

Maciej TORA¹
Marcin KARBOWNICZEK¹
Barbara TORA²

Fotowoltaika w Polsce. Stan aktualny i perspektywy

Wprowadzenie

Odnawialne źródła energii są istotnym elementem rozwoju społeczno-gospodarczego, mającym ogromny wpływ na jakość otaczającego nas środowiska naturalnego i klimatu. Rola odnawialnych źródeł energii rośnie. Wzrastające ceny uprawnień do emisji dwutlenku węgla przy spadających kosztach instalacji odnawialnych źródeł energii (OZE) spowodowały, że zielona energetyka stała się poważną alternatywą dla energetyki tradycyjnej, wykorzystującej paliwa kopalne.

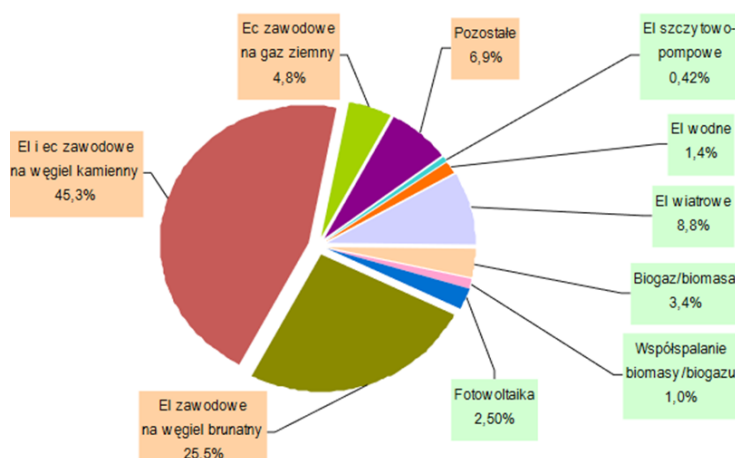
Od około 2000 roku tempo pojawiania się nowych instalacji fotowoltaicznych na świecie zaczęło gwałtownie przyspieszać, a w 2015 całkowita moc ulokowana w tej technologii była szacowana na 220 GW. Według danych udostępnionych przez International Renewable Energy Agency (IRENA) już w 2050 roku liczba ta może przekroczyć 4500 GW.

Zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, państwa członkowskie były zobowiązane do zapewnienia udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w 2020 r. w wysokości 20%; dla Polski cel ten został ustalony na poziomie 15%.

Udział energii ze źródeł odnawialnych w pozyskaniu energii pierwotnej w Polsce ogółem wzrósł w latach 2015–2019 z 13,25 do 15,96%. Struktura pozyskania energii ze źródeł odnawialnych dla Polski wynika przede wszystkim z charakterystycznych dla naszego kraju warunków geograficznych i możliwych do zagospodarowania zasobów. Energia pozyskiwana ze źródeł odnawialnych w Polsce w 2019 r. pochodziła z biopaliw stałych (65,56%), energii

¹ 2LOOP TECH SA, e-mail: mtora@2loop.tech; mkarbo@2loop.tech.

² Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; e-mail: tora@agh.edu.pl.



Rys. 1. Moc elektryczna osiągalna z OZE – dynamika wzrostu za trzy kwartały 2020–2021

Źródło: ARE

Fig. 1. Electrical power achievable from RES – growth dynamics for three quarters 2020–2021

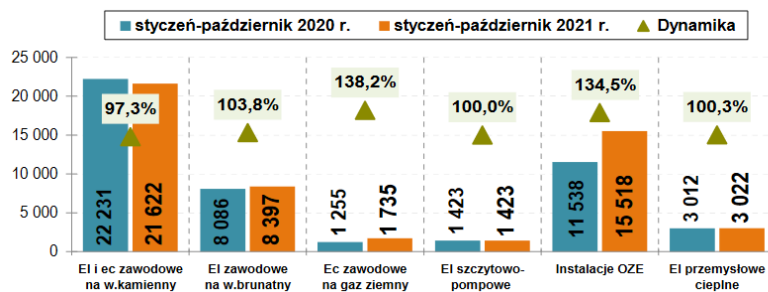
wiatru (13,72%) i z biopaliw ciekłych (10,36%). Łączna wartość energetyczna pozyskanej energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w Polsce w 2019 r. wyniosła 396 498 TJ.

