budynku dla systemów technicznych wyznacza się według wzoru (6).

$$Q_k = Q_{k,H} + Q_{k,W} + Q_{k,C} + Q_{k,L} + E_{el,pom}, \frac{\text{kW}}{\text{rok}} \quad (6)$$

gdzie:

$Q_{k,H}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku lub części budynku dla systemu ogrzewania, kW/rok

$Q_{k,W}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku lub części budynku dla systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej, kW/rok

$Q_{k,C}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku lub części budynku dla systemu chłodzenia, kW/rok

$Q_{k,L}$ – roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczaną do budynku lub części budynku dla systemu wbudowanej instalacji oświetlenia, kW/rok

$E_{el,pom}$ – roczne zapotrzebowanie na energię pomocniczą końcową dostarczaną do budynku lub części budynku dla systemów technicznych, kW/rok

Roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla systemów technicznych Q_p wyznacza się ze wzoru (7).

$$Q_p = Q_{p,H} + Q_{p,W} + Q_{p,C} + Q_{p,L}, \frac{\text{kW}}{\text{rok}} \quad (7)$$

gdzie:

$Q_{p,H}$ – roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla systemu ogrzewania, kW/rok

$Q_{p,W}$ – roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej, kW/rok

$Q_{p,C}$ – roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla systemu chłodzenia, kW/rok

$Q_{p,L}$ – roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla systemu wbudowanej instalacji oświetlenia, kW/rok

Roczne zapotrzebowanie na energię pomocniczą końcową dostarczaną do budynku lub części budynku dla systemów technicznych $E_{el,pom}$ określa się z zależności (8).

$$E_{el,pom} = E_{el,pom,H} + E_{el,pom,W} + E_{el,pom,C}, \frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \quad (8)$$

gdzie:

$E_{el,pom,H}$ – roczne zapotrzebowanie na energię pomocniczą końcową dostarczaną do budynku lub części budynku dla systemu ogrzewania, kWh/rok

$E_{el,pom,W}$ – roczne zapotrzebowanie na energię pomocniczą końcową dostarczaną do budynku lub części budynku dla systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej, kWh/rok

$E_{el,pom,C}$ – roczne zapotrzebowanie na energię pomocniczą końcową dostarczaną do budynku lub części budynku dla systemu chłodzenia, kWh/rok

Sumarycznie, dla wszystkich systemów technicznych można zapisać następująco:

$$E_{el,pom,H,W,C} = \sum_i q_{el,H,W,C,i} \cdot t_{te,i} \cdot A_f \cdot 10^{-3}, \frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \quad (9)$$

gdzie:

$q_{el,H,W,C,i}$ – zapotrzebowanie na moc elektryczną do napędu i-tego urządzenia pomocniczego w danym systemie, W/m²

$t_{te,i}$ – czas działania i-tego urządzenia pomocniczego w systemie ogrzewania w ciągu roku, h/rok

A_f – powierzchnia pomieszczeń o regulowanej temperaturze powietrza (powierzchnia ogrzewana), m²

Wartości $q_{el,i}$ oraz $t_{te,i}$ określa się według (Minister Infrastruktury i Rozwoju, 2015) lub na podstawie rzeczywistych danych odczytanych z tablic znamionowych.

W przypadku pompy ciepła zasilanej energią elektryczną systemową rozważa się montaż mikroinstalacji PV w celu obniżenia kosztów za energię elektryczną. Średni dobowy czas efektywnego pozyskiwania energii przez ogniwa fotowoltaiczne w okresie zimowym w Kielcach wynosi około 3,5–4,5 godziny dziennie. To oszacowanie opiera się na danych klimatycznych oraz analizach nasłonecznienia w regionie. Według danych z Geoportalu Gminy Kielce (Geoportal Polski średnie dzienne nasłonecznienie w okresie zimowym wynosi około 167,75 Wh/m²/dobę. Przy założeniu, że panele fotowoltaiczne mają efektywność konwersji energii na poziomie około 15–20%, można oszacować, że średni dobowy czas efektywnego pozyskiwania energii w okresie zimowym w Kielcach wynosi około 3,5–4,5 godziny dziennie (Geoportal Kielce – Fotowoltaika Kielce).

To oznacza, że w okresie zimowym, przy odpowiednich warunkach pogodowych, instalacje fotowoltaiczne w Kielcach mogą efektywnie produkować energię przez około 3,5 do 4,5 godziny dziennie. Warto jednak pamiętać, że rzeczywisty czas efektywnego pozyskiwania energii może się różnić w zależności od konkretnych warunków lokalnych, takich jak kąt nachylenia paneli, orientacja względem stron świata, obecność zacielenia czy też stan techniczny samej instalacji.

