

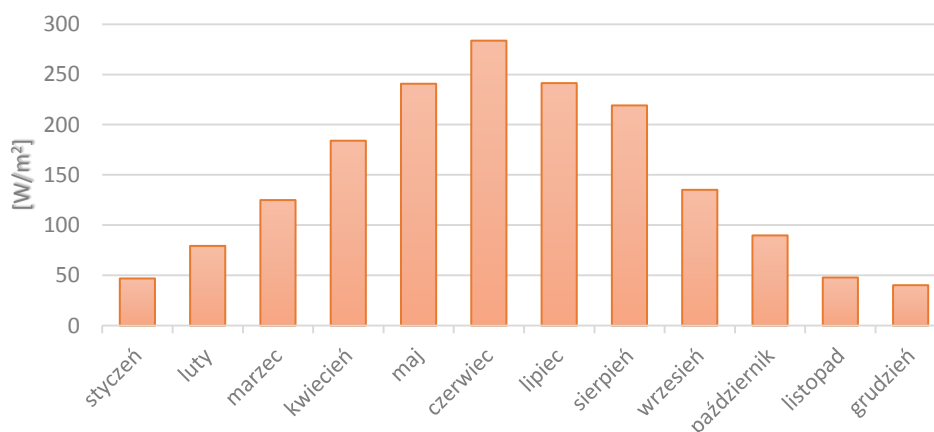
Opłacalność ekonomiczna farmy fotowoltaicznej do 1 MW w warunkach polskich.

1. Wprowadzenie

Rozwój energetyki odnawialnej w Polsce wynika zarówno z ogólnoświatowych trendów jak również konieczności osiągnięcia wymaganego prawodawstwem unijnym udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto [1]. Do tej pory technologiami dominującym w tym obszarze były elektrownie wiatrowe oraz jednostki wykorzystujące biomasę w procesach produkcji energii elektrycznej, jednakże wejście w życie tzw. „Ustawy Wiatrakowej” [2] w 2016 roku, a wcześniej istotny spadek cen świadectw pochodzenia wydawanych za energię wytwarzaną z OZE, znacząco ograniczyły rozwój tych technologii w kraju. Na podstawie projektu Polityki energetycznej Polski do 2040 roku [3], można wysnuć wniosek, że rozwój energetyki odnawialnej w znacznej mierze opierał się będzie na fotowoltaice. Zasadnym staje się więc pytanie o opłacalność ekonomiczną inwestycji w tego typu elektrownie w aktualnych i przewidywanych warunkach.

2. Założenia techniczne

W celu znalezienia odpowiedzi na powyższe pytanie przeanalizowana została modelowa farma fotowoltaiczna o mocy do 1 MW ulokowana w okolicach Rzeszowa (50,03 N, 22,08E). W oparciu o dane dla typowego roku meteorologicznego [4] określono ilość promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię płaską ustawioną pod kątem nachylenia równym 30° w kierunku południowym, z uwzględnieniem współczynnika refleksyjności podłoża na poziomie 0,25. Średniomiesięczne natężenie promieniowania słonecznego padającego na daną powierzchnię przedstawiono na wykresie poniżej.



Rysunek 1

Średniomiesięczne natężenie promieniowania słonecznego padającego na panele fotowoltaiczne w wybranej lokalizacji.

Źródło: Opracowanie własne w oparciu o: [4], [5].

W analizie założono, że dana farma fotowoltaiczna o mocy 1 MW_{el} składać się będzie z 3 334 paneli o następujących parametrach technicznych:

Tabela 1

Podstawowe dane techniczne modelowych paneli fotowoltaicznych

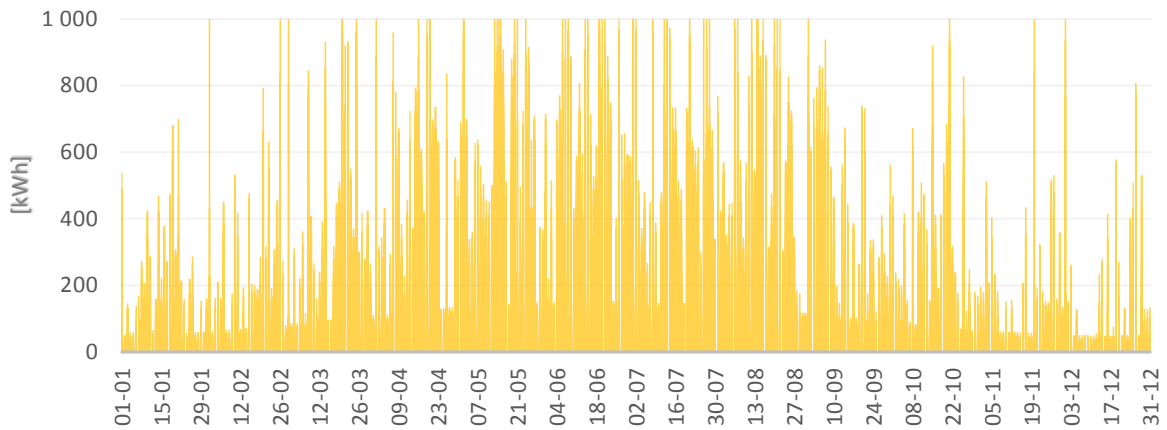
Powierzchnia czynna pojedynczego panelu:	1,46	m²
Właściwości elektryczne [STC 1000 W/m², 25°C, AM 1,5]		
Napięcie jałowe modułu, V_{OC0}	38,23	V
Prąd zwarcia modułu, I_{SC0}	9,69	I
Napięcie w punkcie mocy maksymalnej, V_{MPP}	32,28	V
Prąd w punkcie mocy maksymalnej, I_{MPP}	9,29	I
Współczynnik wypełnienia, FF	80,95	%
Maksymalna moc znamionowa, P_{max}	300	W
Sprawność znamionowa, η	18,15	%
Roczna utrata wydajności	0,7	%
Współczynniki temperaturowe:		
Dla I_{sc}	0,03	%/K
Dla V_{oc}	-0,24	%/K

Źródło: Opracowanie własne w oparciu o: [6]

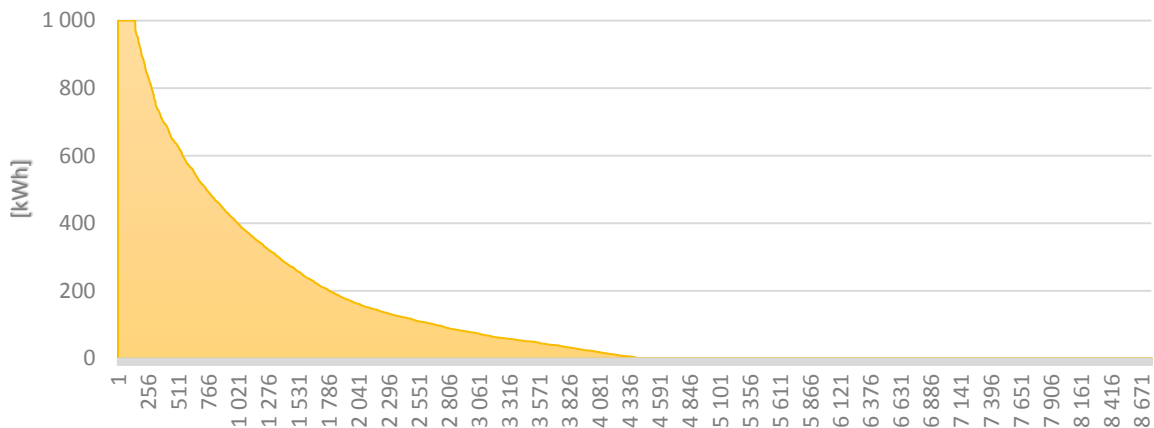
Produkcja energii elektrycznej z farmy fotowoltaicznej w roku cechuje wysoka zmienność, na którą wpływ ma bieżące promieniowanie słoneczne, jak również wahania sprawności zależne od temperatury ogniw. W analizie przyjęto, że temperatura ogniw jest równa temperaturze całego modułu, która to z kolei jest zależna między innymi od natężenia promieniowania słonecznego, temperatury zewnętrznej jak i sposobu zamontowania modułów czy technologii ich wykonania [7]. Dodatkowo, w analizie energetycznej uwzględniono straty wynikające z konwersji prądu stałego na prąd zmienny w inwerterach, które są zależne z kolei od zmienności ich obciążenia. Moc znamionową inwerterów przyjęto na poziomie mocy zainstalowanej dla całej farmy fotowoltaicznej,

w związku z czym ewentualna generacja energii elektrycznej ponad parametry znamionowe przez instalację, traktowana jest jako strata z uwagi na ograniczenia mocy wyjściowej falownika [8].

