

## Przegląd materiałów do zabezpieczenia balistycznego fotoogniw

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania przezroczystych osłon balistycznych do ochrony ogniwa fotowoltaicznego przed uszkodzeniami powstałymi w skutek działań militarnych (ostrzał z broni palnej, wybuchy) czy z powodu przyczyn naturalnych takich jak na przykład trzęsienie ziemi. Dokonano przeglądu różnych rodzajów przezroczystych osłon balistycznych w kontekście przepuszczalności długości światła. Przeprowadzono analizę wydajności ogniwa fotowoltaicznego w zależności od zastosowanej osłony balistycznej.

**Abstract.** The article presents the concept of using transparent ballistic shields to protect the photovoltaic cell against damage caused by military actions (firearms, explosions) or due to natural causes such as an earthquake. Different types of transparent ballistic shields were reviewed in the context of light length transmission. An analysis of the efficiency of the photovoltaic cell was carried out depending on the ballistic shield used. (Review of materials for ballistic protection of photocells)

**Słowa kluczowe:** ogniwo fotowoltaiczne, osłona balistyczna, bezpieczeństwo militarne.

**Keywords:** photovoltaic cell, ballistic shield, military security.

### Wstęp

Zabezpieczenie nieprzerwanego działania systemów infrastruktury krytycznej w kontekście konfliktów zbrojnych, oraz zagrożeń terrorystycznych jest ważnym zagadnieniem dla instytucji państwa [1, 2]. Zadanie to realizowane jest m.in. poprzez dywersyfikację źródeł zasilania. W tym celu obok zasilania z linii energetycznych stosuje się systemy zasilania awaryjnego (UPS), czy spalinowo-elektryczne agregaty prądotwórcze (ZSE) [3]. Ciekawą alternatywą dla pozyskania energii na potrzeby ciągłości działania systemów infrastruktury krytycznej są również odnawialne źródła energii (OZE) wyposażone we własne systemy magazynowania energii [4].

Głównymi komponentami takich systemów są moduły fotowoltaiczne (PV) oraz magazyny energii. Moduły PV zawierają połączone szeregowo pojedyncze ogniwa fotowoltaiczne wykonane z różnych materiałów o różnej strukturze krystalicznej [5, 6, 7].

Ze względu na niewielką wytrzymałość mechaniczną pojedynczych ogniw fotowoltaicznych na etapie produkcji umieszcza się je na sztywnych podłożach. Dodatkowo ogniwa fotowoltaiczne połączone w moduł PV na ogół zabezpiecza się aż pięcioma warstwami ochronnymi – obudowane są one aluminiową ramą, odizolowane od pozostałych warstw modułu PV uszczelką, która zabezpiecza panel przed wnikaniem w jego wnętrze zanieczyszczeń. Ponadto fotoogniwa zabezpieczone są położoną na nich folią EVA (kopolimer etylenu i octanu winylu). A całość chroniona jest hartowaną szybą położoną jako wierzchnia warstwa modułów PV [8, 9].

Istnieją również technologie pozwalające na produkcję paneli na podłożu elastycznym. Obecnie badania nad elastycznymi panelami fotowoltaicznymi skupiają się na ogniwach cienkowarstwowych, które charakteryzują się zwiększoną sprawnością oraz elastycznością struktury [10].

Sprawność komercyjnie produkowanych modułów PV wynosi ponad 20,9% [11, 12, 13]. Nie mniej zależy ona m.in. od gęstości mocy promieniowania oświetlającego moduły fotowoltaiczne [14,15], które znacząco maleje przechodząc przez dodatkowe przeszkody, w tym np. przez osłony balistyczne. Dlatego niezmiernie istotnym jest podczas doboru materiału z jakiego wykonane mają być osłony balistyczne aby znaleźć kompromis pomiędzy skutecznością zastosowanych osłon, a przenikalnością promieniowania słonecznego danego materiału.

Celem pracy jest ocena wpływu osłon balistycznych na wydajność ogniwa.

### Przeźroczyste osłony balistyczne

Przykładem narażenia na zniszczenie infrastruktury energetycznej jest konflikt zbrojny w Ukrainie. W działaniach zbrojnych najbardziej narażone są na uszkodzenia systemy zasilające wykorzystujące OZE w tym panele PV. Na rysunku 1 przedstawiono obraz zniszczeń w elektrowni firmy DTEK Renewables w miejscowości w Tryfonivska w obwodzie Chersońskim.



Rys. 1. Zniszczone panele PV w wyniku ostrzału.