Niezbędną ilość paneli fotowoltaicznych wyznacza się z algorytmu (10).

$$P_h = \frac{P_{dobowe}}{t} \quad (10)$$

gdzie:

$P_{h,P_{dobowe}}$ – odpowiednio godzinowy oraz dobowy wymagany uzysk mocy z instalacji PV, kWp
 t – czas, dni

$$P_{dobowe} = (B_{PC} + E_{el,pom}) \cdot 24h \cdot t_s/365 \quad (11)$$

gdzie:

$B_{PC} + E_{el,pom}$ – zapotrzebowanie na energię elektryczną przez pompę ciepła i armaturę służącą do przygotowania ciepła na cele CO ($B_{PC,H}$, $E_{el,pom,H}$) oraz CWU ($B_{PC,W}$, $E_{el,pom,W}$), kWp; wielkości wynikające z wykonanych wyżej obliczeń charakterystyki energetycznej
 t_s – sezon pracy pompy ciepła, dni

Niezbędną ilość modułów fotowoltaicznych o danej mocy oblicza się z następującej zależności (12).

$$n = \frac{P_h}{P_{PV}} \quad (12)$$

gdzie:

P_h – godzinowy wymagany uzysk mocy PV, kWp
 P_{PV} – stanowi moc pojedynczego panelu fotowoltaicznego, kWp

Emisja całkowita kotłowni wynika z jednostkowych wskaźników emisji dla danego paliwa określana jest zgodnie ze wzorem (13).

$$E_{tot,CO_2} = \sum B \cdot WE_{el,CO_2} \quad (13)$$

gdzie:

ΣB – sumaryczna ilość energii elektrycznej dla całej kotłowni, kWh/rok
 WE_{el,CO_2} – jednostkowy wskaźnik emisji zastosowanego paliwa, kg CO₂/kWh

Całkowita produkcja energii z mikroinstalacji wynikająca z cyklu życia określana jest zgodnie z (14).

$$E_{life} = P_{pk} \cdot H \cdot L \quad (14)$$

gdzie:

P_{pk} – zainstalowana moc instalacji PV, kWp

H – średni roczny uzysk energetyczny (PVGIS, 2024), kWh/kWp/rok

L – czas eksploatacji, lata

Wskaźnikowo, łącznej emisyjności wszystkich faz okresła (15).

$$e_{tot} = e_{mod} + e_{inv} + e_{BOS} + e_{tr} + e_{O\&M} + e_{EoL} \quad (15)$$

gdzie:

e_{mod} – emisja związana z produkcją modułów fotowoltaicznych, gCO₂e/kWh

e_{inv} – emisja związana z produkcją modułów fotowoltaicznych, gCO₂e/kWh

e_{BOS} – emisje związane z pozostałymi elementami instalacji, gCO₂e/kWh

e_{tr} – emisja związana z transportem wszystkich, gCO₂e/kWh

$e_{O\&M}$ – emisja wynikająca z eksploatacji i serwisu, gCO₂e/kWh

e_{EoL} – emisja związana z końcem użycia i utylizacją, gCO₂e/kWh

Całkowita emisja CO₂e mikroinstalacji wynikająca z cyklu życia określana jest na podstawie (16).

$$CF_{total} = E_{life} \cdot e_{tot} \quad (16)$$

gdzie:

E_{life} – całkowita energia wyprodukowana przez instalację w całym okresie użytkowania, kWh

e_{tot} – łączna jednostkowa emisja wszystkich faz cyklu życia instalacji PV, kgCO₂e/kWh

Studium przypadku

Analizowany obiekt dla którego sporządzono świadectwo charakterystyki energetycznej to budynek mieszkalny jednorodzinny o danych technicznych oraz parametrach systemów technicznych zestawionych odpowiednio w Tabeli 2 i Tabeli 3. W pierwszym wariantcie założono instalację wyposażoną w gruntową pompę ciepła bez wspomagania przez instalację PV (Rysunek 1). Wariant drugi

