DOI: 10.65545/COW.2026.10.02



Analiza integracji systemu PV z magazynem energii w istniejącym budynku jednorodzinnym

PV and energy storage system integration in an existing single-family house



Dr inż. Anna Justyna Werner-Juszczuk
ORCID ID: 0000-0002-5460-7874
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Politechnika Białostocka
a.juszczuk@pb.edu.pl



Dr inż. Piotr Rynkowski
ORCID ID: 0000-0002-2380-5181
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Politechnika Białostocka



Prof. dr hab. inż. Dorota Anna Krawczyk
ORCID ID: 0000-0002-3118-2236
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Politechnika Białostocka

Słowa kluczowe: emisja CO_2, energia słoneczna, samowystarczalność energetyczna, budynek zeroemisyjny

Streszczenie

Zgodnie z najnowszą dyrektywą Unii Europejskiej w sprawie charakterystyki energetycznej budynków EPBD wszystkie budynki mieszkalne będą musiały być zeroemisyjne od 2050 roku. Spełnienie tych warunków będzie wymagać przeprowadzenia renowacji budynków nie tylko w zakresie izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych i stolarki okienno-drzwiowej, ale przede wszystkim w zakresie źródeł ciepła i energii elektrycznej. Celem pracy jest określenie jak wykorzystanie paneli fotowoltaicznych (PV) oraz magazynu energii w budynku jednorodzinnym wpłynęło na pokrycie zapotrzebowania budynku na energię elektryczną i emisję zanieczyszczeń. Źródłem danych było rzeczywiste zużycie energii elektrycznej przez budynek w wybranym roku kalendarzowym obejmujące zużycie energii elektrycznej przez źródło ciepła, oświetlenie, sprzęt RTV i AGD i inne urządzenia zasilane energią elektryczną. Analizę przeprowadzono dla istniejącego budynku jednorodzinnego zlokalizowanego w Białymstoku z mikro-instalacją PV o mocy zainstalowanej 6,24 kWp. Analiza emisji obejmowała zanieczyszczenia: CO_2, NO_x, SO_2 oraz pyły.

Montaż systemu PV w budynku wpłynął na zmniejszenie ilości energii elektrycznej pobranej z sieci energetycznej i tym samym emisji zanieczyszczeń o 34%, zapewniając samowystarczalność budynku na poziomie 35%. Zastosowanie magazynu energii elektrycznej o pojemności 10 kWh zwiększyło samowystarczalność budynku do 63% oraz przyczyniło się do spadku emisji CO_2 o 1754 kg. Analiza potwierdza istotną rolę energii słonecznej w spełnieniu wymagań dyrektywy Europejskiej EPBD w zakresie emisyjności budynków.

Keywords: CO_2 emissions, solar energy, energy self-sufficiency, zero-emission building

Abstract

According to the latest European Union Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), all residential buildings are required to become zero-emission buildings by 2050. Meeting these requirements will necessitate building renovations not only in terms of improving the thermal insulation of external envelopes, windows and doors, but also, and most importantly, in relation to heat and electricity supply systems.

The aim of this study was to determine how the use of photovoltaic (PV) panels and battery energy storage in a single-family house affected the coverage of the building's electricity demand and the reduction of pollutant emissions. The analysis was based on actual electricity consumption data recorded over a selected calendar year, including electricity used for the heating system, lighting, household appliances, consumer electronics, and other electrically powered devices. The study was conducted for an existing single-family house located in Białystok, Poland, equipped with a PV micro-installation with an installed capacity of 6.24 kWp. The emissions analysis covered CO_2, NO_x, SO_2, and particulate matter.

The installation of the PV system reduced the amount of electricity imported from the grid and consequently lowered pollutant emissions by 34%, while increasing the building's electricity self-sufficiency to 35%. The application of a 10 kWh battery energy storage system further increased self-sufficiency to 63% and resulted in a reduction of CO_2 emissions by 1,754 kg. The results confirm the significant role of solar energy in meeting the EPBD requirements regarding building decarbonization and emissions reduction.

Wstęp

W związku z malejącymi zasobami paliw kopalnych, kryzysem energetycznym oraz zmianami klimatycznymi Unia Europejska ustanowiła tzw. Europejski Zielony Ład, którego celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku (Komisja Europejska, 2019). Jednym z najbardziej energochłonnych sektorów gospodarki jest budownictwo, które odpowiada aż za 40% zużycia energii w Unii Europejskiej (Komisja Europejska, 2024). Stąd od wielu lat prowadzone są działania zmierzające do zmniejszenia energochłonności budynków, czego jednym z przykładów jest opublikowana po raz pierwszy w 2002 roku dyrektywa Unii Europejskiej w sprawie charakterystyki energetycznej budynków EPBD (ang. *Energy Performance of Buildings Directive*). Zgodnie z nowelizacją z 2024 roku wszystkie nowe budynki mają być bezemisyjne od roku 2030 (Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej, 2024). Średnie zużycie energii pierwotnej wszystkich budynków mieszkalnych ma być obniżone co najmniej o 16% do roku 2030 i o 20–22% do roku 2035. Od 2050 r. wszystkie budynki istniejące w UE powinny być bezemisyjne.