Doświadczenia wyniesione z konfliktu w Ukrainie sugerują potrzebę zabezpieczenia modułów PV przed uszkodzeniami balistycznymi. Wyposażenie w takie zabezpieczenia kilku hektarowych elektrowni fotowoltaicznych jest bardzo kosztowne, dlatego należy skupić się na niewielkich elektrowniach zasilających elementy infrastruktury krytycznej. Wydajność modułów PV zależy od natężenia i czasu nasłonecznienia, aby przeciwdziałać uszkodzeniom mechanicznym można użyć osłony balistycznej, która nie będzie znacząco obniżać wydajności fotoogniw. Dlatego przy doborze materiału do ochrony modułów PV należy wykorzystać materiały o dużej transmisji promieniowania z zakresu czułości fotoogniw i wysokiej odporności balistycznej. Przykładami takich materiałów są szkło akrylowe, szkło pancerne oraz szkło poliwęglanowe. Tabela 1 zawiera porównanie parametrów technicznych materiałów przezroczystych natomiast na rysunku 2 pokazano wybrane materiały do produkcji osłon balistycznych.

Tabela nr 1. Wybrane parametry fizykochemiczne dla szkła akrylowego, szkła pancernego oraz szkła poliwęglanowego.

Parametr	Szko akrylowe	Szko pancerne	Poliwęglan
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	1,2	4	2
Temperatura topnienia °C	135	900	150
Odporność na uderzenia	Niska	Bardzo wysoka	Średnia
Odporność chemiczna	Średnia	Wysoka	Średnia
Odporność na promieniowanie UV	Niska	Niska	Średnia
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	75	250	75
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	80	300	106
Moduł sprężystości [GPa]	2,7	300	2,2



Rys. 2. Przejroczyste osłony balistyczne: a) szkło akrylowe – producent Sonstige, b) szkło pancerne – producent Antisol, c) szkło poliwęglanowe – Antisol

**Szko akrylowe** (szko organiczne), jest materiałem syntetycznym o wysokiej transmisji światła oraz dużej wytrzymałości mechanicznej. Jednocześnie jest to materiał łatwy w obróbce mechanicznej. Ma niższą gęstość niż szkło tradycyjne, co sprawia, że jest lżejsze i elastyczne. Szkło akrylowe stosuje się do budowy zadaszczyń (rysunek 3), okien samolotowych i pojazdów osobowych.



Rys. 3. Przykład zastosowania szkła akrylowego jako osłony przeciwdeszczowej.

**Szko pancerne**, zwane także szkłem hartowanym, również jest materiałem o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej uzyskanej poprzez poddanie szkła tradycyjnego specjalnemu procesowi hartowania, który zwiększa jego odporność na uderzenia i jednocześnie zmniejsza ryzyko rozszyczenia się szkła na drobne kawałki w przypadku jego uszkodzenia. Szkło pancerne stosowane jest głównie w miejscach wymagających wysokiego poziomu bezpieczeństwa, takich jak witryny sklepowe, panele samochodowe i panele okienne. Szkło pancerne jest rodzajem szkła o zwiększonej odporności na uderzenia, w porównaniu do standardowego szkła. Jest ono zwykle wykonane z kilku warstw szkła i folii poliwęglanowej, co zapewnia mu dużą wytrzymałość i odporność na rozpryskiwanie. Przenikalność światła przez szkło pancerne jest zwykle nieco niższa niż przez standardowe szkło, co może wpłynąć na jakość obrazu w przypadku zastosowania go w oknach lub witrynach sklepowych. Różnica ta jest jednak zwykle niewielka i zależy od konkretnego rodzaju szkła pancernego i jego grubości. Na rysunku 4 pokazano przykład użycia szkła pancernego jako szyby w pojeździe opancerzonym.



Rys. 4. Przykład użycia szkła pancernego jako szyby w pojeździe opancerzonym.

**Szko poliwęglanowe** stosowane jest w batyskafach, samolotach, hełmach astronautów, kaskach kierowców Formuły 1, pokryciach dachowych oraz wszędzie tam gdzie wymagany jest materiał o dużej odporności na ciśnienie i obciążenia mechaniczne. W zakresie przenikalności, szkło poliwęglanowe charakteryzuje się nieco niższą wartością niż szkło akrylowe, ale nadal umożliwia przepuszczenie większości widzialnego światła. Na rysunku 5 pokazano szkło wykonane z poliwęglanu użyte do wykonania okna w batyskafie Trieste, który zszedł na głębokość 10916 metrów poniżej poziomu morza.



