

# Analiza wydajności produkcji energii elektrycznej w instalacji fotowoltaicznej dla miejskiej oczyszczalni ścieków w warunkach meteorologicznych województwa podkarpackiego

Celem omawianej pracy jest analiza wydajności produkcji energii elektrycznej w instalacji fotowoltaicznej dla budynku użyteczności publicznej z uwzględnieniem warunków meteorologicznych, jakie panują w województwie podkarpackim.

Znaczący wpływ na wydajność instalacji solarnych ma przejrzystość atmosfery. Zanieczyszczenia (pyły pochodzenia przemysłowego) sprawiają, że własności optyczne powietrza pogarszają się.

Latем przezroczystość powietrza jest mniejsza z powodu zwiększonej ilości pary wodnej. Istotny wpływ ma także orientacja powierzchni absorbującej.

W Europie Środkowej moduły fotowoltaiczne należy ustawiać w stronę południową, a nachylenie ich do horyzontalnej płaszczyzny powinno odpowiadać szerokości geograficznej miejsca, w którym się je umieszcza. Najkorzystniejsze kąty nachylenia wahają się między 30 a 45°, jednak kąty od 25 do 75° mogą okazać się również dobre wtedy, kiedy okres użytkowania instalacji fotowoltaicznej jest tylko okresowy.

Na sprawność i wydajność modułów fotowoltaicznych mają wpływ nie tylko warunki środowiskowe, lecz także sama ich temperatura – im jest wyższa, tym sprawność spada. Ważne jest zatem analizowanie efektywności produkcji energii elektrycznej, pomagające określić najlepsze parametry i warunki pracy w konkretnych przypadkach.

Krzem jest podstawowym materiałem, z którego produkuje się ogniwa fotowoltaiczne. Właściwości, które o tym decydują, to m.in.:

- bardzo dobrze opanowana technologia wytwarzania krystalicznego krzemu,
- wysoce trwała struktura krystaliczna,
- tani i łatwo dostępny materiał,
- najbardziej znany materiał półprzewodnikowy,
- sprawność modułów w stosunku do ceny jest akceptowalna.

Temperatura ogniów, na które działa promieniowanie słoneczne, wzrasta zależnie od natężenia tego promieniowania. Ważny jest także czas, w jakim ono działa. Czynniki łagodzącymi mogą być opady atmosferyczne i wiatr. Nagrzewanie modułów powoduje obniżenie efektywności systemu fotowoltaicznego. Gdy zmienia się temperatura materiału półprzewodnikowego, zmieniają się także jego właściwości fizyczne, np. szerokość przerwy energetycznej czy współczynnik absorpcji promieniowania. Powoduje to pośrednio zmiany parametrów pracy ogniów, takich jak prąd zwarcia czy sprawność konwersji fotowoltaicznej.

Moduły wystawione na kilkugodzinne działanie promieniowania słonecznego, zwłaszcza w letnią porę roku, mogą nagrzać się nawet do 70-80°C. To może skutkować

utraceniem nawet połowy mocy możliwej do uzyskania w warunkach optymalnej temperatury pracy, podawanej przez producentów ogniw/modułów.

Dane do pracy objęły:

- dane meteorologiczne IMGW dla obszaru miasta Krosno w 2019 r. – zawarto dane średniej temperatury dobowej [°C] i usłonecznienia [h] dla każdego dnia w roku,
- wielkość produkcji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej Oczyszczalni Ścieków w Krośnie za rok 2019,
- wielkość mocy zainstalowanej paneli w instalacji fotowoltaicznej Oczyszczalni Ścieków w Krośnie.

