



fot. Andreas Gücklhorn on Unsplash

Dr Krzysztof Broda,  
Katedra Inżynierii Środowiska,  
Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica

Prof. dr hab. inż. Barbara Tora,  
Katedra Inżynierii Środowiska,  
Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica

# Bezpieczna utylizacja, czy recycling PV?

Technologia fotowoltaicznych ogniw słonecznych rozwija się dynamicznie od lat 70. ub. w. Od około trzydziestu lat dzięki polityce energetycznej krajów uprzemysłowionych, wytwarzanie energii fotowoltaicznej stało się komercyjnie opłacalne.

Moc zainstalowana w fotowoltaice sukcesywnie rośnie, a od dwóch lat tempo wzrostu jest niezwykle wysokie. Według SolarPower Europe na koniec ub. r. w 27 państwach członkowskich UE moc zainstalowana w fotowoltaice wyniosła 137,2 GW. Tylko w ciągu 12 miesięcy przybyło prawie 19 GW mocy. Do 2024 r. prognozowany jest prawie dwukrotny wzrost - do poziomu 252 GW.

W historii rozwoju fotowoltaiki w Polsce 2020 r. był rokiem najbardziej dynamicznego wzrostu. Moc zainstalowana w fotowoltaice na koniec 2020 r. wyniosła 3936 MW, co oznacza wzrost o 2 463 MW rok do roku (wzrost o 200% rok do roku) [raport Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej IRENA, <https://www.irena.org/>] Największy wkład w przyrost nowych mocy mieli prosumenci indywidualni.

Według prognoz (Instytutu Energii Odnawialnej, IEO), na koniec 2021 r. moc zainstalowana w PV w Polsce może przekroczyć 6 GW.

Żywotność paneli fotowoltaicznych szacowana jest na 25-30 lat, zatem za kilkanaście lat należy się spodziewać dużej ilości zużytych paneli, które muszą być poddane recyklingowi.

Według szacunku Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (IRENA), wartość rynku recyklingu paneli fotowoltaicznych będzie w najbliższych latach rosła bardzo szybko, głównie w Europie. Prognozuje się około 60-80 mln ton paneli do przetworzenia do 2050 r. Rynek polski jest znacznie mniejszy, ale jeśli weźmiemy pod uwagę panele zainstalowane tylko do 2010 r., to już mówimy o 1,5 mln ton odpadów, które niebawem będą trafiały do recyklingu. Prognozy wskazują także, że łączne obroty na rynku fotowoltaiki w 2021 r. przekroczą 9 mld zł.

Aktualnie odpady z fotowoltaiki traktowane są jako odpady elektryczne i elektroniczne (WEEE).

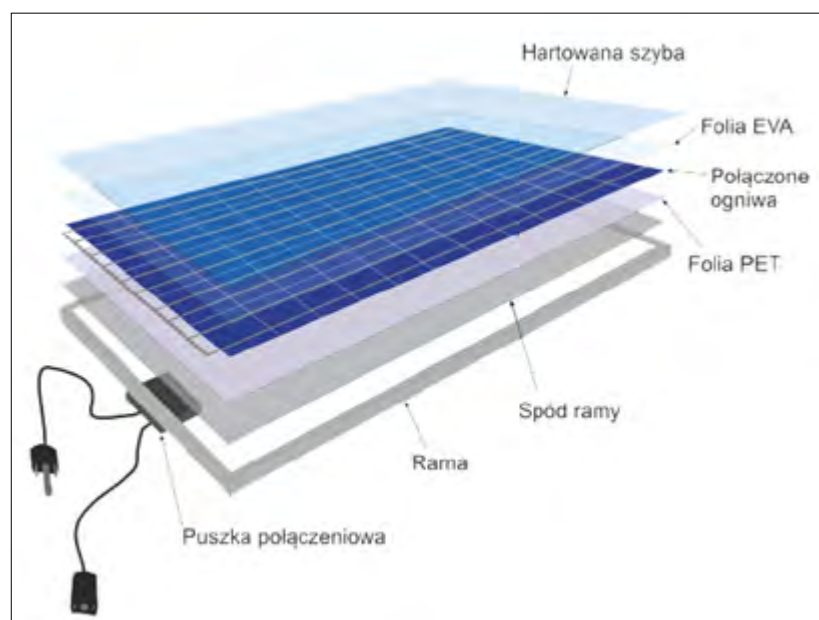
Hierarchię postępowania z odpadami określa Dyrektywa Parlamentu Euro-

pejskiego i Rady 2008/98/WE w sprawie odpadów transponowana do przepisów krajowych.

Hierarchia ta obejmuje pięć elementów: zapobieganie powstawaniu odpadów, przygotowywanie do ponownego



Źródło: [http://publications.europa.eu/resource/cellar/62983c1a-e3ad-11e6-ad7c-01aa75ed71a1.0008.03/DOC\\_1](http://publications.europa.eu/resource/cellar/62983c1a-e3ad-11e6-ad7c-01aa75ed71a1.0008.03/DOC_1)



Źródło: <https://poradnikprojektanta.pl/ogniwa-i-moduly-fotowoltaiczne-zasada-dzialania-i-budowa/>



Fot. Wszystkie zdjęcia wykonane w laboratoriach Wydziału Inżynierii Łądowej i Gospodarki zasobami AGH, wyk. B. Tora

użycia, recykling, inne metody odzysku, np. odzysk energii, unieszkodliwianie.

