

Badanie wpływu zabrudzenia paneli fotowoltaicznych trawą na ich sprawność

Study of the Impact of Grass Contamination on the Efficiency of Photovoltaic Panels

TOMASZ RYBAK, ADAM MOŁCZAN, SANDRA JARMUŁA, MATEUSZ LICHONŃ, SARA MAJEWSKA, MARCIN MICHALSKI

DOI 10.36119/15.2024.6.1

Wpływ zabrudzenia paneli fotowoltaicznych ma istotne znaczenie dla projektantów i użytkowników systemów fotowoltaicznych, powodując spadek ich wydajności, co sugeruje, że rozmieszczenie paneli ma istotny wpływ na ich funkcjonowanie. W trakcie przeglądu literatury nie znaleziono badań dotyczących wpływu zanieczyszczenia paneli fotowoltaicznych trawą czy liśćmi, co było motywacją do przeprowadzenia badania wpływu zabrudzenia paneli fotowoltaicznych trawą na ich sprawność. Przeprowadzono je poprzez pokrycie paneli fotowoltaicznych warstwą trawy, w celu symulacji efektu zacienienia. Doświadczenie miało na celu wskazać w jaki sposób zacienienie wpływa na efektywność konwersji energii słonecznej. Wyniki analizy wskazują na istotne zmiany wydajności paneli fotowoltaicznych, a także wskazują różnicę między dwoma rodzajami paneli: Full Black oraz Standard.

Słowa kluczowe: panele fotowoltaiczne, sprawność paneli, zabrudzenie paneli

The impact of contamination of photovoltaic panels is significant to designers and users of photovoltaic systems, as it causes a decrease in their efficiency, suggesting that the placement of panels has a crucial impact on their performance. During the literature review, no studies were found regarding the impact of contamination of photovoltaic panels by grass or leaves, which motivated this study. This study investigates the effect of grass contamination on the efficiency of photovoltaic panels. It was conducted by covering photovoltaic panels with a layer of grass to simulate the effect of shading. The experiment aimed to demonstrate how shading affects the efficiency of solar energy conversion. The results of the analysis indicate significant changes in panels performance and highlight the differences between two types of panels: Full Black and Standard.

Keywords: photovoltaic panels, panel efficiency, panel contamination.

Wprowadzenie

Zauważalny rozwój technologii i wielu gałęzi przemysłu niesie za sobą coraz większe zapotrzebowanie na energię. Pierwotne metody jej wytwarzania oparte na paliwach kopalnych obecnie z uwagi na politykę ekologiczną świata coraz częściej są wspomagane alternatywnymi źródłami energii. Nieustanna emisja gazów cieplarnianych prowadzi do niepożądaných zmian w ekosystemie, a jednym z głównych rozwiązań problemu jest restrukturyzacja energetyki. Przez ostatnie lata przemysł energetyczny dąży do zrównoważonego udziału odnawialnych źródeł energii w całkowitej jej produkcji. Energia słoneczna stanowiąca niewyczerpalne źródło energii staje się coraz bardziej atrakcyjna ze względu na dynamicz-

nie rozwijające się technologie jej konwersji. Jedną z nich to zastosowanie paneli fotowoltaicznych, które wykorzystując zjawisko fotowoltaiczne wytwarzają energię elektryczną przez konwersję energii słonecznej. Wytwarzanie energii elektrycznej z paneli fotowoltaicznych w Polsce na przestrzeni ostatnich lat wzrasta bardzo gwałtownie. W grudniu 2023 roku odnotowano 17,1 GW mocy zainstalowanej w instalacjach fotowoltaicznych, podczas gdy na koniec 2022 roku moc ta wyniosła 12,5 GW. W 2019 roku było to jedynie 0,6 GW, co wprost wskazuje na stale rosnące zainteresowanie tym sposobem konwersji energii słonecznej [1,2].

