

JAKUB RĄB, MAREK LENART, MIŁOSZ ZARDZEWIAŁY

Katedra Inżynierii Produkcji Rolno-Spożywczej, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Zelwerowicza 4,
35-601 Rzeszów, email: mzardzewialy@ur.edu.pl; ORCID: 0000-0002-8843-2814

**ANALIZA EKONOMICZNA I ENERGETYCZNA INSTALACJI
FOTOWOLTAICZNEJ ZLOKALIZOWANEJ W RZESZOWIE**

Abstrakt: Rosnące ceny energii elektrycznej, potrzeba ograniczania emisji gazów cieplarnianych oraz rozwój odnawialnych źródeł energii uzasadniają konieczność oceny efektywności energetycznej i ekonomicznej przydomowych instalacji fotowoltaicznych w warunkach klimatycznych Polski. Szczególnie istotne jest określenie rzeczywistych korzyści wynikających z ich eksploatacji na podstawie danych rzeczywistych. Celem pracy była analiza energetyczna i ekonomiczna przydomowej instalacji fotowoltaicznej o mocy 3 kWp zlokalizowanej w Rzeszowie, obejmująca ocenę produkcji energii, stopnia pokrycia zapotrzebowania gospodarstwa domowego, poziomu autokonsumpcji oraz opłacalności inwestycji. Badania przeprowadzono na podstawie danych eksploatacyjnych z lat 2022–2023, udostępnionych przez prosumenta. Analizie poddano miesięczne wartości energii wyprodukowanej, wprowadzonej do sieci, pobranej z sieci, zużytej w gospodarstwie domowym oraz koszty zakupu energii w wariantach z instalacją PV i bez niej. Wyniki wykazały wyraźną sezonowość pracy instalacji oraz średnie pokrycie zapotrzebowania energetycznego na poziomie 78,41%. Instalacja umożliwiła redukcję kosztów energii elektrycznej o 31–34% w analizowanym okresie, a okres zwrotu inwestycji oszacowano na około 8 lat, co potwierdza jej zasadność energetyczną i ekonomiczną.

Słowa kluczowe: analiza ekonomiczna, analiza energetyczna, fotowoltaika, instalacja prosumencka, efektywność energetyczna

**ECONOMIC AND ENERGY ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC INSTALLATION
LOCATED IN RZESZÓW**

Abstract: Rising electricity prices, the need to reduce greenhouse gas emissions, and the development of renewable energy sources justify the necessity of assessing the energy and economic efficiency of residential photovoltaic installations under Polish climatic conditions. In particular, it is important to determine the actual benefits resulting from their operation based on real data. The aim of this study was to perform an energy and economic analysis of a residential photovoltaic installation with a capacity of 3 kWp located in Rzeszów, including an assessment of energy production, the degree of household energy demand coverage, the level of self-consumption, and the profitability of the investment. The analysis was based on operational data from 2022–2023 provided by the prosumer. Monthly values of energy produced, fed into the grid, drawn from the grid, and consumed by the household were analyzed, as well as electricity purchase costs for scenarios with and without a PV installation. The results demonstrated a clear seasonal pattern in system operation and an average household energy demand coverage of 78.41%. The photovoltaic installation

enabled a reduction in electricity costs by 31–34% over the analyzed period, while the payback period of the investment was estimated at approximately 8 years, confirming both its energy and economic viability.

Key words: economic analysis, energy analysis, photovoltaics, prosumer installation, energy efficiency

I. WSTĘP

Zrównoważony rozwój zakłada możliwość zaspokajania potrzeb obecnego pokolenia w taki sposób, aby nie ograniczać szans rozwojowych przyszłych generacji, zgodnie z definicją przedstawioną w Raplocie Brundtland [WCED 1987]. Realizacja tej koncepcji wymaga kompleksowych i długofalowych działań w wielu obszarach, w tym szczególnie w sektorze energetycznym, który stanowi fundament funkcjonowania współczesnych gospodarek. Transformacja energetyki w kierunku bardziej efektywnych i niskoemisyjnych technologii jest zatem kluczowym warunkiem osiągnięcia zrównoważonego rozwoju i zapewnienia stabilnego dobrobytu obecnych oraz przyszłych pokoleń [Adamkiewicz 2017].

Kryzys klimatyczny stanowi dziś jeden z najważniejszych bodźców do intensyfikacji wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Powszechne stosowanie paliw kopalnych w procesach produkcji energii jest bowiem głównym czynnikiem odpowiedzialnym za emisję gazów cieplarnianych do atmosfery, co prowadzi do nasilenia efektu cieplarnianego [Kumar i in. 2010]. Energetyka oparta na surowcach kopalnych, takich jak węgiel, gaz ziemny czy ropa naftowa, pozostaje nadal podstawowym filarem systemów energetycznych wielu państw zarówno w Europie, jak i na świecie [Eurostat 2023].

