

Ewa RADZIEMSKA¹ i Piotr OSTROWSKI¹

RECYKLING I PONOWNE UŻYCIE ELEMENTÓW SYSTEMÓW FOTOWOLTAICZNYCH

RECYCLING AND REUSE TREATMENT OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Streszczenie: Systemy fotowoltaiczne są stosowane na całym świecie jako niezawodne i wydajne układy zasilania zarówno w przemyśle, budownictwie, jak i w urządzeniach codziennego użytku. Średni czas eksploatacji modułów fotowoltaicznych wynosi ponad 25 lat. Wyeksploatowane moduły oraz te, które uległy uszkodzeniu, są obecnie przeważnie składowane na wysypiskach jako odpady przemysłowe lub komunalne, np. jako szkło lub materiał rozbiórkowy, co było dopuszczalne dla niewielkich ilości w przeszłości. Biorąc pod uwagę stale rosnącą produkcję modułów fotowoltaicznych, takie postępowanie może stanowić poważny problem. Zagadnienie zagospodarowania zużytych elementów systemów fotowoltaicznych nie zostało jeszcze dokładnie rozpoznane. Opracowanie technologii recyklingu i powtórnego zastosowania elementów systemów wycofanych z użycia powinno rozwiązać ten problem. Ponieważ żywotność ogniw fotowoltaicznych jest większa niż całych modułów, możliwe jest ponowne użycie ogniw, z wyjątkiem tych, które uległy uszkodzeniu. Poprzez ponowne użycie ogniw można znacznie ograniczyć ilość energii zużytej w procesie ich produkcji i w efekcie zredukować koszt produkowanych modułów. Prosta i tania technologia recyklingu i powtórnego wykorzystania może w niedalekiej przyszłości znacznie obniżyć koszt wytwarzania systemów PV. W artykule przedstawiono niektóre z istniejących technologii recyklingu i powtórnego wykorzystania zużytych lub uszkodzonych modułów fotowoltaicznych oraz perspektywy ich rozwoju.

Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne, recykling, energia słoneczna, odnawialne źródła energii

Promieniowanie słoneczne, docierające do powierzchni Ziemi, jest dla naszej planety najważniejszym źródłem energii. Konwersja fotowoltaiczna polega na wykorzystaniu półprzewodników lub innych materiałów, mogących uczestniczyć w zamianie energii fotonów padającego promieniowania na energię elektryczną.

Energia słoneczna jest w ten sposób wykorzystywana od XVIII wieku:

1839 r. - Antoine Becquerel [1788-1878] odkrył zjawisko fotowoltaiczne.

1877 r. - Alexander Graham Bell [1847-1922] wyprodukował pierwsze krzemowe ogniwo fotowoltaiczne.

1916 r. - Jan Czochralski [1885-1953], polski chemik i metaloznawca odkrył powszechnie stosowaną do dzisiaj metodę otrzymywania monokryształów krzemu, zwaną metodą Czochralskiego.

1921 r. - Albert Einstein [1879-1955] otrzymał Nagrodę Nobla za wkład w rozwój fizyki teoretycznej, a szczególnie za wyjaśnienie (1905 r.) praw rządzących zjawiskiem fotoelektrycznym.

1958 r. - sprawność konwersji fotowoltaicznej osiągnęła wartość 11%. Powstał pierwszy sztuczny satelita ziemski i samochód zasilany ogniwami fotowoltaicznymi.

1966 r. - wytworzono pierwsze cienkowarstwowe ogniwo z materiałów półprzewodnikowych.

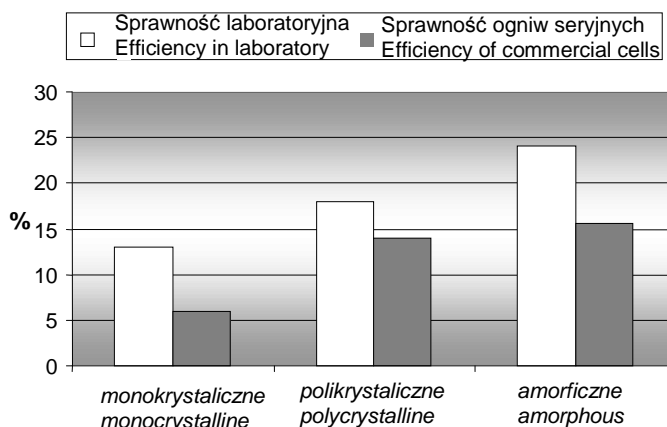
1989 r. - ogniwa fotowoltaiczne osiągnęły sprawność powyżej 20%.