Systemy fotowoltaiczne są narażone na regularne zanieczyszczenia, co prowadzi do obniżenia ich efektywności. Jest to niekorzystne ze względu na ogranicze-

nie docierających promieni słonecznych do powierzchni paneli. Zabrudzenia paneli fotowoltaicznych głównie pochodzą z zewnętrznych czynników, takich jak pył czy liście. Część zanieczyszczeń jest eliminowana przez deszcz, ale duża ich ilość gromadzi się w dolnej części panelu. Inny problem związany z tą kategorią zanieczyszczeń to odchody ptaków. Zanieczyszczenia te powodują zacienienie paneli PV, a także przyczyniają się do trwałego uszkodzenia jego powierzchni poprzez powodowanie odbarwień szkła i uszkodzeń powierzchni panelu. W okresie zimowym, obecność zalegającego śniegu jest czynnikiem, który może spowodować zacienienie paneli fotowoltaicznych, co może całkowicie lub częściowo uniemożliwić wytwarzanie energii. Dodatkowo, błędy w projektowaniu instalacji,

inż. Tomasz Rybak, inż. Adam Mołczan, inż. Sandra Jarmuła, inż. Mateusz LichonŃ, Sara Majewska – Studenckie Koło Naukowe „Płomień”, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska

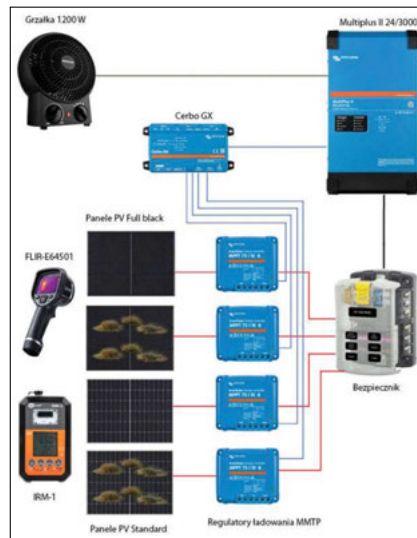
dr inż. Marcin Michalski – Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław, Polska <https://orcid.org/0000-0002-5996-1549>. Adres do korespondencji/Corresponding author: tomasz.rybak99@gmail.com

takie jak pominięcie istniejących elementów konstrukcyjnych budynków (m.in. kominy czy otaczające elementy), również mogą przyczynić się do zacinienia instalacji PV [3,4]. W przypadku jednolitego naświetlania słonecznego oczekuje się, że panel fotowoltaiczny utrzyma równomierną temperaturę na swojej powierzchni. Niemniej jednak nawet niewidoczne wady w panelu mogą spowodować lokalny wzrost jego temperatury. Zjawisko „hot-spotów” występuje, gdy prąd generowany przez zaciemnione, czyli nieaktywne ogniwa, przepływa przez aktywne ogniwa, powodując nagły wzrost ich temperatury. Prąd przepływający przez zaciemnione ogniwa może być na tyle duży, że temperatura znacznie wzrasta, co prowadzi do stopienia ogniwa, uszkodzenia folii enkapsulacyjnej i tylnego pokrycia panelu [5,6]. Aby uniknąć hotspotów i zminimalizować spadki mocy spowodowanych zaciemnieniem stosuje się diody by-pass. Przekierowują one prąd wokół zaciemnionych lub uszkodzonych ogniw, co pozwala na utrzymanie wyższej wydajności panelu i chroni przed możliwością przegrzania jednocześnie minimalizując ryzyko samozapłonu instalacji fotowoltaicznej. Dodatkowo ogniwa w panelu połączone są szeregowo, więc w przypadku zaciemnienia jednego z nich obniża się wartość natężenia całego ciągu. Dioda by-pass pozwala ominąć zaciemnione ogniwo minimalizując te straty. Istotnym problemem, który znacząco wpływa na efektywność konwersji energii słonecznej na energię elektryczną jest zanieczyszczenie wywołane przez trawę oraz liście. Zabrudzenie trawą podczas koszenia, gdy panele umieszczone są na gruncie lub przez liście, gdy zlokalizowane są w pobliżu drzew, może spowodować powstanie bariery niemożliwiającej docieranie promieni słonecznych do powierzchni panelu, co znacznie wpłynie na wydajność systemu.

Celem przeprowadzenia badań jest wykazanie wpływu zabrudzenia paneli fotowoltaicznych trawą na ich wydajność oraz porównanie uzyskanych wyników dla dwóch technologii paneli fotowoltaicznych typu Full Black oraz Standard.

