

# Ocena wpływu uszkodzeń mechanicznych na pracę paneli PV

**Streszczenie.** Celem wykonanych badań była ocena wpływu uszkodzeń elementów paneli PV na zmiany ich charakterystycznych parametrów eksploatacyjnych w odniesieniu do danych znamionowych. Z badań wynika, że jeżeli struktura modułów fotowoltaicznych nie została istotnie naruszona to uszkodzony panel charakteryzuje się parametrami pracy zbliżonymi do wartości znamionowych. Niestety w przypadku degradacji struktury wewnętrznej ogniw zmiany są już znaczące. Sprawności konwersji energii obniża się o ponad 50% i usunięcie zabrudzeń z szyby solarnej nieznacznie wpływa na poprawę parametrów pracy.

**Abstract.** The aim of the tests was to assess the impact of damage to PV panel elements on changes in their characteristic operating parameters in relation to the nominal data. The tests show that if the structure of photovoltaic modules has not been significantly damaged, the damaged panel is characterized by operating parameters close to the nominal values. Unfortunately, in the case of degradation of the internal structure of the cells, the changes are already significant. The energy conversion efficiency is reduced by over 50% and removing dirt from the solar glass slightly improves the operating parameters. (**Assessment of the impact of mechanical damage on the operation of PV panels**)

**Słowa kluczowe:** sprawność paneli PV, hot-spoty, usuwanie zabrudzeń, warunki STC

**Keywords:** PV panel efficiency, hotspots, dirt removal, STC conditions

## Wstęp

Przez ostatnie lata widoczny jest dynamiczny wzrost liczby oraz mocy zainstalowanej w siłowni PV zarówno w Polsce jak i na świecie. Przy coraz powszechniejszym wykorzystaniu systemów fotowoltaicznych, wzrasta też liczba paneli PV, które uległy uszkodzeniu w transporcie, montażu instalacji, jak również przez wystąpienie niekorzystnych zjawisk meteorologicznych, m.in. takich jak opad gradu czy porywisty wiatr [1]. Uszkodzenie paneli pracujących w instalacjach PV objawia się najczęściej spadkiem efektywności ich pracy. Najprościej zidentyfikować uszkodzone moduły, które posiadają pęknięcia na powierzchni warstwy szkła hartowanego. Niestety część uszkodzeń nie jest widoczna, a przyczynia się do pogorszenia parametrów pracy i przyspiesza degradację paneli PV. Do najczęstszych uszkodzeń należą mikropęknięcia powodujące powstawanie gorących punktów oraz delaminację folii EVA. W literaturze dostępnych jest wiele doniesień na temat metod identyfikacji uszkodzonych paneli [2], [3]. Jedne z nich bazują na elektroluminescencji i termografii w podczerwieni [4] [5] a inne na skanowaniu falami Lamba [6]. Są to metody tzw. nieelektryczne (wizualne i termiczne). Druga grupa to metody elektryczne bazujące głównie na porównaniu zmierzonych i modelowanych parametrów pracy instalacji oraz uzysków energii [7]. Skuteczność opracowanych metod jest wysoka i sięga 99,5% [5]. Zdemontowane panele mogą być poddane recyklingowi, lecz środowiska naukowe proponują również inne metody ich wykorzystania. Jedną z nich jest włączenie wycofanych z eksploatacji zawodowej paneli PV w system instalacji fotowoltaicznej zintegrowanej z budynkiem [8]. Zastosowanie uszkodzonych mechanicznie lub termicznie paneli PV w takiej instalacji może przyczynić się do poprawy jakości życia mieszkańców dotkniętych ubóstwem, przez niższe koszty zużycia energii. Dodatkowo spowoduje obniżenie emisji CO<sub>2</sub>, ze względu na zastąpienie energii kopalnej energią odnawialną oraz ograniczając nakłady energetyczne na recykling uszkodzonych paneli. Nie każdy bowiem uszkodzony panel musi być natychmiast zastąpiony nowym. O konieczności wymiany decyduje m.in. spadek generowanej mocy i punktowy wzrost temperatury jego pracy. Celowe są więc badania zmierzające od oceny stopnia uszkodzenia struktury i podjęcia decyzji o czasie jego wymiany.