## Metodyka i wyniki

### 1. Obliczenie wartości średniego usłonecznienia na podstawie danych meteorologicznych

Obliczono średnie usłonecznienie dla kolejnych miesięcy za 2019 rok jako średnią arytmetyczną. Obliczenia wykonano na podstawie danych udostępnionych przez IMGW według wzoru:

$$U_{SR} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n} \text{ [h/dobę]},$$

gdzie:

$U_{SR}$  – średnie usłonecznienie w jednym z miesięcy [h/dobę],  
 $m_1, m_2, m_n$  – usłonecznienie w kolejnych dniach jednego z miesięcy [h],  
 $n$  – ilość dni w jednym z miesięcy.

Tabela 1. Wyniki obliczeń wartości średniego usłonecznienia

Średnie usłonecznienie [h/dobę]	
styczeń	0,92
luty	3,75
marzec	4,74
kwiecień	6,75
maj	4,25
czerwiec	9,88
lipiec	7,89
sierpień	9,09
wrzesień	7,48
październik	6,55
listopad	2,66
grudzień	2,00



## 2. Obliczenie szacunkowej ilości wyprodukowanej energii

Obliczono szacunkową ilość wyprodukowanej energii dla kolejnych miesięcy za 2019 rok, na podstawie danych IMGW oraz wielkości mocy zainstalowanej instalacji, wynoszącej 100,00 [kW]. Obliczenia wykonano według wzoru:

$$E_{SZ} = P_Z \times U_{\text{SR}} \times n \text{ [kWh]},$$

gdzie:

$E_{SZ}$  – szacunkowa ilość wyprodukowanej energii [kWh],

$P_Z$  – moc zainstalowana instalacji fotowoltaicznej [kW],

$U_{\text{SR}}$  – średnie usłonecznienie w jednym z miesięcy [h/dobę],

$n$  – ilość dni w jednym z miesięcy.

Obliczona metoda została nazwana „metodą nr 1” dla obliczenia szacunkowej ilości energii elektrycznej.

## 3. Analiza wydajności produkcji energii elektrycznej w analizowanej instalacji fotowoltaicznej w funkcji usłonecznienia

Przygotowano pierwszy wykres (wykres 1). Na osi „x” przedstawiono kolejne 12 miesięcy, na osi „y” ilość wyprodukowanej energii (w [kWh]), zaś na osi pomocniczej „y” usłonecznienie (w [h/dobę]).

Drugi wykres: na osi „x” przedstawiono rosnąco usłonecznienie [h/dobę], a na osi „y” ilość wyprodukowanej energii [kWh/miesiąc], także rosnąco (wykres 2). Dodatkowo, wykorzystano metodę regresji liniowej, aby sprawdzić korelację i wyprowadzić empiryczny model wydajności instalacji fotowoltaicznej w funkcji usłonecznienia.

Powyższa metoda została nazwana „metodą nr 2” dla obliczenia szacunkowej ilości energii elektrycznej.

Uzyskano dodatkowy wykres liniowy obrazujący tą metodę, wraz z wyprowadzeniem wzoru:

$$E = zU + b,$$

gdzie:

$E$  – szacunkowa ilość energii do uzyskania (E) [kWh],

$U$  – usłonecznienie [h/dobę].