Wśród eksploatowanych obecnie źródeł energii odnawialnej fotowoltaika zajmuje drugą pozycję, a jej udział w czerwcu 2021 r. (w najbardziej sprzyjającym produkcji miesiącu letnim) wynosił 4%. Na pierwszym miejscu w Polsce pod względem produkcji znajduje się energetyka wiatrowa, która stanowiła 5%. Pozostałe źródła energii, czyli m.in. elektrownie wodne i biogazowe pozwalały uzyskać jeden procent produkcji, natomiast biomasowe – 3%.

Na rysunku 2 przedstawiono dynamikę przyrostu mocy zainstalowanych w Polsce za trzy kwartały 2020 roku porównane do 2021 roku.

Na rysunku 3 przedstawiono dynamikę wzrostu osiągalnej mocy elektrycznej ze źródeł odnawialnych za trzy kwartały 2020 i 2021 rok.

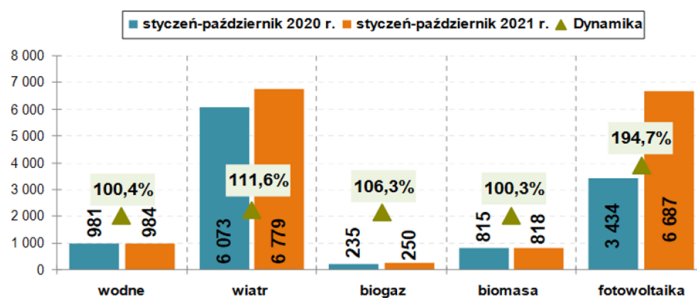
Od kilku lat obserwuje się w Polsce dynamiczny wzrost zainstalowanej mocy w energetyce fotowoltaicznej (rys. 4). W 2020 roku moc zainstalowana wyniosła 887 MW i w stosunku



Rys. 2. Moce elektryczne zainstalowane w Polsce [MW] – dynamika wzrostu za trzy kwartały 2020 do 2021

Źródło: ARE

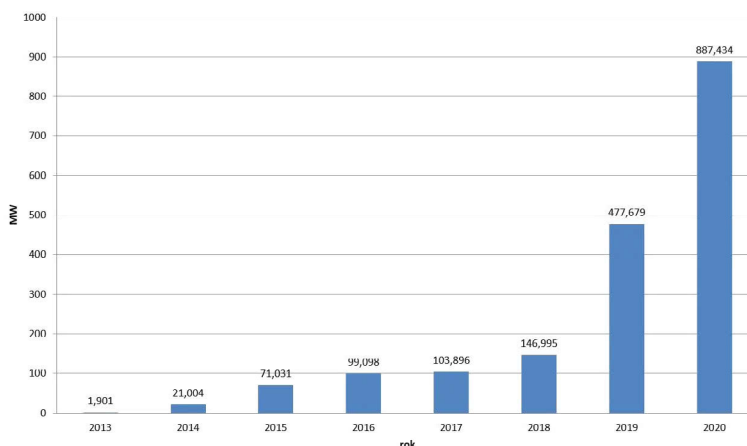
Fig. 2. Electric powers installed in Poland [MW] – growth dynamics for three quarters of 2020 to 2021



Rys. 3. Struktura produkcji energii elektrycznej z OZE w Polsce [MW] (styczeń–październik w 2020 i 2021)

Źródło: ARE

Fig. 3. Energy produced from renewables in Poland [MW] (January–October 2020 and 2021)



Rys. 4. Instalacje wykorzystujące energię promieniowania słonecznego w Polsce [MW]

Źródło: URE

Fig. 4. Installations using the energy of solar radiation in Poland [MW]

do 2014 roku wzrost był 42-krotny. Według stanu na dzień 30 września 2021 roku [PSE] moc zainstalowana w fotowoltaice w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym osiągnęła poziom 6126 MW. Według danych Agencji Rynku Energii na koniec września 2021 roku, moc zainstalowana we wszystkich źródłach wytwórczych w Polsce wyniosła 53 274,6 MW.