Tabela 2. Parametry techniczne analizowanego budynku, Źródło: opracowanie własne

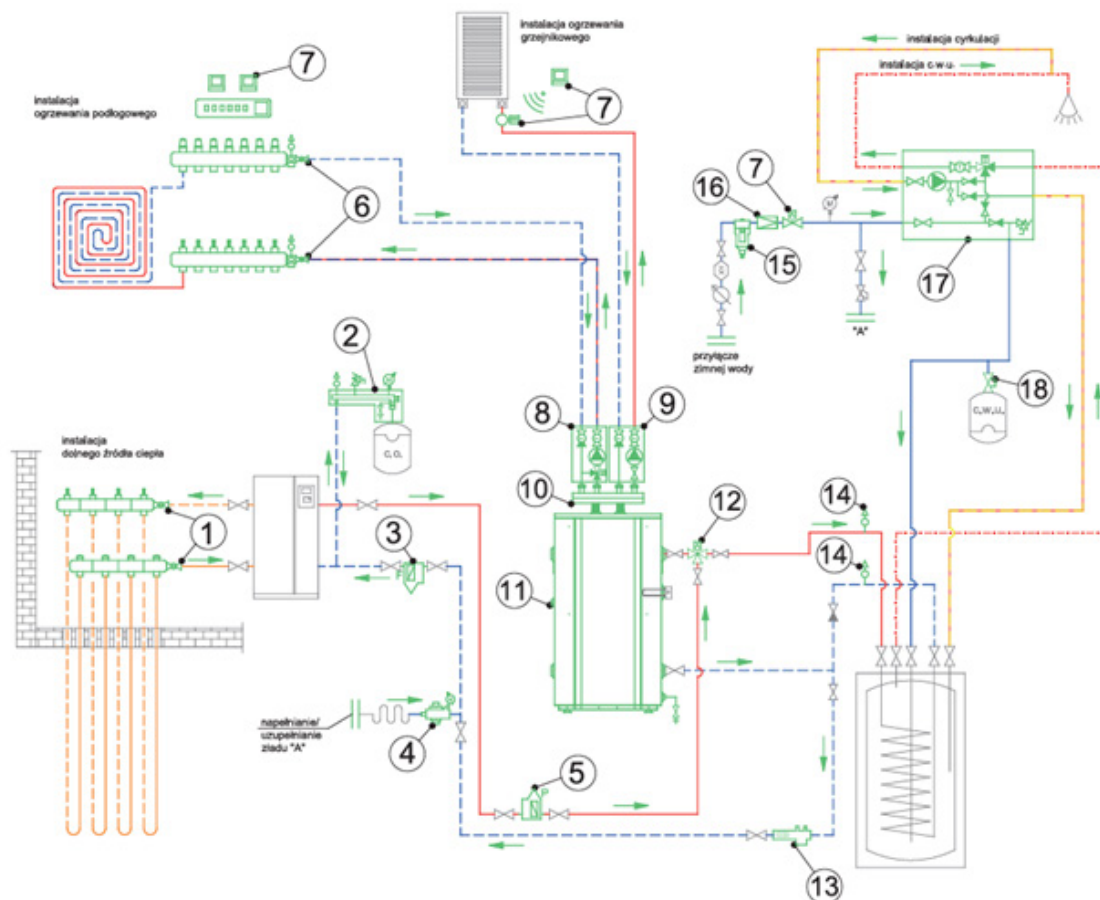
Table 2. Technical parameters of the analyzed building, Source: authors' own study

Nazwa	Jednostka	Wartość
Powierzchnia użytkowa budynku	m ²	258,2
Kubatura budynku	m ³	499,3
Liczba osób w budynku	os.	4
Współczynnik przenikania ciepła, U		
Ściana zewnętrzna	W/(m ² K)	0,16
Dach		0,15
Podłoga na gruncie		0,14
Stolarka okienna		0,90
Drzwi zewnętrzne		1,10

Tabela 3. Parametry systemów technicznych dla analizowanego budynku, Źródło: opracowanie własne

Table 3. Technical system parameters for the analyzed building, Source: authors' own study

Rodzaj sprawności	Wartość sprawności
System ogrzewania	
Wytwarzanie ciepła	4,8
Przesył ciepła	0,96
Akumulacja ciepła	0,95
Regulacja i wykorzystanie ciepła	0,89
Średnio, $n_{H,tot}$	3,90
System przygotowania ciepłej wody użytkowej	
Wytwarzanie ciepła	3,3
Przesył ciepła	0,70
Akumulacja ciepła	0,85
Regulacja i wykorzystanie ciepła	1,0
Średnio, $n_{W,tot}$	1,96



Rysunek 1. Schemat kotłowni z grzewczą pompą ciepła (AFRISO, 2024). Oznaczenie przyjęte na rysunku: 1 – Rozdzielacz do dolnego źródła ciepła, moduł podstawowy, obieg zasilający i powrotny, zawory kulowe, 2 – Grupa bezpieczeństwa, 3 – Separator zanieczyszczeń, 4 – Zawór do automatycznego napełniania instalacji, 5 – Separator powietrza, 6 – Rozdzielacz poliamidowy, siłowniki termoelektryczne, zawory odcinające z termometrami, 7 – Przewodowy zestaw sterowania ogrzewaniem podłogowym i bezprzewodowy system sterowania ogrzewaniem grzejnikowym, 8 – Grupa pompowa, 9 – Grupa pompowa 10. Rozdzielacz dla 2 obiegów, 11 – Zbiornik buforowy, 12 – 3-drogowy zawór strefowy, 13 – Zespół armatury serwisowej do pompy ciepła, 14 – Odpowietrznik automatyczny pionowy z zaworem stopowym, 15 – Filtr do wody, 16 – Kompaktowy reduktor ciśnienia wody 17 – Grupa pompowa do cyrkulacji CWU, 18 – Szybkołączące do naczynia wzbiorczego z zaworem rewizyjnym

Figure 1. Boiler room diagram with a ground-source heat pump (AFRISO, 2024). Legend used in the figure: 1 – Manifold for the lower heat source, basic module, supply and return circuits, ball valves, 2 – Safety group, 3 – Dirt separator, 4 – Automatic filling valve, 5 – Air separator, 6 – Polyamide manifold, thermoelectric actuators, shut-off valves with thermometers, 7 – Wired control set for underfloor heating and wireless control system for radiator heating, 8 – Pump group, 9 – Pump group 10. Manifold for 2 circuits, 11 – Buffer tank, 12 – Three-way zone valve, 13 – Service valve assembly for the heat pump, 14 – Vertical automatic air vent with shut-off valve, 15 – Water filter, 16 – Compact water pressure reducing valve, 17 – Pump group for DHW circulation, 18 – Quick connector for expansion vessel with inspection valve

uzupełniono o panele fotowoltaiczne pokrywające 50% zapotrzebowania na energię elektryczną dla kotłowni.