W laboratoriach Akademii Górniczo-Hutniczej powstaje innowacyjna metoda recyklingu paneli fotowoltaicznych. Władze uczelni wraz ze spółką technologiczno-badawczą 2loop Tech utworzyły w kwietniu 2021 r. konsorcjum w celu przeprowadzenia badań i działań wdrożeniowych. Umowa zawarta w ramach konsorcjum zakłada opracowania technologii blisko 100% recyklingu zużytych paneli fotowoltaicznych. Akademia Górniczo-Hutnicza przeprowadzi badania laboratoryjne oraz opracuje metodę przetwarzania paneli. Badania będą prowadzone w Katedrze Inżynierii Środowiska na Wydziale Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami. Natomiast prace wdrożeniowe oraz uruchomienie prototypowej linii technologicznej nastąpi w zakładzie 2loop Tech w Czaplach k. Torunia. Dziekan Wydziału Prof. Marek Cała oraz Prezes 2LOOP TECH Marcin Karbowniczek przewidują w ramach konsorcjum współpracę międzynarodową m. in. z VSB Technical University w Ostrawie.

2loop Tech jest liderem konsorcjum, odpowiadającym za proces wdrożeniowy projektu. Natomiast za część naukowo-badawczą projektu odpowiada Akademia Górniczo-Hutnicza. Umowa konsor-

cjum zawarta w kwietniu br. przewiduje zakończenie pierwszego etapu badań w 2022 r., a wdrożenie i uruchomienie linii technologicznej do końca 2023 r.

Obecnie większość paneli fotowoltaicznych objęta jest 25-letnią gwarancją producenta, a ich żywotność szacuje się na 25-30 lat. Podczas eksploatacji instalacje PV tracą efektywność energetyczną, a nowe rozwiązania paneli są bardziej energooszczędne. Instalacje fotowoltaiczne składają się nie tylko z paneli, ale zawierają również inne elementy takie jak falowniki, które zamieniają prąd stały na przemienny. Żywotność takich falowników jest krótsza niż paneli, a okres gwarancji wynosi zwykle 10 lat.

W Unii Europejskiej problem odpadów z ogniw PV rozwiązano wprowadzając dyrektywę WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment). Dokument definiuje zużyte panele fotowoltaiczne jako odpady elektroniczne, dla których poziom recyklingu powinien wynosić co najmniej 85%.

Technologia opracowywana w konsorcjum ma na celu zwiększenie poziomu takiego recyklingu, przy zachowaniu konkurencyjnych kosztów.

Najpopularniejszymi modułami fotowoltaicznymi występującymi w instalacjach PV są moduły krzemowe i cien-

kowarstwowe. Składają się z krzemu, szkła, plastiku i miedzi lub innych metali. Ze względu na różnice w strukturze, ich procesy recyklingu są różne. Recykling modułów silikonowych polega na oddzieleniu części aluminiowych (ramy i okablowanie) od części szklanych. Następnie szklane elementy są rozdrabniane i segregowane na poszczególne składniki (szkło, krzem, miedź, plastik) z wykorzystaniem nowoczesnych urządzeń.

Fotowoltaika jak każda dziedzina nauki i techniki ciągle się rozwija. Wynikiem tego rozwoju jest pojawianie się kolejnych generacji ogniw fotowoltaicznych. Historycznie pierwszą generację reprezentują krzemowe ogniwa monokrystaliczne i polikrystaliczne, nad którymi prace rozpoczęto w latach 50 ub. w. Są to ogniwa nieorganiczne. Jednak bardzo wysokie koszty przygotowania krzemu krystalicznego spowodowały poszukiwania innych rozwiązań. Druga generacja ogniw to ogniwa cienkowarstwowe, także nieorganiczne - charakteryzujące się cienką warstwą półprzewodnika wynoszącą ok. 1-3  $\mu\text{m}$ . Są tańsze w produkcji i lżejsze od ogniw krzemowych. Można nakładać je na powierzchnie elastyczne, jednak posiadają trochę niższą sprawność i krótszą żywotność. Problemem może być w przypadku ich