W Polsce pierwsze ogniwo fotowoltaiczne zostało wyprodukowane w latach 70. XX wieku przez profesora Witolda Żdanowicza. Obecnie pracujące komercyjne instalacje

¹ Wydział Chemiczny, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel. +48 58 347 18 74, email: ewarad@chem.pg.gda.pl

fotowoltaiczne produkują energię elektryczną ze sprawnością od 7 do 17% [1], a koszt wytworzenia takiego systemu wynosi około 6 \$ na każdy wat mocy nominalnej [2].

Ponad 80% produkowanych na świecie ogniw fotowoltaicznych stanowią ogniwa krzemowe [3]. W zależności od technologii otrzymywania krzemu sprawności konwersji fotowoltaicznej są różne, co jest przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Sprawność modułów krzemowych (w zależności od technologii)

Fig. 1. Silicon module efficiency (depending on technology)

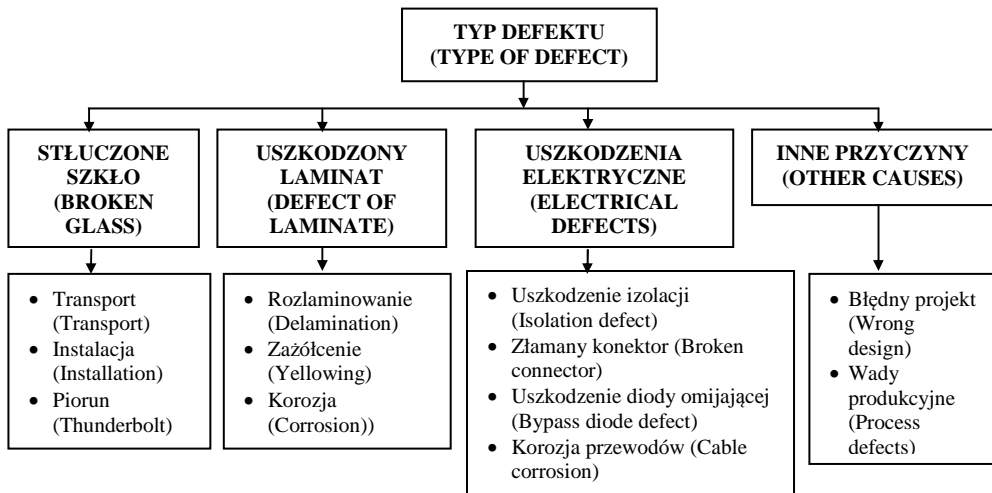
Okres eksploatacji modułów fotowoltaicznych

Producenci modułów udzielają 25÷30 lat gwarancji na swoje wyroby, jednakże część z nich ulega uszkodzeniu w okresie eksploatacji. Rodzaje defektów, mogących pojawić się podczas eksploatacji system fotowoltaicznego przedstawiono na rysunku 2 (na podstawie [4]).

Wyniki badań prowadzonych przez Deutsche Solar AG określają procentowy udział poszczególnych rodzajów uszkodzeń dla krzemowych modułów fotowoltaicznych (rys. 3).

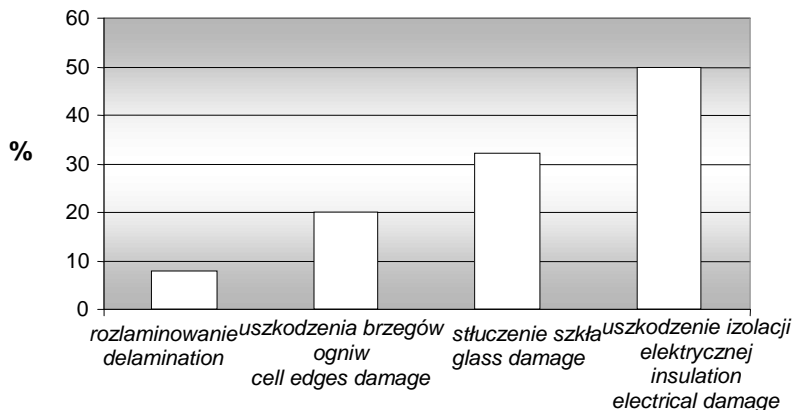
Wyeksploatowane moduły oraz te, które uległy uszkodzeniu, są obecnie przeważnie składowane na składowiskach jako odpady przemysłowe lub komunalne, np. jako szkło lub materiał rozbiórkowy, co było dopuszczalne dla niewielkich ilości w przeszłości. Biorąc pod uwagę stale rosnącą produkcję modułów fotowoltaicznych, takie postępowanie może stanowić poważny problem.