Roczną produkcję energii elektrycznej z modelowej farmy fotowoltaicznej w oparciu o powyższe założenia przedstawiają poniższe wykresy:



Rysunek 2
Produkcja energii elektrycznej z farmy fotowoltaicznej w typowym roku meteorologicznym
Źródło: Opracowanie własne w oparciu o: [7], [8], [9], [10].



Rysunek 3
Produkcja energii elektrycznej z farmy fotowoltaicznej w typowym roku meteorologicznym - wykres uporządkowany
Źródło: Opracowanie własne w oparciu o: [7], [8], [9], [10].

Analizowana instalacja fotowoltaiczna funkcjonuje zaledwie przez 118 godziny w roku ze swoją pełną mocą znamionową, natomiast w pozostałych godzinach jej produkcja znacząco spada i przez prawie połowę roku równa jest zeru. Całkowita roczna produkcja energii elektrycznej z farmy fotowoltaicznej nie przekracza 1 106,4 MWh.

3. Założenia finansowe

Analizę finansową przeprowadzono w rozbiciu miesięcznym metodą Free Cash Flow to Firm (FCFF) [11]. Za punkt startowy w modelu ekonomiczno-finansowym przyjęto kwiecień 2019 roku, natomiast analizowany okres obejmuje 25 lat eksploatacji wraz z czasem realizacji przedsięwzięcia, wynoszącym 16 miesięcy (z uwzględnieniem zarówno fazy planowania, jak i fizycznej budowy instalacji). W trakcie eksploatacji założono wsparcie inwestycji w postaci uczestnictwa w systemie aukcyjnym w okresie 15 lat, po którym sprzedaż energii odbywać się będzie na rynku hurtowym. Cenę rynkową energii elektrycznej określono na poziomie kosztu krańcowego zmiennego wytwarzania energii elektrycznej (scenariusz 27% celu OZE) w oparciu o wyniki analiz prognostycznych zawartych w projekcie Polityki Energetycznej do 2040 roku [3]. Sposób finansowania projektu przebadano wariantowo w zależności od przyjętego poziomu dofinansowania. Zakładane dotacje wynoszą od 0 do 60% nakładów początkowych, przy czym przyjęto, że oczekiwana stopa zwrotu z danego kapitału wynosi 6%. Założono, że pozostała część kosztów pokryta zostanie za pomocą środków własnych i kredytu w proporcji 40%/60%. Roczną stawkę oprocentowania kredytu przyjęto jako sumę indeksu WIBOR 3M [12] i marży banku 3% przy rocznej kapitalizacji odsetek począwszy od dnia rozpoczęcia eksploatacji instalacji. Jako stopę dyskonta w analizie przyjęto średnioważony koszt kapitału (WACC) przy założeniu, że koszt kapitału własnego jest równy 8,5%.

Całkowite nakłady inwestycyjne przyjęto na poziomie 4 585 800 zł zaś ich poszczególne składowe zostały przedstawione w tabeli poniżej:

Tabela 2
Koszty inwestycyjne analizowanej farmy fotowoltaicznej 1 MW

Wyszczególnienie	Kwota
Zakup paneli fotowoltaicznych	2 333 800 zł
Zakup gruntu 1,1 ha	66 000 zł
Koszt inwerterów	755 700 zł
Instalacja konstrukcji wsporczej i modułów, prace ziemne	860 000 zł
Wykonanie przyłącza	400 000 zł
System monitoringu, ogrodzenie i inne	170 300 zł
RAZEM	4 585 800 zł

Źródło: Opracowanie własne w oparciu o: [6], [13].

