

# Wodór jako element transformacji energetycznej

## Hydrogen as part of the energy transformation

Anna Król, Ewa Kukulska-Zajęc, Jadwiga Holewa-Rataj, Monika Gajec

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W publikacji zaprezentowano dostępne i perspektywiczne procesy pozyskiwania i oczyszczania wodoru w odniesieniu do planowanych strategicznych zmian rynku wodoru. W związku z koniecznością wprowadzania zmian związanych z ograniczeniem użytkowania paliw kopalnych na rzecz zastąpienia ich mniej emisyjnymi źródłami energii, głównie odnawialnymi (OZE), nieodzowne będą zmiany zarówno w skali, jak i sposobie wykorzystania wodoru. Dokumenty strategiczne tworzone w tym obszarze pokazują, że w perspektywie lat 2025–2030 nastąpi zwiększenie wykorzystania wodoru jako paliwa transportowego (m.in. w transporcie samochodowym, ciężkim kołowym i kolejowym). Rozważane są również zmiany polegające na wykorzystaniu wodoru pochodzącego ze źródeł odnawialnych w obszarze budownictwa i energetyki, a także wytwarzania ciepła technologicznego. Perspektywy zwiększenia zapotrzebowania na wodór pochodzący z OZE powodują konieczność rozwoju nowych lub niszowych obecnie metod jego wytwarzania oraz separacji i oczyszczania. W artykule przeprowadzono analizę dostępnych metod wytwarzania i oczyszczania wodoru, która wykazała, że wodór w skali przemysłowej produkowany jest najczęściej z paliw kopalnych w procesach reformingu parowego i autotermicznego oraz częściowego utlenienia. Natomiast wodór z odnawialnych źródeł energii otrzymywany jest w procesie elektrolizy oraz w procesach biologicznych i termicznych. Wydajność pozyskiwania wodoru w znanych obecnie procesach jest zróżnicowana (0,06–80%). Także skład pozyskiwanej mieszaniny gazowej jest różny i w związku z tym zachodzi konieczność dobrania metod separacji i oczyszczania wodoru nie tylko w zależności od wymagań podczas jego dalszego zastosowania, ale również w zależności od składu mieszaniny poreakcyjnej zawierającej wodór. Do oczyszczania wodoru w skali przemysłowej najczęściej stosowane są technologie adsorpcji zmiennociśnieniowej (PSA), które pozwalają na pozyskanie wodoru o czystości nawet do 99,99%. Jeśli oczekiwana czystość nie przekracza 95%, istnieje możliwość zastosowania metody destylacji kriogenicznej. Trzecia grupa metod separacji i oczyszczania wodoru to technologie membranowe, stosowane od dawna m.in. do oczyszczania gazów. Do oczyszczania i separacji wodoru najczęściej stosowane są membrany polimerowe, metaliczne lub elektrolityczne.

**Słowa kluczowe:** wodór, polityka wodorowa, odnawialne źródła energii (OZE), metody oczyszczania wodoru, metody wytwarzania wodoru.

**ABSTRACT:** The publication presents the available and prospective processes for obtaining and purifying hydrogen in relation to the planned strategic changes in the hydrogen market. Due to the necessity to introduce changes related to the limitation of the use of fossil fuels in order to replace them with less emitting energy sources, mainly renewable ones (RES), changes in both the scale and the manner of using hydrogen will be indispensable. Strategic documents developed in this area indicate that in the 2025–2030 perspective, the use of hydrogen as a transport fuel will increase (e.g. in car, heavy road and rail transport). Changes involving the use of hydrogen from renewable sources in the fields of construction and energy as well the generation of process heat, are also considered. The prospects for increasing the demand for hydrogen from renewable energy sources generate the need to develop new or niche methods of its production, separation and purification. The article analyzes the available methods for the production and purification of hydrogen, which showed that hydrogen is produced on an industrial scale mostly from fossil fuels in the processes of steam and autothermal reforming and partial oxidation. On the other hand, hydrogen from renewable energy sources is obtained in the electrolysis process as well as in biological and thermal processes. The hydrogen recovery efficiency in the currently known processes varies (0.06–80%). The composition of the obtained gas mixture is also different, and therefore it is necessary to select the methods of hydrogen separation and purification depending not only on the requirements for its further use, but also on the composition of the hydrogen-containing post-reaction mixture. For the purification of hydrogen on an industrial scale, the most commonly used technology is pressure swing adsorption (PSA), which allows to obtain hydrogen with a purity of up to 99.99%. If the expected purity does not exceed 95%, it is possible to use the cryogenic distillation method. The third group of hydrogen separation and purification methods are membrane technologies, which have long been used for gas purification, among other things. Polymer, metallic or electrolytic membranes are most often used for hydrogen purification and separation.

**Key words:** hydrogen, hydrogen policy, renewable energy sources (RES), hydrogen purification methods, hydrogen production methods.

---

Autor do korespondencji: A. Król, e-mail: [anna.krol@inig.pl](mailto:anna.krol@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 27.12.2021 r. Zatwierdzono do druku: 18.05.2022 r.

## Wprowadzenie

Zmiany polityki światowej, jak i krajowej prowadzące do ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> spowodowały, że dąży się do ograniczenia użytkowania paliw kopalnych i zastąpienia ich mniej emisyjnymi odnawialnymi źródłami energii, których efektywne wykorzystanie wymaga jednak zastosowania odpowiednich nośników energii. Wydaje się, że najbardziej obiecującym w tym zakresie nośnikiem jest wodór. To jeden z najbardziej rozpowszechnionych pierwiastków, a podczas jego spalania w tlenie lub reakcji w urządzeniach elektrochemicznych, takich jak ogniwa paliwowe, nie wydzielają się praktycznie żadne szkodliwe substancje. Gaz ten stosowany jest od lat w różnych gałęziach przemysłu, jednak zwiększenie możliwości jego wykorzystania i zastąpienie nim bardziej emisyjnych paliw wymaga rozwoju technologii związanych z jego produkcją i oczyszczaniem. Ciągłe poszukiwane są również nowe możliwości zastosowania wodoru.

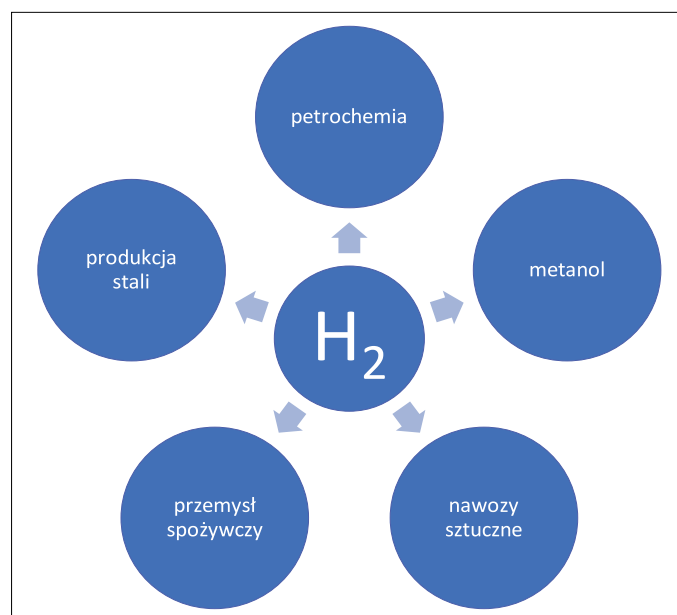
Jednym ze sposobów szerszego wykorzystania H<sub>2</sub> może być jego użycie jako paliwa do zasilania polimerowych ogniw paliwowych (PEM), stosowanych m.in. w pojazdach samochodowych. Zastosowanie to wymaga jednak bardzo wysokiej czystości wodoru. W związku z tym istnieje konieczność rozwijania technologii oczyszczania wodoru do odpowiedniej jakości, wymaganej dla tego zastosowania (EN 17124:2018; ISO 14687:2019; ISO 19880-8:2019; Dawood et al., 2020; Du et al., 2021; Vermaak et al., 2021).