Dyrektywa EPBD definiuje budynek bezemisyjny jako „budynek o bardzo wysokiej charakterystyce energetycznej (…), wymagający zerowej lub bardzo małej ilości energii, niewytwarzający na miejscu emisji dwutlenku węgla z paliw kopalnych i wytwarzający zerowe lub bardzo małe ilości operacyjnych emisji gazów cieplarnianych (...)" (Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej, 2024). Celem osiągnięcia tak wysokich wymagań konieczne jest stosowanie odnawialnych źródeł energii cieplnej i elektrycznej. Dyrektywa EPBD jasno wskazuje, że jednym z gwarantów zmniejszenia emisyjności budynków jest wykorzystanie energii słonecznej, nakładając na nowo wybudowane budynki mieszkalne obowiązek stosowania instalacji słonecznych od 2030 roku.

W Polsce udział gospodarstw domowych w krajowym zużyciu energii elektrycznej w 2024 roku wyniósł 20,2%. Natomiast 19,4% całkowitego pozyskania energii słonecznej w Polsce stanowiła energia wytworzona w gospodarstwach domowych, przy czym wartość ta uwzględnia zarówno produkcję energii elektrycznej przez systemy fotowoltaiczne, jak i energii cieplnej w kolektorach słonecznych (GUS, 2026). Tak wysoki udział gospodarstw domowych wynika z intensywnego rozwoju rynku mikroinstalacji PV w Polsce, który zapoczątkowało ogłoszenie w 2019 roku programu „Mój Prąd" dofinansującego te systemy. W roku 2018 liczba mikroinstalacji PV w Polsce wynosiła 55 tys., podczas gdy w roku 2024 przekroczyła liczbę 1,5 mln (URE, 2019, 2025). Po 2019 r. ogłaszano kolejne edycje programu, poszerzając jednocześnie zakres dofinansowania o magazyny energii i ciepła (od 2023 roku) (Mój Prąd, 2019). Obecna edycja „Przydomowe Magazyny Energii" umożliwia dofinansowanie zakupu i montażu magazynów energii elektrycznej o pojemności 10 kWh oraz falowników hybrydowych, a także zakup i montaż magazynów ciepła w postaci zasobników c.w.u. i buforów ciepła współpracujących ze źródłami elektrycznymi i pompami ciepła (Przydomowe Magazyny, 2026). Działania te są istotnym elementem transformacji energetycznej budownictwa mieszkalnego jednorodzinnego, nie tylko w obszarze budynków nowobudowanych, lecz także istniejących.

W artykule dokonano oceny wykorzystania odnawialnych źródeł energii na cele produkcji energii elektrycznej w istniejącym budynku jednorodzinnym, zlokalizowanym w północno-wschodniej Polsce. Analiza obejmuje pięć wariantów: wariant bez paneli PV, z panelami PV, wariant z panelami PV i magazynem energii elektrycznej o pojemności 2,5 kWh, 10 kWh i 15 kWh.

Dokonano porównania autokonsumpcji energii elektrycznej produkowanej przez system PV bez i z magazynem energii elektrycznej o trzech pojemnościach. Określono samowystarczalność budynku dla analizowanych wariantów w zakresie energii elektrycznej. Obliczono jak wykorzystanie paneli PV oraz systemu PV z magazynem energii elektrycznej wpływa na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń przez budynek w zakresie CO_2, SO_2, NO_x oraz pyłu całkowitego. Analiza uwzględnia rzeczywiste całkowite zapotrzebowanie na energię elektryczną budynku w wybranym roku kalendarzowym na cele systemu grzewczego, przygotowania ciepłej wody użytkowej i urządzeń pomocniczych tych systemów, oraz na cele oświetlenia, sprzętu RTV, AGD i pozostałego wyposażenia budynku zasilanego energią elektryczną.

Materiały i metody

Opis obiektu badań

Przedmiotem analizy jest istniejący budynek z poddaszem użytkowym zlokalizowany w Białymstoku. Dach budynku jest dwuspadowy o połaciach zorientowanych w kierunku północ-południe i kącie nachylenia 42°. Budynek jest podłączony do miejskiej sieci energetycznej i brak w nim magazynów energii elektrycznej. Na połaci południowej budynku zlokalizowanych jest 16 paneli PV monokrystalicznych Q-CELLS G9 o mocy 390 Wp każdy, o łącznej mocy 6,24 kWp (Rysunek 1). Sprawność STC (Standard Test Conditions) modułu wynosi minimum niż 20,6%, roczny poziom degradacji wynosi 0,5%. System PV jest wyposażony w inwerter FRONIUS 5.0-3-M. Instalacja na budynku została wykonana przed 1 kwietnia 2022 roku i pracuje w systemie net-metering (Werner-Juszczuk, 2025).



Rysunek 1. Widok analizowanego budynku z systemem fotowoltaicznym (GIS Białystok, 2026)
Figure 1. View of the analyzed building equipped with a photovoltaic system (GIS Białystok, 2026)

Metodologia obliczeń

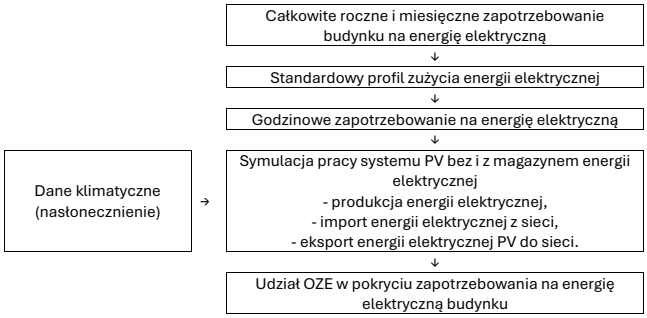
Schemat przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na Rysunku 2, a poszczególne kroki omówiono w kolejnych podrozdziałach. Analiza jest oparta na rzeczywistych danych dotyczących pracy systemu PV w budynku

i uwzględnia całkowite zużycie energii elektrycznej w budynku wynikające z działania wyposażenia technicznego budynku oraz codziennego użytkowania budynku, w tym oświetlenia (Krawczyk i in., 2025).