Charakterystyczną cechą instalacji fotowoltaicznych są zerowe zmienne koszty O&M. W przypadku stałych kosztów O&M ich wartość oszacowano na poziomie 72 109,44 zł. Do tych kosztów zaliczono opłatę serwisową, podatek od nieruchomości i gruntu, zużycie energii elektrycznej na potrzeby własne w wysokości 500 kWh/miesiąc oraz koszty ubezpieczenia instalacji na wypadek zdarzeń losowych np. kradzieży [13], [14], [15].

W analizie uwzględniono podatek dochodowy na poziomie 19% oraz stawkę amortyzacyjną 7%. Do podstawy amortyzacyjnej zaliczono koszty zakupu paneli i inwerterów, koszt instalacji konstrukcji wsporczej modułów i prac naziemnych oraz koszt wykonania przyłącza.

Ostateczna cena sprzedaży energii elektrycznej z aukcji (cena skorygowana) uzależniona jest od otrzymanego wstępnego dofinansowania do projektu (Art. 39 ust. 5, Dz. U. 2015 poz. 478). Przy braku dodatkowego wsparcia inwestycyjnego, cena ta jest równa cenie oferowanej na aukcji, którą to przyjęto na poziomie ceny referencyjnej, tj. 420 zł/MWh [16]. Podstawowe założenia dla wszystkich wariantów przedstawiono w tabeli poniżej:

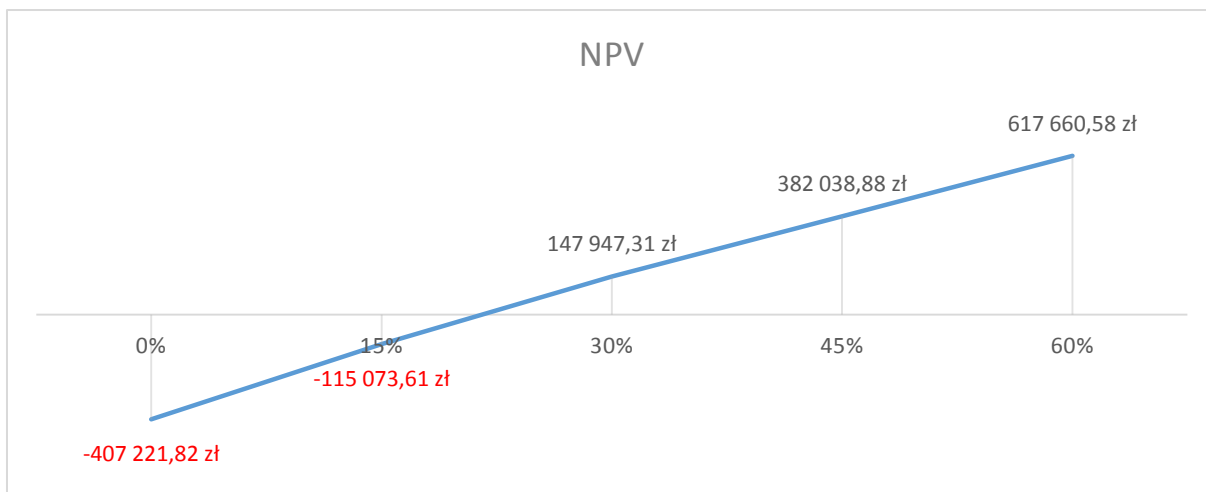
*Tabela 3
Główne założenia inwestycyjne dla różnych wariantów*

	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IV	Wariant V
Wysokość dofinansowania [% nakładów inwestycyjnych]	0%	15%	30%	45%	60%
Skorygowana cena [zł/MWh]	420,00	376,65	333,30	289,95	246,60
Wysokość zaciągniętego kredytu	2 751 480,00 zł	2 338 758,00 zł	1 926 036,00 zł	1 513 314,00 zł	1 100 592,00 zł
Średnioważony koszt kapitału WACC	5,70%	5,74%	5,79%	5,83%	5,88%