Stanowisko badawcze i metodyka badań

Na rysunku 1 przedstawiono schemat stanowiska badawczego, które składało się z czterech paneli fotowoltaicznych, dwóch typu Full Black oraz dwóch Standard, gdzie ich najważniejsze dane znamionowe przedstawiono w tabeli 1. Kąt



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 1. Schematic of the test stand

nachylenia paneli względem ziemi wynosił 30°, a azymut 150°.

Dwa panele, zostały równomiernie pokryte taką samą ilością trawy (41 g po wysuszeniu na słońcu), która została dobrana przez próbę znacznego, lecz niecałkowitego zaciemnienia paneli. Masa materiału jest wynikowa, po subiektywnym stopniu jej rozłożenia na panelach, ponieważ w literaturze nie znaleziono podobnych badań, aby mieć punkt odniesienia odnośnie do zastosowanej ilości trawy.

Rys. 2. Zdjęcie badanych paneli fotowoltaicznych
Fig. 2. Photo of the tested photovoltaic panels



Tabela 1. Dane znamionowe paneli fotowoltaicznych
Table 1. Data of photovoltaic panels

Dane znamionowe	Jednostka	Full Black	Standard
Model	-	JAM60S17-325/MR	JKM330M-60H-V
Technologia	-	Mono half-cut	Mono half-cut
Pole powierzchni	m ²	1,687	1,682
Moc znamionowa (P _{max})	Wp	325	330
Napięcie w punkcie maksymalnej mocy (V _{mp} /V)	V	33,97	33,8
Natężenie prądu w punkcie maksymalnej mocy (I _{mp} /A)	A	9,57	9,77
Napięcie obwodu otwartego	V	40,87	41,3
Prąd obwodu zamkniętego	A	10,23	10,31
Wydajność modułu	%	19,3	19,56
Temperatura pracy	C	-40~+85	-40~+85
Współczynnik temperaturowy (P _{max})	%/°C	-0,35	-0,36
Współczynnik temperaturowy (V _{oc})	%/°C	-0,272	-0,28
Współczynnik temperaturowy (I _{sc})	%/°C	+0,044	+0,048

Została ona przyklejona do paneli dzień wcześniej po zmoczeniu jej wodą. Dzięki temu zabiegowi w dzień pomiarowy trawa po odparowaniu wody znacznie lepiej przylegała do powierzchni paneli. Panele fotowoltaiczne były jednostajnie obciążone przez grzejnik elektryczny o mocy 1200 W za pośrednictwem przetwornicy napięcia (MultiPlus II 24/3000). Pomiar istotnych parametrów rozpoczęto o godzinie 8:00 i wykonywano co 30 minut, aż do godziny 11:00. Średnia temperatura każdego z paneli została wyznaczona na podstawie pięciu pomiarów, z każdego rogu i środka (tabela 2). Pomiar został wykonany kamerą termowizyjną (FLIR-E64501) skierowaną prostopadle do płaszczyzny paneli. Wartość natężenia promieniowania słonecznego była mierzona przy użyciu dedykowanego miernika (IRM-1), umieszczonego równoległe do płaszczyzny paneli. Temperatura otoczenia była mierzona w cieniu w odległości kilku metrów od stanowiska przy pomocy termometru cyfrowego. Wartości napięcia oraz natężenia prądu każdego panelu były odczytywane z dedykowanej aplikacji Victron Connect, dzięki zastosowaniu czterech oddzielnych regulatorów ładowania MPPT oraz urządzenia monitorującego (Cerbo GX).

Należy podkreślić, że prędkość wiatru również mogłaby wpłynąć na temperaturę

Tabela 2. Zestawienie pomiarów
Table 2. Summary of measurements

Czas	godz:min	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00
Warunki zewnętrzne	Średnia temperatura otoczenia T_{ot} [°C]	15	16	18	19	19	21	23
	Średnie natężenie promieniowania [W/m ²]	359	437	567	657	740	775	817
Full Black czysty	Średnia temperatura panelu	20,38	29,98	34,46	36,50	42,34	45,30	45,20
	Napięcie U [V]	31,14	31,80	30,21	30,98	29,78	29,75	29,40
	Natężenie prądu I [A]	3,5	4,5	5,6	6,1	6,8	7,1	7,2
Full Black brudny	Średnia temperatura panelu	21,30	31,32	35,66	38,94	43,30	45,62	46,22
	Napięcie U [V]	36,61	34,13	34,37	33,50	33,83	33,13	32,90
	Natężenie prądu I [A]	1,4	2,0	2,6	3,0	3,3	3,5	3,6
Standard czysty	Średnia temperatura panelu	20,32	27,60	32,16	35,04	37,72	40,62	41,08
	Napięcie U [V]	32,77	31,18	30,27	30,34	28,27	28,63	28,49
	Natężenie prądu I [A]	3,5	4,6	5,7	6,3	7,1	7,3	7,5
Standard brudny	Średnia temperatura panelu	20,00	29,10	32,04	36,06	39,34	40,30	41,34
	Napięcie U [V]	35,32	33,13	32,26	31,54	32,15	30,93	31,01
	Natężenie prądu I [A]	1,8	2,6	3,3	3,9	4,2	4,5	4,5