Rodzaje paneli fotowoltaicznych

Obecnie, instalacje fotowoltaiczne (zarówno w przypadku fotowoltaiki dla domu, jak i fotowoltaiki dla firm) zwykle opierają się na jednym z dwóch typów modułów – krzemowym lub cienkowarstwowym.

Ogniwa tzw. pierwszej generacji obejmują ogniwa z krzemu monokrystalicznego i polikrystalicznego. Modele monokrystaliczne charakteryzują się wysoką wydajnością, wyni-

kającą z technologii rozwijanych od wielu lat. To właśnie wśród nich znajdują się panele o najwyższych parametrach. Druga generacja to przede wszystkim ogniwa z krzemu amorficznego, a także ogniwa z arsenku galu, tellurku kadmu, mieszaniny miedzi, indu, galu i selenu, ogniwa wielozłączowe i inne konstrukcje cienkowarstwowe.

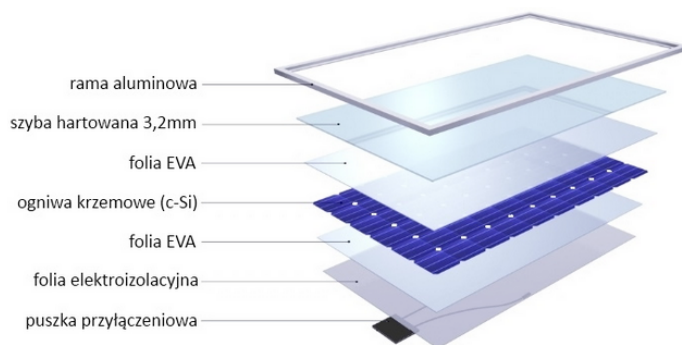
Ogniwa nowszych generacji zazwyczaj nie są bardziej skuteczne, niemniej mają inne zalety: są cieńsze, tańsze w produkcji, można je instalować w zupełnie inny sposób, np. poprzez integrację z elewacją budynku lub dachem; niestety są mniej trwałe.

Natomiast wśród ogniw pierwszej generacji modele krzemowe polikrystaliczne są tańsze niż monokrystaliczne, gdyż produkcja płytek podłożowych do nich jest znacznie prostsza. Wystarczy, by krzem uległ krystalizacji i był odpowiednio czysty (zazwyczaj na poziomie 99,9999%).

Rodzaj ogniwa jest łatwo odróżnić, modele monokrystaliczne mają jednolitą barwę, najczęściej niemal czarną, ogniwa polikrystaliczne są najczęściej bardziej niebieskie i mieniają się w świetle. Głównym surowcem do produkcji, zarówno mono-, jak i polikrystalicznych ogniw fotowoltaicznych jest wysokiej czystości krzem krystaliczny (c-Si).

Budowa panelu fotowoltaicznego

Ogniwa fotowoltaiczne są łączone w panele. Panel składa się z szeregu ułożonych obok siebie ogniw, których elektrody są ze sobą połączone (rys. 5). Ogniwa charakteryzują się znaczną kruchością gdyż są niezwykle cienkie (I generacji – 0,1–0,3 mm, II generacji płytki podłożowe mają grubość poniżej 0,2 mm). Dlatego całość pokrywa się szkłem hartowanym, które nadaje panelowi grubość i zabezpiecza elektronikę przed uszkodzeniami. Następnie szkło pokrywa się warstwą uszczelniającą (folią), która chroni przed warunkami atmosferycznymi – głównie przed wilgocią i dostępem tlenu. Folia jest najczęściej poli(etylenu-co-octanu winylu), nazywany folią EVA (ang. *Etylene-Vinyl Acetate*); stosuje się ją i od góry i od dołu ogniwa.