Źródło: Opracowanie własne

4. Wyniki analizy

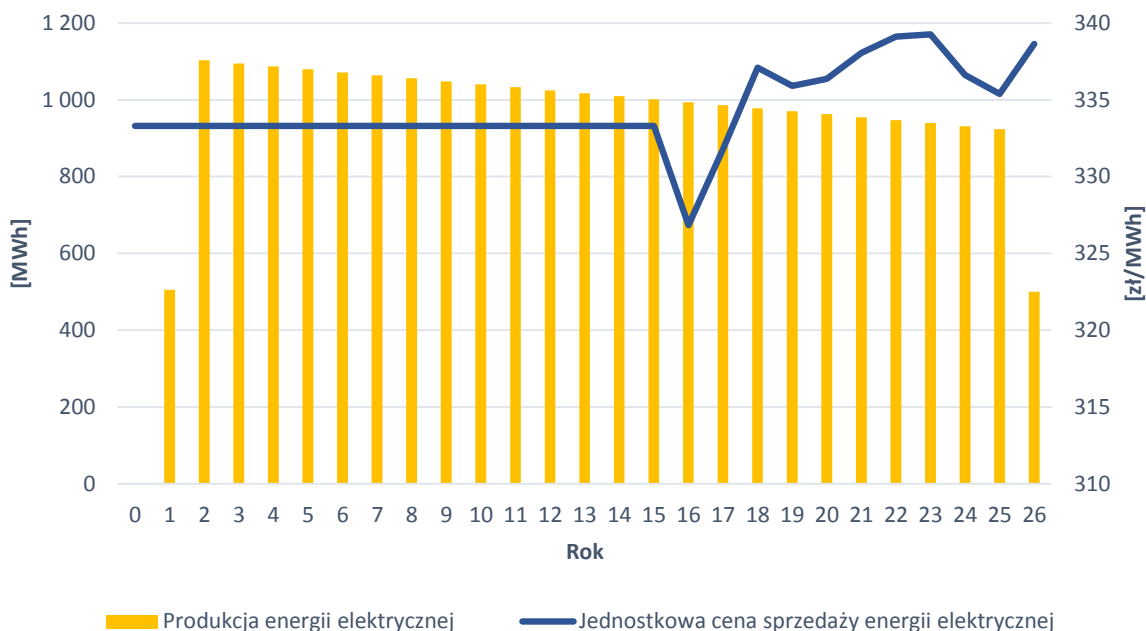
Jako fundamentalne kryterium oceny opłacalności inwestycyjnej przyjęto wartość bieżącą inwestycji netto (NPV) dla ostatniego miesiąca analizy [17]. Warunkiem koniecznym uzasadniającym ekonomiczny sens realizacji danej inwestycji jest to, aby wartość NPV była większa lub równa 0. Na wykresie poniżej przedstawiono zależność osiągniętej wartości NPV od otrzymanej wysokości dofinansowania do projektu.



Rysunek 4
Zależność wartości bieżącej netto inwestycji od dofinansowania do nakładów inwestycyjnych
Źródło: Opracowanie własne

Z analizy wynika, że przy danych założeniach inwestycyjnych i technicznych trzy warianty znajdują uzasadnienie ekonomiczne, tj. Wariant III – V. W dalszej części artykułu przedstawiono szczegółowe wyniki obliczeń dla wariantu z 30% dofinansowaniem inwestycyjnym.

Rysunek 5 przedstawia roczną produkcję energii elektrycznej wraz z zakładaną jednostkową ceną sprzedaży. Rozkład wszystkich przepływów finansowych w analizowanym okresie przedstawia z kolei Tabela 4.



Rysunek 5 Produkcja energii elektrycznej i zakładana cena sprzedaży w trakcie eksploatacji - Wariant III
Źródło: Opracowanie własne w oparciu o: [7], [8], [9], [10], [3]