Rys. 5. Przykład wykorzystania szkła poliwęglanowego - okna batyskafu Trieste.

### Analiza literaturowa wpływu przezroczystych osłon balistycznych na parametry ogniwa fotowoltaicznego

Podstawowe parametry charakteryzujące ogniwo słoneczne to:

(i) **sprawność** (ang. *Power Conversion Efficiency*,  $\eta$ , PCE), czyli stosunek maksymalnej mocy uzyskiwanej z ogniwa słonecznego do mocy padającego światła

$$PCE = V_{oc} \times I_{sc} \times FF / P_{in}$$

gdzie  $P_{in}$  jest natężeniem światła padającego, podawanym w  $W/m^2$ .

(ii) **współczynnik wypełnienia** (ang. *Fill Factor*, FF), związany jest z morfologią wytworzonej warstwy i wzrasta wraz ze zmniejszaniem się rezystancji szeregowej ( $R_s$ ) i zwiększaniem rezystancji równoległej ( $R_{sh}$ ).

$$FF = I_{mpp} \times V_{mpp} / I_{sc} \times V_{oc}$$

gdzie  $I_{mpp}$  i  $V_{mpp}$  to wartość prądu i napięcia punktu o największej mocy.

(iii) **napięcie obwodu otwartego** (ang. *Open Circuit Voltage*,  $V_{oc}$ ), określa napięcie na końcach otwartego ogniwa fotowoltaicznego w określonej temperaturze i przy określonym natężeniu promieniowania.

(iv) **gęstość prądu zwarcia ogniwa** (ang. *Short Circuit Current*,  $J_{sc}$ ) określa natężenie prądu wyjściowego ogniwa fotowoltaicznego w warunkach zwarcia w określonej temperaturze i o określonym natężeniu promieniowania.

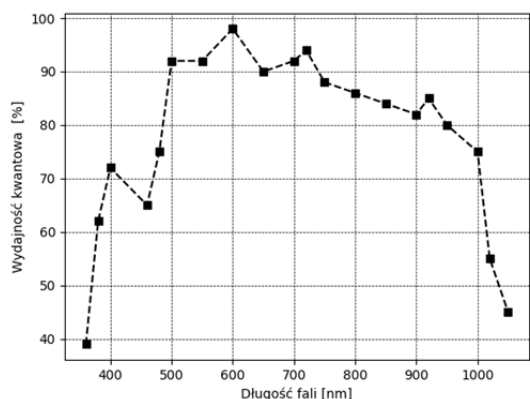
(v) **zewnętrzna wydajność kwantowa** (ang. *external quantum efficiency*, EQE) to liczba wygenerowanych elektronów po absorpcji jednego fotonu (bez poprawki na straty związane z odbiciem) dla światła monochromatycznego o danej długości fali.

$$EQE = \eta_A \times \eta_{diff} \times \eta_{diss} \times \eta_{tr} \times \eta_{cc}$$

gdzie  $\eta_A$ : współczynnik absorpcji fotonu,  $\eta_{diff}$ : współczynnik dyfuzji ekscytynu,  $\eta_{diss}$ : współczynnik dysocjacji ekscytynu,

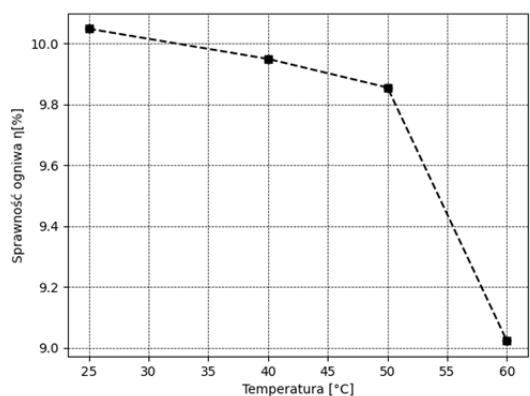
$\eta_{tr}$ : współczynnik transportu nośników ładunku,  $\eta_{cc}$ : współczynnik odebrania ładunku.

Badania literaturowe potwierdzają zależność między wydajnością kwantową monokrystalicznego ogniwa fotowoltaicznego krzemowego, a długością fali światła promieniowania jak przedstawiono na rys. 6 [16].



Rys. 6. Wykres wydajności kwantowej ogniwa monokrystalicznego w zależności od długości fali światła.