## Cel i zakres pracy

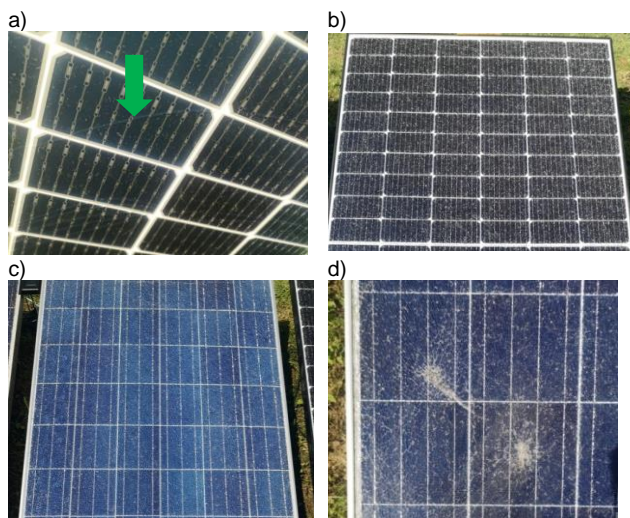
Celem pracy była ocena stopnia zmiany charakterystycznych parametrów eksploatacyjnych uszkodzonych elementów paneli PV w odniesieniu do danych znamionowych.

Zakres pracy obejmował pomiar i analizę takich parametrów jak: napięcie obwodu otwartego ( $U_{oc}$ ), prądu zwarcia ( $I_{sc}$ ), napięcia i prądu w punkcie mocy maksymalnej odpowiednio ( $U_{mpp}$ ), ( $I_{mpp}$ ), współczynnika wypełnienia ( $FF$ ), punktu mocy maksymalnej ( $P_{mpp}$ ) oraz sprawność ( $\eta$ ). W badaniach wykorzystano miernik służący do wykonywania pomiarów w instalacjach fotowoltaicznych oraz elektrycznych Metrel MI 3108 PV, który współdziałał z miernikiem natężenia promieniowania słonecznego (Metrel A 1399) i czujnikiem temperatury modułu PV (Metrel A 1400). Ponadto wykorzystane w badaniu mierniki spełniały wymagania norm dotyczących pomiarów w instalacjach fotowoltaicznych takich jak PN-EN 61829 [9] i PN-EN 62446 [10], oraz podlegały corocznej certyfikacji. Wyniki przeprowadzonych pomiarów miały na celu identyfikację wielkości i miejsc uszkodzonych w panelach, oraz ocenę wpływu tych uszkodzeń na charakterystyczne parametry paneli PV. Wykonane pomiary posłużyły do porównania wartości charakterystycznych parametrów dla paneli PV w warunkach Standard Test Conditions (STC), określonych w kartach katalogowych z obliczonymi wartościami w warunkach STC dla obiektów objętych badaniem. Opracowano również charakterystyki prądowo-napięciowe, mocy na potrzeby ich porównania z danymi katalogowymi. W analizach uwzględniano wpływ zabrudzenia paneli na ich pracę. Zabrudzenia powstałe w czasie ich eksploatacji usunięto poprzez przemywanie szyby solarnej wodą demineralizowaną, oraz wodą deszczową w sposób naturalny.