Zgodnie z obowiązującym prawodawstwem, dotyczącym odpadów niebezpiecznych, tylko niektóre, produkowane wiele lat temu moduły fotowoltaiczne z CdTe nie spełniają wymagań stawianych odpadom, które mogą być składowane na składowiskach komunalnych. Ponieważ moduły fotowoltaiczne generują energię elektryczną, mogą one podlegać regulacjom dotyczącym urządzeń elektrycznych i elektronicznych, jak istniejące obecnie dyrektywy unijne WEEE i RoHS, dotyczące postępowania ze zużytymi urządzeniami elektrycznymi i elektronicznymi oraz materiałami niebezpiecznymi. W dyrektywach tych nie wymieniono jednak urządzeń fotowoltaicznych, możliwe są jednak poprawki do Aneksu 1B.



Rys. 2. Typowe uszkodzenia modułów PV

Fig. 2. Typical defects of PV modules



Rys. 3. Procentowy udział uszkodzeń modułów krzemowych [5]

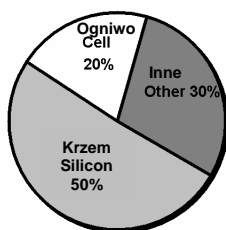
Fig. 3. Proportional composition of causes of damage silicon modules [5]

Jakie korzyści daje recykling?

Do chwili obecnej nie opracowano skutecznej, funkcjonującej na całym świecie, metody recyklingu elementów systemów fotowoltaicznych, która prowadziłaby do odzysku cennych materiałów, a jednocześnie rozwiązałaby problem składowania ich na składowiskach. Jest to niezwykle ważne, ponieważ w najbliższych latach zacznie pojawiać się znaczna ilość wyeksploatowanych modułów i innych elementów systemów PV, jako że pierwsze instalacje montowane były w latach 80. ubiegłego wieku oraz ze względu na rosnącą ilość nowych instalacji (roczny wzrost wynosi około 40%).

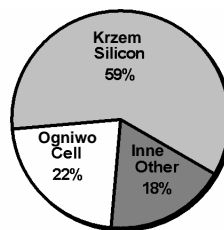


Ponieważ proces produkcji modułów fotowoltaicznych wymaga dostarczenia energii i jest to energia pochodząca ze źródeł konwencjonalnych, odzyskiwanie elementów lub materiałów ze zużytych instalacji pozwoli na znaczne jej ograniczenie. Obecnie zwrot zużytej w procesie produkcji modułu energii odbywa się w ciągu 1,25÷1,5 pierwszych lat jego eksploatacji [7]. W przypadku powtórnego użycia odzyskanych płytek krzemowych można oszczędzić około 57% energii potrzebnej do wyprodukowania modułu [8]. Strukturę kosztów i energii zużytej w procesie produkcji modułów PV przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Struktura kosztów wytworzenia modułu ogniw krzemowych [6]

Fig. 4. Module producing costs [6]



Rys. 5. Energia potrzebna do wytworzenia modułu krzemowego [6]

Fig. 5. Energy required in the production process of Si PV module [6]

Innym aspektem, związanym ze stale rosnącą ilością instalowanych rocznie na całym świecie modułów fotowoltaicznych, jest ograniczona ilość krzemu wysokiej czystości dostępnego na rynku. Na całym świecie dostarcza go jedynie 7 producentów - głównie z Azji (Chiny, Japonia, Malezja i Korea) oraz USA. Problem ten może rozwiązać prowadzony na szeroką skalę recykling modułów PV, prowadzący do odzyskania całych płytek lub - w przypadku ich uszkodzenia - krzemu, który będzie powtórnie użyty w procesie produkcji.