Z punktu widzenia bilansu energetycznego, dla kotłowni opartej o pompę ciepła, całkowite roczne zużycie energii można zapisać jako (17).

$$E = E_{co} + E_{cwu} + E_{pom} \quad (17)$$

gdzie:

- E – całkowite zużycie energii elektrycznej, kWh/rok
- E_{co} – zużycie energii na cele ogrzewania, kWh/rok
- E_{cwu} – zużycie energii na przygotowanie CWU, kWh/rok
- E_{pom} – energia pomocnicza (zazwyczaj 5–10% sumy), kWh/rok (Minister Infrastruktury i Rozwoju, 2015)

Systemy techniczne analizowanego budynku obejmują centralne wodne ogrzewanie z lokalnego źródła ciepła umieszczonego wewnątrz ogrzewanej przestrzeni, z zizolowanymi przewodami i elementami instalacji. Jest to system o ogrzewaniu wodnym podłogowym, wyposażony w regulację centralną i miejscową oraz sprawnos-

ściami sezonowymi. Źródłem ciepła dla ogrzewania jest grzewcza pompa ciepła o sezonowej sprawności 4,8. Wentylacja ma charakter grawitacyjny.

Certyfikat energetyczny wykonano w programie Instal-System5 (wersja edukacyjna) i dla dwóch wariantów uzyskano następujące wyniki i zestawiono w Tabeli 4.

Wyniki potwierdzają, że budynek jest wykonany w standardzie energooszczędnym, spełnia wszystkie aktualne wymagania prawne dotyczące izolacyjności cieplnej i wskaźnika EP oraz charakteryzuje się umiarkowanym zapotrzebowaniem na energię, wynikającym zarówno z dobrej izolacyjności, jak i wysokosprawnych systemów technicznych (Minister Infrastruktury i Rozwoju, 2015). Zapotrzebowanie na energię elektryczną dla danego systemu technicznego, jakie wykazano w Tabeli 4. wynika z konkretnego modelu wybranego urządzenia – Viessmann Vitocal 333-G model BWT 331 C12 o parametrach jak w Tabeli 5.

Tabela 4. Zestawienie wskaźników zapotrzebowania na energię, Źródło: opracowanie własne
Table 4. Summary of energy demand indicators, Source: authors' own study

Nazwa wskaźnika	Skrót	Jednostka	Wariant 1	Wariant 2
Roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną	$EP_{uzyskane}$	kWh/(m ² rok)	67,6	33,4
	$EP_{wymagane}$	kWh/(m ² rok)	70,0	
Roczne zapotrzebowanie na energię końcową	EK	kWh/(m ² rok)	27,0	22,7
Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową	EU	kWh/(m ² rok)	68,6	
Jednostkowa wielkość emisji CO ₂	E_{CO_2}	tCO ₂ /(m ² rok)	0,009	0,005
Udział odnawialnych źródeł energii w rocznym zapotrzebowaniu na energię końcową	U_{oze}	%	0,0	38,6
Roczne zapotrzebowanie na:				
– nieodnawialną energię pierwotną	Q_p	kWh/rok	17443	8619
– energię końcową	Q_k	kWh/rok	6977	6895
– energię użytkową	Q_u	kWh/rok	17703	
– energię pomocniczą końcową	$E_{el,pom}$	kWh/rok	781	781
– energię pierwotną przez system ogrzewania i wentylacji	$Q_{p,H}$	kWh/rok	10013	4236
– energię końcową dostarczoną przez system ogrzewania i wentylacji	$Q_{k,H}$	kWh/rok	3564	2948
– na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji	$Q_{H,nd}$	kWh/rok	11484	
– na energię pomocniczą końcową dostarczoną dla systemu ogrzewania i wentylacji	$E_{el,pom,H}$	kWh/rok	441	
– na energię pierwotną przez systemy przygotowania CWU	$Q_{p,W}$	kWh/rok	7430	4383
– na energię końcową dostarczoną przez system przygotowania CWU	$Q_{k,W}$	kWh/rok	2633	3167
– na energię użytkową do przygotowania CWU	$Q_{W,nd}$	kWh/rok	6219	
– na energię pomocniczą końcową dostarczoną dla systemu przygotowania CWU	$E_{el,pom,W}$	kWh/rok	339	

Tabela 5. Parametry techniczne pompy ciepła, Źródło: opracowanie własne na podstawie danych katalogowych pompy ciepła Viessmann i-tocal 333-G model BWT 331 C12