Dla długości fali światła z przedziału 500 nm a 900 nm wydajność kwantowa monokrystalicznego ogniwa fotowoltaicznego wynosi powyżej 80%. Wydajność kwantowa na poziomie poniżej 50% obserwowana jest w zakresie poniżej 380 nm (ultrafiolet) oraz powyżej 1000 nm (podczerwień). Wydajność kwantowa jest zdefiniowana jako stosunek liczby zebranych ładunków elektrycznych do liczby fotonów padających na fotoreaktywną powierzchnię. Zastosowanie osłony balistycznej spowoduje zatrzymanie cyrkulacji powietrza w wyniku czego nastąpi wzrost temperatury pracy ogniwa fotowoltaicznego co przełoży się na spadek jego sprawności [18]. Zależność temperaturowa sprawności kwantowej ogniwa jest przedstawiona na rysunku 7.



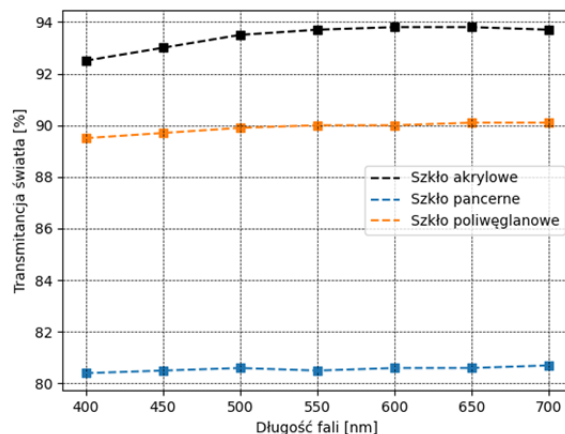
Rys. 7. Wykres sprawności kwantowej krzemowego ogniwa monokrystalicznego od temperatury.

Transmitancja (T) to ta część promieniowania elektromagnetycznego, która została tzw. „przepuszczona” (I) przez badany materiał w stosunku do promieniowania padającego ( $I_0$ ). Transmitancję wyraża się zazwyczaj w procentach.

$$\%T = I/I_0 \times 100\%$$

Przepuszczalność światła (transmitancja) użytego materiału do wykonania osłony balistycznej jest jednym z kluczowych parametrów. Transmitancja światła dla szkła pancernego jest na poziomie od 50% do 85% w zależności

od długości fali światła [19,20]. Na rysunku 8 przedstawiono transmitancję badanych materiałów.



Rys. 8. Wykres transmitancji światła w zależności od długości fali dla szkła akrylowego, pancernego oraz poliwęglanowego.

### Model literaturowy

Wskazane jest aby materiał, który zostanie użyty do wykonania osłony balistycznej ogniwa, charakteryzował się wysoką odpornością balistyczną oraz nie obniżał w znacznym stopniu wydajności chronionego ogniwa fotowoltaicznego. Dokonano analizy trzech kluczowych czynników, aby zweryfikować wpływ na wydajność ogniwa. Pierwszym czynnikiem jest sprawność kwantowa, drugim - zależność temperaturowa sprawności PCE, a trzecim - transmitancja światła przez materiał. Wynikiem walidacji jest wstępna ocena materiału na podstawie sumy tych trzech kluczowych parametrów [21].

$$V = \eta_{kwantowa}(\lambda) + \eta_{ogniwa}(T) + \%T(\lambda)$$

gdzie:

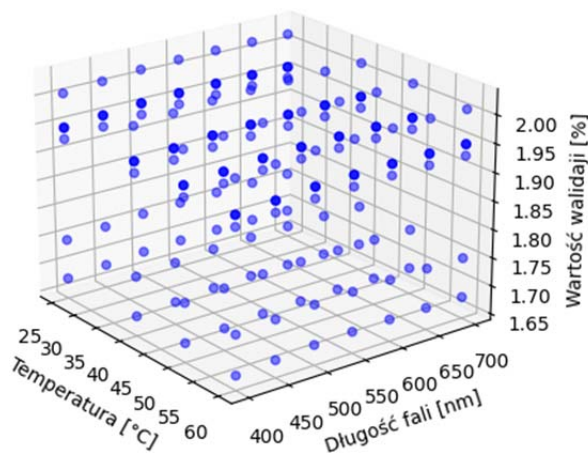
V – walidacja układu osłona – ogniwo,

$\eta_{kwantowa}(\lambda)$  – wydajność kwantowa ogniwa,

$\eta_{ogniwa}(T)$  – sprawność ogniwa fotowoltaicznego w zależności od temperatury pracy.

