

*Electrolysers in hydrogen production. A review of technologies***Elektrolizery w produkcji wodoru. Przegląd technologii**

DOI: 10.15199/62.2025.10.12

A review, with 11 refs., of water electrolysis technologies for H₂ prodn. The main types of electrolyzers were discussed and compared. Their operating principles, efficiency, and potential for integration with renewable energy sources were analyzed. Key technical and economic barriers to the development of electrolysis technologies were identified.

Keywords: hydrogen, electrolysis, electrolyzer

Przedstawiono przegląd technologii elektrolizerów stosowanych do produkcji wodoru. Omówiono i porównano dostępne systemy elektrolizy wody. Przeanalizowano ich zasadę działania, sprawność oraz możliwości integracji z odnawialnymi źródłami energii. Zidentyfikowano kluczowe bariery techniczne i ekonomiczne ograniczające rozwój technologii elektrolizy.

Słowa kluczowe: wodór, elektroliza, elektrolizery

W obliczu wdrażania strategii zielonej transformacji, ukierunkowanej na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych oraz zahamowanie postępujących zmian klimatycznych, kluczowe sektory gospodarki, w szczególności energetyka, transport oraz wybrane gałęzie przemysłu, podlegają intensywnej modernizacji technologicznej. Wśród tych zmian szczególne znaczenie ma rozwój technologii wodorowych, postrzeganych jako perspektywiczne rozwiązanie dla wielu branż. Szczególne znaczenie przypisuje się produkcji wodoru odnawialnego, której wdrożenie pozwala na niemal bezemisyjne wytwarzanie tego nośnika^{1,2)}.

Wodór postrzegany jest jako obiecujący, czysty nośnik energii o znaczącej roli w kierunku transformacji zrównoważonej i niskoemisyjnej gospodarki. Charakteryzuje się korzystnymi właściwościami fizycznymi i chemicznymi, takimi jak m.in. wysoka gęstość energetyczna^{3, 4)}. Obecnie jednak dominującymi metodami produkcji wodoru są te wykorzystujące paliwa kopalne, co przyczynia się do znacznej emisji gazów cieplarnianych. Te metody (m.in. parowy reforming metanu) odpowiadają za ponad 90% globalnej produkcji wodoru⁴⁾. W obliczu rosnącej potrzeby dekarbonizacji szczególne znaczenie zyskuje proces elektrolizy, który wyróżnia się jako kluczowa, alternatywna technologia produkcji wodoru o zerowej emisji bezpośredniej, gdy do jej

zasilania wykorzystuje się energię odnawialną⁵⁾. Taki wodór nazywany jest zielonym wodorem. Zgodnie ze strategią wodorową Unii Europejskiej zielony wodór odegra istotną rolę w transformacji energetyki, transportu i przemysłu, gdzie dekarbonizacja jest szczególnie trudna i kosztowna⁶⁾. Elektroliza wody stanowi zatem kluczowy element strategii zrównoważonego rozwoju, zwłaszcza biorąc pod uwagę szerokie możliwości zastosowania wodoru w różnych branżach.

Proces elektrolizy i elektrolizery

Proces elektrolizy wyróżnia się jako jedna z najskuteczniejszych metod wytwarzania wodoru z wody. Elektroliza wody jest zrównoważoną technologią rozkładu wody na wodór i tlen za pomocą energii elektrycznej, o znaczącym potencjale dla badań i zastosowań przemysłowych. Dzięki temu procesowi możliwe jest uzyskanie czystego wodoru, którego produkcja nie generuje bezpośrednich emisji gazów cieplarnianych, pod warunkiem zastosowania energii z odnawialnych źródeł. Elastyczność i skalowalność elektrolizy sprawiają, że jest ona odpowiednia zarówno dla małych systemów zasilanych, np. pojedynczą turbiną wiatrową, jak i dla dużych rozbudowanych instalacji, które mogą być zintegrowane z siecią elektroenergetyczną^{1, 5, 7)}.