Table 5. Technical parameters of the heat pump, Source: authors' own elaboration based on catalogue data for the Viessmann Vitocal 333-G BWT 331.C12 heat pump

Parametr	Jednostka	Wartość
Znamionowa moc cieplna	kW	5,3
Zakres modulacji	kW	2,4–11,4
Współczynnik efektywności COP w trybie CO	–	4,8
Współczynnik efektywności COP w trybie CWU	–	3,3
Maksymalna temperatura zasilania	°C	65
SCOP dla klimatu umiarkowanego i W55	–	3,97

Technologia kotłowni z pompą ciepła

Schemat analizowanej kotłowni za (AFRISO, 2024) zamieszczono na Rysunku 1., z którego wynika, że całkowite zużycie energii elektrycznej przez kotłownię obejmuje nie tylko sprężarkę pompy ciepła, ale również urządzenia pomocnicze takie jak: grupy pompowe (8,9) – każda grupa pompowa zawiera silnik elektryczny pompy i elektronikę regulacji czasu pracy, grupa pompowa do cyrkulacji CWU (17), przewodowy zestaw sterowania ogrzewaniem podłogowym (7) – wszystkie elementy sterowania pokojowego i podłogówki, siłowniki termoelektryczne (6) oraz zespół armatury serwisowej do pompy ciepła (13).

Mikroinstalacja PV dla pokrycia zapotrzebowania na CO i CWU

W odniesieniu do przedstawionych parametrów efek-

tywności energetycznej analizowanego budynku, zakłada się, że w pierwszym wariantcie źródłem ciepła dla instalacji CO oraz CWU jest grzewcza pompa ciepła napędzana energią elektryczną systemową. Uwzględniono tutaj także pracę armatury kotłowej. W drugim wariantcie przyjęto, że instalacja fotowoltaiczna pokryje 50% zapotrzebowania na energię elektryczną całej kotłowni; dobrano minimalną moc wymaganą dla takiej instalacji oraz określono ślad węglowy całego jej cyklu życia.

Wytyczne do doboru modułów fotowoltaicznych przyjęto następujące:

- szacunkowy średni dobowy czas pozyskiwania energii przez ogniwa fotowoltaiczne dla okresu zimowego/sezonu grzewczego: $t = 4$ h,
- szacunkowy średni dobowy czas pozyskiwania energii przez ogniwa fotowoltaiczne dla okresu poza sezonem grzewczym: $t = 6$ h,
- powierzchnia pojedynczego panelu fotowoltaicznego: $A_{PV} = 2$ m²,
- uzysk mocy elektrycznej z pojedynczego panelu fotowoltaicznego: $P_{PV} = 450$ Wp,
- t_s – czas pracy instalacji PV; zakłada się całoroczną pracę instalacji CWU; czas trwania sezonu grzewczego 220 dni.

Niezbędną ilość paneli fotowoltaicznych wyznacza się z poniższego algorytmu. Użyte wzory opisano w rozdziale „Materiały i metody”.

$$P_h = \frac{P_{dobowe}}{t} \quad (10)$$

$$P_{dobowe} = (B_{PC} + E_{el,pom}) \cdot 24h \cdot t_s / 365 \quad (11)$$

W pierwszej kolejności, na podstawie parametrów charakterystyki energetycznej analizowanego budynku (patrz Tabela 4.) obliczono zapotrzebowanie na energię elektryczną przez pompę ciepła i armaturę kotłową służące do przygotowania ciepła na cele CO ($B_{PC,H}$, $E_{el,pom,H}$) oraz CWU ($B_{PC,H}$, $E_{el,pom,H}$).

$$B_{PC} = B_{PC,H} + B_{PC,W} = (2948 + 3167) \cdot 0,5 = 3057,5 \text{ kWh/rok}$$

$$E_{el,pom} = E_{el,pom,H} + E_{el,pom,W} = (441 + 339) \cdot 0,5 = 390 \text{ kWh/rok}$$

$$B_{PC,H} + E_{el,pom,H} = (2948 + 441) \cdot 0,5 = 1694,5 \text{ kWh/rok}$$

$$B_{PC,W} + E_{el,pom,W} = (3167 + 339) \cdot 0,5 = 1753 \text{ kWh/rok}$$

W związku z powyższymi założeniami, przez 220 dni w roku szacunkowy średni dobowy czas pozyskiwania energii przez ogniwa fotowoltaiczne dla okresu zimowego to $t = 4h$, czyli $t_s = 220$ dni; dla reszty roku czyli 145 dni $t = 6h$ co należy uwzględnić we wzorze 11.