## Obecne wykorzystanie wodoru w Polsce i na świecie

Wodór jest bardzo ważnym gazem dla przemysłu, ponieważ to kluczowy reagent i/lub produkt uboczny różnych procesów w wielu gałęziach gospodarki. Wodór wykorzystywany jest m.in. w przemyśle spożywczym oraz petrochemicznym, znajduje zastosowanie w procesach hydrometalurgicznych oraz rafinacji metali, stanowi też substrat do produkcji amoniaku, nawozów sztucznych, etanolu i metanolu. Gaz ten może być również używany do produkcji energii elektrycznej w ogniwach paliwowych lub jako paliwo w transporcie. Jego zastosowanie jest także jednym ze sposobów na magazynowanie energii z OZE (Staffel et al., 2019; Chmielniak i Chmielniak, 2020; Vermaak et al., 2021).

Na rysunku 1 przedstawiono zestawienie najbardziej istotnych obszarów przemysłowych, w których wodór jest wykorzystywany jako substrat lub stanowi produkt uboczny procesu technologicznego.

Obecnie do najważniejszych zastosowań przemysłowych pod względem zużycia wodoru należą rafinacja ropy naftowej,



**Rysunek 1.** Wodór jako substrat lub produkt uboczny w przemyśle

**Figure 1.** Hydrogen as a substrate or by-product in industry

produkcja amoniaku i nawozów sztucznych, produkcja metanolu oraz produkcja stali poprzez bezpośrednią redukcję rudy żelaza.

W Polsce wodór stosowany jest w przemyśle chemicznym, rafineryjnym, metalurgicznym, transportowym oraz energetycznym. Jego produkcja wynosi obecnie około 1 mln ton rocznie, a cały wytwarzany wodór pochodzi z przetworzenia paliw kopalnych. Głównym producentem, wytwarzającym około 32% tego gazu, jest Grupa Azoty S.A. (produkcja roczna ok. 420 tys. ton), kolejnymi wytwórcami są koksownie Przyjaźń i Zdzieszowice, PKN Orlen, Grupa Lotos oraz szereg innych podmiotów (Maj i Szpor, 2019; Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021).

Analizy zaprezentowane w literaturze (Maj i Szpor, 2019) wykazały, że istnieje ciągły wzrost zapotrzebowania na wodór. Między rokiem 1975 a 2018 światowe zużycie wodoru wzrosło z około 29 mln ton do 115 mln ton rocznie.

## Perspektywiczne kierunki rozwoju zastosowania wodoru

Obecnie istniejące zastosowania wodoru stanowią podstawę wielu obszarów światowej gospodarki i naszego życia codziennego. Ich przyszły rozwój zależy od ewolucji popytu na produkty przetworzone, zwłaszcza rafinowane paliwa do transportu, nawozy do produkcji żywności oraz materiały budowlane (International Energy Agency, 2019). Jak już wspomniano, jednym ze sposobów szerszego wykorzystania wodoru może też być jego stosowanie jako paliwa do zasilania

polimerowych ogniw paliwowych (PEM) w pojazdach samochodowych. W chwili obecnej sektor transportu to jeden z najbardziej uzależnionych od paliw kopalnych obszarów przemysłowych w Europie. Do jego dekarbonizacji potrzebne jest przejście na bardziej innowacyjną i zintegrowaną mobilność. Wodór może odgrywać kluczową rolę w tym obszarze, gdyż istnieje możliwość jego bezpośredniego zastosowania jako paliwa w samochodach, ciężarówkach, autobusach, pociągach i statkach zasilanych poprzez ogniwa paliwowe. Odnosząc się do transportu drogowego, należy dodatkowo podkreślić, że pojazdy zasilane poprzez ogniwa paliwowe (ang. *fuel cell electric vehicle*, FCEV), które wykorzystują wodór jako paliwo, mogą stanowić uzupełnienie taboru pojazdów elektrycznych zasilanych bateriami (ang. *battery electric vehicle*, BEV), gdyż ich zaletą jest większy zasięg. Pojazdy FCEV, ze względu na wyższą gęstość magazynowania energii w porównaniu z pojazdami typu BEV, są również atrakcyjną opcją w przypadku większych samochodów (Gerard et al., 2020). W sektorze żeglugi i lotnictwa rozpatrywane są możliwości wykorzystania syntetycznych paliw płynnych produkowanych na bazie wodoru (Gerard et al., 2020). W transporcie wodnym (łodzi i statki żeglugowe) analizowane są obecnie możliwości zastosowania jako paliwa skroplonego wodoru. Rozważane są również możliwości użycia jako paliwa amoniaku i metanolu, do których produkcji wykorzystywany jest wodór. Związki te można przetwarzać w celu uzyskania skroplonego metanu i innych syntetycznych paliw ciekłych, m.in. syntetycznego oleju napędowego. Natomiast w sektorze transportu lotniczego biopaliwa płynne i paliwa syntetyczne produkowane z wodoru wydają się najodpowiedniejszymi paliwami niskoemisyjnymi (Gerard et al., 2020).

Mimo tego, że prowadzone są szerokie analizy, obecnie nie można jednoznacznie określić, które technologie związane z wodorem są najbardziej odpowiednie z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia.

Kolejne pole do zastosowania wodoru istnieje w sektorze budownictwa, gdzie wodór może w części zastąpić używany obecnie gaz ziemny. W ogrzewaniu i klimatyzacji budynków wodór jako źródło energii może być dostarczany do użytkowników końcowych poprzez istniejące sieci gazowe jako mieszanina wodoru z gazem ziemnym lub ewentualnie poprzez lokalne dedykowane sieci wodorowe. W obu tych przypadkach zachodzi konieczność zbadania możliwości technicznych prowadzenia takiego transportu w wielu wymiarach, przede wszystkim w zakresie bezpieczeństwa transportu i użytkowania mieszaniny gaz ziemny–wodór lub czystego wodoru. Badania w tym obszarze od kilku lat prowadzone są w INiG – PIB (Jaworski et al., 2019, 2020; Huszał i Jaworski, 2020; HOLEWA-RATAJ i Kukulka-Zajac, 2020; Jaworski i Dudek, 2020; Dell'Isola et al., 2021).

Wodór w sektorze energetycznym stosowany jest obecnie na niewielką skalę, przede wszystkim w małych instalacjach wykorzystujących ogniwa paliwowe. Rozwój ogniw paliwowych jest więc konieczny do rozpowszechnienia technologii związanych z energetycznym wykorzystaniem wodoru. W tym obszarze istotny jest również rozwój metod uzyskiwania wodoru wysokiej czystości oraz weryfikacji jakości paliwa stosowanego do zasilania ogniw paliwowych PEM. Znaczna część zużycia energii w przemyśle związana jest z wytwarzaniem ciepła technologicznego. Duży udział tego zapotrzebowania dotyczy wysokotemperaturowych procesów cieplnych przeprowadzanych w temperaturze powyżej 200°C, które w związku z tym mają również duży udział w całkowitym zużyciu energii w przemyśle. Jedną z opcji niskoemisyjnych przewidzianych dla tych procesów jest zastosowanie biomasy stałej, biometanu i wodoru (Gerard et al., 2020).