Rys. 5. Budowa panelu PV

Źródło: selfa, <https://www.selfa-pv.com/>

Fig. 5. PV panel – construction

Na szkło nakłada się kolejne warstwy antyrefleksyjne, sprawiające, że przechodzi przez nie więcej światła.

Recykling paneli fotowoltaicznych

Żywotność paneli fotowoltaicznych szacuje się na około 25–30 lat. Zatem można się spodziewać, że około 2030 roku zaczniemy mieć do czynienia z dużą ilością odpadowych paneli. Aby zbudować efektywny system recyklingu, potrzebne są rozwiązania systemowe.

Według szacunków Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (International Renewable Energy Agency, IRENA) rynek recyklingu paneli fotowoltaicznych osiągnie w 2030 roku wartość 450 mln dolarów, a w roku 2050 nawet 15 mld dolarów.

Według wyliczeń amerykańskiego Departamentu Energii, około 95% sprzedawanych obecnie paneli jest wyprodukowanych z krzemu krystalicznego, a więc ich ogniwa fotowoltaiczne wykonane są z półprzewodników krzemowych. Skład chemiczny paneli przedstawiono w tabeli 1.

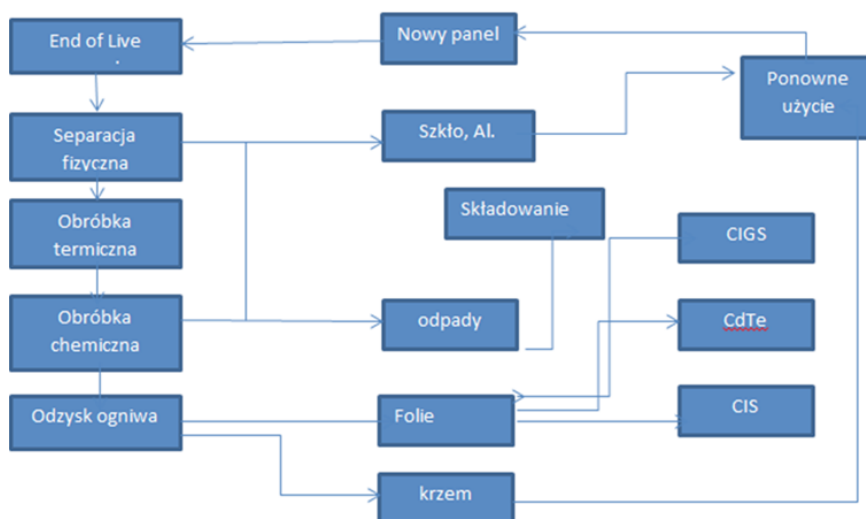
TABELA 1. Skład chemiczny paneli fotowoltaicznych

TABLE 1. Chemical composition of photovoltaic panels

Składnik	Krzemowe c-Si [%]	CIGS [%]	CdTe [%]
Szkło	74	88	96
Glin	12,8	7,0	0
Folia EVA	9,0	4,0	0
Miedź	0,1	0,1	0
Srebro	0,1	0	3,4
Ind	0	0,28	0,04
Gal	0	0,1	0
Selen	0	0,52	0
Nikiel	0	0	0
Cynk	0	0	0,1
Cyna	0	0	0,12
CdTe	0	0	0,15

Źródło IRENA.

W 2020 roku inicjatywę budowy instalacji recyklingu ogniw fotowoltaicznych w Polsce podjęła firma 2LOOP TECH SA.



Rys. 6. Schemat recyklingu ogniw fotowoltaicznych

Fig. 6. Recycling process of photovoltaic cells

Schemat projektowanej instalacji przedstawiono na rysunku 6.

Panele fotowoltaiczne trudno poddają się recyklingowi. Są bardzo wytrzymałe i utworzone z wielu różnych materiałów. Recykling paneli jest prowadzony wieloetapowo. Pierwszym etapem jest oddzielenie aluminiowej ramy i kabli połączeniowych. Kolejny panel jest rozdrabniany. Po rozdrobieniu panel fotowoltaiczny jest poddawany serii procesów, które pozwalają odzyskać poszczególne metale. Odzyskanie krystalicznego krzemu następuje w procesie ługowania chemicznego.