paneli, jednak ten aspekt został pominięty z uwagi na umiejscowienie paneli w przestrzeni znacznie ogrodzonej przez pobliskie budynki, oraz na niską prędkość wiatru obserwowaną podczas trwania eksperymentu.

Wyniki i ich analiza

W ramach prowadzonych badań w godzinach od 8:00 do 11:00 zaobserwowano charakterystyczny wzrost natężenia promieniowania słonecznego (rys. 3). Wzrost temperatury panelu wynikał głównie ze zwiększenia ekspozycji paneli na intensywne promieniowanie słoneczne oraz wzrostu temperatury otoczenia. Stwierdzono tak na podstawie modelu, gdzie temperatura panelu opisana jest zależnością [7]:

$$T_c = G_0 e^{(\sigma + b\alpha)} + T_{ot} \quad (1)$$

gdzie:

T_c – temperatura pracy panelu fotowoltaicznego, °C

G_0 – natężenie promieniowania słonecznego, W/m²

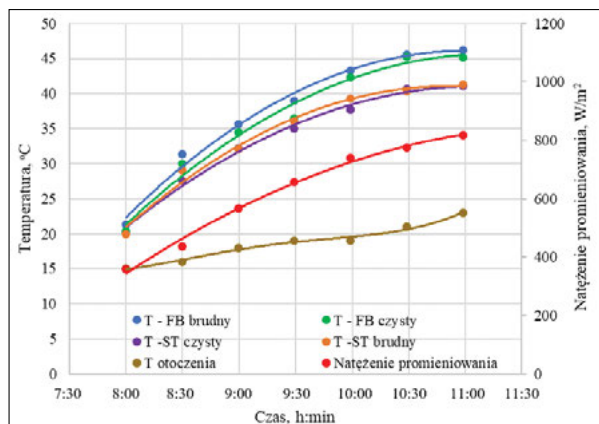
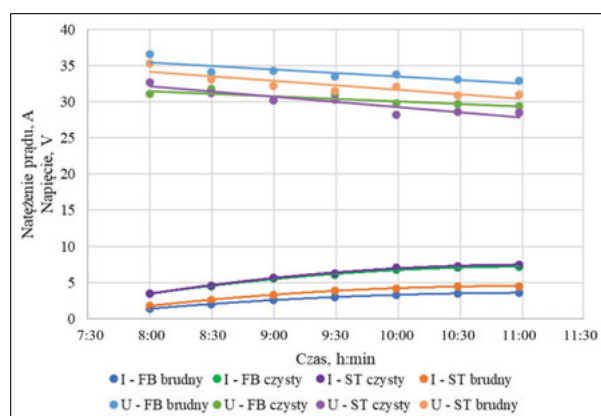
T_{ot} – temperatura otoczenia, °C

(α) – prędkość wiatru, m/s

a, b – współczynniki uzależnione od sposobu zamontowania panelu fotowoltaicznego i od technologii wykonania (w tym przypadku $a = -3,56$; $b = -0,75$).

Dla paneli Full Black odnotowano większy przyrost temperatury, co wynika bezpośrednio ze struktury tych paneli, które charakteryzują się całkowicie czarną powierzchnią. Skutkuje to wyższym współczynnikiem absorpcji promieniowania elektromagnetycznego, szczególnie w zakresie podczerwieni. Temperatura tych paneli wyniosła dla zabrudzonego oraz czystego odpowiednio 46,2 °C oraz 45,2 °C.