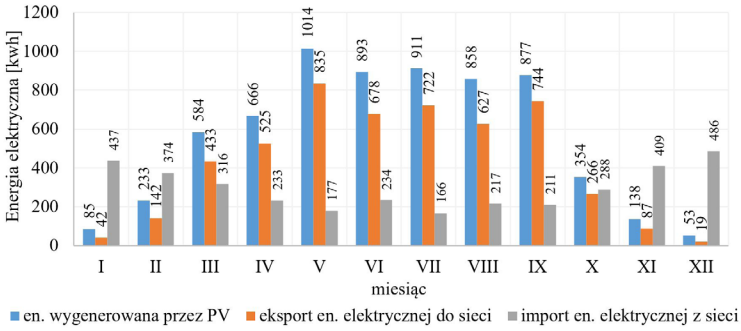
Celem przeprowadzenia symulacji systemu PV z magazynem energii konieczne było pozyskanie godzinowych danych w zakresie nasłonecznienia w lokalizacji budynku. Dane zaczerpnięto z platformy Komisji Europejskiej (PGIS, 2026), z uwzględnieniem rzeczywistego kąta nachylenia i orientacji paneli PV.

Na podstawie wielkości zapotrzebowania energii elektrycznej budynku i wielkości energii importowanej dla wariantów określono poziom autokonsumpcji energii produkowanej przez system PV.

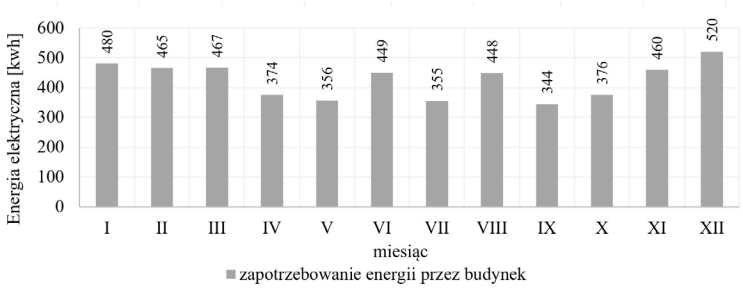
Istotnym parametrem pozwalającym na ocenę zasadności wykorzystania systemu PV w budynku jest samowystarczalność energetyczna budynku, określona jako procent, w którym budynek jest wstanie samodzielnie pokryć zapotrzebowanie na energię elektryczną.



Rysunek 2. Schemat obliczeń. Źródło: opracowanie własne
Figure 2. Calculation procedure. Source: authors' own study



Rysunek 3. Produkcja energii elektrycznej przez system PV w 2023 roku oraz energia pobrana i wyeksportowana do sieci energetycznej. Źródło: opracowanie własne
Figure 3. Electricity production of the photovoltaic system in 2023, along with energy imported from and exported to the electricity grid. Source: authors' own study



Rysunek 4. Rzeczywiste zapotrzebowanie budynku na energię elektryczną w roku 2023. Źródło: opracowanie własne
Figure 4. Actual electrical energy demand of the building in 2023. Source: authors' own study

System PV

Analizę oparto na rzeczywistych danych budynku dla 2023 roku pozyskanych z aplikacji Solar.web, która służy do monitorowania istniejącej instalacji PV. Dane pomiarowe obejmowały: energię elektryczną produkowaną przez system PV, energię elektryczną importowaną z sieci energetycznej i energię elektryczną eksportowaną do sieci, wskutek jej niewykorzystania przez budynek. W 2023 roku system PV wyprodukował 6667 kWh energii elektrycznej, z sieci pobrano 3548 kWh, a wyeksportowano do sieci 5120 kWh (Rysunek 3) (Werner-Juszczuk, 2025).

Roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną budynku wyniosło 5095 kWh. Przy czym zapotrzebowanie istotnie zależało od miesiąca, osiągając minimum we wrześniu i maksimum w grudniu (Rysunek 4). Najwyższe zapotrzebowanie występowało w miesiącach zimowych, co jest związane z pracą źródła ciepła oraz dłuższym czasem działania oświetlenia.

Magazyn energii elektrycznej

Istnieje kilka propozycji doboru wielkości magazynu energii elektrycznej, które są stosowane w praktyce projektowe. Niezależnie od przyjętej metody pojemność magazynu należy dobierać uwzględniając profil zużycia energii elektrycznej. W przypadku analizowanego domu jednorodzinnego, uwzględniając aspekt ekonomiczny, rekomendowana pojemność magazynu energii to najczęściej około 10 kWh. Pojemność ta jednak nie pozwala na wykorzystanie potencjału PV. Rozsądnym zakresem jest pojemność magazynu rzędu 12–15 kWh. W przypadku odpowiednio dużego profilu zużycia, na przykład użytkowanie samochodu elektrycznego, pojemność może być większa – 20–25 kWh. Większe pojemności są ekonomicznie mało uzasadnione. W Polsce funkcjonowało zalecenie związane z programem Mój Prąd 6.0, według którego pojemność magazynu powinna wynosić co najmniej 1,5 kWh na 1 kWp PV, co dla zamontowanej mocy paneli PV (6,24 kWp) oznacza pojemność magazynu 9,36 kWh (Mój Prąd). Obecnie w programie „Przydomowe Magazyny Energii" przewiduje się wielkość minimalną dla magazynu energii 10 kWh (Przydomowe Magazyny, 2026). Według „Kalkulatora wielkości przydomowego magazynu energii" dostępnego na stronach Ministerstwa Klimatu i Środowiska (Ministerstwa Klimatu i Środowiska, 2022) dla analizowanej instalacji PV i profilu zużycia energii elektrycznej dobrana wielkość magazynu to 2,5 kWh.

