



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

Gaz Woda i Technika Sanitarna Gas Water & Sanitary Engineering

Artykuł dostępny / Open Access: www.gwits.pl

Analiza procesu produkcji wodoru metodą reformingu parowego metanu w kontekście efektywności technologicznej i oddziaływania środowiskowego

Analysis of hydrogen production via steam methane reforming in the context of technological efficiency and environmental impact

Anna Yevtushenko^{1*} 

¹ Wydział Inżynierii i Ekonomii, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie

* Kontakt / Correspondence: yevtushenkoanna04@gmail.com

Streszczenie:

Praca dotyczy szczegółowej analizy procesu produkcji wodoru metodą reformingu parowego metanu, stanowiącego najbardziej rozwiniętą technologicznie metodę przemysłowego wytwarzania wodoru. W pracy przyjęto tezę, że reforming parowy metanu (SMR) jest podstawowym i najbardziej dojrzałym technologicznie procesem przemysłowej produkcji szarego wodoru. Przedstawiono charakterystykę procesu, analizę energetyczną oraz budowę instalacji SMR. Szczególną uwagę poświęcono emisji CO₂ oraz możliwościom jej ograniczenia poprzez technologie CCS. Omówiono również koszty produkcji wodoru oraz porównanie z innymi metodami jego wytwarzania.

Słowa kluczowe: reforming parowy metanu, wodór szary, wodór niebieski, CCS, emisja CO₂

Abstract:

The paper presents a detailed analysis of hydrogen production via steam methane reforming (SMR), which is the most technologically mature industrial method. The thesis assumes that SMR is the primary and most advanced technology for large-scale grey hydrogen production. The study includes process characteristics, energy analysis, and system components. Particular attention is given to CO₂ emissions and their reduction using CCS technologies. Economic aspects and comparisons with alternative hydrogen production methods are also discussed.

Keywords: steam methane reforming, grey hydrogen, blue hydrogen, CCS, CO₂ emissions

1. Wstęp

Współczesny system energetyczny opiera się na nośnikach energii, takich jak energia elektryczna, paliwa ciekłe oraz gaz ziemny, które powstają w wyniku przetwarzania pierwotnych źródeł energii. Nośniki te umożliwiają transport, magazynowanie oraz wykorzystanie energii w sektorach przemysłowym, transportowym i komunalnym.

W długoterminowej perspektywie rośnie znaczenie energii elektrycznej oraz wodoru jako nośników energii wspierających transformację energetyczną. Wodór wyróżnia się dużą elastycznością w zakresie metod produkcji i może być wytwarzany zarówno z surowców kopalnych, jak i odnawialnych. Z tego względu uznawany jest za jeden z kluczowych elementów dekarboni-

zacji gospodarki.

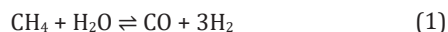
Obecnie zdecydowana większość wodoru produkowana jest z paliw kopalnych, przede wszystkim z gazu ziemnego. Reforming parowy metanu (steam methane reforming – SMR) stanowi dominującą technologię produkcji wodoru na świecie, odpowiadając za większość jego globalnej produkcji. Technologie odnawialne, takie jak elektroliza wody, mają obecnie znacznie mniejszy udział, głównie ze względu na wyższe koszty. Wodór klasyfikowany jest często według tzw. „kolorów”, odnoszących się do sposobu jego produkcji. Wodór szary powstaje z gazu ziemnego bez redukcji emisji CO₂, wodór niebieski uwzględnia technologie wychwytu i składowania dwutlenku węgla, natomiast wodór zielony produkowany jest z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii.

Artykuł / Article: Nadesłany / Received: 26.03.2026; Zrecenzowany / Revised: 3.04.2026; Zaakceptowany / Accepted: 10.04.2026; Opublikowany / Published: 25.04.2026

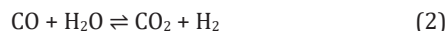
Prawa autorskie: © 2026 autorów. Licencjodawca: PZITS. Artykuł w otwartym dostępie na licencji Creative Commons CC BY 4.0. / Copyright: © 2026 by the authors. Licensee PZITS. This article is an open access under the Creative Commons CC BY 4.0 license.

2. Charakterystyka technologii reformingu parowego metanu

Reforming parowy metanu jest procesem chemicznym polegającym na reakcji metanu z parą wodną w podwyższonej temperaturze, prowadzącej do powstania gazu syntezowego zawierającego głównie wodór i tlenek węgla. Proces ten stanowi podstawę przemysłowej produkcji wodoru. Podstawowa reakcja przebiega zgodnie z równaniem (1):



W dalszym etapie zachodzi reakcja konwersji tlenku węgla (water-gas shift – WGS):



W wyniku tych reakcji uzyskuje się mieszaninę gazów, która po oczyszczeniu pozwala na uzyskanie wodoru o wysokiej czystości. Proces prowadzony jest w wysokich temperaturach, najczęściej w zakresie 800–1000°C, oraz pod umiarkowanym ciśnieniem. Warunki te wynikają z charakteru reakcji – reforming jest procesem endotermicznym, wymagającym dostarczania dużych ilości energii. Na przebieg procesu wpływają m.in. temperatura, ciśnienie, stosunek pary wodnej do metanu oraz skład surowca. Wyższa temperatura sprzyja zwiększeniu wydajności wodoru, natomiast zbyt wysokie ciśnienie ogranicza konwersję metanu. Istotne znaczenie ma również odpowiednie oczyszczenie gazu ziemnego z zanieczyszczeń siarkowych, które mogą dezaktywować katalizator. Reforming parowy wyróżnia się wysoką efektywnością oraz możliwością prowadzenia procesu w dużej skali, co czyni go podstawową technologią produkcji wodoru na świecie.