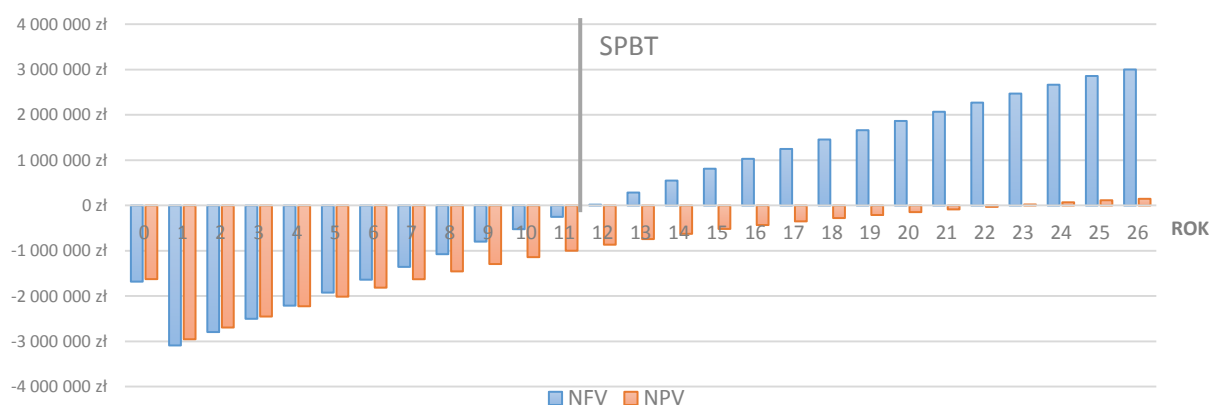
Tabela 4
Analiza przepływów pieniężnych – Wariant III

Rok	Sprzedaż [a]	Nakłady inwestycyjne [b]	Koszty operacyjne [c]	EBITDA [a – c = d]	Amortyzacja [e]	EBIT [d – e = f]	Podatek dochodowy [g]	NOPAT [f – g = h]	FCFF [h – b]
0	- zł	1 679 860,00 zł	- zł	- zł	- zł	- zł	- zł	- zł	-1 679 860,00 zł
1	168 266,29 zł	1 530 200,00 zł	46 158,04 zł	122 108,25 zł	126 860,42 zł	-4 752,16 zł	- zł	-4 752,16 zł	-1 408 091,75 zł
2	367 559,99 zł	- zł	72 109,44 zł	295 450,55 zł	304 465,00 zł	-9 014,45 zł	- zł	-9 014,45 zł	295 450,55 zł
3	364 964,76 zł	- zł	72 109,44 zł	292 855,33 zł	304 465,00 zł	-11 609,67 zł	- zł	-11 609,67 zł	292 855,33 zł
4	362 369,54 zł	- zł	72 109,44 zł	290 260,10 zł	304 465,00 zł	-14 204,90 zł	- zł	-14 204,90 zł	290 260,10 zł
5	359 774,31 zł	- zł	72 109,44 zł	287 664,87 zł	304 465,00 zł	-16 800,13 zł	- zł	-16 800,13 zł	287 664,87 zł
6	357 179,09 zł	- zł	72 109,44 zł	285 069,65 zł	304 465,00 zł	-19 395,35 zł	- zł	-19 395,35 zł	285 069,65 zł
7	354 583,86 zł	- zł	72 109,44 zł	282 474,42 zł	304 465,00 zł	-21 990,58 zł	- zł	-21 990,58 zł	282 474,42 zł
8	351 988,63 zł	- zł	72 109,44 zł	279 879,20 zł	304 465,00 zł	-24 585,80 zł	- zł	-24 585,80 zł	279 879,20 zł
9	349 393,41 zł	- zł	72 109,44 zł	277 283,97 zł	304 465,00 zł	-27 181,03 zł	- zł	-27 181,03 zł	277 283,97 zł
10	346 798,18 zł	- zł	72 109,44 zł	274 688,74 zł	304 465,00 zł	-29 776,26 zł	- zł	-29 776,26 zł	274 688,74 zł
11	344 202,95 zł	- zł	72 109,44 zł	272 093,52 zł	304 465,00 zł	-32 371,48 zł	- zł	-32 371,48 zł	272 093,52 zł
12	341 607,73 zł	- zł	72 109,44 zł	269 498,29 zł	304 465,00 zł	-34 966,71 zł	- zł	-34 966,71 zł	269 498,29 zł
13	339 012,50 zł	- zł	72 109,44 zł	266 903,07 zł	304 465,00 zł	-37 561,93 zł	- zł	-37 561,93 zł	266 903,07 zł
14	336 417,28 zł	- zł	72 109,44 zł	264 307,84 zł	304 465,00 zł	-40 157,16 zł	- zł	-40 157,16 zł	264 307,84 zł
15	333 822,05 zł	- zł	72 109,44 zł	261 712,61 zł	264 594,58 zł	-2 881,97 zł	- zł	-2 881,97 zł	261 712,61 zł
16	324 802,92 zł	- zł	72 109,44 zł	252 693,48 zł	- zł	252 693,48 zł	34 275,89 zł	218 417,59 zł	218 417,59 zł
17	327 155,24 zł	- zł	72 109,44 zł	255 045,80 zł	- zł	255 045,80 zł	37 520,59 zł	217 525,22 zł	217 525,22 zł
18	329 755,69 zł	- zł	72 109,44 zł	257 646,25 zł	- zł	257 646,25 zł	49 064,38 zł	208 581,88 zł	208 581,88 zł
19	325 970,80 zł	- zł	72 109,44 zł	253 861,36 zł	- zł	253 861,36 zł	48 299,53 zł	205 561,83 zł	205 561,83 zł
20	323 806,27 zł	- zł	72 109,44 zł	251 696,84 zł	- zł	251 696,84 zł	47 848,42 zł	203 848,42 zł	203 848,42 zł
21	322 781,96 zł	- zł	72 109,44 zł	250 672,52 zł	- zł	250 672,52 zł	47 670,83 zł	203 001,69 zł	203 001,69 zł
22	321 162,28 zł	- zł	72 109,44 zł	249 052,84 zł	- zł	249 052,84 zł	47 376,34 zł	201 676,50 zł	201 676,50 zł
23	318 670,28 zł	- zł	72 109,44 zł	246 560,84 zł	- zł	246 560,84 zł	46 990,93 zł	199 569,92 zł	199 569,92 zł
24	313 555,92 zł	- zł	72 109,44 zł	241 446,48 zł	- zł	241 446,48 zł	46 001,11 zł	195 445,37 zł	195 445,37 zł
25	309 792,66 zł	- zł	72 109,44 zł	237 683,22 zł	- zł	237 683,22 zł	45 135,41 zł	192 547,81 zł	192 547,81 zł
26	169 359,04 zł	- zł	25 951,40 zł	143 407,64 zł	- zł	143 407,64 zł	- zł	143 407,64 zł	143 407,64 zł