Implementacja odnawialnych źródeł energii (OZE) stanowi globalny trend w poszukiwaniu czystych, zrównoważonych i dywersyfikowanych form zasilania. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na energię oraz ograniczonością zasobów paliw kopalnych rośnie zainteresowanie alternatywnymi źródłami energii. Wśród nich szczególnie istotna jest energia słoneczna [Sala 2018]. Zastępowanie konwencjonalnych źródeł energii instalacjami słonecznymi wynika m.in. z wysokiej skalowalności tej technologii. Relatywnie niewielkie rozmiary instalacji PV pozwalają na precyzyjne dostosowanie mocy wytwórczych do zapotrzebowania użytkowników, co czyni je rozwiązaniem elastycznym i uniwersalnym. Fotowoltaika znajdująca zastosowanie zarówno w gospodarstwach domowych, jak i w przemyśle, odgrywa coraz większą rolę w globalnym miksie energetycznym [Brodziński i in. 2021]. Systemy PV coraz częściej instalowane są nie tylko na dachach domów jednorodzinnych, ale również na budynkach użyteczności publicznej, takich jak szpitale, szkoły czy przedszkola. Powszechne jest również wykorzystanie paneli w konstrukcjach wolnostojących, zasilających m.in. znaki drogowe lub oświetlenie reklamowe. Energia słoneczna znajduje ponadto szerokie zastosowanie jako źródło ciepła w obiektach wielorodzinnych i komercyjnych [Mularczyk i Hysa 2015].

Decyzja o wyposażeniu gospodarstwa domowego w instalację fotowoltaiczną stanowi zatem nie tylko inwestycję w oszczędności, lecz także w ochronę środowiska. Produkcja własnej energii elektrycznej pozwala znacząco ograniczyć emisję zanieczyszczeń do atmosfery. Dodatkową zaletą są niskie koszty eksploatacyjne oraz stosunkowo krótki okres zwrotu nakładów inwestycyjnych, wynoszący przeciętnie od 8 do 10 lat. Po jego upływie instalacja zaczyna generować realne oszczędności, umożliwiając użytkownikowi korzystanie z taniej i czystej energii przez wiele lat [Chrzan i in. 2018].

Celem pracy była ocena energetyczna i ekonomiczna przydomowej instalacji fotowoltaicznej o mocy 3 kWp zlokalizowanej w Rzeszowie. Ocena ta obejmowała analizę produkcji i zużycia energii na podstawie dwuletnich danych prosumenckich w ujęciu

miesięcznym i rocznym oraz analizę ekonomiczną uwzględniającą oszczędności w kosztach energii i okres zwrotu inwestycji do 20 lat eksploatacji.

II. METODA PRACY

Do analizy energetycznej i ekonomicznej wykorzystano instalację fotowoltaiczną (PV) zlokalizowaną na terenie miasta Rzeszów w województwie podkarpackim. Instalacja o mocy 3 kWp zasila dom jednorodzinny wraz z dodatkowymi zabudowaniami znajdującymi się na działce. Budynek zamieszkiwany jest przez czteroosobową rodzinę, a jego powierzchnia użytkowa nie przekracza 300 m². Instalacja została umiejscowiona na dachu budynku w ekspozycji południowo-zachodniej. Ze względu na konstrukcję dachu, którego kąt pochylenia połaci wynosi 7° do montażu paneli wykorzystano konstrukcję korygującą nachylenie. Po zamontowaniu na konstrukcji kąt nachylenia paneli wynosił 30°. Obszar instalacji jest dobrze nasłoneczniony oraz nie znajduje się pod wpływem zacinienia. Instalacja została oddana do użytku pod koniec 2020 roku.

Badania przeprowadzono na podstawie danych udostępnionych przez właściciela instalacji fotowoltaicznej. Zebrane informacje pochodziły z aplikacji mobilnej monitorującej ilość wyprodukowanej energii oraz z dokumentów udostępnionych do wglądu. Dane zostały zestawione, uporządkowane oraz przeanalizowane z wykorzystaniem programu Microsoft Excel. Analiza obejmuje okres od stycznia 2022 roku do końca grudnia 2023 roku.

W celu wykonania analiz energetycznych i ekonomicznych wykorzystano następujące dane, zestawione w ujęciu miesięcznym:

- ilość energii wytworzonej przez instalację PV,
- ilość energii wprowadzonej do sieci i pobranej z sieci,
- ilość energii zużytej na potrzeby własne gospodarstwa,
- koszt instalacji.

Analiza ekonomiczna obejmowała porównanie kosztów zakupu energii elektrycznej w dwóch wariantach: z instalacją fotowoltaiczną oraz bez instalacji PV. Na podstawie zgromadzonych danych określono również przewidywany czas zwrotu nakładów poniesionych na budowę instalacji.

III. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Tabela 1 przedstawia zestawienie miesięcznej produkcji energii elektrycznej generowanej przez instalację fotowoltaiczną o mocy 3 kWp zlokalizowaną w Rzeszowie w latach 2022-2023. W tabeli ujęto wartości produkcji energii dla poszczególnych miesięcy, od stycznia do grudnia, a także sumaryczną roczną generację. Dodatkowo, w ostatniej kolumnie zaprezentowano średnie miesięczne wartości produkcji obliczone jako średnia arytmetyczna danych z obu analizowanych lat.

Analiza danych wskazuje na wyraźną sezonowość pracy instalacji fotowoltaicznej, charakterystyczną dla warunków klimatycznych Polski. Najwyższe wartości produkcji energii odnotowano w miesiącach wiosenno-letnich, tj. od kwietnia do sierpnia, co wynika z większej intensywności promieniowania słonecznego i dłuższego czasu ekspozycji instalacji na światło dzienne. Maksymalną miesięczną ilość wygenerowanej energii zarejestrowano w czerwcu 2022 r. (532,40 kWh) oraz w maju 2023 r. (471,70 kWh). Z kolei najniższą produkcję energii uzyskano w okresie zimowym, szczególnie w grudniu, kiedy wartości wyniosły odpowiednio 48,00 kWh w 2022 r. i 55,50 kWh w 2023 r.