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe etapy recyklingu. Najłatwiejsze do przetworzenia są elementy szklane i aluminiowe. Trudniejsze do recyklingu są płytki krzemowe, które przetapia się i wykorzystuje ponownie w nowych modułach PV.



Rys. 7. Etapy recyklingu ogniw PV

Fig. 7. Stages of recycling of PV cells

Inne elementy poddaje się utylizacji w wysokiej temperaturze, nawet do 500°C. Części plastikowe są odparowywane (Zgłoszenie patentowe 2021). Odzysk materiałowy całego panelu jest bliski 99,9%.

Międzynarodowa Agencja Energii Odnawialnej w swoim raporcie oszacowała, że masa surowców wtórnych z fotowoltaiki, która powstanie do 2050 roku to 78 mln ton. 2LOOP TECH SA. planuje wybudowanie instalacji pilotażowej do recyklingu o wydajności 50 000 sztuk paneli rocznie.

Podsumowanie

Odnawialne źródła energii (energia wiatrowa, słoneczna, hydroelektryczna, energia oceanów, energia geotermalna, biomasa i biopaliwa) stanowią alternatywę dla paliw kopalnych i przyczyniają się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, zróżnicowania dostaw energii oraz zmniejszania zależności od niepewnych i niestabilnych rynków paliw kopalnych, zwłaszcza ropy i gazu.

Unijne prawodawstwo dotyczące promowania odnawialnych źródeł energii znacznie ewoluowało w ostatnich piętnastu latach. W 2009 r. przywódcy unijni wyznaczyli cel, zgodnie z którym do 2020 r. 20% zużycia energii w Unii ma pochodzić z odnawialnych źródeł. W 2018 r. uzgodniono cel na rok 2030: do tego czasu 32% zużycia energii w Unii ma pochodzić z odnawialnych źródeł. W lipcu 2021 r., w związku z nowymi ambicjami UE w dziedzinie klimatu, zaproponowano współprawodawcom zmianę celu na 40% do 2030 r. Trwają też rozmowy na temat przyszłych ram polityki na okres po 2030 r.

Zainteresowanie rynku OZE recyklingiem paneli PV jest ogromne. Według raportu *Europe Solar Panel Recycling Market 2020–2027* opracowanego przez analityków Research&Markets, wartość rynku recyklingu paneli fotowoltaicznych w Europie w 2020 roku wyniosła 49,1 mln dolarów. Eksperti przewidują, że w latach 2020–2027 rynek ten będzie rósł o 19 proc. rocznie. W efekcie wartość rynkowa branży recyklingowej w Europie wzrośnie do poziomu 165,8 mln dolarów.

Aktualnie niskie ceny paneli powodują, że stały się one powszechne. Można je wykorzystywać w domowych mikroinstalacjach, a także w farmach o dużej mocy. Największy park solarny (Pavagada) uruchomiono w Indiach. Panele PV zajmują 53 km², a ich moc zainstalowana wynosi 2050 MW.

Dla rozwoju rynku fotowoltaiki w Polsce znaczący wpływ miał program „Mój Prąd”. Dofinansowanie do fotowoltaiki jest również wpisane w ogólnopolski program „Czyste Powietrze”. Zmiana w ustawie o wspieraniu termomodernizacji i remontów, która weszła w życie 12 kwietnia 2021 r., wprowadziła wyższą premię termomodernizacyjną za montaż w budynkach odnawialnych źródeł energii, w tym paneli fotowoltaicznych. Premia wyniesie 21% kosztów przedsięwzięcia. Właściciele domów jednorodzinnych i wielorodzinnych mogą po nią sięgnąć nawet przy instalacji słonecznej o mocy do 50 kW.