Wodór stanowi również część koncepcji przemysłowej znanej jako technologia *power-to-gas* (P2G), która jest mechanizmem równoważenia pracy sieci elektroenergetycznej. W technologii P2G wodoru używa się do przechwytywania i przechowywania nadwyżki energii, która jest potem możliwa do wykorzystania w okresach ograniczonej podaży (np. w nocy lub w godzinach, gdy obserwowana jest niska prędkość wiatru przy produkcji energii z OZE). Technologia P2G opiera się na przekształcaniu nadmiaru energii ze źródeł odnawialnych w nośnik chemiczny, taki jak wodór czy metan (Chmielniak i Chmielniak, 2020; Jaworski i Dudek, 2020; Vermaak et al., 2021).

Dużym zainteresowaniem cieszy się także zastosowanie wodoru jako nośnika energii. Może on być wytwarzany z energii elektrycznej za pomocą urządzeń elektrochemicznych (np. elektrolizerów) i przetwarzany ponownie na energię elektryczną (np. w ogniwach paliwowych). Wodór może też być przechowywany przy użyciu różnych metod i technologii w postaci sprężonego gazu, cieczy kriogenicznej, związków chemicznych (np. ciekłe organiczne nośniki wodoru, amoniak) lub może być adsorbowany/absorbowany na specjalnych materiałach (np. hybrydy metaliczne, hybrydy chemiczne, nanostruktury węglowe). Może też być magazynowany w podziemnych kawernach solnych (Sharma i Ghoshal, 2015; Abdalla et al., 2018; El-Shafie et al., 2019; Budak i Szpunar, 2020; Chmielniak i Chmielniak, 2020; Żyjewska, 2021).

Wymienione nowe obszary zastosowania wodoru mają duży potencjał jego wykorzystania, o ile koszty związane z niskoemisyjną produkcją wodoru będą mniejsze w porównaniu z innymi rozwiązaniami (Maj i Szpor, 2019).

Zaznaczyć należy, że obecnie wszystkie wymienione powyżej sektory wykorzystują głównie tzw. szary wodór (czyli ten powstający w procesach, w których stosowane są paliwa kopalne).

## Polityka wodorowa w kontekście dekarbonizacji

Praktycznie całe obecne zapotrzebowanie na wodór zaspokojone jest przez jego otrzymywanie z paliw kopalnych. Krajowe i światowe polityki energetyczne oraz strategie wodorowe stawiają wyzwania prowadzące do wykorzystywania jedynie wodoru ze źródeł odnawialnych lub niskoemisyjnych. Chęć znacznego ograniczenia stosowania paliw kopalnych, wynikająca z przyjętych założeń w zakresie osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 r., jest obecnie głównym priorytetem w kontekście polityki energetycznej kraju i UE. Założenia dotyczące wprowadzenia na rynek pojazdów drogowych wykorzystujących wodór jako paliwo zostały zapisane w dokumentach strategicznych wielu krajów, w tym Polski. W perspektywie 2025 r. w polskiej strategii wodorowej oceniono, że możliwe jest dopuszczenie do eksploatacji 100–250 autobusów zeroemisyjnych napędzanych wodorem oraz wskazano konieczność rozwoju około 30 stacji tankowania (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021). Natomiast w perspektywie 2030 r. strategia wodorowa przewiduje dalszy rozwój sieci stacji tankowania wodoru i wdrożenie do eksploatacji od 800 do 1000 kolejnych autobusów zasilanych wodorem (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021). W perspektywie 2025 r., zgodnie z zapisami w *Polskiej strategii wodorowej*, wspierane będą również działania prowadzące do rozpoczęcia użytkowania pociągów osobowych oraz lokomotyw transportowych napędzanych wodorem w miejscach, gdzie nie została przewidziana elektryfikacja trakcji. Zaplanowano również uruchomienie pilotażowych programów mających na celu wdrożenie wykorzystania wodoru w transporcie ciężkim kołowym, kolejowym, morskim i rzeczonym oraz dalszy ich rozwój w perspektywie do 2030 r. W perspektywie 2030 r. przewidywane jest również wytwarzanie paliw syntetycznych opartych na wodorze (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021).

Także prognozy dotyczące zastosowania wodoru w transporcie na skalę Europy stawiają na zwiększenie popytu na wodór pozyskiwany w inny sposób niż ten z przeróbki węglowodorów. W sektorze transportu kolejowego w Europie obecnie wykorzystywane są zróżnicowane paliwa. Mimo że w większości państw członkowskich duża część systemu kolejowego jest zelektryfikowana i dalsza elektryfikacja jest jednym z logicznych sposobów na dekarbonizację tego sektora, to w niektórych rejonach pociągi z ogniwami paliwowymi mogą być bardziej atrakcyjnym i tańszym rozwiązaniem. Takie rozwiązanie wydaje się korzystne, gdyż pociągi zasilane przez ogniwa paliwowe mogą być eksploatowane przez długi czas (ponad 18 godzin) bez tankowania, a w razie potrzeby istnieje możliwość ich szybkiego ponownego tankowania (Gerard et al., 2020).

W związku z planowaną dekarbonizacją wielu procesów zachodzących w gospodarce niezbędne są również zmiany

związane z zastąpieniem wodoru produkowanego z paliw kopalnych gazem wytwarzanym w procesach niskoemisyjnych lub tym zielonym pochodzącym z OZE. Według prognoz zapisanych w *Polskiej strategii wodorowej* „szary wodór” można będzie w kolejnych latach zastąpić przez wodór pochodzący ze źródeł odnawialnych, m.in. z wysokotemperaturowych procesów cieplnych. Zmiana ta może stanowić ważny krok w rozważanych scenariuszach dekarbonizacji Polski (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021). Wodór ma również potencjał dostarczania energii do głównych sektorów gospodarki, w tym transportu, budownictwa i przemysłu. Uzyskanie w perspektywie 2030 r. możliwie szerokiego zastosowania wodoru może prowadzić do osiągnięcia niskoemisyjnego systemu energetycznego zwanego „gospodarką wodorową” (Staffell et al., 2019; Lambert i Schulte, 2021; Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021).

## Technologie pozyskiwania wodoru

Ze względu na koszty, dostępność surowców i stopień zaawansowania technologii około 95% produkowanego w skali roku wodoru to ten wytworzony z paliw kopalnych (Zhang et al., 2016; Baykara, 2018). Technologie produkcji wodoru z paliw kopalnych są rozwiniętymi i dojrzałymi technologiami przemysłowymi, zdolnymi do wytwarzania wodoru wysokiej jakości przy stosunkowo niskich kosztach w porównaniu z technologiami alternatywnymi (Vermaak et al., 2021).

Obecnie najczęściej stosowanym surowcem do produkcji wodoru na skalę przemysłową jest gaz ziemny, ze względu na jego dużą dostępność i niską cenę. Należy zaznaczyć, że coraz częściej dostrzeganą wadą gazu ziemnego jako surowca do produkcji wodoru jest fakt, że gaz ziemny to paliwo kopalne.

W produkcji wodoru konieczny jest rozwój metod jego wytwarzania w sposób przyjazny dla środowiska i zasoboszczędny. Wybór ścieżki produkcji powinien uwzględniać stopień jakości paliwa wodorowego wymagany do zastosowania końcowego oraz możliwe do zastosowania technologie oczyszczania. W tabeli 1 przedstawiono opisywane w literaturze metody wytwarzania wodoru z podziałem na surowiec będący podstawą do jego wytworzenia oraz podano szacunkową efektywność poszczególnych procesów (Kumar i Himabindu, 2019; Dawood et al., 2020).