Łączna roczna produkcja energii wyniosła 3568,20 kWh w 2022 r. oraz 3350,30 kWh w 2023 r., natomiast średnia wartość roczna dla obu lat została oszacowana na poziomie 3459,25 kWh. Wyniki te potwierdzają stabilność pracy instalacji w skali rocznej, przy

jednoczesnym wpływie zmiennych warunków atmosferycznych na poziom uzyskiwanych miesięcznych generacji. Tendencje obserwowane w danych są zgodne z wynikami badań Matuszko i in. [2014], które wskazują, że sezonowe wahania nasłonecznienia w Polsce bezpośrednio przekładają się na dużą różnicę między produkcją letnią a zimową. Otrzymane wartości roczne mieszczą się również w typowym zakresie uzysków przewidywanych przez modele SolarGIS dla południowo-wschodniej Polski, wynoszących od 950 do 1150 kWh/kWp rocznie [Šuri i in. 2007].

Różnice w poziomie produkcji energii między rokiem 2022 a 2023 mogą być związane z lokalnymi zmianami pogodowymi, zwłaszcza zachmurzeniem, opadami oraz temperaturą modułów PV. Dunlop i in. [2006] podkreślają, że zmienność parametrów atmosferycznych może powodować różnice roczne w uzysku energii na poziomie 10-15%, co odpowiada obserwowanej różnicy w produkcji między dwoma analizowanymi latami. Oznacza to, że spadek produkcji w 2023 r. nie świadczy o pogorszeniu stanu instalacji, lecz jest zjawiskiem naturalnym w kontekście lokalnych warunków pogodowych. Ogólnie, przedstawione dane wskazują, że analizowana instalacja PV pracuje stabilnie i zgodnie z przewidywanymi charakterystykami technicznymi dla systemów o podobnej mocy, a sezonowe zmiany w uzyskach wynikają przede wszystkim z cyklicznych zmian nasłonecznienia typowych dla klimatu umiarkowanego.

Tabela 1 - Table 1

Zestawienie miesięcznych wartości produkcji energii elektrycznej generowanej przez instalację PV o mocy 3 kWp/ *Summary of monthly electricity production values generated by a 3 kWp PV installation*

Miesiąc /Month	Ilość energii wyprodukowanej przez instalację Energy produced by the installation [kWh]		Średnia Average [kWh]
	2022	2023	
Styczeń / January	82,10	40,80	61,45
Luty / February	164,90	148,80	156,85
Marzec / March	373,30	294,40	333,85
Kwiecień / April	293,10	310,40	301,75
Maj / May	510,90	471,70	491,30
Czerwiec / June	532,40	429,70	481,05
Lipiec / July	483,30	469,10	476,20
Sierpień / August	438,50	412,70	425,60
Wrzesień / September	261,50	384,10	322,80
Październik / October	280,70	249,80	265,25
Listopad / November	99,50	83,30	91,40
Grudzień / December	48,00	55,50	51,75
Suma / Total	3568,20	3350,3	3459,25

źródło: opracowanie własne / author's own study

Tabela 2 przedstawia zestawienie miesięcznych wartości energii elektrycznej wprowadzonej do sieci oraz energii pobranej z sieci w ramach funkcjonowania instalacji prosumenckiej w latach 2022-2023. Dane obejmują okres od stycznia do grudnia i zostały zestawione osobno dla obu lat. W pierwszej części tabeli zaprezentowano ilość energii

oddanej do sieci, natomiast w drugiej ilość energii pobranej z sieci na potrzeby własne użytkownika. Analiza danych wskazuje, że wartości energii wprowadzanej do sieci wykazują silną sezonowość, wynikającą z charakterystyki produkcyjnej instalacji PV. Najwyższe uzyski energii oddanej do sieci obserwowane są w miesiącach wiosenno-letnich, zwłaszcza od maja do sierpnia, co wynika z wysokiego poziomu nasłonecznienia i nadwyżek produkcyjnych typowych dla tego okresu. Z kolei niskie wartości zimą wynikają z ograniczonego promieniowania słonecznego oraz skróconej długości dnia. Jednocześnie dane dotyczące energii pobranej z sieci wskazują, że największe zapotrzebowanie na energię zewnętrzną występuje w miesiącach zimowych, co jest konsekwencją niskiej produkcji własnej instalacji w tym czasie.

Tabela 2 – Table 2

Zestawienie energii oddanej i pobranej z sieci przez instalację PV o mocy 3 kWp w latach 2022-2023
Summary of energy exported to and imported from the grid by a 3 kWp PV installation in 2022-2023

Miesiąc / Month	Energia wprowadzona do sieci <i>Energy fed into the grid</i> [kWh]		Energia pobrana z sieci <i>Energy drawn from the grid</i> [kWh]	
	2022	2023	2022	2023
Styczeń / January	28	14	286	370
Luty / February	77	73	212	279
Marzec / March	194	193	977	276
Kwiecień / April	142	171	151	246
Maj / May	300	295	105	201
Czerwiec / June	317	260	110	196
Lipiec / July	256	282	157	173
Sierpień / August	225	255	184	179
Wrzesień / September	88	269	270	190
Październik / October	134	151	262	220
Listopad / November	41	40	348	295
Grudzień / December	11	17	391	367
Suma / Total	1813	2020	3453	2992