Rys. 4. Charakterystyka napięcia oraz natężenia prądu w funkcji czasu
Fig. 4. Voltage and current characteristics as a function of time



Rys. 3. Zestawienie pomiarów na wykresie w funkcji czasu
Fig. 3. Summary of measurements on a graph as a function of time

W przypadku paneli Standard końcowe wartości wyniosły odpowiednio 41,3 °C dla zabrudzonych oraz 41,1 °C dla czystych. Niższe wartości temperatur wynikają z charakterystycznych białych łączeń między ogniwami, które przez refleksyjne właściwości dla padającego promieniowania, ograniczały jego absorpcję. Można zauważyć, że zanieczyszczenie paneli warstwą trawy skutkowało wzrostem temperatury paneli względem czystych.

Analiza zmian wartości natężenia prądu z paneli fotowoltaicznych wykazała, że wartość natężenia rośnie nieliniowo, a przyrost maleje w czasie (rys. 4). Ponadto, średnie wartości natężenia prądu dla paneli czystych są zbliżone i dla panelu Standard otrzymano 6,00 A, a dla Full Black 5,83 A. Ich zabrudzenie trawą spowodowało znaczne obniżenie ich średniej wartości dla panelu Standard do 3,54 A, natomiast dla technologii Full Black do 2,77 A. Warto zauważyć, że panele w technologii Full Black okazały się bardziej wrażliwe na zabrudzenie, osiągając niższe wartości natężenia prądu niż panele Standard. Analizując zmianę wartości napięcia dla każdego panelu odnotowano liniowy spadek, jednak w przypadku paneli Full Black ten spadek występuje w mniejszym stopniu. Współczynniki spadku napięcia od temperatury dla brudnego i czystego panelu Standard wyniosły odpowiednio – 0,63 %/K i – 0,57 %/K,

natomiast dla paneli Full Black wyniosły – 0,41 %/K dla brudnego i – 0,23 %/K dla czystego. Najwyższe wartości napięcia wystąpiły w przypadku zabrudzonych paneli, gdzie wartości średnie wyniosły 34,07 V dla Full Black oraz 32,33 V dla Standard.

Dla czystych paneli Full Black i Standard osiągnęły one odpowiednio 30,44 V i 29,99 V. W analizie wpływu zmiennych na charakterystyki napięcia stwierdzono, że głównym parametrem wpływającym na spadek napięcia jest wzrost temperatury paneli.

Charakterystyka zależności zmiany mocy od temperatury paneli jest liniowo malejąca o praktycznie identycznym nachyleniu, co jest zdeterminowane przez monokrystaliczną technologię obu typów paneli. Zgodnie z przyjętymi warunkami odniesienia (STC), charakterystyki przecinają się w temperaturze 25 °C, dla której zmiana mocy wynosi 0 %. Przy odchyleniach temperatury paneli od tego punktu, procentowa zmiana mocy zwiększa się

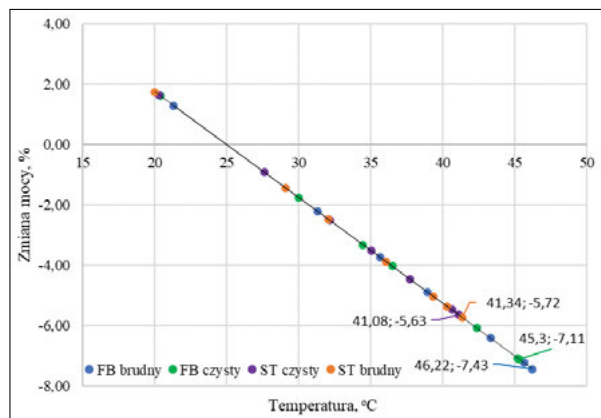
słonecznego. Może to oznaczać, że czyste panele są bardziej podatne na spadek mocy na skutek wzrostu ich temperatury. Charakterystyki sprawności czystych i zabrudzonych paneli, dla analizowanych przypadków, osiągają lokalne maksimum przy zróżnicowanych wartościach natężenia promieniowania, mieszcząc się w zakresie 400-500 W/m². Wzrost natężenia promieniowania inicjuje gwałtowny wzrost sprawności ogniw, osiągając lokalne mak-

nadto, zaobserwowano szybszy spadek sprawności w przypadku czystych paneli. W kontekście zabrudzonych paneli, uzyskane wartości sprawności są istotnie niższe, przy czym względny spadek sprawności panelu Standard wyniósł średnio 37,0 %, a panelu Full Black 47,6 %. Technologia Full Black jest zatem bardziej podatna na spadek sprawności w wyniku zabrudzenia oraz dodatkowego wzrostu temperatury, co w konsekwencji prowadzi do generowania mniejszej ilości energii elektrycznej po ich wystąpieniu.