W artykule przyjęto do analizy trzy wielkości magazynu energii elektrycznej: 2,5 kWh, 10 kWh i 15 kWh.

Ze względu na wolniejszy proces starzenia baterii, w symulacji przyjęto zakres stanu naładowania baterii (SOC) w granicach 25–90%. Wartości 30–70% są bardziej korzystne dla żywotności, jednak ze względu na kompromis między żywotnością a użyteczną pojemnością zdecydowano o wyborze zakresu 25–90%.

Przy wykonywaniu analizy systemu PV wykorzystano model magazynu energii, który jest przedstawiony równaniem (1):

$$SOC_t+1 = SOC_t + \eta_c P_c - P_d/\eta_d \quad (1)$$

gdzie:
SOC – stan naładowania baterii w chwili t,
t – krok czasowy, s,
P_c – moc ładowania baterii, W,
P_d – moc rozładowania baterii, W,
η_c, η_d – sprawność odpowiednio ładowania i rozładowania baterii, –.

Profil zużycia energii elektrycznej

Celem wykonania analizy produkcji i zużycia energii elektrycznej w cyklu godzinowym a nie miesięcznym, należało uwzględnić harmonogram poboru energii elektrycznej w budynku. Źródłem danych był standardowy profil zużycia energii elektrycznej określony przez dostawcę energii elektrycznej PGE (PGE, 2026). Profil obejmuje wskaźnik zapotrzebowania na energię elektryczną w krokach 15-minutowych i jest określony dla dni roboczych od poniedziałku do piątku, sobót oraz niedziel (Rysunek 5), z podziałem na miesiące. Tak szczegółowy podział jest konieczny, ze względu na występowanie nierówności w rozbiorze energii elektrycznej wynikającym z dobowego harmonogramu użytkowania budynku jednorodzinnego. Jednocześnie obserwuje się zmienny charakter rozbioru energii w ciągu roku, co wynika z pracy urządzeń grzewczych w sezonie grzewczym oraz większej liczby godzin korzystania z oświetlenia w okresie zimowym.

Prezentowane w profilu wartości bezwymiarowe umożliwiają rozdział zużycia energii elektrycznej w poszczególnych miesiącach na przedziały 15 minutowe w ciągu doby o określonym profilu zużycia, zależnym od dnia tygodnia, zgodnie z zależnością (2) (PGE, 2026):

$$E_{15} = P_{15} \cdot K \quad (2)$$

gdzie:
E_{15} – zużycie energii elektrycznej w danym 15-minutowym przedziale, kWh,
P_{15} – wartość profilu zużycia energii elektrycznej w danym 15-minutowym przedziale, -,
K – współczynnik skali, który przelicza wartości względne profilu na rzeczywistą energię, kWh, obliczany ze wzoru (3) (PGE, 2026):

$$K = \frac{E_{m-c}}{\sum_i (P_i \cdot n_1)} \quad (3)$$

gdzie:
E_{m-c} – zużycie energii elektrycznej w danym miesiącu (Rysunek 4), kWh,
n_i – liczba dni danego typu w miesiącu (od poniedziałku do piątku, soboty i niedziele), szt.,
P_i – dobowa suma wartości profilu zużycia energii elektrycznej w danym 15-minutowym przedziale dla danego typu dnia, –.

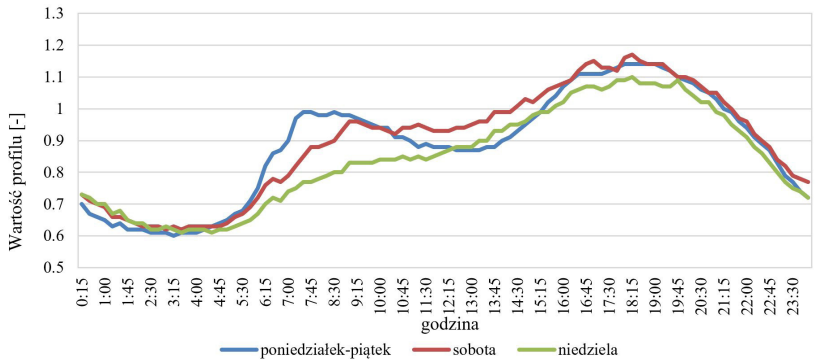
Ponieważ w analizie pracy systemu PV i magazynu energii elektrycznej uwzględniono krok godzinowy, dokonano zsumowania wyliczonych wartości zużycia energii elektrycznej dla 15-minutowego okresów w danej godzinie doby. Następnie do każdego dnia roku, w zależności od rodzaju i miesiąca przyporządkowano odpowiednie zużycie energii elektrycznej w budynku (Rysunek 6).

Obliczone zapotrzebowanie na energię elektryczną w kroku godzinowym wykorzystano do analizy pracy systemu PV z magazynem energii elektrycznej o zmiennej pojemności.