Źródła: Opracowanie własne w oparciu o: [11]

Z uwagi na przyjętą metodę analizy ekonomicznej (FCFF) w analizie przepływów finansowych nie uwzględniono odsetek i rat kapitałowych, natomiast cały koszt związany z kredytowaniem uwzględniony został w stopie dyskonta. Dodatkowo, z uwagi na wykazywaną stratę w rozliczeniach podatkowych, przez pierwsze lata trwania projektu nie jest on obciążany podatkiem dochodowym.

Rozkład wartości bieżącej i przyszłej w poszczególnych latach dla analizowanego wariantu przedstawiono na wykresie poniżej.



Rysunek 6
Wartości bieżące i przyszłe inwestycji na koniec danego roku trwania inwestycji - Wariant III.
Źródło: Opracowanie własne

Kompleksowe zestawienie podstawowych wskaźników opłacalności ekonomicznej dla wszystkich rozpatrywanych wariantów przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela 5
Wskaźniki opłacalności ekonomicznej dla wszystkich wariantów

Wariant	Dofinansowanie	Prosty czas zwrotu, SPBT [mc]	Prosta stopa zwrotu, ROI	Wartość bieżąca netto, NPV	Wewnętrzna stopa zwrotu, IRR	Zmodyfikowana wewnętrzna stopa zwrotu, MIRR
I	0%	169	6,42%	-407 221,82 zł	4,40%	5,37%
II	15%	160	5,94%	-115 073,61 zł	5,21%	5,64%
III	30%	155	5,42%	147 947,31 zł	6,16%	5,94%
IV	45%	145	4,86%	382 038,88 zł	7,34%	6,31%
V	60%	132	4,30%	617 660,58 zł	9,12%	6,81%

Źródło: Opracowanie własne w oparciu o: [11], [17]