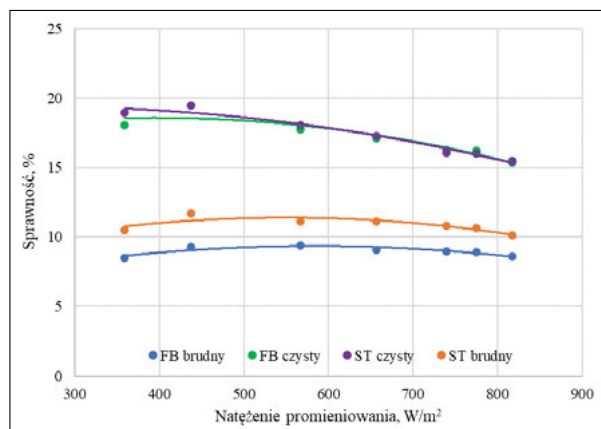
Na rysunku 7 najbardziej znaczący spadek sprawności zaobserwowano na początku badania, gdzie dla panelu Full Black wyniósł 53,0 %, a dla panelu Standard 44,6 %. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem natężenia promieniowania słonecznego zmiana względnej sprawności maleje. Wzrost natężenia promieniowania skutkuje stabilizacją zmiany względnej sprawności, która jest związana ze stabilizacją temperatury paneli, gdzie temperatura paneli Full Black jest większa o 5 °C w ostatnim pomiarze w porównaniu do paneli Standard.

Różnica ta może wpływać na większy spadek sprawności dla paneli Full Black, sugerując istotność wpływu temperatury panelu w charakteryzowaniu efektywności paneli fotowoltaicznych.

W analizowanym zestawieniu (rys. 8) wykazano minimalne odchylenia zmierzonych wartości sprawności od wartości STC, co potwierdza zgodność z wytycznymi producentów i mieści się w dopuszczalnej granicy tolerancji, wynoszącej mniej niż 0,5 %. Istnieją istotne różnice między panelami Full Black oraz Standard, gdzie w obu



Rys. 5. Charakterystyka zmiany mocy w funkcji temperatury paneli
Fig. 5. Characteristics of power change as a function of panel temperature



Rys. 6. Charakterystyka sprawności paneli w funkcji natężenia promieniowania
Fig. 6. Characteristics of panel efficiency as a function of radiation intensity

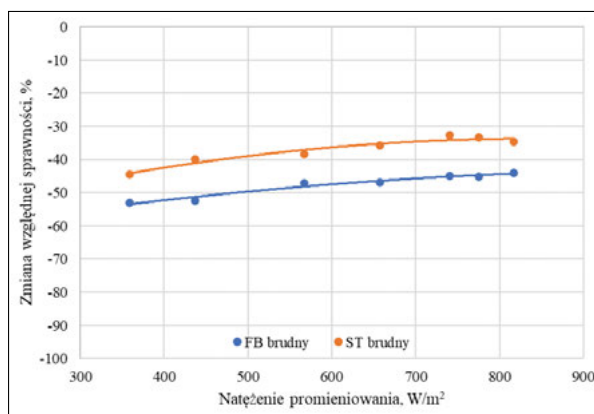
lub maleje, odpowiednio przy spadku lub wzroście temperatury paneli.

W ostatnim pomiarze dla czystego panelu Standard obserwowano spadek tej mocy o 5,63 % przy 41,1 °C, a dla brudnego o 5,72 % przy 41,3 °C. Natomiast dla czystego panelu Full Black odnotowano spadek o 7,11 % przy 45,3 °C, a dla brudnego o 7,43 % przy 46,2 °C.

W przypadku, gdyby natężenie promieniowania byłoby stałe, zaobserwowano by wynikowy spadek mocy, jednak stale rosnące napromieniowanie spowodowało, że moc z każdym pomiarem rosła, ale obniżała się maksymalna potencjalna moc, którą można by było uzyskać.