źródło: opracowanie własne / *author's own study*

Łącznie w 2022 r. instalacja oddała do sieci 1813 kWh energii, natomiast w 2023 r. 2020 kWh. W zakresie energii pobranej z sieci wartości roczne wyniosły odpowiednio 3453 kWh w 2022 r. oraz 2992 kWh w 2023 r., co może wskazywać na poprawę autokonsumpcji lub korzystniejsze warunki produkcyjne w analizowanym okresie. Tendencje te są zgodne z wynikami badań nad prosumentami w Europie Środkowej, gdzie zimą udział energii pobieranej z sieci znacząco rośnie, natomiast latem dominują nadwyżki energii oddawanej do sieci. Jak wskazuje Matuszko [2014], zimowe wartości nasłonecznienia w Polsce mogą spadać do 10-20% wartości letnich, co bezpośrednio tłumaczy niski poziom energii eksportowanej do sieci w tym okresie. Równocześnie wyniki odpowiadają charakterystyce długoterminowych obserwacji promieniowania słonecznego na terenie kraju, które

potwierdzają dużą zmienność sezonową i wpływ zachmurzenia na produkcję energii z instalacji PV [Kleniewska i in. 2016].

Zwiększenie ilości energii oddanej do sieci w roku 2023 może być także pochodną zmiany profilu zużycia energii w gospodarstwie domowym, co potwierdzają wyniki nowszych badań dotyczących autokonsumpcji. Według Alimi i in. [2022], nawet niewielkie przesunięcie części obciążeń na godziny szczytowej produkcji energii z PV może prowadzić do istotnej redukcji energii pobieranej z sieci. Tym samym obserwowany spadek poboru energii z 3453 kWh do 2992 kWh może odzwierciedlać zarówno korzystniejsze warunki nasłonecznienia w poszczególnych miesiącach roku 2023, jak i większą efektywność wykorzystania energii bezpośrednio w miejscu jej wytwarzania. Dane analizowane w tabeli 2 są więc w pełni spójne z literaturą przedmiotu opisującą zachowania energetyczne prosumentów oraz sezonowy charakter pracy instalacji fotowoltaicznych.

Tabela 3 przedstawia porównanie miesięcznej ilości energii elektrycznej wykorzystanej w gospodarstwie domowym z ilością energii wyprodukowanej przez instalację fotowoltaiczną o mocy 3 kWp w latach 2022-2023.

Tabela 3- Table 3

Relacja między zapotrzebowaniem energetycznym gospodarstwa domowego a generacją energii z instalacji PV w latach 2022-2023/ *Relationship between household energy demand and energy generation from a PV installation in 2022-2023*

Miesiąc / Month	Energia wykorzystana w gospodarstwie domowym <i>Energy used in the household</i> [kWh]		Ilość energii wyprodukowanej przez instalację <i>Amount of energy produced by the installation</i> [kWh]	
	2022	2023	2022	2023
Styczeń / January	340,10	396,80	82,10	40,8
Luty / February	299,90	354,80	164,90	148,8
Marzec / March	1156,30	377,40	373,30	294,4
Kwiecień / April	302,10	385,40	293,10	310,4
Maj / May	315,90	377,70	510,90	471,7
Czerwiec / June	325,40	365,70	532,40	429,7
Lipiec / July	384,30	360,10	483,30	469,1
Sierpień / August	397,50	336,70	438,50	412,7
Wrzesień / September	443,50	305,10	261,50	384,1
Październik / October	408,70	318,80	280,70	249,8
Listopad / November	406,50	338,30	99,50	83,3
Grudzień / December	428,00	405,50	48,00	55,5
Suma / Total	5208,20	4322,30	3568,20	3350,3

źródło: opracowanie własne / *author's own study*

Dane obejmują wartości od stycznia do grudnia, a na końcu zestawiono również roczne sumy dla obu kategorii. W pierwszej części tabeli zaprezentowano ilość energii zużywanej przez gospodarstwo domowe, która wykazuje umiarkowaną sezonowość – największe zużycie

występuje w miesiącach zimowych, co wiąże się z wyższym zapotrzebowaniem energetycznym, natomiast wartości niższe obserwowane są latem. W drugiej części przedstawiono ilość energii generowanej przez instalację PV, charakteryzującą się typową dla klimatu umiarkowanego sezonowością zależną od nasłonecznienia. Najwyższe uzyski energii odnotowano w miesiącach wiosenno-letnich (kwiecień-sierpień), natomiast najniższe – zimą.

Zestawienie danych ujawnia znaczną dysproporcję pomiędzy zapotrzebowaniem energetycznym gospodarstwa domowego a produkcją instalacji PV, szczególnie w okresie zimowym, kiedy uzyski energii są najniższe. Suma roczna zużycia energii wyniosła 5208,2 kWh w 2022 r. oraz 4322,3 kWh w 2023 r., natomiast roczna produkcja instalacji osiągnęła odpowiednio 3568,2 kWh oraz 3350,3 kWh. Wyniki te potwierdzają, że instalacja PV pokrywa jedynie część zapotrzebowania energetycznego gospodarstwa, a udział energii własnej w bilansie energetycznym zależy silnie od sezonu. Dane przedstawione w tabeli 3 są zgodne z wieloletnimi obserwacjami dotyczącymi zmienności promieniowania słonecznego w Polsce, które według Matuszko [2014] cechuje się istotnym spadkiem w okresie zimowym – nawet do 10-20% wartości letnich. To tłumaczy znaczącą różnicę między zapotrzebowaniem a produkcją energii PV w miesiącach zimowych. Podobne tendencje sezonowe odnotowano również w badaniach Kleniewskiej i in. [2016], którzy wskazują, że polski klimat charakteryzuje się silnymi wahaniami zachmurzenia i nasłonecznienia, co przekłada się na okresowo niską efektywność tych mikroinstalacji.