Dr hab. inż. Katarzyna STOLECKA-ANTCZAK, prof. PŚ (ORCID: 0000-0001-6247-3987), w roku 2013 uzyskała stopień doktora, a w 2022 r. stopień doktora habilitowanego na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obecnie pracuje na stanowisku profesora uczelni w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych na tym samym wydziale. Specjalność – ocena skutków awarii maszyn, urządzeń i instalacji energetycznych.



Mgr inż. Mateusz KLEJNOWSKI jest doktorantem w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach oraz głównym specjalistą energetykiem ds. nadzoru w JSW Koks SA w Zabrzu. Obecnie realizuje doktorat wdrożeniowy pt. „Wzbogacanie gazu koksowniczego w wodór odnawialny w celu redukcji emisji CO₂ z przemysłowych jednostek wytwórczych”. Specjalność – odnawialne źródła energii, gospodarka wodorowa oraz projekty B+R+I.

*** Adres do korespondencji:**

Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, tel.: (32) 237-23-60, e-mail: katarzyna.stolecka@polsl.pl

Proces elektrolizy prowadzony jest z wykorzystaniem różnych typów elektrolizerów, niektóre z nich są znane od ponad dwóch wieków. Elektrolizery są zazwyczaj zasilane prądem stałym i składają się z 2 elektrod, katody (elektroda ujemna) oraz anody (elektroda dodatnia) zanurzonych w elektrolicie. Gdy prąd przepływa przez elektrolit, następuje rozkład wody na wodór i tlen. Elektrolizery mogą funkcjonować w 3 głównych stanach roboczych, którymi są produkcja, spoczynek i czuwanie. W stanie produkcyjnym elektrolizer wytwarza wodór na podstawie dostępnej mocy wejściowej, w stanie czuwania elektrolizer nie prowadzi aktywnej produkcji, ale warunki pracy (ciśnienie i temperatura) są utrzymywane, a w stanie spoczynku elektrolizer jest odłączony od zasilania, rozhermetyzowany i utrzymywany w temperaturze otoczenia⁸⁾. Najczęściej elektrolizery dzieli się ze względu na 4 główne technologie, które różnią się między sobą m.in. temperaturą pracy i wykorzystanym elektrolitem, co z kolei wpływa na dobór różnych materiałów i komponentów. Istnieją 4 rodzaje elektrolizerów: elektrolizery alkaliczne (AEL), elektrolizery z membraną polimerową (PEM), elektrolizery z membraną anionową (AEM) i elektrolizery z tlenkiem stałym (SOEC)¹⁾.

Elektrolizery alkaliczne (AEL)

Elektrolizery alkaliczne charakteryzują się stosunkowo prostą konstrukcją i są uznawane za sprawdzone technologicznie, niezawodne rozwiązanie. Jest to technologia komercyjnie dostępna i szeroko stosowana w przemyśle na dużą skalę. Charakteryzują się wydajnością na poziomie 50–78%, w zależności od warunków operacyjnych i konfiguracji. W elektrolizerach alkalicznych stosuje się ciekły elektrolit, najczęściej jest to roztwór wodorotlenku potasu, choć wykorzystuje się również wodorotlenek sodu. Proces polega na zanurzeniu 2 elektrod w elektrolitycznym roztworze, z przeponą umieszczoną między nimi w celu ułatwienia ruchu jonów wodorotlenkowych (OH⁻). Elektrody wykonane są zwykle z niklu lub jego stopów, co pozwala ograniczyć koszty materiałowe w porównaniu z technologiami wymagającymi zastosowania metali szlachetnych. Do głównych zalet elektrolizerów alkalicznych należą mniejsze nakłady inwestycyjne, koszt kapitałowy elektrolizerów wynosi 500–1400 USD/kW, co czyni je konkurencyjnymi w porównaniu z innymi elektrolizerami. Dodatkowo technologia ta wyróżnia się długą żywotnością, sięgającą nawet kilkudziesięciu tysięcy godzin pracy. Elektroliza alkaliczna pozwala uzyskać wodór o bardzo wysokiej czystości, przekraczającej 99,999%. Do ograniczeń technologii AEL należy zaliczyć relatywnie niską gęstość prądu (mniej niż 0,45 A/cm²), co przekłada się na większe rozmiary urządzeń przy tej samej wydajności. Sprawność energetyczna jest mniejsza niż w przypadku nowoczesnych elektrolizerów PEM lub SOEC. Dodatkowo, korozyjny charakter elektrolitu alkalicznego stawia wysokie wymagania materiałowe dla elementów konstrukcyjnych. Elektrolizery te cechują się również dłuższym czasem rozruchu i wolniejszą reakcją na zmieniające się warunki obciążenia, co ogranicza ich przydatność w aplikacjach opartych na niestabilnych źródłach odnawialnych, takich jak energia wiatrowa i słoneczna^{1, 3–8)}.