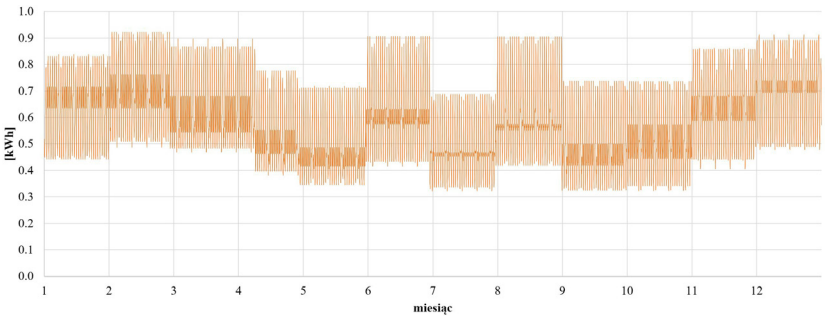
Emisja zanieczyszczeń

Analizę emisji zanieczyszczeń związanej z wykorzystywaniem energii elektrycznej opracowano dla struktury paliw dla Polski do produkcji energii elektrycznej z 2023 r. według dostawcy energii elektrycznej (Rysunek 7).

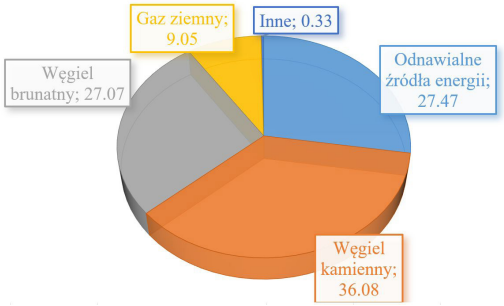
W obliczeniach uwzględniono jednostkowe emisje zanieczyszczeń: CO_2, NO_x, SO_2 i pyłów zgodnie z Tabelą 1.



Rysunek 5. Standardowy profil zużycia energii elektrycznej w styczniu (PGE, 2026)
Figure 5. Standard electricity consumption profile for January (PGE, 2026)



Rysunek 6. Godzinowe zużycie energii elektrycznej w ciągu roku dla analizowanego budynku wyznaczone w oparciu o standardowy profil zużycia energii elektrycznej. Źródło: opracowanie własne
Figure 6. Annual hourly electricity consumption of the analyzed building determined using a standard electricity consumption profile. Source: authors' own study



Rysunek 7. Struktura paliw do wytworzenia energii elektrycznej przez PGE Obrót w 2023 r. (PGE, 2024)
Figure 7. Fuel mix for electricity generation of PGE Obrót in 2023 (PGE, 2024)

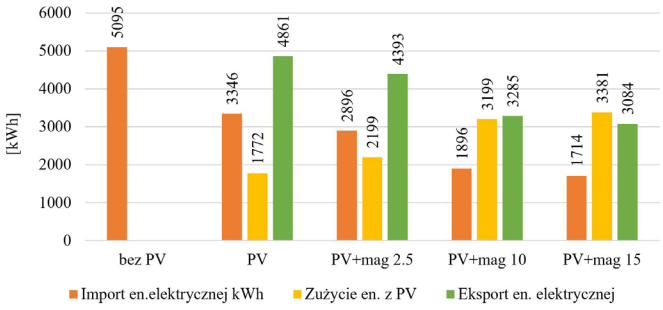
Tabela 1. Jednostkowa emisja zanieczyszczeń przy produkcji energii elektrycznej w 2023 (PGE, 2024
Table 1. Specific pollutant emissions associated with electricity generation in 2023 (PGE, 2024)

CO_2	SO_2	NO_x	Pyły
g/kWh			
548,36	0,38	0,37	1,00

Wyniki i dyskusja

Analiza pracy systemu PV bez i z magazynem energii

W wyniku przeprowadzonych symulacji w kroku godzinowym otrzymano wartości zużycia energii elektrycznej wygenerowanej przez system PV, energię pobraną z sieci przez budynek oraz energię pochodzącą z systemu PV wyeksportowaną do sieci (Rysunek 8).

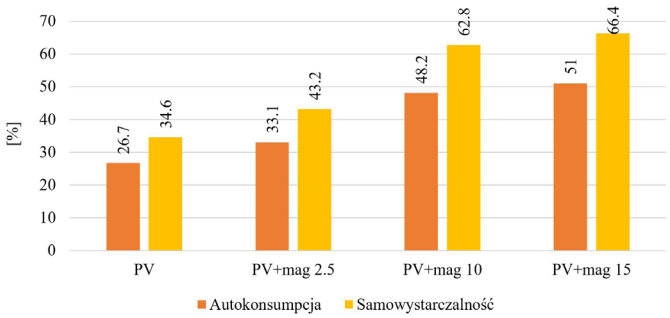


Rysunek 8. Import energii elektrycznej z sieci, zużycie energii elektrycznej z PV oraz eksport energii elektrycznej wygenerowanej przez system PV dla analizowanych wariantów. Źródło: opracowanie własne
Figure 8. Grid electricity imports, electricity self-consumed from the PV system, and electricity exports from the PV system for the analyzed scenarios. Source: authors' own study

Montaż systemu PV pozwolił na zmniejszenie ilości energii elektrycznej pobieranej przez budynek z sieci o 34%. Dodanie do systemu magazynu PV o pojemności 2,5 kWh skutkowało spadkiem importu energii o 43% względem wariantu bez paneli PV. W kolejnych wariantach z magazynem o pojemności 10 kWh i 15 kWh redukcja importu względem wariantu bez systemu PV wyniosła odpowiednio 63% i 66%.