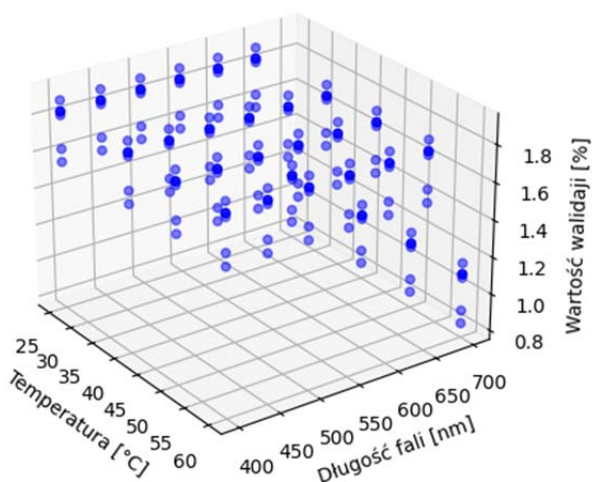
$\%T(\lambda)$  – transmitancja światła osłony w zależności od długości światła. Rysunki 9-11 przedstawiają wyniki walidacji w zależności od temperatury i długości fali:

Uzyskane wyniki walidacji pokazują podobny wynik dla szkła akrylowego i poliwęglanowego ze wskazaniem na szkło akrylowe, natomiast wynik dla szkła pancernego jest bardzo wrażliwy na długość fali światła.

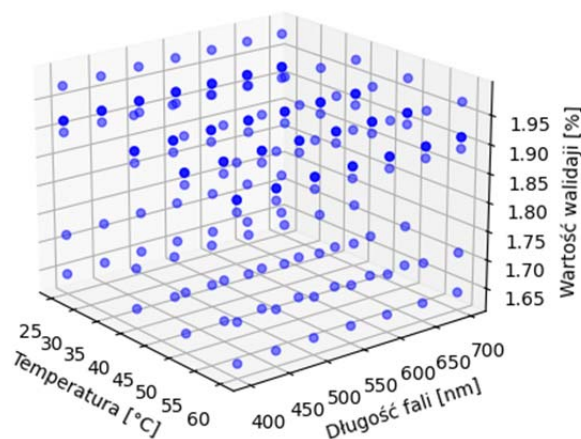


Rys 9. Wynik walidacji dla szkła akrylowego.





Rys 10. Wynik walidacji dla szkła pancernego.



Rys 11. Wynik walidacji dla szkła poliwęglanowego.

## Wnioski

Przeprowadzona analiza walidacyjna z wykorzystaniem danych zawartych w literaturze [18, 19, 20] dla szkła pancernego wykazuje znaczną zależność wyników od długości fali, podczas gdy dla szkła akrylowego i poliwęglanowego wyniki są stabilne i zbliżone do siebie. Należy jednak zauważyć, że zaproponowany wzór w celu określenia wartości walidacji  $V$  nie bierze pod uwagę parametrów balistycznych oraz różnic w temperaturze pracy ogniwa dla badanych układów osłona-ogniwo. Otrzymane wyniki walidacji stanowią tylko wskazówkę dla dalszych badań, które należy przeprowadzić w celu dokładnej klasyfikacji przezroczystych osłon balistycznych dla ogniwa fotowoltaicznego i mają charakter badań wstępnych. Konieczne będzie zmodyfikowanie wzoru na walidację w celu uwzględnienia wpływu odporności balistycznej. Wymagane jest także przeprowadzenie badań eksperymentalnych w celu zbadania wpływu grubości zastosowanej osłony na wydajność ogniwa fotowoltaicznego. Należy dokładnie określić, w jaki sposób uszkodzenia osłony, takie jak pęknięcia lub zarysowania, wpływają na wydajność ogniwa fotowoltaicznego.

**Autorzy:** mgr inż. Krzysztof Spaliński, Akademia Wojsk Lądowych, Wydział Zarządzania, Katedra Zarządzania Innowacyjnymi Projektami, ul. Piotra Czajkowskiego 109, 51-147 Wrocław, E-mail: [krzysztof.spalinski@awl.edu.pl](mailto:krzysztof.spalinski@awl.edu.pl); kpt. dr inż. Krzysztof Górski, Wydział Zarządzania, Katedra Zarządzania Innowacyjnymi Projektami, ul. Piotra Czajkowskiego 109, 51-147 Wrocław, E-mail: [krzysztof.gorski@awl.edu.pl](mailto:krzysztof.gorski@awl.edu.pl).