Elektrolizery z membraną polimerową (PEM)

Elektrolizery z membraną polimerową cechują się prostą konstrukcją, dużą elastycznością oraz wysoką sprawnością, w zakresie 50–83%, zależnie od warunków pracy i konfiguracji systemu. Są one powszechnie stosowane w systemach na małą i średnią skalę. Mają jedną z najbardziej kompaktowych konstrukcji w porównaniu z elektrolizerami alkalicznymi, urządzenia PEM charakteryzują się mniejszą powierzchnią zabudowy, przy porównywalnej wydajności produkcji wodoru. Elektrolizery z membraną polimerową wytwarzają wodór o czystości ponad 99,99%, osiągając w niektórych przypadkach 99,999%. Elektrolizer PEM składa się z anody i katody rozdzielonych membraną polimerową, która pełni funkcję stałego elektrolitu przewodzącego protony. Najczęściej stosowanymi materiałami są polimery (np. Nafion), umożliwiające selektywny transport jonów wodorowych (H⁺) z anody do katody. Jednym z głównych ograniczeń technologii PEM jest konieczność stosowania katalizatorów z metali szlachetnych. Na anodzie wykorzystywany jest zazwyczaj ditlenek irydu lub ditlenek rutenu, natomiast na katodzie platyna lub jej stopy. Materiały te są niezbędne nie tylko do zapewnienia długoterminowej stabilności i wydajności ogniwa. Ich zastosowanie znacząco podnosi koszt produkcji urządzeń, a koszt kapitałowy elektrolizerów PEM szacuje się obecnie na poziomie 1100–1800 USD/kW. Do zalet technologii PEM należy również możliwość pracy przy wysokich gęstościach prądu. Standardowo osiągane są wartości do 3 A/cm², jednak najnowsze badania wskazują na możliwość pracy przy gęstości 10 A/cm², a nawet do 20 A/cm². Elektrolizery PEM cechują się również krótkim czasem rozruchu oraz szybkim czasem reakcji na zmiany obciążenia, co czyni je szczególnie odpowiednimi do współpracy ze źródłami energii odnawialnej, takimi jak np. energetyka wiatrowa. Do głównych wyzwań technologii PEM, oprócz wysokich kosztów katalizatorów, należy również ograniczona trwałość membrany i innych komponentów ogniwa, co przekłada się na krótszy czas eksploatacji w porównaniu z technologią alkaliczną. Trudność stanowi również skalowanie technologii do zastosowań wielkoskalowych, np. przemysłowych, z uwagi na ograniczenia materiałowe i kosztowe. Obecnie rozwój technologii elektrolizy PEM koncentruje się na zwiększeniu trwałości materiałów elektrodowych i membranowych, optymalizacji systemowej, a także zmniejszeniu zużycia metali szlachetnych poprzez zastosowanie alternatywnych materiałów katalitycznych. Istotnym kierunkiem badań pozostaje również efektywna integracja systemów PEM z odnawialnymi źródłami energii^{1, 3–8)}.