$$P_{dobowe,c.o.} + P_{dobowe,c.w.u.} = \left(\frac{1695 \text{ kWh}}{(365 \cdot 24)h} \cdot 24h \cdot \frac{220}{365} \right) + \left[\left(\frac{1753 \text{ kWh}}{(365 \cdot 24)h} \cdot 24h \cdot \frac{145}{365} \right) + \left(\frac{1753 \text{ kWh}}{(365 \cdot 24)h} \cdot 24h \cdot \frac{220}{365} \right) \right] = 7,60 \text{ kWh} \cong 8 \text{ kWh}$$

$$P_h = 8 \text{ kWh}/(4 + 6)/2 \text{ h} = 1,6 \text{ kW}$$

Niezbędna ilość modułów fotowoltaicznych o mocy 450 Wp dla pokrycia połowy zapotrzebowania na energię elektryczną zużywaną przez armaturę kotłową oraz pompę ciepła pracującą na potrzeby CO oraz CWU wyniesie 4.

$$n = \frac{1,6 \text{ kW}}{0,45 \text{ kW}} \cong 4 \text{ szt.}$$

Przyjęto 4 moduły PV o mocy 450 Wp każdy, które należy rozlokować na powierzchni dachu lub konstrukcji wolnostojącej zachowując podstawowe zasady optymalizacyjne.

W przypadku pompy ciepła grunt - woda paliwem będzie energia elektryczna o wartości opałowej oraz wskaźniku emisji wynoszących odpowiednio 1,0001 kWh/kWh i 0,337 kg CO₂/kWh.

$$WO_{el.} = 3,6 \text{ MJ/kWh} \cdot 0,2778 = 1,0001 \text{ kWh/kWh}$$

$$WE_{el.,CO_2} = 93,55 \text{ tCO}_2/\text{TJ} \cdot 0,0036 \text{ TJ/kWh} = 0,337 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

Ilość energii elektrycznej, czyli zapotrzebowania tego paliwa dla całej kotłowni, uwzględniając również armaturę kotłową, będzie równe 6895 kWh/rok.

$$\sum B = B_{PC} + E_{el,pom} = \frac{Q_k}{WO_{el.}} = \frac{6895}{1} = 6895 \text{ kWh/rok}$$

Z kolei emisja całkowita kotłowni wyniesie 2323,62 kgCO₂/rok.

$$E_{tot,CO_2} = \sum B \cdot WE_{el.,CO_2} = 6895 \cdot 0,337 = 2323,62 \text{ kgCO}_2/\text{rok}$$

Dobrana moc instalacji PV dla pokrycia 50% zapotrzebowania na energię elektryczną przez kotłownię ma jedynie pokazać skalę problemu. W praktyce, wielkość planowanej instalacji PV uwzględnia również pokrycie potrzeb bytowych mieszkańców. Czasami także zdeterminowana jest także dostępnością miejsca na dachu lub konstrukcji wolnostojącej. Najczęściej jednak, dla podobnej wielkości budynku w Polsce (PVGIS, 2024) stosowane są instalacje fotowoltaiczne o mocy 4–7 kWp w systemie on-grid oraz 7–10 kWp w połączeniu z magazynem energii o pojemności 5–15 kWh, w zależności od profilu zużycia energii elektrycznej (Gramwielone.pl, 2023).

W związku z powyższym, w kolejnym podrozdziale obliczono ślad węglowy przykładowej instalacji PV o mocy 7 kWp.

Ślad węglowy przykładowej instalacji PV

Pomysł systematycznego obliczania śladu węglowego pochodzi z podejścia LCA (Life Cycle Assessment) (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b), rozwijanego już od lat 90. XX w. oraz z międzynarodowych porozumień klimatycznych (Protokół z Kioto, 1997; Porozumienie Paryskie, 2015). W dzisiejszej rzeczywistości ślad węglowy służy nie tylko jako narzędzie badawcze, ale także jako czynnik strategii zrównoważonego rozwoju, pozwalając wytwórcom i społecznościom mierzyć i raportować postępy w walce z kryzysem klimatycznym, choć ten jest także kwestią sporną politycznie. Poniżej przedstawiono przykład obliczeniowy śladu węglowego (LCA) dla typowej mikroinstalacji PV o założonej i typowej mocy 7 kWp, wraz z analizą całości emisji w cyklu jej życia. Tabela 6. zawiera założenia wstępne do obliczenia śladu węglowego.

Obliczenie całkowitej produkcji energii z mikroinstalacji wykazało 175 000 kWh.

$$E_{life} = 7 \text{ kWp} \cdot 1000 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp} \cdot \text{rok}} \cdot 25 \text{ lat} = 175 \text{ 000 kWh}$$

Obliczenie wskaźnikowo łącznej emisyjności poprzez zsumowanie wszystkich faz wyniosło 52 gCO₂e/kWh.

Tabela 6. Założenia wyjściowe do obliczenia śladu węglowego dla przykładowej mikroinstalacji fotowoltaicznej o mocy 7 kWp, Źródło: opracowanie własne na podstawie ogólnej wiedzy technicznej Table 6. Initial assumptions for calculating the carbon footprint of a sample 7 kWp photovoltaic micro-installation, Source: authors' own elaboration based on general technical knowledge.