Widoczna nadwyżka zapotrzebowania nad produkcją energii w miesiącach zimowych jest zgodna z obserwacjami dotyczącymi zachowań prosumentów w regionach o umiarkowanym klimacie. Badania Alimi i in. [2022] podkreślają, że w gospodarstwach o stałym profilu zużycia energii, szczególnie tam, gdzie część odbiorców pracuje niezależnie od sezonu, poziom autokonsumpcji energii PV w miesiącach zimowych może spaść nawet do kilku procent wytworzonej energii. Oznacza to, że w tym okresie instalacja PV pełni funkcję jedynie wspomagającą, a głównym źródłem zasilania pozostaje sieć elektroenergetyczna. Z kolei w miesiącach letnich obserwowany jest znacznie lepszy stosunek produkcji do zużycia, co wynika zarówno z wysokiej dostępności energii słonecznej, jak i stabilnych warunków atmosferycznych. Wyniki te potwierdzają charakterystykę instalacji PV typową dla regionów Europy Środkowej – system pracuje z wysoką efektywnością w sezonie letnim, natomiast zimą jego wkład w pokrycie zapotrzebowania jest ograniczony. Tego typu profil pracy instalacji jest szeroko opisywany w literaturze europejskiej i polskiej, a jego zrozumienie jest kluczowe przy analizie opłacalności mikroinstalacji PV oraz planowaniu działań w zakresie zwiększenia autokonsumpcji, np. poprzez zarządzanie obciążeniami lub stosowanie magazynów energii.

Analiza danych przedstawionych w tabeli 4 pozwala na szczegółowe omówienie bilansu energetycznego instalacji fotowoltaicznej o mocy 3 kWp w latach 2022–2023. Wskaźniki nadwyżki lub niedoboru energii potwierdzają typową dla klimatu umiarkowanego silną sezonowość pracy systemów PV. Ujemne wartości dominujące w miesiącach zimowych wskazują, że produkcja instalacji nie była w stanie pokryć bieżącego zapotrzebowania energetycznego gospodarstwa domowego, co jest zgodne z obserwacjami dotyczącymi znaczącego spadku promieniowania słonecznego w Polsce w okresie zimowym. Jak podaje Matuszko [2014], zimowe sumy nasłonecznienia na terenie kraju mogą stanowić mniej niż 20% wartości letnich, co bezpośrednio przekłada się na niskie uzyski instalacji PV w tym czasie.

Dodatknie wartości bilansu energii, głównie od kwietnia do sierpnia, potwierdzają możliwość generowania nadwyżek energii typową dla sezonu wiosenno-letniego. Zjawisko to jest opisywane w literaturze naukowej. Według Kleniewskiej i in. [2016], w miesiącach letnich na obszarze Polski obserwuje się zwiększoną liczbę godzin słonecznych oraz wyraźnie wyższe sumy promieniowania, co skutkuje wysoką produkcją energii z instalacji PV i umożliwia jej eksport do sieci.

Tabela 4 - Table 4

Analiza bilansu energetycznego instalacji fotowoltaicznej 3 kWp w latach 2022-2023 / *Analysis of the energy balance of a 3 kWp photovoltaic installation in 2022-2023*

Miesiąc / Month	Nadwyżka/niedobór energii / <i>Energy surplus deficit</i> [kWh]		Pokrycie zapotrzebowania na energię / <i>Energy demand coverage</i> [%]		Autokonsumpcja <i>Self-consumption</i>			
					2022		2023	
	2022	2023	2022	2023	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]
Styczeń / January	-258,00	-356,00	24,14	10,28	54,10	65,90	26,80	65,69
Luty / February	-135,00	-206,00	54,98	41,94	87,90	53,31	75,80	50,94
Marzec / March	-783,00	-83,00	32,28	78,01	179,30	48,03	101,40	34,44
Kwiecień / April	-9,00	-75,00	97,02	80,54	151,10	51,55	139,40	44,91
Maj / May	195,00	94,00	161,73	124,89	210,90	41,28	176,70	37,46
Czerwiec / June	207,00	64,00	163,61	117,50	215,40	40,46	169,70	39,49
Lipiec / July	99,00	109,00	125,76	130,27	227,30	47,03	187,10	39,88
Sierpień / August	41,00	76,00	110,31	122,57	213,50	48,69	157,70	38,21
Wrzesień / September	-182,00	79,00	58,96	125,89	173,50	66,35	115,10	29,97
Październik / October	-128,00	-69,00	68,68	78,36	146,70	52,26	98,80	39,55
Listopad / November	-307,00	-255,00	24,48	24,62	58,50	58,79	43,30	51,98
Grudzień / December	-380,00	-350,00	11,21	13,69	37,00	77,08	38,50	69,37

źródło: opracowanie własne / *author's own study*

Wskaźniki procentowego pokrycia zapotrzebowania energetycznego jednoznacznie wskazują, że najkorzystniejszym okresem pod względem samowystarczalności energetycznej są miesiące letnie, w których wartości przekraczają 100%. Oznacza to, że w tym okresie instalacja generuje nadwyżki energii, co jest zgodne z obserwacjami przedstawionymi w analizach europejskich prosumentów, według których w regionach o umiarkowanym klimacie profil produkcji PV znacząco przewyższa profil zużycia w sezonie letnim [Alimi i in. 2022]. Z kolei znaczne obniżenie poziomu pokrycia zapotrzebowania w miesiącach zimowych podkreśla dużą zależność od energii pobieranej z sieci elektroenergetycznej.