5. Wnioski

Analizowaną farmę fotowoltaiczną cechuje umiarkowana rentowność. Przy zadanej wysokości ceny referencyjnej (420 zł/MWh) dla danego koszyka aukcyjnego inwestycja wymaga dodatkowego dofinansowania do nakładów inwestycyjnych w wysokości 30%. Dodatkowo, nawet przy skrajnie optymistycznym wariacie, prosty czas zwrotu z inwestycji (SPBT) wynosi 11 lat. Należy tu zaznaczyć także fakt, że dana analiza została dokonana przy dość optymistycznych założeniach kredytowania. Ponadto, w analizie nie uwzględniono ewentualnej wymiany inwerterów w trakcie eksploatacji farmy fotowoltaicznej, co dodatkowo obniżyłoby rentowność inwestycji.

Głównym czynnikiem wpływającym na daną efektywność ekonomiczną przedsięwzięcia jest stosunkowo niski poziom generacji energii elektrycznej w ciągu roku, co jest konsekwencją

uwarunkowań meteorologicznych. Świadczy o tym niewielki, w stosunku do nakładów inwestycyjnych, roczny zysk z tytułu sprzedaży energii elektrycznej, co odzwierciedla prosta stopa zwrotu ROI. Warunkiem koniecznym dla zwiększenia rentowności danego typu inwestycji w Polsce jest dalsza redukcja kosztów inwestycyjnych.

Bibliografia

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, 2009.
- [2] Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych, Warszawa: Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, 2016.
- [3] Ministerstwo Energii, *Polityka energetyczna Polski do 2040 roku*, Warszawa, 2018.
- [4] Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju, [Online]. Available: <https://www.miiir.gov.pl/strony/zadania/budownictwo/charakterystyka-energetyczna-budynkow/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow-1/>. [Data uzyskania dostępu: 14 Luty 2019].
- [5] S. Soulayman, *Economical and Technical Consideration for Solar Tracking: Methodologies and Opportunities for Energy Management*, Hershey: IGI Global, 2018.
- [6] OEM Energy, [Online]. Available: <https://oemsolar.pl/oem-energy/>. [Data uzyskania dostępu: 28 Luty 2019].
- [7] Sandia National Laboratories, „PVPerformance Modeling Collaborative,” [Online]. Available: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/module-temperature/sandia-module-temperature-model/>. [Data uzyskania dostępu: 15 Luty 2019].
- [8] M. Piliński, *Przewymiarowanie instalacji względem mocy falowników*, Fronius, 2018.
- [9] H. Ibrahim i N. Anani, „Variations of PV module parameters with irradiance and temperature,” w *Procedia Engineering*, 2017.
- [10] M. Pociask, „Energetyka odnawialna. O korzyściach ze Słońca i fotowoltaice,” Instytut Fizyki, Uniwersytet Rzeszowski, Rzeszów, 2006.
- [11] P. Szczepanowski, *Zarządzanie finansami przedsiębiorstwa*, Warszawa: WSPiZ, 2004.
- [12] „money.pl,” *Wirtualna Polska*, 2018. [Online]. Available: <https://wibor.money.pl/>. [Data uzyskania dostępu: 22 Luty 2019].
- [13] G. Trela, „Analiza opłacalności projektów fotowoltaicznych,” *Czysta Energia*, nr 3, 2013.
- [14] E. Nadav, W. Dean i K. Geoffrey Taylor, „Budgeting for Solar PV Plant Operations & Maintenance: Practices and Pricing,” 2016.
- [15] SolarInsure, [Online]. Available: <https://www.solarinsure.com/for-solar-developers-how-solar-property-insurance-is-priced/>. [Data uzyskania dostępu: 4 Marzec 2019].
- [16] Urząd Regulacji Energetyki, [Online]. Available: <https://www.ure.gov.pl/pl/oze/aukcje-oze/ceny->

referencyjne/6539,Ceny-referencyjne.html. [Data uzyskania dostępu: 25 Luty 2019].

[17] W. Rogowski, Rachunek efektywności inwestycji. Wyzwania teorii, potrzeby praktyki, Kraków: WoltersKluwer S.A., 2013.

[18] Biznes radar, [Online]. Available: <https://www.biznesradar.pl/stopy-zwrotu/sektor:ene>. [Data uzyskania dostępu: 21 Luty 2019].