Samo dodanie magazynu energii do systemu PV o najniższej analizowanej pojemności spowodowało zmniejszenie ilości energii importowanej z sieci o 13%. Dodanie magazynów energii o pojemności 10 kWh i 15 kWh spowodowało redukcję importu o 43% i 49% względem wariantu bez magazynów. Należy zwrócić uwagę, że zależność pomiędzy redukcją importu energii elektrycznej sieci a wielkością magazynu nie jest liniowa. Wzrost pojemności magazynu z 2,5 do 10 kWh powoduje spadek importu energii o 35%, a z 10 kWh na 15 kWh o 10%. Oznacza to, że przewymiarowanie magazynów energii elektrycznej nie wpływa na znaczące zwiększenie samowystarczalności budynku w zakresie energii elektrycznej.

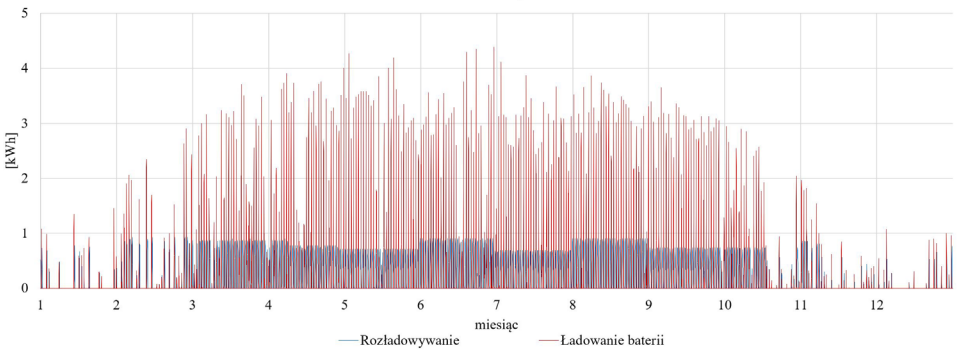
Poziom autokonsumpcji energii elektrycznej wygenerowanej przez system PV istotnie zależy od obecności magazynu energii i jego pojemności (Rysunek 9). Najniższy poziom autokonsumpcji na poziomie 26,7% zaobserwowano w systemie PV bez magazynu energii. Oznacza to, że 73,3% energii wyprodukowanej przez system PV jest eksportowane do sieci energetycznej. Modernizacja systemu PV o magazyn energii wpłynęła na zwiększenie autokonsumpcji odpowiednio do 33,1%, 48,2% i 51% dla magazynów o pojemności 2,5kWh, 10 kWh i 15 kWh. Oznacza to uwzględnienie magazynu energii zwiększyło poziom wykorzystania energii słonecznej, lecz nawet najwyższa analizowana pojemność magazynu wiązała się z eksportem prawie połowy całkowitej energii wygenerowanej przez system PV.



Rysunek 9. Poziom autokonsumpcji i samowystarczalności energetycznej budynku w zakresie energii elektrycznej dla analizowanych wariantów systemu PV. Źródło: opracowanie własne
Figure 9. Electricity self-consumption and self-sufficiency rates of the building for the analyzed PV system scenarios. Source: authors' own study

Najwyższa osiągnięta samowystarczalność budynku w zakresie energii elektrycznej wynosi 66,4% w wariancie z magazynem energii o pojemności 15 kWh. Mniejsza pojemność magazynu energii (10 kWh) zapewnia samowystarczalność niższą o kilka % (62,8%), co potwierdza, że nadmierne przewymiarowanie pojemności magazynu nie ma istotnego wpływu na pokrycie zapotrzebowania budynku na energię. W wariancie bez magazynu energii aż 65,4% energii musi być zapewnione przez źródło zewnętrzne (sieć energetyczna), a wariancie z magazynem o pojemności 2,5 kWh udział ten wynosi 56,8%.

Pracę magazynu energii elektrycznej o pojemności 10 kWh współpracującego z systemem PV budynku przedstawiono na Rysunku 10. Wyraźnie widoczna jest mniejsza



Rysunek 10. Proces ładowania oraz rozładowywania magazynu energii o pojemności 10 kWh. Źródło: opracowanie własne
Figure 10. Charging and discharging profiles of a 10 kWh battery energy storage system. Source: authors' own study

praca magazynu w okresie zimowym, co związane jest z brakiem nadwyżki energii elektrycznej z systemu PV w tym okresie.

Stan naładowania baterii (SOC) dla wariantu o pojemności 10 kWh przedstawiono na Rysunku 11. Zakres pracy magazynu wynosi 25–90% wartości nominalnej. Rzeczywista dostępna pojemność wynosi 9,75 kWh, co związane jest z uniknięciem degradacji baterii w przypadku głębokiego rozładowania. Wyraźnie widoczny jest okres letni, gdy bateria jest naładowana oraz okres sezonu grzewczego, gdzie poziom naładowania jest niski.

Emisja zanieczyszczeń

Kolejnym krokiem analizy było określenie jak montaż paneli PV oraz wykorzystanie magazynów energii elektrycznej wpłynie na emisję zanieczyszczeń przez budynek.

Wskutek zainstalowania paneli PV na dachu budynku uzyskano zmniejszenie emisji zanieczyszczeń o 34% (Rysunek 12). Emisja CO_2 zmniejszyła się o 959 kg t/rok. Emisja SO_2 uległa zmniejszeniu o 0,7 kg/rok, a NO_x o 0,6 kg/rok. Emisja pyłów zmalała o 1,7 kg/rok.

Modernizacja systemu PV o magazyny energii wykazała pozytywny efekty ekologiczny. Najwyższe spadki emisji zanieczyszczeń względem stanu bez paneli PV obserwuje się dla największego analizowanego magazynu o pojemności 15 kWh (np. 1854 kg CO_2/rok).