Literatura

- ARE. [Online] <https://www.arenawaw.pl/badania-statystyczne/wynikowe-informacje-statystyczne> [Dostęp 01.01.2022].
- Curtis i in. 2021 – Curtis, T.L., Buchanan, H., Heath, G., Ligia Smith, L. and Shaw, S. 2021. *Solar Photovoltaic Module Recycling: A Survey of U.S. Policies and Initiatives*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-74124. [Online] <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/74124> [Dostęp: 1.01.2021].
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych. [Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L2001&from=PL> [Dostęp: 1.01.2021].
- IRENA – International Renewable Energy Agency. [Online] www.irena.org [Dostęp: 1.01.2021].
- Karbowiczek M. 2021. *Technologie krzemowe ogniw fotowoltaicznych na rynku*. [Online] <https://budownictwo-b2b.pl/instalacje/baza-wiedzy/fotowoltaika/51980-technologie-krzemowe-ogniw-fotowoltaicznych-na-ryнку> [Dostęp 1.01.2021].
- [Online] https://inzynieria.com/energetyka/odnawialne_zrodla_energii/rankingi/58459,odnawialne-zrodla-energii-w-polsce-i-na-swiecie [Dostęp: 1.01.2021].
- [Online] <file:///C:/Users/Dell/AppData/Local/Temp/sytuacja-kwartalnik-III-2021.pdf> [Dostęp: 1.01.2021].
- [Online] <https://globenergia.pl/pse-moc-zainstalowana-w-fotowoltaice-siega-poziomu-6126-mw/> [Dostęp: 1.01.2021].
- [Online] https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_pl [Dostęp: 1.01.2021].
- Polityka energetyczna Polski do 2040 r. [Online] <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polski> [Dostęp: 1.01.2021].
- Polskie Sieci Energetyczne „Zestawienie danych ilościowych dotyczących funkcjonowania KSE w 2020 roku”. [Online] https://www.pse.pl/pl_PL/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-roczne-z-funkcjonowania-kse-za-rok/raporty-za-rok-2020 [Dostęp: 1.01.2021].
- Selfa. [Online] <https://www.selfa-pv.com/> [Dostęp: 1.01.2021].
- URE. [Online] <https://www.ure.gov.pl> [Dostęp: 1.01.2021].
- Zgłoszenie patentowe 2021 – Zgłoszenie patentowe P.438735 Sposób recyklingu krzemowych paneli fotowoltaicznych [WIPO ST 10/C PL438735] Zgłaszający: 2LOOP TECH SPÓŁKA AKCYJNA, Warszawa, Polska.

Fotowoltaika w Polsce. Stan aktualny i perspektywy

Słowa kluczowe: fotowoltaika, panele PV, odnawialne źródła energii, recykling paneli

Streszczenie: W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój fotowoltaiki. Moc paneli słonecznych zainstalowanych w Polsce na początku 2021 roku wyniosła prawie 4 GW i wzrosła w ciągu roku o ponad 100%. W artykule przedstawiono analizę udziału energii z fotowoltaiki w odnawialnych źródłach energii. Scharakteryzowano rynek paneli fotowoltaicznych i tendencje rozwoju. Okres żywotności paneli fotowoltaicznych jest szacowany na 25–30 lat, zatem po 2030 roku spodziewana jest rosnąca ilość paneli, które będą poddawane recyklingowi. Przedstawiono plany instalacji recyklingu ogniw zaproponowane przez firmę 2LOOP TECH SA.

Photovoltaics in Poland. Current status and prospects

Keywords: photovoltaic, PV panels, renewable energy sources, panel recycling

Abstract: In recent years, a dynamic development of photovoltaics has been observed. The power of solar panels installed in Poland at the beginning of 2021 amounted to almost 4 GW and increased by over 100% during the year. The article presents an analysis of the share of photovoltaic energy in renewable energy sources. The market of photovoltaic panels and development trends were characterized. The life cycle of panels is discussed. The duration of the photovoltaic panels is reduced to 25–30 years, while after 2030 the increasing number of panels, which will be subject to recycling, is considered. A plan for the installation of recycling was presented by 2LOOP TECH SA.