Autokonsumpcja, czyli energia wykorzystana bezpośrednio w miejscu jej wytworzenia, również wykazuje charakterystyczną sezonowość. Najwyższe wartości autokonsumpcji obserwowane są latem, kiedy produkcja energii jest wysoka i często pokrywa zapotrzebowanie w czasie rzeczywistym. Badania Alimi i in. [2022] wskazują, że autokonsumpcja w typowych gospodarstwach korzystających z instalacji PV może wahać się od 20% do nawet 60%, zależnie od profilu zużycia energii oraz pory roku. Zimowe spadki autokonsumpcji wynikają natomiast nie tylko z niższej produkcji, lecz także z większego udziału energii pobieranej z sieci, która kompensuje niedobory.

Analiza danych przedstawionych w tabeli 5 pozwala jednoznacznie stwierdzić, że zastosowanie instalacji fotowoltaicznej znacząco wpływa na obniżenie kosztów zakupu energii elektrycznej w gospodarstwie domowym. Niższe miesięczne koszty energii w wariantcie z instalacją PV odzwierciedlają częściowe zastąpienie energii pobieranej z sieci energią

wyprodukowaną lokalnie, co stanowi podstawowy mechanizm ekonomicznych korzyści wynikających z użytkowania mikroinstalacji fotowoltaicznych.

Tabela 5 - Table 5

Zestawienie kosztów energii elektrycznej ponoszonych przez gospodarstwo domowe z instalacją PV oraz bez instalacji PV w latach 2022-2023 / *Summary of electricity costs incurred by the household with and without a PV installation in 2022-2023*

Miesiąc / Month	Koszt zakupu energii elektrycznej / Cost of electricity purchase [zł]			
	z instalacją PV with a PV installation		bez instalacji PV without a PV installation	
	2022	2023	2022	2023
Styczeń / January	113,44	152,07	135,63	163,20
Luty / February	86,40	116,23	122,47	147,71
Marzec / March	399,05	115,20	472,62	157,31
Kwiecień / April	59,28	99,41	121,27	157,31
Maj / May	41,13	80,94	127,66	154,32
Czerwiec / June	43,11	79,37	131,48	149,85
Lipiec / July	62,46	68,88	155,72	146,58
Sierpień / August	73,61	71,23	161,21	136,72
Wrzesień / September	110,06	75,58	181,24	123,38
Październik / October	107,50	90,50	167,69	131,53
Listopad / November	142,78	121,72	166,79	139,70
Grudzień / December	158,33	147,56	173,51	163,55
Suma / Total	1397,15	1218,69	2117,30	1771,16

źródło: opracowanie własne / author's own study

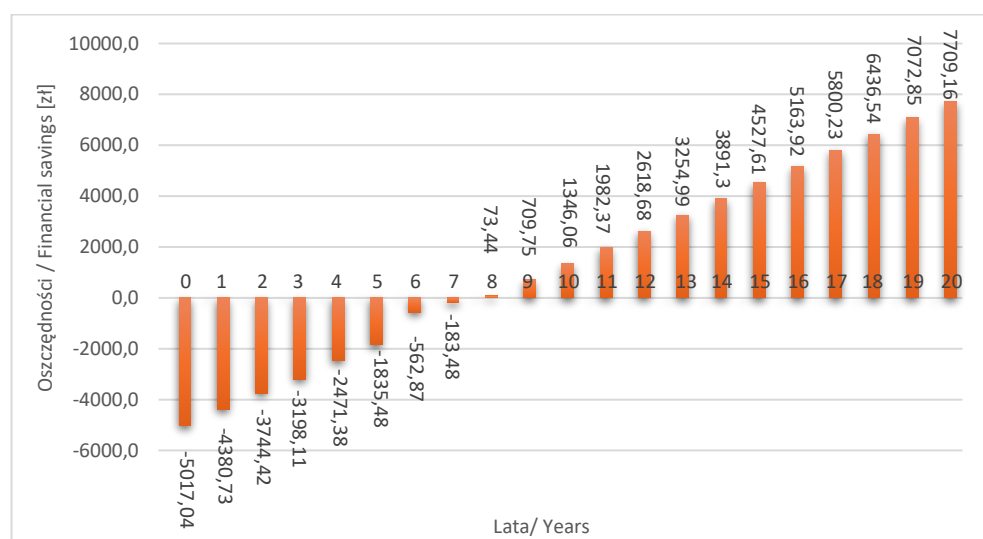
Warto zauważyć, że różnice kosztów pomiędzy wariantem z PV a bez PV są największe w okresie od kwietnia do września, czyli w miesiącach o największym nasłonecznieniu i najwyższej produkcji energii. Zjawisko to potwierdzają dane dotyczące sezonowego promieniowania słonecznego w Polsce, publikowane m.in. przez Matuszko [2014], które wskazują na znaczący wzrost dostępności energii słonecznej w półroczu letnim. Z kolei w zimie, gdy produkcja PV jest niska, koszty energii w obu wariantach stają się do siebie zbliżone. Jest to typowa cecha systemów PV w klimacie umiarkowanym, opisywana również w raporcie Instytutu Energetyki Odnawialnej [IEO 2023], gdzie podkreślono dużą sezonową dysproporcję między uzyskami a zużyciem.