Metodami pozyskiwania wodoru charakteryzującymi się wysoką efektywnością procesów (60–85%) są reforming parowy oraz elektroliza. Pozostałe metody są mniej efektywne (0,06–50%), lecz należy mieć na uwadze, że są stale dopracowywane i udoskonalane. Dwie główne metody stosowane w przemyśle do produkcji wodoru to procesy reformingu

**Tabela 1.** Zestawienie metod produkcji wodoru z uwzględnieniem rodzaju surowca wsadowego (Kumar i Himabindu, 2019)  
**Table 1.** Summary of hydrogen production methods, including the type of feedstock (Kumar and Himabindu, 2019)

| Paliwa kopalne  |          | Odnawialne źródła energii   |  |
|---|----------|---|--|
| reforming   | piroliza | biomasa   | rozkład wody   |
| – Reforming parowy – SMR (75–85%)*<br>– Częściowe utlenianie – POX (60–75%)*<br>– Reforming autotermiczny – ATR (60–75%)* |          | <b>Metody biologiczne:</b><br>– biofotoliza (10–11%)*<br>– fotofermentacja (60–80%)*<br>– fermentacja w ciemności (0,1%)*<br><b>Metody termiczne:</b><br>– zgazowanie (30–40%)*<br>– piroliza (35–50%)*<br>– spalanie | – termoliza (20–45)*<br>– fotoliza (0,06%)*<br>– elektroliza (60–80%)* |
| * Wydajność procesu   |          |   |  |

i zgazowania, które różnią się charakterem dopływającego paliwa (Dawood et al., 2020; Vermaak et al., 2021). Procesy zgazowania wykorzystują do produkcji wodoru lub gazu syntezowego paliwa stałe, takie jak węgiel, biomasa i odpady stałe (Sharma i Ghoshal, 2015; Dawood et al., 2020; Vermaak et al., 2021). Procesy reformingu do produkcji gazu syntezowego wykorzystują natomiast paliwa w postaci gazowej lub ciekłej (Zhang et al., 2016; Dawood et al., 2020). W celu wytworzenia wodoru z węglowodorów można zastosować jeden z trzech procesów reformingu:

- reforming parowy (w szczególności reforming parowy metanu (SMR));
- częściowe utlenianie (POX);
- reforming autotermiczny (ATR).

Procesy te różnią się zastosowanymi reagentami i termodynamicznym charakterem zachodzących reakcji. Na przykład w SMR woda reaguje z węglowodorami, tworząc wodór w reakcji endotermicznej. W przypadku POX z węglowodorami reaguje natomiast tlen, a zachodząca reakcja jest egzotermiczna. Połączenie obu tych reakcji (SMR i POX) jest określane jako proces ATR. W procesach reformingu emitowane są CO<sub>2</sub> i CO (Dincer i Acar, 2014; Acar i Dincer, 2015; Sharma i Ghoshal,

2015; Zhang et al., 2016; Abdalla et al., 2018; Baykara, 2018; Vermaak et al., 2021).

Pojawienie się nowych technologii wytwarzania wodoru powoduje konieczność poszukiwania nowych rozwiązań w zakresie jego uzdatniania. Podczas doboru metod separacji wodoru z mieszaniny poreakcyjnej, a następnie jego oczyszczania do wymaganego poziomu należy zwrócić uwagę na składy typowych mieszanin, jakie są uzyskiwane w zależności od surowca i zastosowanej metody wytwarzania wodoru. Zestawienie przykładowych składów mieszanin poreakcyjnych w zależności od metody wytwarzania (Du et al., 2021) zostało przedstawione w tabeli 2.

Analiza zestawionych w tabeli 2 składów mieszanin poreakcyjnych wykazała, że zawartość wodoru zmienia się w zależności od metody jego wytworzenia. Największy procentowy udział wodoru w mieszaninie poreakcyjnej uzyskuje się w wyniku reformingu metanolu i mieści się on w zakresie 75–80%. Najmniej wodoru zawierają mieszaniny gazowe powstałe w wyniku zgazowania węgla i biomasy. W ich przypadku zawartość wodoru wynosi 25–35%. Mieszaniny gazowe pochodzące z procesów zgazowania biomasy i węgla zawierają największy udział procentowy CO, wynoszący odpowiednio

**Tabela 2.** Zestawienie przykładowych składów mieszanin wodorowych w zależności od metody wytwarzania (Du et al., 2021)  
**Table 2.** List of exemplary compositions of hydrogen mixtures depending on the production method (Du et al., 2021)

| Składniki [%]    | Zgazowanie węgla | Reforming gazu ziemnego | Reforming metanolu | Gaz koksowniczy | Syntetyczny gaz resztkowy z NH <sub>3</sub> | Zgazowanie biomasy |
|------------------|------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|---|--------------------|
| H <sub>2</sub>   | 25–35            | 70–75                   | 75–80              | 45–60           | 60–75                                       | 25–35              |
| CO               | 35–45            | 10–15                   | 0,5–2,0            | 5–10            | –   | 30–40              |
| CO <sub>2</sub>  | 15–25            | 10–15                   | 20–25              | 2–5             | –   | 10–15              |
| CH <sub>4</sub>  | 0,1–0,3          | 1–3                     | –                  | 25–30           | –   | 10–20              |
| N <sub>2</sub>   | 0,5–1,0          | 0,1–0,5                 | –                  | 2–5             | 15–20                                       | 1                  |
| Ar               | –                | –                       | –                  | –               | –   | –                  |
| Siarka całkowita | 0,2–1,0          | –                       | –                  | 0,01–0,50       | –   | 0,2–1,0            |
| H <sub>2</sub> O | 15,2             | –                       | –                  | –               | 1–3   | –                  |
| O <sub>2</sub>   | –                | –                       | –                  | 0,2–0,5         | 10–15                                       | 0,3                |
| Inne             | –                | –                       | –                  | 2–5             | –   | –                  |

30–40% dla procesu zgazowania biomasy oraz 35–45% dla procesu zgazowania węgla. Najwięcej dwutlenku węgla powstaje w procesie reformingu metanolu (20–25%), natomiast najwięcej metanu – w procesie produkcji gazu koksowniczego (25–30%). Wśród pozostałych komponentów mieszaniny zawierającej wodór wymienić można azot, tlen, a także wodę czy związki siarki.

### Technologie oczyszczania wodoru

Istnieje wiele technologii separacji wodoru z mieszaniny preakcyjnej oraz jego oczyszczania do wymaganego zastosowaniem poziomu. Część z tych metod znalazła zastosowanie przemysłowe, część jest w fazie opracowywania. Ciągłe prowadzone są badania nad opracowaniem nowych, efektywnych energetycznie i bardziej przyjaznych środowisku metod oczyszczania i/lub separacji wodoru. Technologie separacji i oczyszczania wodoru można sklasyfikować jako metody chemiczne i fizyczne. Metody chemiczne opierają się na reakcjach chemicznych, głównie katalizowanych przez metale lub wodorki metali. Metody fizyczne to metody adsorpcji (zmienności ciśnieniowej, zmiennotemperaturowej i próżniowej) oraz separacji niskotemperaturowej i membranowej (Chmielniak i Chmielniak, 2020; Dawood et al., 2020; Du et al., 2021; Vermaak et al., 2021) Schemat dostępnych metod oczyszczania wodoru przedstawiono na rysunku 2.

Dostępne metody separacji i oczyszczania wodoru są zróżnicowane i charakteryzują się różną wydajnością i efektywnością, w zależności od składu oczyszczanego gazu. Różny jest również stopień zaawansowania tych technologii, jednak wszystkie są cały czas modyfikowane i prowadzone są prace badawczo-rozwojowe nad ich udoskonaleniem.