## Obiekt badań

W badaniach wykorzystano cztery panele PV o różnym stopniu uszkodzenia zidentyfikowanego doświadczalnie, które mogło być uszkodzeniem typu mechanicznego. Pierwszym z nich był panel monokrystaliczny, dwustronny (bifacjalny) Risen-Energy-Rsm144-7-445BMDG o mocy  $P_{MPP}$  wynoszącej 445 W oraz sprawności znamionowej 19,95% w warunkach (STC). Charakteryzował się on najmniejszym stopniem widocznych uszkodzeń (rys. 1). Warstwa górna nie posiada zauważalnych uszkodzeń mechanicznych a na części spodniej było pojedyncze

pęknięcia warstwy szkła hartowanego w górnej połowie modułu przechodzące przez całą szerokość panelu PV.

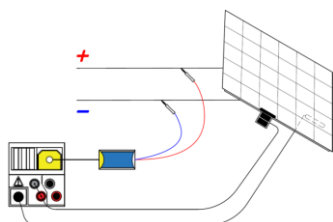


Rys. 1. Widok paneli fotowoltaicznych poddanych badaniom

Drugi z paneli monokrystalicznych (JA Solar JAM60S20-380/MR-BF) o maksymalnej mocy w warunkach STC wynoszącej 380 W i sprawności wynoszącej 20,34% charakteryzował się równomiernym uszkodzeniem całej powierzchni szkła hartowanego w postaci spękań bez widocznego punktu, w którym warstwa szkła została rozbita (rys. 1b). Kolejny z paneli PV to IBC PolySol 260 ZL o mocy znamionowej 260 W i sprawność 16,14% wykonany w technologii polikrystalicznej posiadał również zauważalne uszkodzenie szkła hartowanego w postaci równomiernego spękania całej powierzchni modułu fotowoltaicznego bez widocznego punktu, w którym warstwa szkła została rozbita (rys. 1c). Dodatkowo widoczne było jasne przebarwienie ogni w PV, co świadczyć może o delaminacji folii EVA. Ostatni badany panel to Boviet BVM6610P-270 o mocy nominalnej 270 W i sprawności 16,60%. Szyba solarna modułu posiadała zauważalne spękania na całej powierzchni z widocznymi dwoma punktami w dolnej lewej części, w którym warstwa szkła została uszkodzona mechanicznie. Widoczne są także jasne przebarwienia ogni PV, co świadczyć może o delaminacji folii EVA.

### Metoda badań

Zgodnie z normą PN-EN 61829 [9], minimalna wartość irradancji powinna być wyższa niż  $700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , by uzyskać odpowiednią dokładność przeliczeń na wartości STC. Stąd dla każdego badanego panelu PV wykonano trzy serie powtórzeń przy natężeniu promieniowania słonecznego w zakresie  $830\div 950 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , a następnie wyznaczono wartości uśrednione (rys. 2). Każdy z paneli fotowoltaicznych był ustawiony prostopadle do kierunku promieniowania słonecznego.



Rys. 2. Schemat połączeń dla wyznaczenia charakterystyki I/U wraz z pomiarem wartości irradancji oraz temperatury powierzchni modułu PV

Przed wykonaniem pomiaru wielkości charakterystycznych dla paneli PV konieczne było

wprowadzenie do ustawień miernika wartości współczynników temperaturowych podanych w kartach katalogowych paneli fotowoltaicznych oraz parametrów klimatu występujących w czasie pomiaru, takich jak natężenie promieniowania słonecznego oraz temperatura powierzchni ogniwa. Dane te posłużyły do przeliczenia zmierzonych wartości na wartości w warunkach STC. Zgodnie z instrukcją obsługi miernika MI 3108, pomiary dla każdego modułu wykonano po odczekaniu 15 minut po umieszczeniu czujnika temperatury pod powierzchnią modułu.

Następnie przeprowadzono badania pozwalające na wykrycie gorących punktów na powierzchni paneli PV. W tym celu wykonano po każdej z serii pomiarowych zdjęcia termowizyjne z użyciem kamery Seek Thermal Compact Pro.