Parametr	Symbol	Wartość
Moc instalacji	P_{pk}	7 kWp
Czas eksploatacji	L	25 lat
Średni roczny uzysk energetyczny (PVGIS, 2024)	H	1000 kWh/kWp/rok
Emisyjność poszczególnych faz (średnio, w g CO ₂ e/kWh):		
- BOS (konstrukcja, okablowanie, itp.)	e_{BOS}	5
- koniec życia i utylizacja	e_{EoL}	2
- produkcja falownika	e_{inv}	8
- produkcja modułów	e_{mod}	30
- eksploatacja i serwis (O&M)	$e_{O\&M}$	3
- transport i montaż	e_{tr}	4

Tabela 7. Emisja CO₂e dla poszczególnych faz cyklu życia przykładowej mikroinstalacji PV, Źródło: opracowanie własne na podstawie ogólnej wiedzy technicznej oraz (Hsu et al., 2012) oraz (PVGIG, 2016)
Table 7. CO₂e emissions for the individual life-cycle phases of a sample PV micro-installation, Source: authors' own elaboration based on general technical knowledge and (Hsu et al., 2012) and (PVGIG, 2016)

Faza	e_i [g CO ₂ e/Wh]	Emisja [t CO ₂ e]
Produkcja modułów (Hsu et al., 2012)	30	175 000·0,030 = 5,25
Produkcja falownika (PVGIG, 2016)	8	175 000·0,008 = 1,40
BOS	5	175 000·0,005 = 0,88
Transport i montaż	4	175 000·0,004 = 0,70
Eksploatacja i serwis	3	175 000·0,003 = 0,53
Koniec życia i utylizacja	2	175 000·0,002 = 0,35
Razem	52	≈9,1 t CO ₂ e

$$e_{tot} = e_{mod} + e_{inv} + e_{BOS} + e_{tr} + e_{O\&M} + e_{EOL} = 30 + 8 + 5 + 4 + 3 + 2 = 52 \text{ g CO}_2\text{e/kWh}$$

Obliczenie całkowitej emisji CO₂e dało 9,1 tCO₂e.

$$CF_{total} = 175\,000 \text{ kWh} \cdot 52 \text{ g/kWh} = 9\,100\,000 \text{ gCO}_2\text{e} = 9,1 \text{ tCO}_2\text{e}$$

W Tab.7. przedstawiono emisję CO₂e w rozbięciu na poszczególne fazy.

Dla porównania, przyjmując średnią emisję spalin dla samochodu osobowego na poziomie 120 g CO₂/km (EEA, 2021), otrzymana wartość emisji dla mikroinstalacji PV odpowiada przejechaniu autem ~75 800 km ($\frac{9\,100 \text{ kg CO}_2}{0,12 \text{ kg/km}} \approx 75\,800 \text{ km}$) (Wciślik, 2025). Trzeba jednak zaznaczyć, że w ciągu eksploatacji (25 lat) mikroinstalacja wytworzy ponad 175 000 kWh czystej energii, unikając spalania paliw kopalnych. Zatem już po ok. 1–2 latach pracy bilans netto (wyemitowane vs. uniknięte emisje) staje się ujemny, a potem instalacja przynosi realne oszczędności w postaci nieemitowanego CO₂. Co więcej, aby skompensować 9,1 t CO₂e z cyklu życia mikroinstalacji 7 kWp, należy posadzić ok. 17 drzew rocznie (zakładając, że każde przez 25 lat pochłonie średnio 550 kg CO₂).

Przedstawiona wyżej analiza odnosi się wyłącznie do kategorii Global Warming Potential (GWP), czyli emisji gazów cieplarnianych właśnie w ekwiwalencie CO₂. Istnieją jednak inne dodatkowe wskaźniki stanowiące odrębne kategorie wpływu środowiskowego, które w tradycyjnym ujęciu śladu węglowego nie są uwzględniane, czyli m.in.: ślad wodny, potencjał zakwaszenia, potencjał eutrofizacji, toksyczność. Pełny obraz wpływu dane inwestycji na środowisko naturalne można przeprowadzić poprzez kompletną analizę Life Cycle Impact Assessment, raportując każdą kategorię oddzielnie. Może się okazać, że chociaż instalacja ma niskie emisje CO₂, to też zużywa pewną ilość wody i generuje inne obciążenia środowiskowe, które warto monitorować.

Bibliografia

AFRISO (2024) Katalog schematów, Instalacje grzewcze do 70kW (za zgodą Afriso Sp. z o.o.)

European Environment Agency (EEA). (2021). Average CO₂ emissions from new passenger cars. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/co2-performance-of-new-passenger/average-co2-emissions-from> (Dostęp z 23.02.2026)

Geoportal Kielce – Fotowoltaika Kielce. (n.d.). <https://on-geo.pl/geoportal/kielce/fotowoltaika>

Geoportal Polski, wszystkie działki na mapie | Geoportal360.pl. (n.d.). Geoportal360.pl. <https://geoportal360.pl> (Dostęp z 23.02.2026)

Gramwzielone.pl. (2023). *Jak dobrać moc instalacji fotowoltaicznej dla domu jednorodzinnego*. <https://www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/20340680/dobor-mocy-instalacji-fotowoltaicznej-dla-domu-jednorodzinnego> (Dostęp z 23.02.2026)

Hsu, D. D., O'Donoghue, P., Fthenakis, V., Heath, G. A., Kim, H. C., Sawyer, P., Choi, J., & Turney, D. E. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of crystalline silicon photovoltaic electricity generation. *Journal of Industrial Ecology*, 16(s1). <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00439.x>

International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). (2024). Task 12 – LCA of Photovoltaic Systems. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_Task_12_LCI_LCA.pdf (Dostęp z 23.02.2026)

International Organization for Standardization. (2006a). ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO.