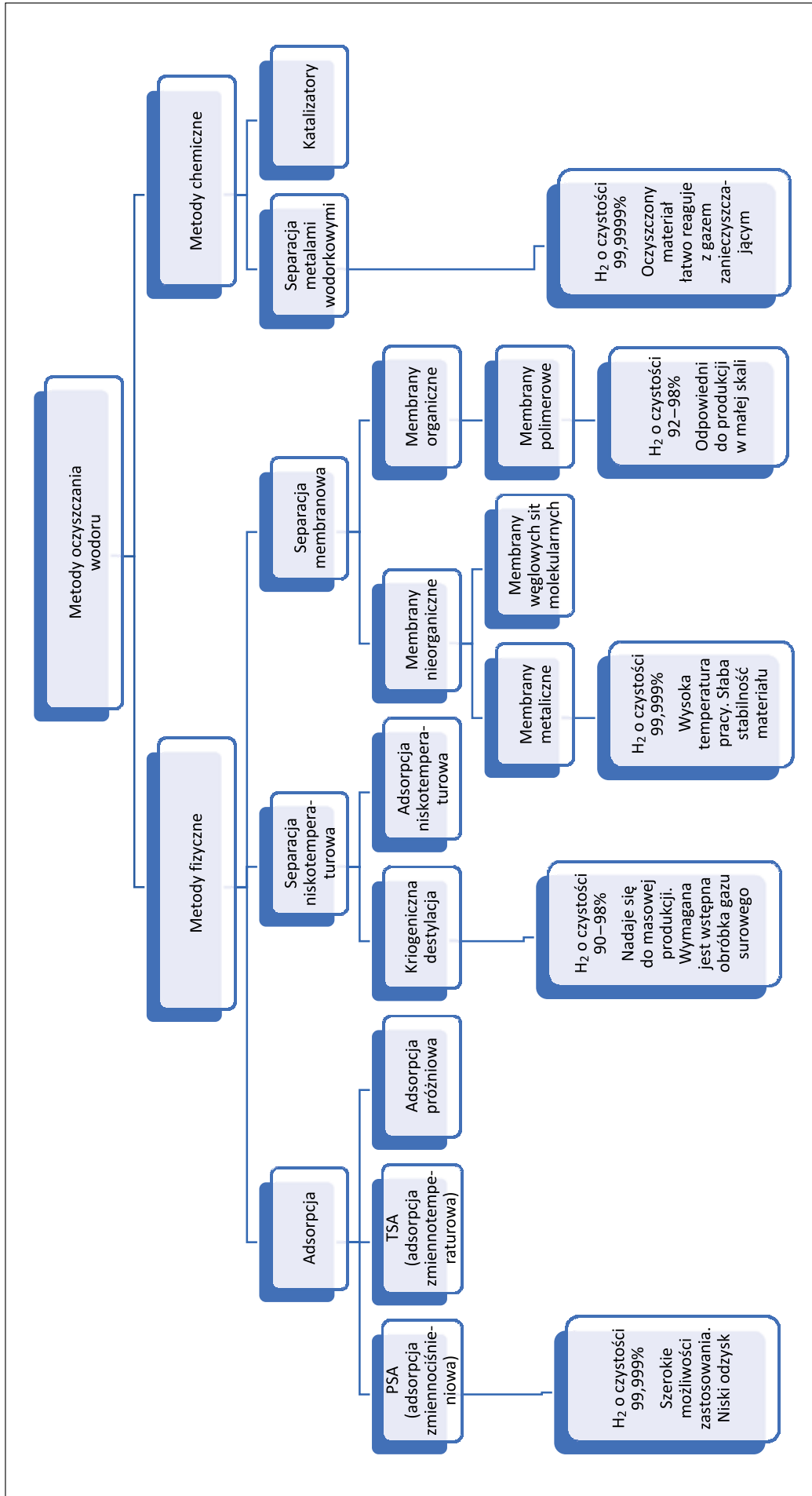
Najszerzej stosowanym i najnowocześniejszym procesem przemysłowym separacji wodoru jest adsorpcja zmiennociśnieniowa (PSA). Technologia ta jest najczęściej wykorzystywana w przemyśle chemicznym/petrochemicznym, a także do odzyskiwania wodoru z przemysłowych gazów odlotowych, w tym gazów odlotowych z reformingu i pirolizy oraz gazów koksowniczych. Innym zastosowaniem technologii PSA jest oczyszczanie biogazu z dwutlenku węgla w celu uzyskania biometanu (LINDE; Vermaak et al., 2021). Obecnie PSA odpowiada za oczyszczanie około 85% wytworzonego na świecie wodoru. Chociaż system jest głównie klasyfikowany jako system okresowy (okres pracy i regeneracji), jego ciągłą pracę można osiągnąć poprzez zastosowanie wielu adsorberów, tworząc proces cykliczny polegający na cyklicznej pracy i regeneracji kolejnych adsorberów w układzie. Cały proces oczyszczania gazu metodą PSA można podzielić na pięć podstawowych etapów:

- 1) adsorpcja;
- 2) równoczesne rozprężanie;
- 3) rozprężanie przeciwprądowe;
- 4) przedmuchiwanie;
- 5) rozprężanie przeciwprądowe (Vermaak et al., 2021).

Oczyszczana w procesie PSA bogata w wodór mieszanina gazów przepuszczana jest przez adsorber o dużej powierzchni, który jest w stanie adsorbować zanieczyszczenia (np. CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O i N<sub>2</sub>), jednocześnie umożliwiając przenikanie wodoru przez materiał sorpcyjny. Zanieczyszczenia są usuwane przez zmianę ciśnienia w układzie z ciśnienia zasilania na ciśnienie wylotowe (Du et al., 2021; LINDE; Vermaak et al., 2021). Generalnie separacja wodoru wymaga stosunku ciśnień pomiędzy ciśnieniem gazu wsadowego a ciśnieniem gazu na wylocie z układu rzędu 4 : 1. Separacja i oczyszczanie gazów w procesie PSA realizowane są poprzez okresową zmianę ciśnienia w zależności od różnicy pojemności adsorbentu dla różnych gazów. Efekt separacji PSA zależy przede wszystkim od rodzaju adsorbentu i zastosowanego procesu. Wodór znacznie różni się od większości cząsteczek gazów (takich jak CO<sub>2</sub>, CO i CH<sub>4</sub>) pod względem pojemności statycznej, dlatego gaz ten może być z powodzeniem separowany i oczyszczany metodą PSA. Zestawienie informacji dotyczących dostępnych technologii PSA wykorzystywanych do oczyszczania wodoru przedstawiono w tabeli 3.

Dane zestawione w tabeli 3 pokazują, że metody PSA stosowane do oczyszczania wodoru są zróżnicowane pod względem wykorzystywanego materiału sorpcyjnego (może to być np. węgiel aktywny, zeolity, impregnowane minerały), liczby kolumn wypełnionych adsorbentami oraz liczby cykli stosowanych w procesie. W zależności od użytej technologii oraz składu mieszaniny gazowej wsadu uzyskiwany jest wodór o czystości od 96% do 99,999%. Opiswane procesy charakteryzują się efektywnością odzysku wodoru z mieszaniny wynoszącą od 55,5% do 99,6%. Warto również podkreślić, że przedstawiane technologie PSA i ich modyfikacje znajdują się na różnych poziomach, biorąc pod uwagę poziom zaawansowania i stopień wdrożenia do działań przemysłowych (Du et al., 2021, LINDE). Istnieją zarówno metody oczyszczania PSA stosowane na bardzo szeroką skalę przemysłową, jak i nowo opracowane modyfikacje metody PSA, zgłaszane w raportach. Metoda PSA jest raczej rozwiązaniem stacjonarnym, opłacalnym w przypadku separacji dużych ilości wodoru.