$z$  – obliczany współczynnik kierunkowy metodą regresji liniowej,

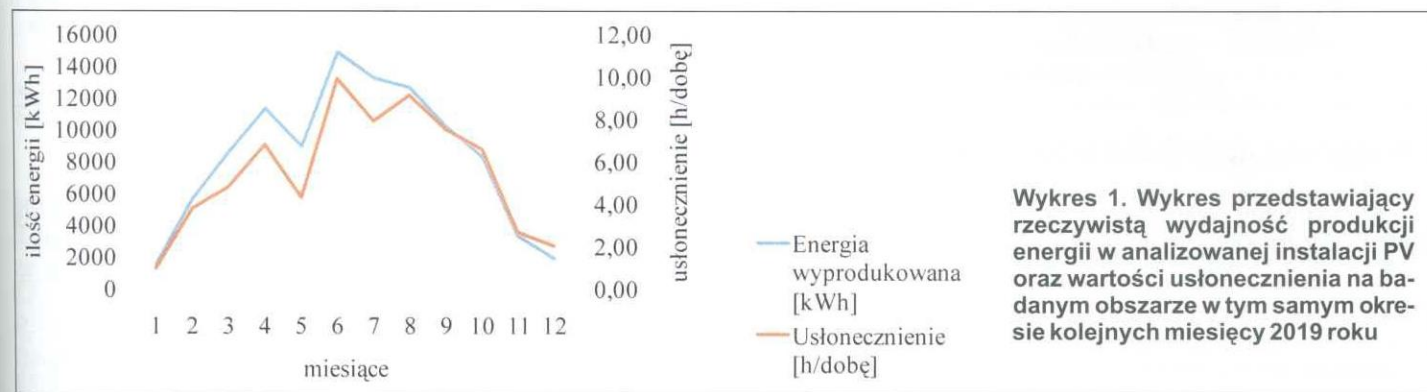
$b$  – współczynnik przesunięcia funkcji.

## 4. Ocena poprawności szacunku wydajności produkcji energii elektrycznej – „metoda nr 1”

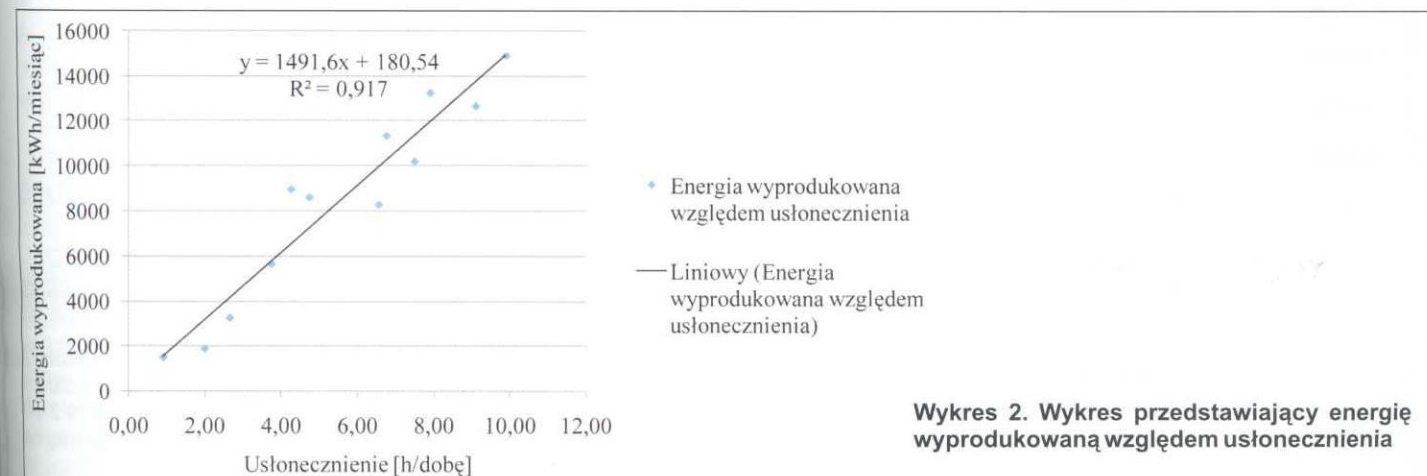
Przygotowano wykres punktowy, na którym każdy punkt odpowiada wartości energii wyprodukowanej [kWh] bądź szacunkowej ilości energii wyprodukowanej w kolejnych miesiącach 2019 roku (wykres 3).