Produkowane obecnie moduły ogniw krzemowych są laminowane za pomocą EVA (Ethylene Vinyl Acetate). Rozwiązaniem, umożliwiającym łatwe odzyskanie całych, nieszkodzonych płytek krzemowych, jest takie zaprojektowanie konstrukcji modułu, aby można było je łatwo demontować. Proces odzysku płytek krzemowych w celu ich powtórnego użycia przedstawiono na rysunku 6.

Uruchomione instalacje pilotażowe

Tabela 2

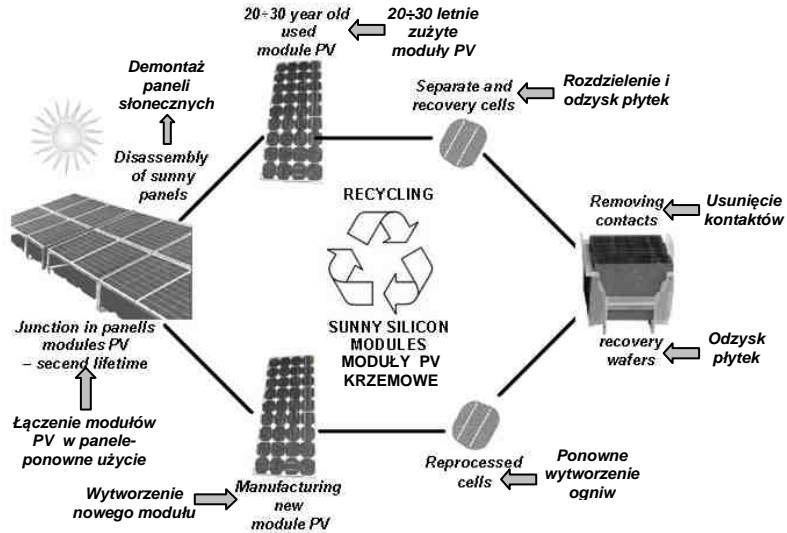
Table 2

Working pilot plants

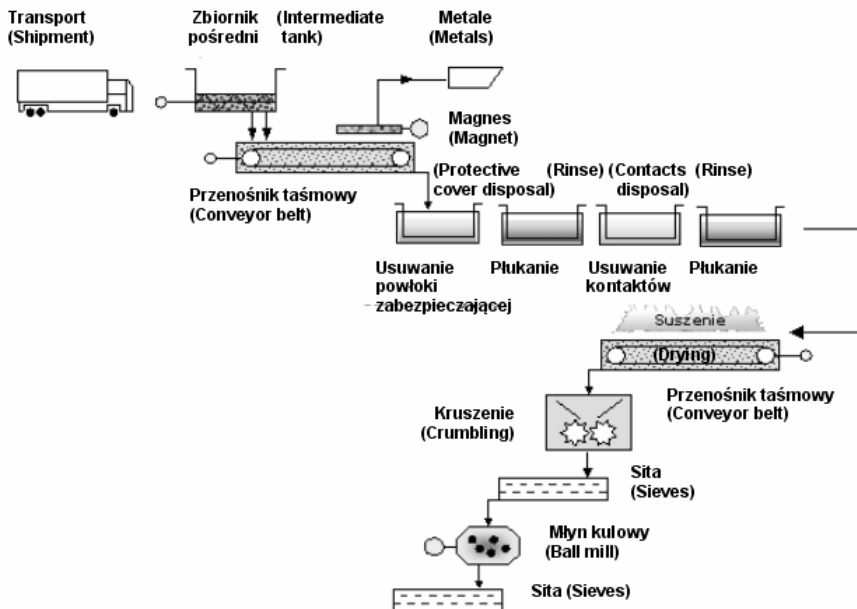
| Fabryka | Kraj | Recykling |
|-------------------|-------------------|--|
| DEUTSCHE SOLAR AG | Niemcy - Freiberg | Odzyskiwanie płytek z modułów z krystalicznego krzemu |
| SHARP | Japonia | Rozwiązania konstrukcyjne dla modułów z krystalicznego krzemu |
| SHOWA SHELL | Japonia | Technologie dla cienkowarstwowych modułów na bazie CIGS (Cu(InGa)Se ₂) |

Podjęmowane są próby opracowania technologii recyklingu przez niektórych producentów modułów PV, funkcjonujące na terenie poszczególnych fabryk. W tabeli 2

przedstawiono uruchomione instalacje pilotażowe, pracujące obecnie na skale laboratoryjną.