Kolejną metodą separacji wodoru stanowi destylacja kriogeniczna. Jest to szeroko stosowany proces separacji w niskiej temperaturze. Służy do rozdzielania składników gazowych na podstawie różnic w ich temperaturach wrzenia. Niska temperatura wrzenia wodoru, wynosząca  $-252,9^{\circ}\text{C}$ , jest wykorzystywana do oddzielania go od innych składników w procesach, w których zebrany wodór można przechowywać w postaci płynnej. Aby



**Rysunek 2.** Dostępne metody oczyszczania wodoru (Du et al., 2021)  
**Figure 2.** Available methods of hydrogen purification (Du et al., 2021)

**Tabela 3.** Zestawienie najważniejszych informacji dotyczących dostępnych technologii PSA stosowanych do oczyszczania wodoru (Du et al., 2021)

**Table 3.** Summary of the most important information on the available PSA technologies for hydrogen purification (Du et al., 2021)

| Uzyskana czystość wodoru [%] | Efektywność odzysku wodoru [%] | Skład wsadu  | Charakterystyka procesu oczyszczania | Stosowany adsorbent                      |
|------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| około 100                    | 88,43                          | CO <sub>2</sub> : H <sub>2</sub> (15 : 85)   | PSA (dwie kolumny)                   | łupiny ziaren palmowych i węgiel aktywny |
| 99,99–99,999                 | 93–96                          | reforming parowy metanu  | PSA (4 kolumny)                      | UTSA-16                                  |
| >99,999                      | >75                            | CO : CO <sub>2</sub> : CH <sub>4</sub> : H <sub>2</sub><br>(1 : 25 : 5 : 69)                       | PSA<br>(12 etapów, 4 kolumny)        | węgiel aktywny                           |
| 99,999                       | –                              | H <sub>2</sub> : CO : CO <sub>2</sub><br>(94,6 : 0,4 : 5)  | PSA (4 kolumny)                      | węgiel aktywny                           |
| 99,9991                      | 99,6                           | CO : CO <sub>2</sub> : H <sub>2</sub> O : H <sub>2</sub><br>(1 : 1 : 10 : 88)                      | ET-PSA<br>(7 etapów, 2 kolumny)      | K-LDOs (hydrotalcyt promowany potasem)   |
| >99,99                       | 69,6                           | H <sub>2</sub> : CH <sub>4</sub> : CO : CO <sub>2</sub><br>(75,89 : 4,01 : 3,03 : 17,07)           | PSA (4 kolumny)                      | zeolit CaX                               |
| 99,99                        | 89,7                           | H <sub>2</sub> : CO <sub>2</sub> : CO : N <sub>2</sub> : Ar<br>(88,75 : 2,12 : 2,66 : 5,44 : 1,03) | PSA (8 kolumn)                       | węgiel aktywny/zeolit LiX                |
| >99,97                       | >75                            | H <sub>2</sub> : CO <sub>2</sub> : CH <sub>4</sub> : CO<br>(70 : 25 : 4 : 1)                       | PSA (4 kolumny)                      | węgiel aktywny impregnowany Cu           |
| >99,95                       | >80                            | H <sub>2</sub> : N <sub>2</sub> : CH <sub>4</sub> : Ar<br>(58 : 25 : 15 : 2)                       | PSA<br>(6 etapów, dwie kolumny)      | węgiel aktywny / zeolit 5A               |
| 99,25–99,97                  | 55,5–75,3                      | H <sub>2</sub> : N <sub>2</sub> : CH <sub>4</sub> : Ar<br>(58 : 25 : 15 : 2)                       | PSA (4 kolumny)                      | zeolit 5A                                |
| 96–99,5                      | 71–85                          | H <sub>2</sub> : CO <sub>2</sub> : CH <sub>4</sub> : CO : N <sub>2</sub><br>(38 : 50 : 1 : 1 : 10) | PSA (4 kolumny)                      | węgiel aktywny / zeolit 5A               |

rozdzielić wodór od innych zanieczyszczeń w procesie destylacji kriogenicznej, gaz wymaga schłodzenia i skroplenia, a te dwa procesy wiążą się ze zużyciem dużej ilości energii. Jeśli w oczyszczanym strumieniu znajdują się znaczne ilości CO, CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>, to w układzie wymagana jest dodatkowo kolumna przemawiająca metanem rozdzielany gaz w celu zmniejszenia stężeń tych gazów. Przed zastosowaniem destylacji kriogenicznej gaz zasilający (oczyszczany) wymaga wstępnego przygotowania, które polega na usunięciu składników powodujących zamrażanie. Metody destylacji kriogenicznej nie zaleca się do stosowania, jeśli celem jest pozyskanie wodoru o wysokiej czystości, gdyż zadowalający wynik odzysku wodoru tą metodą można uzyskać, jeśli oczekiwana czystość nie przekracza 95%. Metoda destylacji ma zastosowanie w dużej skali przemysłowej, nie nadaje się natomiast do małych zastosowań przenośnych (Du et al., 2021, Vermaak et al., 2021).

Obecnie szeroko badanym zagadnieniem jest oczyszczanie gazów, w tym wodoru, z zastosowaniem membran. Technologie membranowe wykazują nieodłączne zalety efektywności energetycznej, opłacalności i kompatybilności środowiskowej w porównaniu z konwencjonalnymi technikami separacji. Ponadto w celu zwiększenia wydajności i ekonomiki procesu separacji technologie membranowe można łatwo łączyć z innymi technikami separacji gazów. Technologie te znalazły

szerokie zastosowanie w uzdatnianiu wody, separacji powietrza, oczyszczaniu gazu ziemnego i odzyskiwaniu wodoru z gazów technologicznych powstających podczas produkcji amoniaku (Chmielewski et al., 2012; Li et al., 2015; Du et al., 2021; Vermaak et al., 2021). Metody membranowe są zróżnicowane, a ich właściwości zależą od materiału, z którego wykonane są membrany. Membrany można podzielić na metaliczne, polimerowe, węglowe i elektrochemiczne.

Membrany metaliczne, przepuszczając cząstki wodoru, blokują równocześnie przejście cząsteczek innych gazów, tj. CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i O<sub>2</sub>. Membrany palladowe należą do najczęściej stosowanych spośród membran metalicznych i są oceniane jako najbardziej wydajne. Charakteryzują się bardzo dobrą przepuszczalnością wodoru, mogą oczyścić wodór nawet do wartości 99,999%. Ich niewątpliwą wadę stanowi koszt produkcji i możliwość wystąpienia tzw. kruchości wodorowej. Dlatego alternatywnym i tańszym rozwiązaniem jest zastosowanie membran ze stopu Pd–metal, gdyż dodanie innego metalu do membrany palladowej pozwala na zwiększenie szybkości przenikania wodoru przez zmodyfikowaną membranę i obniżenie kosztów jej produkcji (Liguori et al., 2020; Du et al., 2021).

Membrany polimerowe charakteryzują się albo wysoką przepuszczalnością i niską selektywnością, albo odwrotnie,



co ogranicza możliwość ich użycia do oczyszczania wodoru. W celu poprawienia efektywności opracowywane są membrany z mieszaną matrycą z dodatkiem zeolitów lub innych materiałów nieorganicznych (Li et al., 2015; Chen et al., 2020; Du et al., 2021). Membrany polimerowe są obecnie stosowane w procesach przemysłowych – głównie ze względu na ich zdolność do radzenia sobie z dużymi spadkami ciśnienia, ich niski koszt i dobrą skalowalność. Jednym z czynników ograniczających wykorzystanie membran polimerowych jest temperatura pracy (optymalna: 90–100°C). Istnieją jednak polimery tak przegrupowane, że wykazują dobrą separację w wysokich temperaturach (Vermaak et al., 2021).