Elektrolizery z membraną anionową (AEM)

Elektrolizery z membraną anionową stanowią technologię łączącą korzystne cechy elektrolizerów alkalicznych i PEM. Główną zaletą tej technologii jest możliwość prowadzenia procesu w zasadowym środowisku przy zastosowaniu stałego polimerowego elektrolitu, co umożliwia użycie katalizatorów z metali nieszlachetnych, takich jak nikiel, kobalt i żelazo, zamiast droższych metali szlachetnych (platyna, iryd). Elektrolizery AEM wykazują podobieństwo systemowe do elektrolizerów PEM

wynikające przed wszystkim ze zwartej i stosunkowo prostej konstrukcji, przy czym elektrolizery tego typu charakteryzują się mniejszymi kosztami inwestycyjnymi. Ponadto ze względu na szybki czas reakcji na zmienne warunki pracy mogą być z powodzeniem integrowane z odnawialnymi i przerywanymi źródłami energii, takimi jak energia słoneczna i wiatrowa. Równocześnie elektrolizery AEM są obecnie najmniej dojrzałą technologią niskotemperaturowej elektrolizy wody, a wiele aspektów operacyjnych i materiałowych nadal pozostaje przedmiotem intensywnych badań. Główne ograniczenia związane są z ograniczoną stabilnością chemiczną i mechaniczną membran, co prowadzi do degradacji struktury polimeru i niestabilnego profilu żywotności; słabą architekturą elektrod i powolną kinetyką reakcji elektrochemicznych, ograniczającą gęstość prądu i ogólną sprawność systemu. Dodatkowym wyzwaniem jest brak wystarczających danych operacyjnych dla pracy przy wysokich różnicach ciśnień oraz w szerokim zakresie mocy, co stanowi istotną barierę dla skalowania technologii do poziomu przemysłowego. Mimo tych ograniczeń elektroliza AEM pozostaje obiecującym kierunkiem rozwoju technologii wytwarzania zielonego wodoru. Aktualne badania koncentrują się na poprawie stabilności membran, zwiększeniu efektywności katalizatorów oraz optymalizacji konstrukcji systemowej^{1, 3, 4, 9, 10}.

Elektrolizery z tlenkiem stałym (SOEC)

Elektrolizery z tlenkiem stałym wykorzystują ceramiczny elektrolit, najczęściej tlenek cyrkonu stabilizowany itrem. Elektrody w elektrolizerach SOEC często wykonywane są z ceramiki. Pracują w temperaturach znacząco wyższych niż elektrolizery alkaliczne i PEM, typowo w zakresie 800–1000°C. Tak wysoka temperatura pozwala osiągnąć m.in. korzystną kinetykę reakcji elektrochemicznych, co zmniejsza wymaganą energię aktywacji oraz obniża straty związane z transportem jonów. Jednakże wysoka temperatura pracy prowadzi równocześnie do przyspieszonej degradacji stosowanych materiałów. Elektrolizery stałotlenkowe charakteryzują się wszechstronnością, wysoką wydajnością oraz dużą tolerancją na zanieczyszczenia. Ogniwa SOEC wyróżniają się wysoką sprawnością termodynamiczną, zwłaszcza gdy są wspierane przez źródła ciepła (odpadowe lub odnawialne), przez co zapotrzebowanie na energię elektryczną na jednostkę produkowanego wodoru jest mniejsze. Co więcej, technologia SOEC umożliwia integrację z procesami chemicznymi, takimi jak współelektroliza pary wodnej i ditlenku węgla, co pozwala produkować syntetyczne paliwa/chemikalia i podnosi ogólną efektywność systemu. Wadami tej technologii są wysokie koszty inwestycyjne związane m.in. ze stosowaniem ceramiki odpornej na wysokie temperatury i konstrukcją ogniw. Wyzwaniem pozostaje również kwestia ograniczonej żywotności ogniw, a także wyzwania operacyjne i bezpieczeństwa wynikające z ekstremalnych warunków temperaturowych^{1–8}.