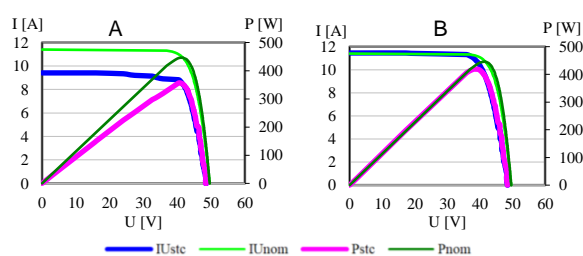
### Wyniki badań

Przeprowadzono szeroką analizę wpływu uszkodzeń mechanicznych na podstawowe parametry elektryczne paneli PV odnosząc to do warunków STC tak aby można porównać z danymi nominalnymi. W tabeli 1 zestawiono uśrednione wartości charakterystycznych parametrów elektrycznych uszkodzonych paneli PV oraz ich wartości podawane przez producenta w karcie katalogowej. W oparciu o zgromadzony materiał wyznaczono procentową zmianę analizowanych parametrów w stosunku do danych katalogowych.

Tabela 1. Charakterystyczne parametry panelu Risen

Stan	wielkość	$U_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	$U_{mpp}$ (V)	$I_{mpp}$ (A)	FF (%)	$P_{mpp}$ (W)	$\eta$ [%]
A	d	48,48	9,43	40,75	8,77	78,15	357,3	<b>16,02</b>
	e	0,23	0,019	0,166	0,011	0,279	1,63	0,073
	f	2,26	17,28	1,22	18,81	0,7	19,71	19,71
B	d	48,8	11,26	39,1	10,7	76,11	418,3	<b>18,76</b>
	e	0,124	0,036	0,128	0,046	0,064	0,543	0,024
	f	1,62	1,2	5,22	0,93	3,29	6	6
C	d	49,02	11,43	39,12	10,91	76,14	426,6	<b>19,13</b>
	e	0,026	0,207	0,261	0,237	0,222	6,74	0,302
	f	1,17	0,27*	5,17	0,99*	3,25	4,13	4,13
	g	49,6	11,4	41,25	10,8	78,7	445	<b>19,95</b>

gdzie: A - panel zabrudzony, B - panel umyty wodą demineralizowaną, C - panel umyty deszczem, D - wartości średnie, E - odchylenie standardowe, F - obniżenie w odniesieniu do danych producenta (%), G - dane producenta, \* - wzrost względem danych producenta (%).



Rys. 3. Charakterystyki dla panelu Risen

W przypadku panelu Risen największy spadek napięcia w obwodzie otwartym ( $U_{oc}$ ) i w punkcie maksymalnej mocy ( $U_{mpp}$ ) w porównaniu z danymi nominalnymi wynosiły odpowiednio 2,26% oraz 1,22% dla panelu zabrudzonego. Wyraźny jest też dla niego spadek wartości prądu zwarcia ( $I_{sc}$ ) oraz prądu w punkcie maksymalnej mocy ( $I_{mpp}$ ) odpowiednio o 17,28% oraz 18,81%. Współczynnik wypełnienia zmienił się nieznacznie o 0,7%. Największej zmianie uległa wartość mocy w punkcie ( $P_{mpp}$ ) z 445 W do

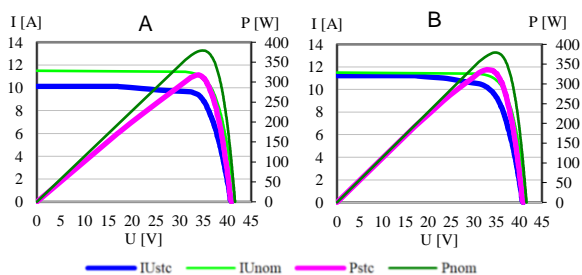
357,29 W, co stanowi spadek o 19,7%. Natomiast sprawność obniżyła się tylko o 4%. Umycie panelu tak wodą destylowaną jak i deszczową spowodowało już nieznaczne obniżenie analizowanych parametrów względem nominalnych co wskazuje, że struktura modułów fotowoltaicznych w tym przypadku nie została istotnie naruszona. Dobrze jest to widoczne na opracowanych charakterystykach (rys. 3).