Membrany węglowe sit molekularnych (CMS) są bardzo kruche. Jest to poważna wada, która ogranicza ich praktyczne zastosowanie. Kruchosc membran CMS można ograniczyć częściowo poprzez dobór optymalnych struktur prekursorów oraz parametrów technologicznych procesu pirolizy. Aby spełnić wymagania praktycznego wykorzystania membran CMS, konieczne jest zwiększenie ich wytrzymałości mechanicznej w warunkach wysokiego ciśnienia (Li et al., 2015; Tanco et al., 2020; Du et al., 2021). Drugą grupę membran węglowych stanowią membrany grafenowe – stosunkowo nowe, budowane na bazie grafenu i tlenku grafenu, wykorzystywane głównie w obszarach związanych z odsalaniem wody, transportem jonoselektywnym i separacją gazów. Grafen i jego pochodne dzięki swoim właściwościom, tj. strukturze, dużej wytrzymałości mechanicznej i stabilności chemicznej, są dobrymi prekursorami do wytwarzania membran separacyjnych. Niestety grafen nie jest przepuszczalny dla wszystkich gazów i cieczy. Niemniej jednak opracowywane są metody prowadzące do uzyskania selektywnej przepuszczalności gazów (Li et al., 2015; Sun et al., 2019; Du et al., 2021; Yang et al., 2021). Zarówno węglowe membrany CMS, jak i membrany na bazie grafenu rozpatrywane są jako mające zastosowanie do separacji wodoru z mieszanin gazowych oraz do oczyszczania wodoru z zanieczyszczeń, jednak wszelkie rozwiązania testowane były wyłącznie w skali laboratoryjnej (Li et al., 2015; Sun et al., 2019; Du et al., 2021; Yang et al., 2021).

Membrany elektrochemiczne charakteryzują się tym, że podczas separacji wodoru już w jednoetapowym procesie osiągnięta jest wysoka czystość wodoru i praktycznie równocześnie można doprowadzić do oczyszczania i sprężania wodoru. Zagadnienia związane z separacją wodoru z wykorzystaniem membran elektrochemicznych są od lat szeroko opisywane w literaturze. Najczęściej przedstawiane są badania prowadzone w układach, w których używana była membrana z nafionu lub polibenzimidazolu (PBI), katalizatorami stosowanymi na anodzie były zazwyczaj platyna lub platyna sorbowana na węglu, natomiast katalizatorami na katodzie – platyna, ruten bądź platyna sorbowana na węglu lub rutenie (Vermaak et al., 2021).

Podsumowując, można stwierdzić, że w separacji/oczyszczaniu dużych ilości wodoru najbardziej sprawdzać się będzie metoda PSA, co znajduje potwierdzenie w fakcie, że jest to też najbardziej popularna metoda oczyszczania stosowana w przemyśle. Jest to metoda kosztowna i wymaga pracy pod wysokim ciśnieniem. Wydaje się, że na potrzeby mniejszych instalacji lub instalacji mobilnych odpowiednie jest zastosowanie membran, głównie metalicznych, wykonanych z palladu lub jego stopów.

### Podsumowanie i wnioski

Wodór stosowany jest od lat w różnych gałęziach przemysłu, głównie w procesach rafinacji ropy naftowej, do produkcji amoniaku i metanolu, do produkcji stali, a także w przemyśle spożywczym. Jedynie niewielkie ilości wodoru produkowane były na cele energetyczne, co obecnie zaczyna ulegać zmianie. Zmiany polityki energetycznej mające na celu ograniczenie zużycia paliw kopalnych oraz osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 r. spowodowały, że w przyszłości wodór będzie znacznie szerzej stosowany w wielu gałęziach przemysłu, w tym w energetyce i transporcie. Jednym z kluczowych sposobów powszechnego wykorzystania wodoru może być jego wykorzystanie jako paliwa do zasilania polimerowych ogniw paliwowych (PEM) stosowanych w pojazdach samochodowych. Jednak do tej technologii konieczne jest użycie wodoru wysokiej czystości.

Jakość wodoru i skład jego potencjalnych zanieczyszczeń zależy w dużym stopniu od metody jego wytworzenia. Wiodące metody produkcji wodoru to reforming parowy, częściowe utlenianie i elektroliza. Widoczny jest także wzrost pozyskiwania wodoru ze źródeł odnawialnych, a ciągły rozwój technologii wytwarzania zielonego wodoru powoduje, że skład strumienia gazów poreakcyjnych ulega zmianie.

Znana i stosowana w skali przemysłowej metoda oczyszczania wodoru do wysokiej klasy czystości to głównie metoda PSA, połączona w razie potrzeby z oczyszczaniem membranowym. Doniesienia literaturowe wskazują, że cały czas trwają prace nad udoskonaleniem wypełnień w absorberach PSA. Równolegle rozwijane są metody oczyszczania wodoru z zastosowaniem membran. Membrany nadające się do oczyszczania wodoru do czystości 99,999 to metaliczne membrany palladowe i metaliczne membrany mieszane (Pd/V). Do separacji i testów separacji wodoru z mieszaniny gaz ziemny–wodór (gdzie wodór nie jest dominującym składnikiem) wykorzystuje się najczęściej mieszane membrany polimerowe. Natomiast metody rozdzielania kriogenicznego wodoru są wystarczająco wydajne jedynie do pozyskania wodoru o jakości powyżej 99,97%.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza możliwości oczyszczania wodoru pod kątem zastosowania w ogniwach paliwowych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0083/GE/2021, nr archiwalny: DK-4100-0071/2021.