Rys. 6. Odzysk oraz ponowne wykorzystanie materiałów - krzemowych modułów PV
 Fig. 6. The recovery and renewed recycling of the materials - photovoltaic silicon modules



Rys. 7. Linia technologiczna do odzysku krzemu wysokiej czystości
 Fig. 7. Technological line for the high purity silicon recovery

Przedstawiona na rysunku 7 prototypowa linia technologiczna została zaprojektowana w naszym laboratorium. Pozwoli ona na półautomatyczną realizację etapu chemicznego recyklingu ogniw z mono- i polikrystalicznego krzemu. Otrzymany materiał w postaci odzyskanych płytek lub materiału (proszku krzemowego o gradacji poniżej 1 μm) zostanie następnie wykorzystany do produkcji nowych ogniw. Jakość przeprowadzonych procesów będzie weryfikowana poprzez pomiar parametrów wytworzonych ogniw: napięcia otwartego obwodu, prądu zwarcia i rezystancji szeregowej.

Literatura

- [1] Katsuya Y., Akimasa U. i Koji O.: *Research and development on recycling and reuse treatment technologies for crystalline silicon photovoltaic modules*. 3rd World Energy Congress on PV Energy. Osaka, Japan 2003.
- [2] Takuya D., Izumi T. i Hiroaki U.: *Experimental study on PV module recycling with organic solvent method*. Solar Energy Materials and Solar Cells 2001, **67**, 397-403.
- [3] Doi T., Tsuda I., Sakuta K. i Matsui G.: *Development of a recyclable PV-module: trial manufacturing and evaluation*. 3rd World Energy Congress on PV Energy. Osaka, Japan 2003.
- [4] Wanbach K.: *Recycling of solar cells and photovoltaic modules*. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France.
- [5] Bombach E., Röver I., Müller A., Schlenker S., Wambach K., Kopecek R. i Wefringhaus E.: *Technical experience during thermal and chemical recycling of a 23 year old PV generator formerly installed on Pellworm Island*. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany.
- [6] Kazmerski L.L.: *Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview*. J. Electron Spectr. Related Phenomena 2006, **150**, 105-135.
- [7] www.azom.com (The A to Z of Materials), Photovoltaics - Safety Issues.
- [8] Radziemska E. i Ostrowski P.: *Analiza cyklu życia modułu słonecznego i jego wpływ na środowisko*. Ekologia i Technika (Ecology and Technology) 2007, **15**(3), 95-97.

RECYCLING AND REUSE TREATMENT OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Summary: The average lifetime of PV modules can be expected to be more than 25 years. End-of-life or damaged modules are at present mostly disposed as industrial or municipal waste, eg as glass or construction and demolition material, what was acceptable for the small amounts in the past. The disposal of spent PV systems will emerge as a problem, considering the ever-increasing production of PV modules. Recycling of such modules can be done at about the same costs as disposal. Transportation can be combined with defective modules from production. The standard procedure for module recycling has a positive environmental balance, but requires large energy consumption. Because the lifetime of PV cell itself is much longer than that of PV module, it is possible to reuse the PV cells, except when the cells are physically damaged. The defects of the modules, which can occur during the exploitation period, can be classified in the following types: glass breakages, the content of damaged cells, laminate defects and defect electrical insulation. By reusing the cells, the significant amount of energy consumed in the manufacture of PV cells can be saved and as a consequence reduce the total cost of PV modules. Simple and low-cost recycling and reuse technologies will contribute in the near future greatly to cut the production cost by reducing drastically the cost of waste disposal. Recovering the silicon wafers from rejected or end-of-life PV modules can lead to economical and environmental benefit. In this paper some of existing recycling and reuse technologies for the used or damaged photovoltaic modules and predicts to its future development are presented.

Keywords: recycling, solar energy, photovoltaic solar cells, renewable energy