Dla panelu JA Solar zaobserwowano wzrost różnic analizowanych parametrów w odniesieniu do danych nominalnych (tab. 2). Zauważyć można iż spadek napięcia w obwodzie otwartym ( $U_{oc}$ ) i punktu maksymalnej mocy ( $U_{mpp}$ ) wynosi odpowiednio 1,84% oraz 2,64% w odniesieniu do wartości nominalnych w STC.

Tabela 2. Charakterystyczne pomiary panelu JA Solar

Stan	Wielkość	$U_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	$U_{mpp}$ (V)	$I_{mpp}$ (A)	FF (%)	$P_{mpp}$ (W)	$\eta$ [%]
A	d	40,85	10,12	33,85	9,4	76,94	318,2	<b>17,03</b>
	e	0,021	0,008	0,132	0,035	0,064	0,35	0,019
	f	1,84	11,76	2,64	14,01	3,13	16,28	16,28
B	d	41,14	11,2	33,39	10,12	73,4	338,1	<b>18,09</b>
	e	0,289	0,028	0,411	0,062	0,232	2,744	0,147
	f	1,16	2,39	3,96	7,37	7,59	11,03	11,03
C	d	41,07	11,59	33,76	10,36	73,49	349,8	<b>18,72</b>
	e	0,383	0,07	0,619	0,124	0,548	6,05	0,324
	f	1,31	1,03*	2,9	5,21	7,49	7,95	7,95
g	41,62	11,47	34,77	10,93	79,43	380	<b>20,34</b>	

Wyraźny jest też spadek wartości prądu zwarcia ( $I_{sc}$ ) oraz prądu w punkcie maksymalnej mocy ( $I_{mpp}$ ) odpowiednio o 11,76% oraz 14,01%. Współczynnik wypełnienia zmniejszył się o 3,13%. Moc w MPP zmniejszyła się z 380 do 318 W, co stanowi spadek o 16,3%. Również obniżeniu uległa sprawność konwersji energii o 3,3%. W tym przypadku również umycie panelu spowodowało poprawę parametrów jego pracy a wartość mocy w punkcie maksymalnym ( $P_{mpp}$ ) wzrosła do 349,8 W, co stanowi spadek już tylko o 7,95%. Natomiast sprawność spadła o 1,62%. Zmiany te są widoczne również na charakterystykach panelu (rys. 4), przy czym uszkodzenia już znacząco wpływają na parametry pracy. W tym przypadku również lepszy efekt uzyskano myjąc panel deszczówką.



Rys. 4. Charakterystyki dla panelu JA Solar

Kolejny badany panel IBC PolySol charakteryzował się już znacznie większymi zmianami w parametrach pracy niż poprzednio badane. Zauważyć można, że spadek napięcia w obwodzie otwartym ( $U_{oc}$ ) i punktu maksymalnej mocy ( $U_{mpp}$ ) w porównaniu z danymi STC producenta wynosi odpowiednio 4,45% oraz 5,76%. Dwukrotnie spadły także wartości prądu zwarcia ( $I_{sc}$ ) maksymalnej mocy ( $I_{mpp}$ ) odpowiednio o 49,80% oraz 52,36%.

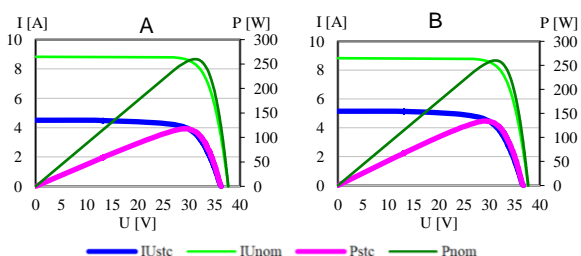
Współczynnik wypełnienia stracił 8,8% swojej wartości. Zmniejszona została także wartość mocy w punkcie

maksymalnym z 260 do 116,9 W, co stanowi spadek o 55%. O niemalże 9% zmniejszyła się sprawności konwersji energii.