Porównując emisję zanieczyszczeń w obecnym stanie budynku, czyli z instalacją PV, dodanie magazynu energii elektrycznej o pojemności 2,5 kWh wpłynie na zmniejszenie emisji CO_2 w ciągu roku o 247 kg. W pozostałych analizowanych wariantach redukcja względem wariantu bez magazynu, lecz z systemem PV wynosi odpowiednio 795 kg CO_2/rok dla pojemności 10 kWh oraz 895 kg CO_2/rok dla magazynu 15 kWh.

Wnioski

Analiza potwierdziła pozytywny efekt wykorzystania energii słonecznej w budynku poprzez zwiększenie samowystarczalności budynku w zakresie energii elektrycznej oraz zmniejszenie emisji zanieczyszczeń, w tym emisji CO_2.

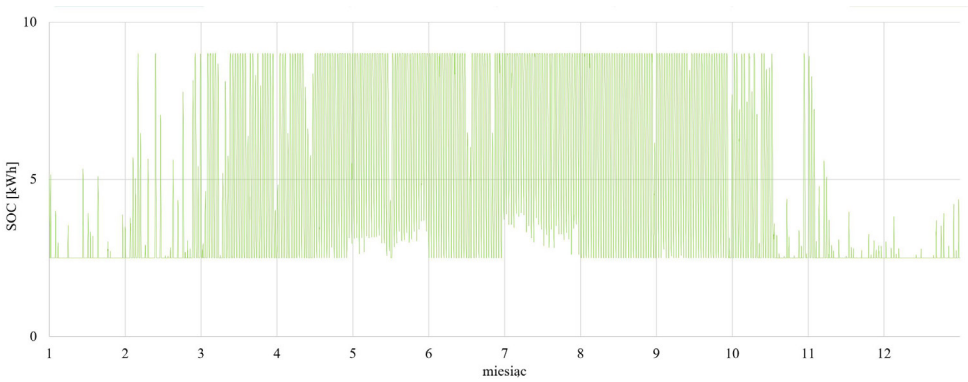
Montaż systemu PV w budynku wpłynął na zmniejszenie ilości energii elektrycznej pobranej z sieci energetycznej i tym samym emisji zanieczyszczeń o 34% oraz zapewnił samowystarczalność budynku w zakresie energii elektrycznej na poziomie 35%.

Dodanie magazynu energii elektrycznej do obecnego systemu PV wykazało pozytywny wpływ na wielkość importu energii elektrycznej z sieci energetycznej. W przypadku najniższej analizowanej pojemności magazynu 2,5 kWh udział ilości energii elektrycznej pobieranej z sieci zmniejszył sie o 13%. Przy pojemności magazynu 10 kWh, zgodnej z rekomendacjami programu Mój Prąd, redukcja wyniosła aż 43%. Przy pojemności 15 kWh zmniejszenie poboru energii elektrycznej z sieci wyniosło 49%.

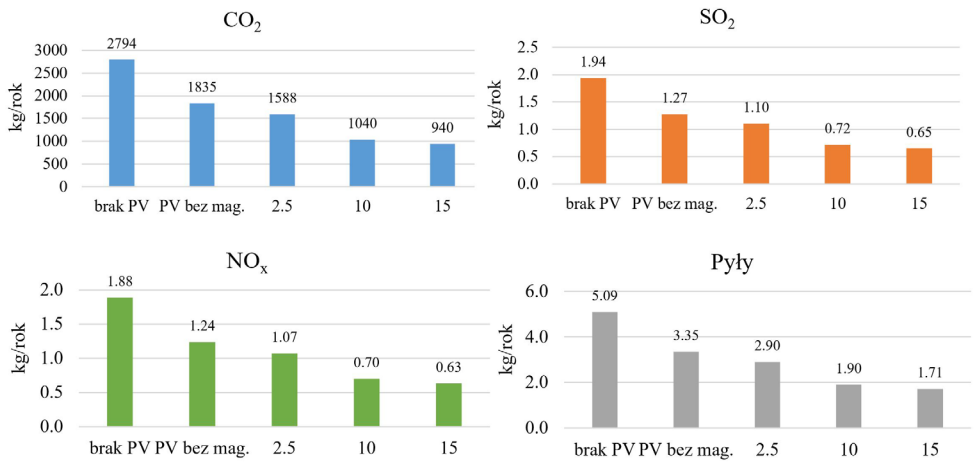
Zastosowanie magazynu energii o pojemności rekomendowanej przez „Kalkulator wielkości przydomowego magazynu energii" Ministerstwa Klimatu i Środowiska zapewniło samowystarczalność budynku w zakresie energii elektrycznej na poziomie ok. 43%, natomiast magazynu o pojemności 10 kWh aż w 63%. Analiza wykazała, że przewymiarowanie magazynu energii nie przełożyło się na znaczący wzrost samowystarczalności budynku w zakresie energii elektrycznej.

Jednoczesne zastosowanie paneli PV i magazynu energii 10 kWh wpłynęło na zmniejszenie emisji CO_2 przez budynek o 1754 kg/rok, co świadczy o pozytywnym efekcie ekologicznym tego rozwiązania.

Przeprowadzona analiza obejmuje rzeczywiste zużycie energii elektrycznej w budynku, z uwzględnieniem m.in. oświetlenia, sprzętu RTV i AGD. Należy pamiętać jednak, że ostateczna ocena budynku pod względem



Rysunek 11. Stan naładowania baterii dla wariantu o pojemności 10 kWh. Źródło: opracowanie własne
Figure 11. State of charge (SOC) of the 10 kWh battery energy storage system. Source: authors' own study



Rysunek 12. Emisja zanieczyszczeń przez budynek na cele energii elektrycznej dla analizowanych wariantów. Źródło: opracowanie własne
Figure 12. Pollutant emissions associated with the building's electricity use for the analyzed variants. Source: authors' own study

emisyjności, celem spełnienia wymagań dyrektywy Unii Europejskiej w zakresie emisyjności budynków, powinna być realizowana zgodnie z metodologią przedstawioną przez właściwe akty prawne z zakresu metodologii charakterystyki energetycznej budynków.