International Organization for Standardization. (2006b). ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. ISO.

JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) – European Commission. (2016, January 11). https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en

Kłobus, U. (2025). *PL: Ekonomiczne i ekologiczne uwarunkowania użytkowania zintegrowanego systemu pompy ciepła i mikroinstalacji fotowoltaicznej*. *EN: Economic and Ecological Benefits of Using an Integrated Heat Pump and Photovoltaic Micro System*. <https://agris.fao.org/search/en/providers/125456/records/68b6deba68d9e6806700b695> (Dostęp z 23.02.2026)

Kwestarz, M., & Kostrzewska, W. (2023). Koncepcja hybrydowego OZE dla domu jednorodzinnego. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, (5), 27-33. <https://doi.org/10.15199/17.2023.5.5>

Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., & Palm, J. (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied energy*, 142, 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>

Minister Infrastruktury i Rozwoju. (2015). Rozporządzenie z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz. U. 2015 poz. 376)

Minister Rozwoju i Technologii. (2022). Obwieszczenie z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2022 poz. 1225).

Perzyński, M., Knaga, J., & Nęcka, K. (2024). Autokonsump-

cja energii elektrycznej na przykładzie domu jednorodzinnego wyposażonego w instalację fotowoltaiczną ogrzewanego pompą ciepła. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 19.

Polski Komitet Normalizacyjny. (2017a). PN-EN 15316-4-2:2017-01 *Systemy ogrzewania w budynkach – Metoda obliczania zużycia energii i sprawności systemów – Część 4-2: Systemy wytwarzania ciepła – Pompy ciepła*. PKN.

Polski Komitet Normalizacyjny. (2017b). PN-EN 378-1:2017-03 *Układy chłodnicze i pompy ciepła – Wymagania bezpieczeństwa i ochrony środowiska – Część 1: Wymagania podstawowe, definicje, klasyfikacja i kryteria doboru*. PKN.

Polski Komitet Normalizacyjny. (2019). PN-EN IEC 60335-2-40:2019-02 *Bezpieczeństwo użytkowania urządzeń elektrycznych do użytku domowego i podobnego – Część 2-40: Wymagania szczegółowe dotyczące elektrycznych pomp ciepła, klimatyzatorów i osuszaczy powietrza*. PKN.

Siergiejuk, J., & Gajewski, A. (2012). Wybór źródła zasilania pomiędzy kotłownią na biopaliwo a pompą cie-

pła dla obiektów w zabudowie szeregowej. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 3(2), 95-102.

Stokowiec, K., Berezowska-Kominek, P. (2025). Odzysk ciepła ze ścieków – przegląd literatury. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 1(9), 24-30. <https://doi.org/10.15199/17.2025.9.4>

Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii. (2015). *Dziennik Ustaw*, 2015, poz. 478. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20150000478>

Wciślik, S. (2025) Materiały dydaktyczne do przedmiotu Ogrzewnictwo z elementami OZE opracowane w ramach realizacji Projektu „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki, FERS.01.05-IP.08-0234/23, Kielce, 2025 <https://dkpsk.tu.kielce.pl/wp-content/materialy-dydaktyczne/Ogrzewnictwo%20z%20elementami%20OZE.pdf> (Dostęp z 23.02.2026)

Wciślik, S., & Kotrys-Działak, D. (2021). Thermal building upgrade with off-grid PV system: a Polish case. *Energy Efficiency*, 14(7). <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09980-x>

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*.

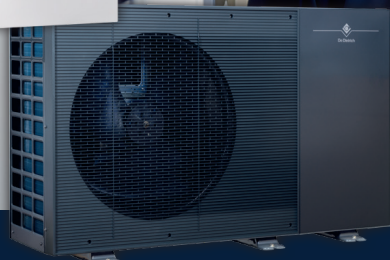
Alezio M R290

pompa ciepła powietrze/woda



ZAPISZ SIĘ
NA SZKOLENIA

DEDIETRICH.PL/SZKOLENIA



ZOSTAŃ AUTORYZOWANYM INSTALATOREM kotłów i pomp ciepła

Dołącz do **Klubu Złotego Instalatora** i otrzymaj premie:

- za montaż urządzenia
- za pierwsze uruchomienie urządzenia
- za promocję sprzedaży

Korzystaj z wyjątkowych promocji!

Zbieraj punkty KZI i wykorzystaj je na:

- wyjazd na Szkolenie Pod Palmami KZI
- wymianę na urządzenia BDR Thermea
- przelew pieniężny na kartę Mastercard