Tabela 3. Charakterystyczne pomiary panelu IBC PolySol

Stan	Wartość	$U_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	$U_{mpp}$ (V)	$I_{mpp}$ (A)	FF (%)	$P_{mpp}$ (W)	$\eta$ [%]
A	d	36,4	4,51	29,31	3,99	71,22	116,9	<b>7,25</b>
	e	0,084	0,02	0,316	0,019	0,725	0,783	0,049
	f	4,45	49,8	5,76	52,36	8,81	55,05	55,05
B	d	36,72	5,15	29,46	4,55	70,84	133,9	<b>8,31</b>
	e	0,047	0,012	0,352	0,057	0,252	0,182	0,011
	f	3,61	42,66	5,28	45,67	9,31	48,48	48,48
C	d	36,26	5,09	28,97	4,44	69,73	128,6	<b>7,98</b>
	e	0,01	0,071	0,221	0,059	0,918	0,867	0,054
	f	4,84	43,35	6,84	46,97	10,73	50,54	50,54
g	38,1	8,98	31,1	8,37	78,1	260	<b>16,14</b>	

Opisane zmiany wyraźnie można zaobserwować na charakterystykach (rys. 5). W tym przypadku umycie panelu nie przyniosło już tak znaczącej poprawy jak wcześniej, ponieważ uszkodzeniu uległa nie tylko szyba solarna ale również połowa struktury panelu.



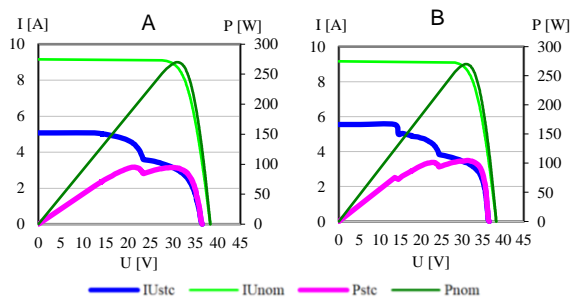
Rys. 5. Charakterystyki dla panelu IBC PolySol

Ostatni z badanych paneli charakteryzował się największymi uszkodzeniami, które oddziaływały na parametry jego pracy. Spadek napięcia w obwodzie otwartym ( $U_{oc}$ ) i punktu maksymalnej mocy ( $U_{mpp}$ ) w porównaniu z danymi producenta wyniósł odpowiednio 4,7% oraz 21,2%. Znacznemu obniżeniu uległy wartości prądu zwarcia ( $I_{sc}$ ) oraz prądu w punkcie maksymalnej mocy ( $I_{mpp}$ ) odpowiednio o 44,7% oraz 54,1%.