Podsumowanie

W obliczu transformacji energetycznej i dążenia do dekarbonizacji kluczowych sektorów gospodarki, produkcja

zielonego wodoru z wykorzystaniem elektrolizy staje się technologią o istotnym znaczeniu. Integracja elektrolizerów z odnawialnymi źródłami energii, takimi jak energia słoneczna i wiatrowa, umożliwia nie tylko zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, lecz również wspiera rozwój zrównoważonych systemów energetycznych. Stosy elektrolizerów zasilane energią odnawialną pozwalają na efektywne magazynowanie nadwyżek wytwarzanej energii elektrycznej poprzez jej przekształcenie w wodór gazowy za pomocą elektrolizy. Wodór ten może następnie zostać wykorzystany jako czyste, wydajne źródło energii w okresach obniżonej produkcji energii, wspierając bilansowanie sieci elektroenergetycznej i zwiększając elastyczność systemu. Pomimo licznych zalet, technologia elektrolizy napotyka istotne wyzwania związane z kosztami inwestycyjnymi, wydajnością, niezawodnością działania oraz ograniczoną trwałością komponentów. Kluczowe znaczenie dla szerokiego wdrożenia tej technologii mają takie czynniki, jak stabilność operacyjna, skalowalność, długość eksploatacji systemów oraz zmniejszenie kosztów inwestycyjnych, zwłaszcza w kontekście kosztów materiałów stosowanych do wytwarzania katalizatorów, elektrod i membran. W odpowiedzi na te wyzwania prowadzone są intensywne prace badawczo-rozwojowe nad rozwojem bardziej wydajnych i trwałych elektrokatalizatorów, zastosowaniem alternatywnych, tańszych materiałów, udoskonaleniem właściwości membran i elektrolitów, a także projektowaniem innowacyjnych konfiguracji ogniw. Postęp w obszarze materiałoznawstwa, chemii oraz inżynierii stanowi więc fundament dalszego rozwoju technologii elektrolizy i jej potencjalnego wkładu w przyszłościową, niskoemisyjną gospodarkę^{4, 5, 11}.

Praca została zrealizowana przy wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach programu Doktorat wdrożeniowy VII M(I) (grant nr 08/050/SDW23/0335): „Wzbogacanie gazu koksowniczego w wodór odnawialny w celu redukcji emisji CO₂ z przemysłowych jednostek wytwórczych”.

Otrzymano: 18-09-2025

Zrecenzowano: 19-09-2025

Zaakceptowano: 19-09-2025

Opublikowano: 20-10-2025

LITERATURA

- [1] IRENA, *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi 2020.
- [2] G.R. Sanny, J.V. Girish, N. Kulshrestha, *JETIR* 2024, **11**, nr 10, 624.
- [3] S. Sebbahi, A. Assila, A.A. Belghithi, S. Laasri, S. Kaya, E.K. Hlil, S. Rachidi, A. Hajjaji, *Int. J. Hydrogen Energy* 2024, **82**, 583.
- [4] M. El-Shafie, *Results Eng.* 2023, **20**, 101426.
- [5] R. Cozzolino G. Bella, *Front. Energy Res.* 2024, **12**, 1358333.
- [6] M. Brzęczek, *Technologie Power-To-Fuel z transformacją zielonego wodoru*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2025.
- [7] M. Tofighi-Milani, S. Fattaheian-Dehkordi, M. Lehtonen, *IEEE Trans. Smart Grid* 2025, **16**, nr 5, 3949.
- [8] K. Stolecka-Antczak, L. Remiorz, M. Klejnowski, *Int. J. Hydrogen Energy* 2025, **147**, 150030.
- [9] Q. Xu, L. Zhang, J. Zhang, J. Wang, Y. Hu, H. Jiang, Ch. Li, *Energy Chem.* 2020, **4**, nr 5, 100087.
- [10] L. Zhang, F. Qi, R. Ren, Y. Gu, Ji. Gao, Y. Liang, Y. Wang, H. Zhu, X. Kong, Q. Zang, L. Wu, *Research* 2025, **8**, 0677.
- [11] E.E.N. Madila, A. Makhsoos, M.M. Shanbhag, B.G. Pollet, *Int. J. Hydrogen Energy* 2025, **144**, 1168.