Tabela 2. Obliczenie szacunkowej ilości wyprodukowanej energii

Szacunkowa ilość wyprodukowanej energii w 2019 roku [kWh]	
styczeń	2860,00
luty	10510,00
marzec	14690,00
kwiecień	20250,00
maj	13190,00
czerwiec	29640,00
lipiec	24460,00
sierpień	28170,00
wrzesień	22440,00
październik	20300,00
listopad	7980,00
grudzień	6210,00
SUMA	200700,00



Wykres 1. Wykres przedstawiający rzeczywistą wydajność produkcji energii w analizowanej instalacji PV oraz wartości usłonecznienia na badanym obszarze w tym samym okresie kolejnych miesięcy 2019 roku



Wykres 2. Wykres przedstawiający energię wyprodukowaną względem usłonecznienia

5. Oszacowanie ilości energii elektrycznej, możliwej do uzyskania w poszczególnych miesiącach (wydajności instalacji PV), przy określonym uśonecznieniu, z porównaniem do energii wyprodukowanej. Ocena poprawności szacunku wydajności produkcji energii elektrycznej – „metoda nr 2”

Obliczono szacunkową ilość energii wyprodukowanej według obliczeniowej „metody nr 2”, stosując wzór:

$$E_{SZZ} = 1491,6 \times U_{SR} + 180,54 \text{ [kWh]},$$

gdzie:

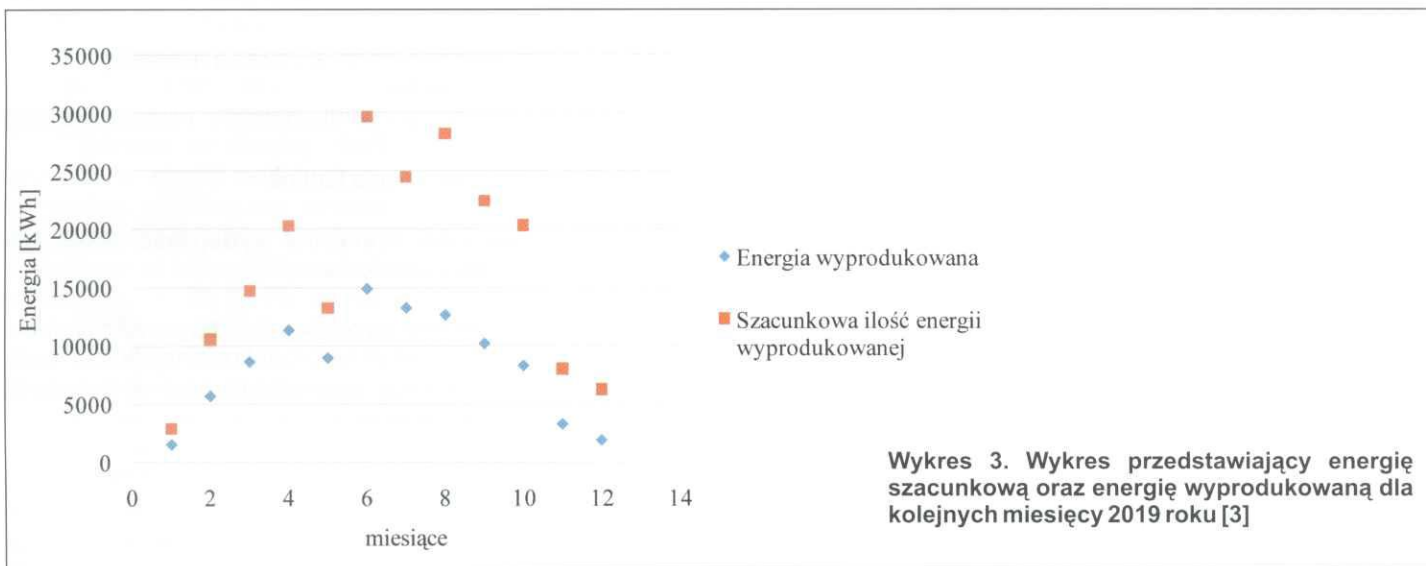
$E_{SZZ}$  – szacunkowa ilość energii wyprodukowanej według obliczeniowej „metody nr 2” [kWh],

$U_{SR}$  – średnie uśonecznienie w poszczególnym miesiącu [h/dobę].