Roczne oszczędności, wynoszące 720,15 zł w 2022 r. oraz 552,47 zł w 2023 r., są zgodne z przeciętnymi oszczędnościami raportowanymi dla instalacji o podobnej mocy. IEO [2023] wskazuje, że w przypadku instalacji prosumenckich o mocy 3–4 kWp średnie roczne korzyści finansowe mogą mieścić się w przedziale 500–900 zł rocznie, zależnie od profilu zużycia, systemu rozliczeń oraz cen energii. Zatem uzyskane wyniki wpisują się w realne warunki ekonomiczne polskich prosumentów. Obserwowana niższa oszczędność w 2023 r. jest również logiczna w świetle zmiennego profilu produkcyjnego instalacji — rok ten charakteryzował się niższą generacją energii, co zostało wykazane w Tabeli 1. Niższe uzyski automatycznie przekładają się na większą konieczność zakupu energii z sieci, co

potwierdzają również analizy Alimi i in. [2022], wskazujące, że efektywność ekonomiczna PV jest zawsze silnie zależna od bieżącego poziomu produkcji energii.

Średnia roczna oszczędność wynosząca 636,31 zł w dwuletnim okresie obserwacji potwierdza ekonomiczną zasadność inwestycji w mikroinstalacje PV. Literatura wskazuje, że mimo zmiennego profilu produkcji i sezonowości, instalacje o mocy około 3 kWp generują wymierne oszczędności, szczególnie w modelach rozliczeń prosumenckich obowiązujących w Polsce [IEO 2023]. Wyniki te potwierdzają również dane z europejskich analiz dotyczących opłacalności mikroinstalacji fotowoltaicznych, w których podkreśla się, że nawet przy umiarkowanym nasłonecznieniu gospodarki domowe mogą znacząco obniżyć koszty energii [Alimi i in. 2022].

Podsumowując, przedstawione dane jednoznacznie wskazują, że instalacja PV stanowi skuteczne narzędzie redukcji kosztów energii elektrycznej, a osiągnięte korzyści są zgodne z wynikami badań krajowych i międzynarodowych. Wyniki potwierdzają także kluczową rolę sezonowości w modelu ekonomicznym instalacji fotowoltaicznej oraz znaczenie indywidualnego profilu zużycia energii w ocenie jej opłacalności.



źródło: opracowanie własne / author's own study

Ryc. 1. Prognoza czasu zwrotu nakładów poniesionych na instalację fotowoltaiczną oraz oszczędności po 20 latach jej wykorzystywania

Fig. 1. Forecast of the payback period for the photovoltaic installation and the savings after 20 years of operation

Analiza przedstawiona na rysunku 1 potwierdza, że instalacje fotowoltaiczne stanowią inwestycję, której zwrot jest możliwy w perspektywie kilku lat, co jest spójne z ustaleniami prezentowanymi w literaturze naukowej. Badania doświadczalne oraz modele ekonomiczne opisane przez Skoplaki i Palyvos [2009] wskazują, że w warunkach europejskich typowy czas zwrotu dla małych instalacji PV mieści się w przedziale od 6 do 10 lat, zależnie od kosztów początkowych oraz lokalnych zasobów promieniowania słonecznego. Uzyskany w analizie czas zwrotu pomiędzy 7 a 8 rokiem eksploatacji mieści się więc w zakresach

podawanych w literaturze, zwłaszcza biorąc pod uwagę obniżony koszt inwestycji wynikający z dofinansowania.

Wyniki ekonomiczne instalacji są również zgodne z wnioskami prezentowanymi przez Reicha i innych [2012], którzy analizowali czynniki wpływające na opłacalność mikroinstalacji PV w Europie. Autorzy wykazali, że kluczowe znaczenie ma nie tylko poziom nasłonecznienia, ale także stabilność uzysków rocznych oraz niskie koszty eksploatacyjne tj. cechy charakterystyczne również dla analizowanej instalacji. Przedstawiona krzywa kumulowanych oszczędności potwierdza obserwację Reicha i współautorów [2012], że instalacje PV generują narastające korzyści finansowe w miarę upływu lat, a ich efektywność ekonomiczna rośnie wraz z czasem użytkowania.

Prognozowany wzrost oszczędności do około 7709 zł po 20 latach eksploatacji jest spójny z analizami długoterminowymi publikowanymi przez Jordan i Kurtz [2013], którzy zbadali wpływ stopniowej utraty sprawności modułów PV na produkcję energii. Ich wyniki wskazują, że typowa degradacja modułów krzemowych wynosi jedynie 0,5–0,8% rocznie, co oznacza, że sprawność instalacji spada stopniowo i nie wpływa drastycznie na jej opłacalność w długiej perspektywie czasowej. Przy uwzględnieniu tak niewielkiej degradacji przewidywany poziom oszczędności w analizie jest realistyczny i zgodny z wynikami badań.

Dodatkowo, prace naukowe dotyczące prosumentów - m.in. analiza Luthander i innych [2015] wskazują, że instalacje PV charakteryzują się szczególnie korzystnym profilem ekonomicznym w gospodarstwach domowych o umiarkowanym zużyciu energii, gdzie znacząca część produkcji może zostać wykorzystana bezpośrednio. W takich przypadkach oszczędności rosną szybciej, a czas zwrotu ulega skróceniu. Instalacje PV, zwłaszcza wspierane programami dotacyjnymi, wykazują wysoki poziom opłacalności, stabilny zwrot kapitału oraz przewidywalny wzrost korzyści ekonomicznych w okresie wieloletniej eksploatacji.

V. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza funkcjonowania instalacji fotowoltaicznej o mocy 3 kWp wykazała, że system ten charakteryzuje się zarówno wysoką efektywnością energetyczną, jak i opłacalnością ekonomiczną. W latach 2022–2023 instalacja wytworzyła odpowiednio 3568,20 kWh oraz 3350,3 kWh energii elektrycznej, co odzwierciedla naturalną zmienność warunków nasłonecznienia w poszczególnych latach. Jednocześnie zaobserwowano wzrost ilości energii wprowadzanej do sieci z 1813 kWh w 2022 r. do 2020 kWh w roku 2023 co wskazuje na zwiększenie nadwyżek produkcyjnych.

Instalacja PV pokrywała znaczną część zapotrzebowania energetycznego gospodarstwa domowego, zapewniając średnio 78,41% zużywanej energii w analizowanym okresie. Oznacza to istotne ograniczenie poboru energii z sieci elektroenergetycznej, choć nie pozwala jeszcze na osiągnięcie pełnej samowystarczalności. W wymiarze ekonomicznym instalacja przyczyniła się do znaczącej redukcji rocznych kosztów energii, generując oszczędności na poziomie 720,15 zł w 2022 r. i 552,47 zł w 2023 r., co daje średnio 636,31 zł oszczędności rocznie. Przekłada się to na obniżenie kosztów zakupu energii o około 30–35% względem wariantu bez instalacji PV.

Istotnym czynnikiem decydującym o opłacalności inwestycji było dofinansowanie udzielone w ramach programu „Wsparcie rozwoju OZE na terenie ROF (Rzeszowski Obszar Funkcjonalny) – projekt parasolowy”, dzięki któremu rzeczywisty koszt inwestycji poniesiony przez prosumenta wyniósł jedynie 5017,04 zł. W konsekwencji okres zwrotu nakładów oszacowano na około osiem lat eksploatacji. Po jego upływie instalacja zaczyna

generować wyłącznie korzyści finansowe, a w perspektywie dwudziestoletniej zapewnia znaczny zysk ekonomiczny oraz poprawę bilansu energetycznego gospodarstwa domowego.

Podsumowując, analizowana instalacja PV okazała się rozwiązaniem efektywnym, umożliwiającym znaczną redukcję kosztów energii, zwiększenie udziału energii odnawialnej w pokryciu potrzeb gospodarstwa oraz uzyskanie wymiernych korzyści finansowych na przestrzeni wieloletniej eksploatacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Adamkiewicz J. 2017. Zarys koncepcji zrównoważonego bezpieczeństwa energetycznego. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie. 104. 103-114.
2. Alimi O.A., Meyer E.L., Olayiwola O.I. 2022. Solar Photovoltaic Modules' Performance Reliability and Degradation Analysis-A Review. *Energies*. 15. 596.
3. Brodziński Z., Brodzińska K., Szadziun M. 2021. Photovoltaic Farms-Economic Efficiency of Investments in North-East Poland. *Energies*. 14(8). 2087.
4. Chrzan M., Pietruszczak D., Wiktorowski M. 2018. Wybrane zagadnienia projektowania instalacji elektrycznej typu OZE na przykładzie domowej elektrowni fotowoltaicznej. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*. 19(12). 66-74.
5. Dunlop E.D., Halton D., O'Driscoll T. 2006. The performance of crystalline silicon photovoltaic solar modules after 22 years of continuous outdoor exposure. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 14(1). 53-64.
6. Eurostat 2023 [dok. elektr.: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview. data wejścia 06.01.2026].
7. Instytut Energetyki Odnawialnej (IEO). 2023. Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2023. Warszawa.
8. Jordan D.C., Kurtz S.R. 2013. Photovoltaic Degradation Rates-An Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 21(1). 12-29.
9. Kleniewska M., Chojnicki B.H., Acosta M. 2016. Long-term total solar radiation variability at the Polish Baltic coast. *Meteorology, Hydrology and Water Management*. 4(2). 35-44.
10. Kumar A., Kumar K., Kaushik N., Sharma S., Mishra S. 2010. Renewable energy in India: current status and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14(8). 2434-2442.
11. Luthander R., Widén J., Nilsson D., Palm J. 2015. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*. 142. 80-94.
12. Matuszko D. 2014. Long-term variability in solar radiation in Krakow based on measurements of sunshine duration. *International Journal of Climatology*. 34(1). 228-234.
13. Mularczyk A., Hysa B. 2015. Rozwój i perspektywy energii solarnej w Polsce i województwie śląskim. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*. 86. 361-377.
14. Reich N. H., Mueller B., Armbruster A., van Sark W. G. J. H. M., Kiefer K., Reise C. 2012. Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic? *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 20(6). 717-726.
15. Sala K. 2018. Energetyka słoneczna jako czynnik rozwoju regionów i gmin w Polsce. *Przedsiębiorczość-Edukacja*. 14. 125-13.
16. Skoplaki E., Palyvos J. A. 2009. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review. *Solar Energy*. 83(5). 614-624.
17. Šuri M., Huld T. A., Dunlop E.D., Ossenbrink H.A. 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*. 81(10). 1295-1305.
18. World Commission on Environment and Development. 1987. *Our common future*. Oxford University Press.