Tabela 4. Charakterystyczne pomiary panelu Boviet

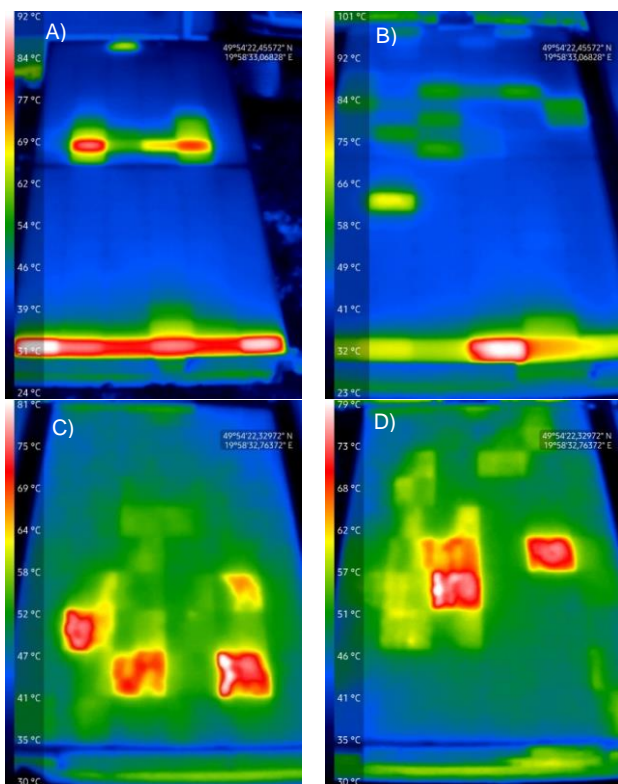
Stan	wielkość	$U_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	$U_{mpp}$ (V)	$I_{mpp}$ (A)	FF (%)	$P_{mpp}$ (W)	$\eta$ [%]
A	d	36,51	5,07	24,42	4	51,44	95,2	<b>5,85</b>
	e	0,008	0,006	4,921	0,743	0,334	0,704	0,043
	f	4,67	44,66	21,22	54,09	33,16	64,74	64,74
B	d	36,55	5,54	30,83	3,39	51,53	104,4	<b>6,42</b>
	e	0,057	0,01	0,365	0,041	0,279	0,517	0,032
	f	4,08	38,28	0,87	59,55	34,02	61,34	61,34
C	d	36,72	5,73	25,63	4,34	51,79	109,1	<b>6,70</b>
	e	0,168	0,011	4,515	0,681	0,775	1,045	0,064
	f	4,12	37,4	17,33	50,22	32,7	59,6	59,6
g	38,3	9,16	31	8,71	76,96	270	<b>16,6</b>	

Współczynnik wypełnienia stracił ponad 33% swojej wartości. Najsilniej z pośród badanych paneli uległa zmianie wartość mocy w punkcie maksymalnym ( $P_{mpp}$ ) z 270 W do 95,21 W, co stanowi spadek aż o 64,7%. Sprawność konwersji również uległa znacznemu obniżeniu do wartości 6%. Umycie szyby solarnej w tym przypadku również nie przyniosło znaczącej poprawy parametrów jego pracy. Na charakterystykach prądu i mocy zaobserwowano załamanie, przy czym po umyciu wystąpiło ono dwukrotnie (rys. 6).



Rys. 6. Charakterystyki dla panelu Bovie

Skutki uszkodzeń mechanicznych w postaci pęknięć szkła są wyraźnie obserwowalne na obrazowaniach termowizyjnych. Uszkodzenia mechaniczne szkła wywołują również uszkodzenia wewnętrznej struktury panelu przyczyniające się do powstawania hot-spotów. W czasie badań rejestrowano punkty w których temperatura wzrastała o ponad 70°C. Uszkodzone ogniwa w strukturze panelu stają się bowiem odbiornikami generowanej energii, na których wydzielą się ciepło. Zjawisko to jest niebezpieczne ponieważ występowanie gorących punktów będzie dalej degradowało strukturę panelu, a w skrajnych przypadkach zwiększa ryzyko zapłonu instalacji.



Rys. 7. Zdjęcia modułów PV wykonane kamerą termowizyjną: A) Risen, B) JA Solar, C) IBC PolySol, D) Boviet

### Podsumowanie

Z wykonanych analiz wynika, że największe obniżenie sprawności konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną na poziomie 50-60% w odniesieniu do danych znamionowych wystąpiło dla paneli IBC PolySol oraz Boviet. Charakteryzowały się one nie tylko uszkodzeniami hartowanej szyby solarnej na całej powierzchni, ale również jasnym przebarwieniem ogniw PV, co świadczyć może o delaminacji folii EVA.