Podziękowania

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr WZ/WB-IIL/2/2026 w Katedrze Budownictwa Zrównoważonego i Instalacji Budowlanych Politechniki Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez ministra właściwego do spraw nauki.

Bibliografia

GIS Białystok. (2026). https://gisbialystok.pl

GUS. (2026). Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2024 r. *Główny Urząd Statystyczny.* https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/zuzycie-energii-w-gospodarstwach-domowych-w-2024-r-,2,6.html

Komisja Europejska. (2019). Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów: Europejski Zielony Ład (COM(2019) 640 final). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640

Komisja Europejska. (2024). Dyrektywa w sprawie charakterystyki energetycznej budynków. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/pol

Siuta-Olcha, A., Babiarz, B., Święcicki, A., Stachniewicz, R. A., Cholewa, T., Lichołai, L., Krasoń, J., Miąsik, P., Bocian, M., Kłopotowski, M., & Gawryluk, D. (2025). New method of retrofitting of kindergartens resulting in increase of energy self-sufficiency. *Energy and Buildings*, 336, 115595. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115595

Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2022). Kalkulator wielkości przydomowego magazynu energii [Arkusz kalkulacyjny]. https://www.gov.pl/web/klimat/kalkulator-wielkosci-przydomowego-magazynu-energii

Mój Prąd (2019). https://mojprad.gov.pl

Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. (2024). Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z dnia 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (wersja przekształcona). Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L, 2024/1275. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj?locale=pl

PGE. (2024). Informacja dla odbiorców o strukturze paliw zużytych do wytworzenia energii elektrycznej sprzedawanej przez PGE Obrót S.A. w 2023 roku. *PGE Obrót S.A.* https://pcc.rokita.pl/wp-content/uploads/2024/04/Struktura-paliw-PGE.pdf

PGE. (2026). Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. PGE Dystrybucja S.A. https://pgedystrybucja.pl/uslugi-dystrybucyjne/instrukcje-i-informacje-techniczne/iriesd

PGIS. (2026). Photovoltaic Geographical Information System. Komisja Europejska. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

Przydomowe Magazyny. (2026). https://przydomowemagazyny.gov.pl

URE. (2019). Raport zawierający zbiorcze informacje dotyczące energii elektrycznej wytworzonej z odnawialnego źródła energii w mikroinstalacji (w tym przez prosumentów) i wprowadzonej do sieci dystrybucyjnej w 2018 r. (art. 6a ustawy OZE). *Urząd Regulacji Energetyki.* https://www.ure.gov.pl/download/3/10728/Raportzbiorczyart6auOZE.pdf

URE. (2025). Raport – energia elektryczna wytworzona z odnawialnego źródła energii w mikroinstalacji (w tym przez prosumentów) i wprowadzona do sieci dystrybucyjnej w 2024 r. (art. 6a ustawy OZE). Urząd Regulacji Energetyki. https://www.ure.gov.pl/download/3/19401/RaportOZEmikroinstalacjeza2024r.pdf

Werner-Juszczuk, A. J. (2025). Actual performance of PV Micro-Installations in the same location: case study for single family houses. In *Green energy and technology* (pp. 29–37). https://doi.org/10.1007/978-3-031-99312-1_4

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 jakiekolwiek 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.*

POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW SANITARNYCH

Kim jesteśmy?

PZITS to ogólnopolska organizacja skupiająca ok. 3 200 techników, inżynierów i naukowców działających w obszarze inżynierii sanitarnej i środowiska.
Misją PZITS jest działalność na rzecz społeczeństwa poprzez rozwój rozwiązań technicznych służących ochronie zdrowia i środowiska naturalnego. PZITS jest jedynym polskim członkiem REHVA oraz International Gas Union, co umożliwia aktywną współpracę międzynarodową.

Więcej szczegółów:
www.pzits.pl/czlonkostwo

Zostań członkiem Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych

Członkostwo w PZITS obejmuje:

Otrzymywanie:
- zaproszeń na seminaria, konferencje i szkolenia organizowane przez PZITS,
- dostępu do nagrań z wydarzeń organizowanych przez Zarząd Główny PZITS,
- zaproszeń do udziału w wycieczkach technicznych oraz spotkaniach integracyjnych,
- bieżących informacji o zmianach w przepisach i legislacji branżowej,
- informacji o ofertach pracy w branży.

Możliwość:
- Udziału w opracowywaniu przepisów oraz zgłaszania propozycji zmian w obowiązujących regulacjach,
- nawiązywania bezpośrednich kontaktów z ekspertami i przedstawicielami branży,
- uzyskiwania porad i opinii w sprawach technicznych związanych z zakresem działalności PZITS,
- współpracy i wymiany doświadczeń z organizacjami zrzeszonymi m.in. w REHVA i IGU,
- publikowania artykułów w czasopismach PZITS,
- aktywnego udziału w pracach sekcji branżowych,
- otrzymania odznaczeń honorowych PZITS.

Dostęp do:
- materiałów, poradników i wytycznych opracowywanych przez PZITS,
- działalności szkoleniowej i rozwojowej organizowanej w całej Polsce,
- stowarzyszeniowej wspólnoty i wsparcia środowiska inżynieryjnego.