## LITERATURA

- [1] G.Rzymkowski., J.Gryciuk., Bezpieczeństwo systemów elektroenergetycznych przed zagrożeniami hybrydowymi, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Bankowej w Poznaniu (2019)
- [2] A.Lemański, J.Mareckie, Zagrożenia terrorystyczne dla infrastruktury krytycznej państwa - wybrane problemy, Przegląd Bezpieczeństwa Wewnętrznego (2021)
- [3] T. E. Okasha, A. M. A. Mohamed, A. M. Salem, A. M. M. Yousef, Evaluation of the Performance of Diesel Generator Sets Used in Critical Infrastructure Applications, Energies (2020)
- [4] J. Stachowicz, B. Gładyszewska-Fiedoruk, M. Witoń, Renewable Energy in Critical Infrastructure Protection, Energies (2020)
- [5] S.Maleczek, M.Szczepaniak, W.Malicki, K.Drabczyk, Zastosowanie polikrystalicznych ogniw krzemowych, jako elastycznych pokryw fotowoltaicznych, Napędy i Sterowanie (2019)
- [6] S.Maleczek, W.Malicki, K.Drabczyk, A.Cebrat, Badanie elastycznych paneli fotowoltaicznych w aspekcie zastosowań militarnych, Elektronika: konstrukcje, technologie (2014)
- [7] W. Malicki, B. Miedziński, K. Rutecki, M. Habrych, Ogniwa fotowoltaiczne w elektrycznych instalacjach zasilających. Mechanizacja i automatyzacja górnictwa, nr 7, (2010)
- [8] J.Plagemann, S.Klempin, B.Brunsch, Evaluation of Material Properties and Tests for Front Glass in Photovoltaic Modules, Energies (2021)
- [9] K.E.Kharrim, A.Bakkas, M.Laoufi, A.Outzourhit, Analysis of the Effect of Temperature and Solar Irradiance on Photovoltaic Performance in a Mediterranean Climate, Energies (2019)
- [10] L.Xiaoyue, L.Peicheng, W.Zhongbin, L.Deying, Y.Hong-Yu, L.Zheng-Hong, Review and perspective of materials for flexible solar cells Materials Reports: EnergyVolume 1, Issue 1, (2021)
- [11] M.Szindler, M.Szindler, Barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne z polielektrolitem, Przegląd Elektrotechniczny, R. 94 nr 8, (2018)
- [12] R.Figura, W.Zientarski, Analiza parametrów pracy modułu fotowoltaicznego, Efektywność transportu, Autobusy, nr 12, (2016)
- [13] P.Korasiak, Sprawność konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną współczesnych ogniw i modułów fotowoltaicznych, Przegląd Elektrotechniczny R. 93, nr 7, (2017)
- [14] O.Orekiti, F.Boukhanouf, B.Asgar, M.Messai, M.Abousaleh, A.Alhazmy, The effects of shading on the performance of solar cells and modules, Progress in Photovoltaics, Research and Applications (2016)
- [15] E.Krac, K.Górecki, Wpływ wybranych parametrów pogodowych na charakterystyki paneli fotowoltaicznych, Elektronika, nr 5, (2016)
- [16] S.Chander, A.Purohit, A.Nehra, S.P.Nehra, M.S.Dhaka, A Study on Spectral Response and External Quantum Efficiency of Mono-Crystalline Silicon Solar Cell, INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH (2015)
- [17] E.Krac, K.Górecki, Wpływ kąta padania światła na wartości natężenia oświetlenia zmierzone za pomocą czujników fotometrycznych, Przegląd Elektrotechniczny, R. 97, nr 12, (2021)
- [18] S.Chander, A.Purohit, A.Sharma, S.P.Nehra, M.S.Dhaka, Impact of temperature on performance of series and parallel connected mono-crystalline silicon solar cells, Energy Reports Volume 1, Pages 175-18 (2015)
- [19] A.Ishigami, K.Watanabe, T.Kurose, H.Ito, Physical and Morphological Properties of Tough and Transparent PMMA-Based Blends Modified with Polyrotaxane, Polymers (2020)
- [20] S.K.Rajendran, P.Biswas, R.Johnson, Y.Mahajan, Transparent Ceramics for Ballistic Armor Applications, Handbook of Advanced Ceramics and Composites (2019)
- [21] K.F.Widaman, W.Revelle, Thinking thrice about sum scores, and then some more about measurement and analysis, Behavior Research Methods (2023)