Uszkodzenie warstwy szkła na panelu PV bez degradacji struktury wewnętrznej ogniw PV nieznacznie tylko pogarsza

jakość konwersji energii. W badaniach paneli Risen i JA Solar zmiana sprawności ich pracy była na poziomie 4-8%.

Większy wpływ na ich pracę ma czystość osłony przezroczystej oddzielającej moduły PV od otoczenia. Zabrudzenie szyby solarnej powodowało obniżenie sprawności o ok. 6% dla paneli z delaminacją folii EVA oraz 8-15% przy uszkodzeniu jedynie warstwy szkła. W większości prób lepszy efekt oczyszczania uzyskiwano dla wody deszczowej niż dla oczyszczania paneli wodą demineralizowaną.

Pęknięć warstwy szkła - uszkodzeń mechanicznych nie można jednak ignorować, ponieważ przyczyniają się one do powstawania gorących punktów na powierzchni paneli PV, co zwiększa ryzyko zapłonu instalacji.

**Autorzy:** dr. inż. Krzysztof Necka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: krzysztof.necka@urk.edu.pl; dr. inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: stanislaw.lis@urk.edu.pl; dr. hab. inż. Jarosław Knaga, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: jaroslaw.knaga@urk.edu.pl; mgr. inż. Piotr Łyszczarz, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: piotr.lyszczarz@urk.edu.pl; inż. Michał Walancik, absolwent Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków

### LITERATURA

- [1] „OpenAGH e-podreczniki | Fotowoltaika”. Dostęp: 20 wrzesień 2024. [Online]. Dostępne na: [https://prepodreczniki.open.agh.edu.pl/openagh-podreczniki\\_view.php?categId=143&handbookId=107](https://prepodreczniki.open.agh.edu.pl/openagh-podreczniki_view.php?categId=143&handbookId=107)
- [2] Z. Yahya, S. Imane, H. Hicham, A. Ghassane, i E. Bouchini-Idrissi Safia, „Applied imagery pattern recognition for photovoltaic modules’ inspection: A review on methods, challenges and future development”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, t. 52, s. 102071, sie. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102071.
- [3] F. Belhachat, C. Larbes, i R. Bennia, „Recent advances in fault detection techniques for photovoltaic systems: An overview, classification and performance evaluation”, *Optik*, t. 306, s. 171797, lip. 2024, doi: 10.1016/j.ijleo.2024.171797.
- [4] M. S. Jadin i S. Taib, „Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography”, *Infrared Physics & Technology*, t. 55, nr 4, s. 236–245, lip. 2012, doi: 10.1016/j.infrared.2012.03.002.
- [5] A. Et-talebi, Y. Chaibi, A. Allouhi, M. Boussetta, i M. Benslimane, „A combined convolutional neural network model and support vector machine technique for fault detection and classification based on electroluminescence images of photovoltaic modules”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, t. 32, s. 100946, grudz. 2022, doi: 10.1016/j.segan.2022.100946.
- [6] D. Silitonga, N. F. Declercq, F. Meraghni, i B. Bousset, „Front glass crack inspection of thin-film solar photovoltaic modules using high-order ultrasonic Lamb waves”, *Solar Energy*, t. 274, s. 112578, maj 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112578.
- [7] A. Triki-Lahiani, A. Bennani-Ben Abdelghani, i I. Slama-Belkhadja, „Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 82, s. 2680–2692, luty 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.101.
- [8] R. R. Rao, S. Priyadarshani, i M. Mani, „Examining the use of End-of-Life (EoL) PV panels in housing and sustainability”, *Solar Energy*, t. 257, s. 210–220, cze. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.04.033.
- [9] PN-EN 61829:2016-04, Panel modułów fotowoltaicznych (PV) -- Pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych na miejscu ich instalacji
- [10] PN-EN 62446-1:2016-08, Systemy fotowoltaiczne (PV) -- Wymagania dotyczące badań, dokumentacji i utrzymania -- Część 1: Systemy podłączone do sieci -- Dokumentacja, odbiory i nadzór