## Literatura

- Abdalla A.M., Hossain S., Nisfindy O.B., Azad A.T., Dawood M., Azad A.K., 2018. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Conversion and Management*, 165: 602–627. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.03.088.
- Acar C., Dincer I., 2015. Impact assessment and efficiency evaluation of hydrogen production methods. *International Journal of Energy Research*; 39: 1757–1768. DOI: 10.1002/er.3302.
- Baykara S.Z., 2018. Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23), 10605–10614. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.022.
- Budak P., Szpunar T., 2020. Zmiany parametrów mieszaniny gazu ziemnego z wodorem w trakcie eksploatacji komory magazynowej w kawernie solnej. *Nafta-Gaz*, 76(11): 799–806. DOI: 10.18668/NG.2020.11.05.
- Chen F., Dong S., Wang Z., Xu J., Xu R., Wang J., 2020. Preparation of mixed matrix composite membrane for hydrogen purification by incorporating ZIF-8 nanoparticles modified with tannic acid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45: 7444–7454. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.050.
- Chmielewski A.G., Wawryniuk K., Antczak J., 2012. Separacja składników gazu syntezowego przy użyciu membran polimerowych i metalicznych. [W:] Traczewska T.M. (red.). *Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska. T. 2. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław*.
- Chmielniak T., Chmielniak T., 2020. Energetyka wodorowa. PWN, wydanie 1. ISBN 978-83-01-21104-2.
- Dawood F., Anda M., Shafiullah G.M., 2020. Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7): 3847–3869. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.
- Dell'Isola M., Ficco G., Moretti L., Jaworski J., Kułaga P., Kukulka-Zajac E., 2021. Impact of Hydrogen Injection on Natural Gas Measurement. *Energies*, 14(24): 8461. DOI: 10.3390/en14248461.
- Dincer I., Acar C., 2014. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34): 11094–11111. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.035.
- Du Z., Liu C., Zhai J., Guo X., Xiong Y., Su W., He G.A., 2021. Review of Hydrogen Purification Technologies for Fuel Cell Vehicles. *Catalysts*, 11: 393. DOI: 10.3390/catal11030393.
- El-Shafie M., Kambara S., Hayakawa Y., 2019. Hydrogen Production Technologies Overview. *Journal of Power and Energy Engineering*, 7: 107–154. DOI: 10.4236/jpee.2019.71007.
- Gerard F., van Nuffel L., Smith T., Yearwood J., Cerny O., Michalski J., Altmann M., 2020. Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans Final Report. <<https://www.fch.europa.eu/publications/opportunities-hydrogen-energy-technologies-considering-national-energy-climate-plans>> (dostęp: lipiec 2021).
- Holewa-Rataj J., Kukulka-Zajac E., 2020. Wpływ dodatku wodoru na liczbę metanową gazu ziemnego. *Nafta-Gaz*, 76(12): 945–950. DOI: 10.18668/NG.2020.12.08.
- Huszał A., Jaworski J., 2020. Studies of the Impact of Hydrogen on the Stability of Gaseous Mixtures of THT. *Energies*, 13(23): 6441. DOI: 10.3390/en13236441.
- International Energy Agency, 2019. The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Technology Report, Report prepared by the IEA for the G20, Japan. <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>> (dostęp: wrzesień 2021).
- Jaworski J., Dudek A., 2020. Study of the effects of changes in gas composition as well as ambient and gas temperature on errors of indications of thermal gas meters. *Energies*, 13(20): 5428. DOI: 10.3390/en13205428.
- Jaworski J., Kukulka-Zajac E., Kułaga P., 2019. Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na elementy systemu gazowniczego. *Nafta-Gaz*, 75(10): 625–632. DOI: 10.18668/NG.2019.10.04.
- Jaworski J., Kułaga P., Blacharski T., 2020. Study of the effect of addition of hydrogen to natural gas on diaphragm gas meters. *Energies*, 13(11): 3006. DOI: 10.3390/en13113006.
- Kumar S., Himabindu V., 2019. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3): 442–454. DOI: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- Lambert M., Schulte S., 2021. Contrasting European hydrogen pathways: An analysis of differing approaches in key markets. <<https://www.oxfordenergy.org/publications/contrasting-european-hydrogen-pathways-an-analysis-of-differing-approaches-in-key-markets/>> (dostęp: wrzesień 2021).
- Li P., Wang Z., Qiao Z., Liu Y., Cao X., Li W., Wang J., Wang S., 2015. Recent developments in membranes for efficient hydrogen purification. *Journal of Membrane Science*, 495: 130–168. DOI: 10.1016/j.memsci.2015.08.010.
- Liguori S., Kian K., Buggy N., Anzelmo B.H., Wilcox J., 2020. Opportunities and challenges of low-carbon hydrogen via metallic membranes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 80: 100851. DOI: 10.1016/j.peccs.2020.100851.
- LINDE. Hydrogen Recovery by Pressure Swing Adsorption. <[https://web.archive.org/web/20160803141740/http://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/en/images/HA\\_H\\_1\\_1\\_e\\_12\\_150dpi19\\_6130.pdf](https://web.archive.org/web/20160803141740/http://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/en/images/HA_H_1_1_e_12_150dpi19_6130.pdf)> (dostęp: wrzesień 2021).
- Maj M., Szpor A., 2019. Kierunki rozwoju i gospodarki wodorowej w Polsce. *Polski Instytut Ekonomiczny, Warszawa*. ISBN 978-83-66306-61-5.
- Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2021. Polska strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. Załącznik do uchwały nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 (poz. 1138).
- Sharma S., Ghoshal S.K., 2015. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43: 1151–1158. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.093.
- Staffell I., Scamman D., Velazquez Abad A., Balcombe P., Dodds P.E., Ekins P., Shahd N., Ward K.R., 2019. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy systems. *Energy and Environmental Science*, 12: 463–491. DOI: 10.1039/c8ee01157e.
- Sun C., Zheng X., Bai B., 2019. Hydrogen purification using nanoporous graphene membranes and its economic analysis. *Chemical Engineering Science*, 208: 115141. DOI: 10.1016/j.ces.2019.07.059.
- Tanco M.A.L., Medrano J.A., Cechetto V., Gallucci F., Tanaka D.A.P., 2020. Hydrogen permeation studies of composite supported alumina-carbon molecular sieves membranes: Separation of diluted hydrogen from mixtures with methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(37): 19758–19767. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.088.
- Vermaak L., Neomagus H.W.J.P., Bessarabov D.G., 2021. Recent Advances in Membrane-Based Electrochemical Hydrogen Separation: A Review. *Membranes*, 11: 127. DOI: 10.3390/membranes11020127.
- Yang E., Alayande A.B., Goh K., Kim C.-M., Chu K.-H., Hwang M.-H., Ahn J.-H., Chae K.-J., 2021. 2D materials-based membranes for hydrogen purification: Current status and future prospects.

*International Journal of Hydrogen Energy*, 46(20): 11389–11410.  
DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.053.

Zhang F., Zhao P., Niu M., Maddy J., 2016. The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33): 14535–14552. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.293.

Żyjewska U., 2021. Rodzaje ogniw paliwowych i ich potencjalne kierunki wykorzystania. *Nafta-Gaz*, 77(5): 332–339. DOI: 10.18668/NG.2021.05.06.

## Akty prawne i dokumenty normatywne

EN 17124:2018 Paliwo wodorowe – Specyfikacja produktu i zapewnienie jakości – Zastosowanie polimerowych ogniw paliwowych (PEM) dla pojazdów drogowych.

ISO 14687:2019 Hydrogen product quality – Product specification.

ISO 19880-8:2019 Gaseous hydrogen – Fuelling stations – Part 8: Fuel quality control.



Dr Ewa KUKULSKA-ZAJĄC  
Zastępca Dyrektora ds. Gazownictwa  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: ewa.kukulska-zajac@inig.pl



Mgr Jadwiga HOLEWA-RATAJ  
Starszy specjalista badawczo-techniczny;  
kierownik Zakładu Ochrony Środowiska  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: jadwiga.holewa-rataj@inig.pl



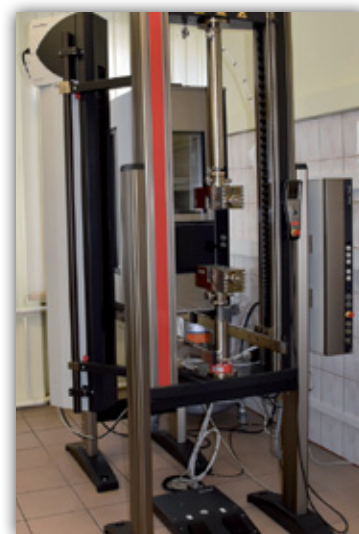
Mgr Monika GAJEC  
Główny specjalista inżynierijno-techniczny  
w Zakładzie Ochrony Środowiska  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: monika.gajec@inig.pl



Dr Anna KRÓL  
Adiunkt w Zakładzie Ochrony Środowiska  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: anna.krol@inig.pl

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU PRZESYŁANIA I DYSTRYBUCJI GAZU

- badania wyrobów z polietylenu do budowy gazociągów, wodociągów oraz kanalizacji deszczowej i sanitarnej;
- badania systemów rurowych z tworzyw sztucznych do instalacji wody ciepłej i zimnej;
- badania armatury metalowej do sieci i instalacji gazowych oraz wodociągowych;
- badania armatury sanitarnej oraz do instalacji centralnego ogrzewania i solarnych;
- badania powłok ochronnych z tworzyw sztucznych na rurach i armaturze stalowej;
- ocena stopnia zagrożenia korozyjnego gazociągów stalowych;
- ocena stanu technicznego izolacji gazociągów stalowych metodami bezwykopowymi;
- badania nowych materiałów z tworzyw sztucznych do budowy gazociągów;
- badania systemów z PE pod kątem możliwości ich stosowania do przesyłania mieszaniny gazu ziemnego i wodoru;
- specjalistyczne szkolenia – szkolenie i kwalifikacja personelu zgrzewającego rury i kształtki z PE wg PN-EN 13067 w INiG-PIB jako Ośrodku Szkoleniowym i Egzaminacyjnym uznanym przez UDT-CERT.



Kierownik: mgr inż. Piotr Szewczyk    Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków  
Telefon: 12 617 74 42    Faks: 12 653 16 65    E-mail: piotr.szewczyk@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU  
– Państwowy Instytut Badawczy