produkcji niedobór na rynku pierwiastków krytycznych. Możemy tutaj zaliczyć ogniwa z: krzemu amorficznego; tellurku kadmu (ogniwa na jego bazie produkują najmniejszy ślad węglowy i przy ich produkcji zużywa się najmniej wody); siarczku kadmu; mieszanin miedzi, galu, selenu i indu; czy wielozłazkowe, które optycznie składają się z układu kilku warstw półprzewodników absorbujących inne części widma słonecznego. Ze względu na toksyczność arsenku galu, który wykorzystuje się najczęściej - problemem staje się bezpieczna utylizacja, czy recykling. W chwili obecnej ogniwa krzemowe stanowią ponad 90% rynku PV. Podział na kolejne generacje, podobnie jak w przypadku komputerów nie jest już tak wyrazisty. Najczęściej przyjmuje się, że trzecią generacją tworzą ogniwa polimerowe i barwnikowe będące ogniwami organicznymi, a czwartą perowskitowe i hybrydowe, w wytwarzaniu których wykorzystuje się zarówno materiały organiczne, jak i nieorganiczne. W ogniwach organicznych najbardziej przełomową cechą jest zastosowanie innej formy złącza p-n. Dzięki czemu osiągnięto większą wydajność zamiany absorbowanego światła na ekscytyny. Jednakże ze względu na mniejszą wydajność procesu konwersji energii niż w ogniwach nieorganicznych końcowa wydajność w przypadku ogniw organicznych jest niższa niż w przypadku tradycyjnych ogniw krzemowych lub cienkowarstwowych. Wadą jest także zmiana z upływem czasu własności powodująca obniżenie wydajności. Zaletami na pewno są niższe koszty materiałów, stosunkowo proste i tanie metody wytwarzania oraz możliwość nanoszenia ogniw organicznych na dowolne powierzchnie w tym podłoża elastyczne.

W ogniwach barwnikowych - Grätzela, możliwe jest oświetlenie ogniwa z każdej strony ze względu na to, że obie elektrody mogą być przezroczyste. Ponadto proces produkcji nie jest bardzo wymagający, a barwniki stosunkowo tanie. Ogniwa barwnikowe są odporne na uszkodzenia mechaniczne i mniej wrażli-



foto: Science in HD on Unsplash

liwe na temperaturę. Kolejny typ ogniw, bardzo dobrze rokujący na przyszłość - to ogniwa perowskitowe, dla których w warunkach laboratoryjnych po 6 latach badań osiągnięto sprawność konwersji energii słonecznej na elektryczną 21.5%, w przypadku ogniw krzemowych po 60 latach badań osiągnięto 25%. Mianowicie współczynnik absorpcji dla perowskitów jest dużo wyższy niż w przypadku krzemu, czy arsenku galu. Oprócz bardzo wielu zalet perowskity posiadają wady ograniczające ich powszechne stosowanie, jak np. bardzo duża wrażliwość na działanie wilgoci, czy zastosowanie ołowiu w strukturach perowskitów zastosowanych do konstrukcji ogniw słonecznych. Ogniwa hybrydowe określa się jako ogniwa wielowarstwowe, w skład których wchodzi dwa lub więcej ogniw różnych typów (generacji). Mają one charakteryzować się niską ceną, nieskomplikowanym procesem wytwarzania, wytrzymałością i wysoką wydajnością. Prace nad nimi trwają.

Panele fotowoltaiczne (moduły PV) krzemowe złożone są z ogniw fotowoltaicznych połączonych ze sobą szeregowo lub równoległe. Tylne strony modułu fotowoltaicznego zabezpieczona jest folią elektroizolacyjną, tzw. backsheet. Ogniwa fotowoltaiczne zalane są folią EVA (etylenowy polioctan winyli), który hermetyzuje ogniwa i chroni je przed działaniem czynników zewnętrznych. Od strony słonecznej przed uszkodzeniami ogniwa chroni szyba ze szkła hartowanego o wysokiej przepuszczalności światła. Dodatkowymi elementami, z których składa się moduł PV, są rama aluminiowa oraz gniazdo przyłączeniowe wraz z okablowaniem. □

ności światła. Dodatkowymi elementami, z których składa się moduł PV, są rama aluminiowa oraz gniazdo przyłączeniowe wraz z okablowaniem.

Proces recyklingu ogniw fotowoltaicznych będzie skoncentrowany na ogniwach nieorganicznych, gdyż stanowią one największy procent rynku PV oraz najwcześniej zostały wprowadzone na rynek. Dlatego też jako pierwsze będą stanowiły odpady - już w połowie lat 20. XXI w. Technologia recyklingu i badania będą rozwijane na kolejne generacje w miarę ich pojawiania się w obiegu surowców wtórnych.

Panel fotowoltaiczny jest zbudowany warstwowo. Moduły PV wytwarza się z pojedynczych ogniw, które są - po wykonaniu połączeń elektrycznych między nimi - laminowane i umieszczane w ramie aluminiowej. Recykling ma za zadanie rozdzielenia poszczególnych materiałów.

Moduły PV krzemowe złożone są z ogniw fotowoltaicznych połączonych ze sobą szeregowo lub równoległe. Tylne strony modułu fotowoltaicznego zabezpieczona jest folią elektroizolacyjną, tzw. backsheet. Ogniwa fotowoltaiczne zalane są folią EVA (etylenowy polioctan winyli), który hermetyzuje ogniwa i chroni je przed działaniem czynników zewnętrznych. Od strony słonecznej przed uszkodzeniami ogniwa chroni szyba ze szkła hartowanego o wysokiej przepuszczalności światła. Dodatkowymi elementami, z których składa się moduł PV, są rama aluminiowa oraz gniazdo przyłączeniowe wraz z okablowaniem. □