Wyniki zestawiono w tabeli.

Tabela 3. Obliczenie energii szacunkowej według „metody nr 2”, możliwej do uzyskania w poszczególnych miesiącach, przy określonym uśonecznieniu według modelu z wykresu 2, z porównaniem do energii wyprodukowanej

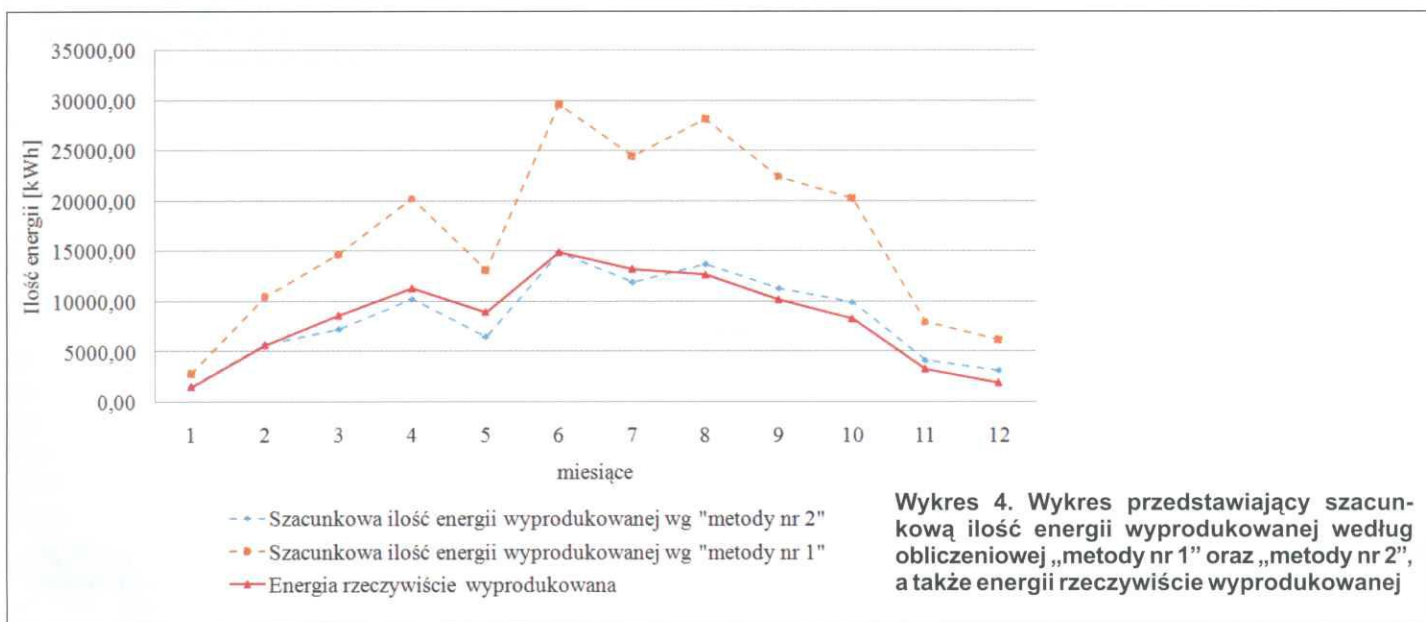
Średnie uśonecznienie [h/dobę]		Szacunkowa produkcja energii [kWh]	Energia wyprodukowana [kWh]
styczeń	0,92	1552,81	1508
luty	3,75	5774,04	5665
marzec	4,74	7250,72	8613
kwiecień	6,75	10248,84	11342
maj	4,25	6519,84	8953
czerwiec	9,88	14917,55	14907
lipiec	7,89	11949,26	13264
sierpień	9,09	13739,18	12667
wrzesień	7,48	11337,71	10204
październik	6,55	9950,52	8289
listopad	2,66	4148,20	3262
grudzień	2,00	3163,74	1890
SUMA		100552,42	100564