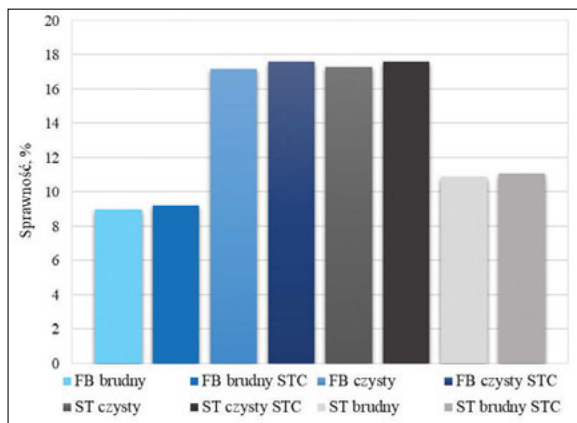
Z otrzymanych wartości sprawności paneli fotowoltaicznych (rys. 6) zauważono, że mimo wyższej ogólnej sprawności paneli czystych, efektywność tych paneli ulega stosunkowo większemu obniżeniu w miarę wzrostu natężenia promieniowania

Rys. 7. Charakterystyka zmiany względnej sprawności
Fig. 7. Characteristics of the change in the relative efficiency



simum, po czym następuje wolniejszy spadek sprawności w porównaniu do fazy wzrostu [8]. Warto podkreślić, że mimo zastosowania dwóch różnych rodzajów paneli fotowoltaicznych, uzyskane wartości sprawności są niemal identyczne, z wyjątkiem pierwszego pomiaru, gdzie odnotowano różnicę wynoszącą 0,88 p.p. Po-

technologiach odnotowany został spadek średniej sprawności w porównaniu do paneli czystych względem zabrudzonych. Analiza danych z wykresu wskazuje na większą odporność paneli Standard na wpływ zanieczyszczenia, ponieważ obserwuje się mniejsze spadki średniej sprawności w porównaniu z panelami Full Black.



Rys. 8.
Zestawienie sprawności paneli do warunków STC
Fig. 8. Summary of panel efficiency for STC conditions

przy czym względny spadek sprawności paneli Standard wyniósł średnio 37,0 %, a paneli Full Black 47,6 %. Technologia Full Black jest zatem bardziej podatna na spadek sprawności w wyniku zabrudzenia oraz w mniejszym stopniu dodatkowego wzrostu temperatury, co w konsekwencji prowadzi do generowania mniejszej ilości energii elektrycznej po ich wystąpieniu.

Podsumowując, wybór paneli w technologii Standard pod względem odporności na zanieczyszczenie trawą oraz zmian temperatury pracy paneli, jest bardziej korzystny.

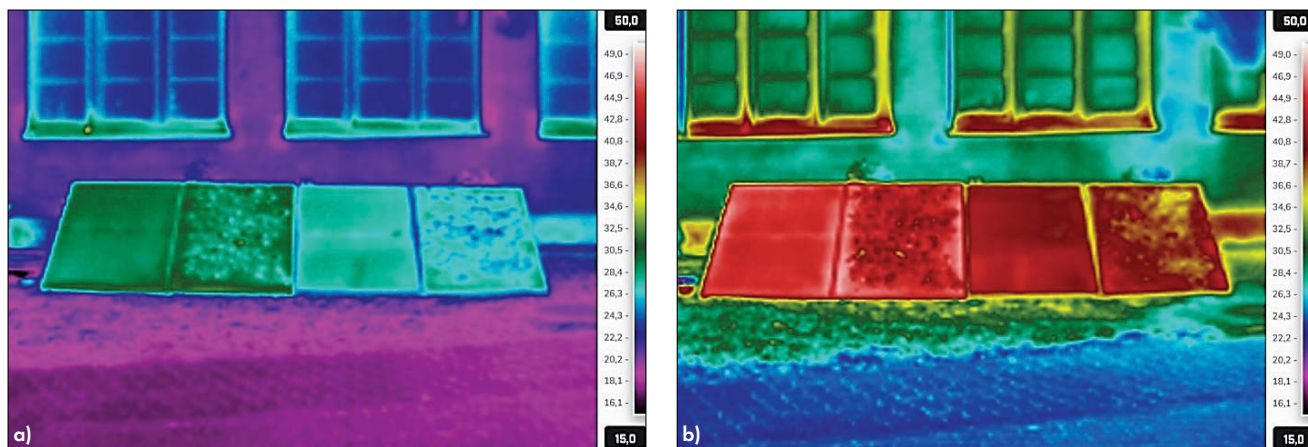
Zostały wykonane zdjęcia termowizyjne wszystkich czterech paneli (rys. 9), aby jakościowo zaobserwować wzrost temperatury między godziną 9:00 i 11:00 oraz różnice w temperaturach pomiędzy panelami w tych godzinach. Ze względu na pochylenie paneli nie powinno się bezpośrednio odczytywać temperatur z przedstawionych zdjęć przez odchylenie od prostopadłego pomiaru, przez co mógł wystąpić znaczący błąd pomiarowy. Widać to

wpływ na spadek ich sprawności. Zanieczyszczenie paneli trawą spowodowało dodatkowe ich nagrzewanie, na skutek izolacyjnego wpływu trawy, przez co panel Full Black miał średni wzrost temperatury o 1,17 K, a panel Standard o 0,52 K.

2) Panel Full Black okazał się bardziej wrażliwy na zabrudzenie trawą, osiągając niższe wartości natężenia prądu niż zabrudzony panel Standard, przy średniej różnicy 0,77 A.

ŹRÓDŁA

- [1] <https://wysokienapiecie.pl/81094-polskafotowoltaika-trzyna-mocno/> [dostęp: 01.04.2024]
- [2] <https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-fotowoltaiki-w-polsce/> [dostęp: 02.03.2024]
- [3] Niedziela P., Górak K., Puchalski C. *Zacienienie paneli fotowoltaicznych*, 2018, DOI: 10.15584/pjsd.2018.22.2.13
- [4] Janowicz W., Mikka H., Woźniak A., Pomorski M. *Wpływ warunków atmosferycznych na*



Rys. 9.
Zdjęcia termowizyjne dla godzin: a) 9:00 b) 11:00
Fig. 9. Thermal images for: a) 9:00 a.m. b) 11:00 a.m

w przypadku porównania paneli zabrudzonych trawą, gdzie wydaje się, że zanieczyszczenie miejscowo obniża temperaturę, ale prawidłowo wykonane pomiary pokazują, że trawa ostatecznie lekko ją podnosi.

Wnioski

Przeprowadzono badanie w celu określenia wpływu zanieczyszczenia trawą powierzchni paneli fotowoltaicznych wykonanych w technologii Full-Black oraz Standard na ich pracę. Główne wnioski można sformułować następująco:

1) Panele fotowoltaiczne w technologii Full Black, dzięki większej czarnej powierzchni, nagrzewały się bardziej niż panele Standard, co miało znaczący

3) Współczynniki spadku napięcia do temperatury dla brudnego i czystego panelu Standard wyniosły odpowiednio – 0,63 %/K i – 0,57 %/K, natomiast dla paneli Full Black wyniosły – 0,41 %/K dla brudnego i – 0,23 %/K dla czystego. Stwierdzono, że głównym parametrem wpływającym na spadek napięcia jest wzrost temperatury paneli.

4) Mimo wyższej ogólnej sprawności czystych paneli, ich efektywność ulega stosunkowo większemu obniżeniu w miarę wzrostu natężenia promieniowania słonecznego. Wynika z tego, że największe spadki sprawności występują przy niższych wartościach natężenia promieniowania.

5) Otrzymane wartości sprawności zabrudzonych paneli są istotnie niższe,

pracę modułów fotowoltaicznych, 03/2023 INSTAL, DOI: 10.36119/15.2023.3.2

- [5] <https://demo.planergia.pl/post/rodzaje-uszkodzen-i-wady-paneli-fotowoltaicznych-czesc-ii/0/0> [dostęp: 28.03.2024]
- [6] <https://repozytorium.ur.edu.pl/server/api/core/bitstreams/937ddb37-d7f6-4eb7-8547100db115c273/content> [dostęp: 01.04.2024]
- [7] <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/module-temperature/sandia-module-temperature-model/> [dostęp: 01.04.2024]
- [8] Donovan M., Bourne B., & Roche J., *Efficiency VS. irradiance characterization of PV modules requires angle-of-incidence and spectral corrections*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, DOI:10.1109/pvsc.2010.5615838