Wykres 3. Wykres przedstawiający energię szacunkową oraz energię wyprodukowaną dla kolejnych miesięcy 2019 roku [3]

6. Porównanie dokładności prognozy wydajności instalacji PV metodą nr 1 i 2

Przygotowano wykres punktowo-liniowy z przedstawionymi wartościami szacunkowej ilości energii wyprodukowanej [kWh] według obliczeniowej „metody nr 1” oraz „metody nr 2”, a także wartości energii rzeczywiście wyprodukowanej [kWh] (wykres 4).



Wykres 4. Wykres przedstawiający szacunkową ilość energii wyprodukowanej według obliczeniowej „metody nr 1” oraz „metody nr 2”, a także energii rzeczywiście wyprodukowanej



## 7. Obliczenie średniej temperatury dobowej dla kolejnych miesięcy w 2019 roku

Obliczono średnią temperaturę dobową dla kolejnych miesięcy w 2019 roku jako średnią arytmetyczną. Obliczenia wykonano według wzoru:

$$T_{\text{SR}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} \text{ [h/dobę]},$$

gdzie:

$T_{\text{SR}}$  – średnia temperatura dobowa w jednym z miesięcy [°C],  
 $t_1, t_2, t_n$  – średnia temperatura dobowa w kolejnych dniach jednego z miesięcy [°C],  
 $n$  – ilość dni w jednym z miesięcy.

Przygotowano tabelę z obliczonymi wartościami średniej temperatury dobowej [°C] w kolejnych miesiącach 2019 roku.

**Tabela 4. Obliczenie średniej temperatury dobowej dla kolejnych miesięcy w 2019 roku**

Średnia temperatura dobowa [°C]	
styczeń	-3,36
luty	2,81
marzec	5,10
kwiecień	10,04
maj	12,09
czerwiec	21,05
lipiec	18,25
sierpień	19,78
wrzesień	14,34
październik	11,91
listopad	7,87
grudzień	2,60

## 8. Analiza wydajności rocznej produkcji energii elektrycznej w analizowanej instalacji fotowoltaicznej do 1 kW mocy zainstalowanej

Obliczono ilość rocznej energii wyprodukowanej w instalacji na 1 kW mocy zainstalowanej. Obliczenia dokonano według wzoru:

$$E_{1\text{kW}} = \Sigma E_W : P_z,$$

gdzie:

$E_{1\text{kW}}$  – energia wyprodukowana przypadająca na 1 kW mocy zainstalowanej [kWh]

$\Sigma E_W$  – suma energii wyprodukowanej w 2019 roku [kWh],

$P_z$  – moc zainstalowana [kW]

Dane:

$\Sigma E_W = 100564$  [kWh]

$P_z = 100,00$  [kW]

$E_{1\text{kW}} = 100564 : 100,00 = 1005,64$  [kWh]

Ilość rocznej energii wyprodukowanej w analizowanej instalacji na 1 kW mocy zainstalowanej wynosi 1005,64 [kWh]

## Dyskusja

Obliczono średnie usłonecznienie dla kolejnych miesięcy za 2019 rok. Największą wartość osiągnęło ono w czerwcu – 9,88 [h/dobę], a najmniejszą w styczniu – 0,92 [h/dobę].

Utworzono wykres przedstawiający energię wyprodukowaną względem usłonecznienia. Uzyskano dzięki temu dodatkowy wykres liniowy, dający możliwość wyprowadzenia empirycznego wzoru  $E = zU + b$ . Dzięki niemu można obliczyć szacunkową ilość energii do uzyskania (E) [kWh],

przy znajomości usłonecznienia (U) [h/dobę], z wykorzystaniem metody regresji liniowej.

Utworzono wykres przedstawiający energię szacunkową [kWh] obliczoną według „metody nr 1” oraz energię wyprodukowaną [kWh]. Wykres obrazuje dość znaczne różnice między szacunkową a wyprodukowaną ilością energii. Wynika to z niewzięcia pod uwagę szeregu czynników mających wpływ na sprawności ogniw fotowoltaicznych, takich jak nasłonecznienie [J/m<sup>2</sup>], gęstość strumienia promieniowania słonecznego [W/m<sup>2</sup>] czy kąt nachylenia ogniw oraz ich orientacja względem stron świata. Obliczenia wykonano wykorzystując moc zainstalowaną paneli, wynoszącą 100,00 [kW].

Obliczono ilość energii szacunkowej [kWh] według „metody nr 2”, możliwą do uzyskania w poszczególnych miesiącach, przy określonym usłonecznieniu według modelu z Wykresu 1.2. Obliczone wartości szacunkowej produkcji energii są zbliżone do wartości energii wyprodukowanej, na co najbardziej wskazują sumy energii, różniące się jedynie o 11,68 [kWh]. Wzór wyprowadzony dzięki zastosowaniu metody regresji liniowej wyprowadza precyzyjny empiryczny model wydajności instalacji fotowoltaicznej w funkcji usłonecznienia. Znając wartości usłonecznienia, można go będzie zastosować dla dowolnej instalacji.

Utworzono wykres przedstawiający szacunkową ilość energii wyprodukowanej [kWh] według obliczeniowej „metody nr 1” oraz „metody nr 2”, a także energii rzeczywiście wyprodukowanej [kWh]. Widać na nim, że „metoda nr 2” jest o wiele bardziej precyzyjna niż „metoda nr 1”, gdyż jej wartości na wykresie prawie pokrywają się z wartościami energii rzeczywiście wyprodukowanej. Obliczeniowa „metoda nr 1” znacznie przeszacowuje wartości energii możliwej do wyprodukowania.

Obliczono średnie temperatury dobowe [°C] dla kolejnych miesięcy w 2019 roku. Największą wartość uzyskano dla czerwca (21,05 [°C]), a najmniejszą dla stycznia (-3,36 [°C]).

Obliczono ilość rocznej energii wyprodukowanej w analizowanej instalacji na 1 kW mocy zainstalowanej, która wynosi 1005,64 [kWh]. Jest to wartość idealnie wpasowująca się w modele prognostyczne, które mówią, że na 1 kW mocy zainstalowanej można uzyskać około 1000 [kWh] energii wyprodukowanej. Świadczy to o tym, że analizowana w pracy instalacja fotowoltaiczna jest możliwie jak najbardziej wydajna. Można zatem założyć, że orientacja i pochylenie ogniw są odpowiednie, a sama instalacja jest dobrze utrzymana i okresowo serwisowana zgodnie z zaleceniami producenta ogniw. W przeciwnym razie nie uzyskiwałaby tak wysokiej wydajności.

Uzyskane wyniki wskazują na zasadność inwestycji w PV na terenie Polski. Można uzyskać wysoką wydajność instalacji w konkretnym regionie, znając lokalne wartości usłonecznienia. Wskazuje na to zastosowanie obliczeniowej „metody nr 2”. Instalacje fotowoltaiczne mogą znacznie pomóc w redukcji poboru prądu z sieci, rzeczywiście produkując około 1000 [kWh] na każdy 1 kW mocy zainstalowanej.

Analiza wydajności pracy instalacji fotowoltaicznych jest wartościowa. Powinna być brana pod uwagę przy projektowaniu instalacji fotowoltaicznych w lokalnych warunkach klimatycznych.



**Dominik Paszkaniak**

*Praca inżynierska studenta/absolwenta kierunku inżynierii środowiska Dominika Paszkaniaka.*

*Promotor: dr Karol Trojanowicz.*

*D. Paszkaniak był również przewodniczącym Koła Naukowego „Granit”.*