3. Elementy instalacji reformingu parowego metanu

Instalacja SMR stanowi złożony układ technologiczny obejmujący kilka podstawowych sekcji procesowych. Centralnym elementem jest reaktor reformingu, w którym zachodzi reakcja metanu z parą wodną. W praktyce stosuje się reformery rurowe, gdzie mieszanina gazów przepływa przez rury wypełnione katalizatorem niklowym. Rury te ogrzewane są zewnątrz przez spaliny powstające w piecu reformingowym. Katalizatory niklowe umożliwiają efektywne rozrywanie wiązań chemicznych w cząsteczkach metanu. Jednocześnie są podatne na dezaktywację, głównie wskutek obecności siarki oraz tworzenia osadów węglowych, dlatego wymagane jest dokładne oczyszczenie surowca. Ze względu na endotermiczny charakter reakcji instalacja wyposażona jest w systemy spalania i wymiany ciepła. Energia cieplna dostarczana jest poprzez spalanie paliwa, a jej część odzyskiwana jest w wymiennikach ciepła, co zwiększa efektywność energetyczną procesu. Po etapie reformingu gaz poddawany jest oczyszczaniu. W pierwszej kolejności zachodzi konwersja tlenku węgla (high temperature shift – HTS, low – temperature shift – LTS), następnie usuwane są zanieczyszczenia, a końcowym etapem jest separacja wodoru w instalacji adsorpcji zanieczyszczeń pod wysokim ciśnieniem (pressure swing adsorption – PSA). Pozwala to uzyskać wodór o czystości przekraczającej 99,9%.

4. Aspekty środowiskowe produkcji wodoru metodą reformingu parowego metanu

Produkcja wodoru metodą reformingu parowego metanu, mimo wysokiej dojrzałości technologicznej i szerokiego zastosowania przemysłowego, wiąże się z istotnym oddziaływaniem na środowisko. Najważniejszym problemem pozostaje emisja dwutlenku węgla, która wynika zarówno z reakcji chemicznych zachodzących w procesie reformingu, jak i ze spalania paliwa niezbędnego do dostarczenia energii cieplnej. W niniejszym rozdziale przedstawiono wielkości emisji CO₂, odniesiono proces SMR do innych technologii produkcji wodoru oraz omówiono metody ograniczania emisji, w tym technologie wychwyty i zagospodarowania dwutlenku węgla.

4.1. Wielkości emisji dwutlenku węgla w procesie SMR

Emisja CO₂ w procesie reformingu parowego metanu ma dwa podstawowe źródła. Pierwszym jest emisja procesowa, bezpośrednio związana z reakcjami reformingu metanu oraz konwersji tlenku węgla. Drugim jest emisja energetyczna, wynikająca ze spalania paliwa w piecu reformingowym, które dostarcza energię niezbędną do przebiegu reakcji endotermicznych. Całkowita emisja dwutlenku węgla w procesie SMR wynosi zazwyczaj od 9 do 12 kgCO₂ na każdy kilogram wyprodukowanego wodoru. Wartość ta zależy od wielu czynników, takich jak sprawność instalacji, stopień odzysku ciepła, skład gazu ziemnego oraz parametry prowadzenia procesu. Wysoka emisyjność stanowi jedno z głównych ograniczeń tej technologii w kontekście dekarbonizacji gospodarki [1, 7, 12].

4.2. Porównanie reformingu parowego z innymi metodami produkcji wodoru

Ocena oddziaływania środowiskowego reformingu parowego metanu wymaga odniesienia do innych technologii produkcji wodoru, w szczególności reformingu autotermicznego (autothermal reforming – ATR) oraz katalitycznego częściowego utleniania (catalytic partial oxidation – POX). Reforming autotermiczny łączy reakcje reformingu parowego z częściowym utlenianiem metanu, dzięki czemu część energii dostarczana jest bezpośrednio w reaktorze. Ogranicza to zapotrzebowanie na paliwo zewnętrzne i może prowadzić do niższych emisji CO₂, jednak kosztem większej złożoności instalacji. Z kolei proces częściowego utleniania charakteryzuje się krótkim czasem reakcji i uproszczoną aparaturą, lecz prowadzi do powstania gazu syntezowego o mniej korzystnym składzie pod kątem produkcji wodoru. Ostateczny bilans emisyjny tej technologii zależy m.in. od sposobu pozyskania tlenu oraz zagospodarowania energii. Na tle tych metod reformingu parowy metanu pozostaje najbardziej efektywny pod względem wydajności wodorowej, jednak przy braku technologii wychwyty CO₂ cechuje się najwyższą emisyjnością [3, 4, 8].

4.3. Metody wychwytywania dwutlenku węgla w instalacjach SMR

Ograniczenie emisji CO₂ możliwe jest poprzez zastosowanie technologii jego wychwytywania. W praktyce stosuje się kilka podejść różniących się miejscem separacji oraz mechanizmem działania. Najczęściej wykorzystywaną metodą jest absorpcja chemiczna z użyciem roztworów aminowych. Proces polega na wiązaniu CO₂ w absorberze, a następnie jego uwalnianiu w desorberze poprzez podgrzewanie roztworu. Rozwiązanie to cechuje się wysoką skutecznością, jednak wiąże się z dodatkowymi nakładami energetycznymi

Alternatywą są technologie membranowe, w których separacja opiera się na różnicach przenikalności gazów przez materiał membrany. Charakteryzują się one niższym zużyciem energii, lecz ich trwałość i efektywność w warunkach przemysłowych są nadal rozwijane.

Stosowane są również metody kriogeniczne, polegające na rozdziale składników gazu w niskich temperaturach. Umożliwiają uzyskanie CO₂ o wysokiej czystości, jednak są bardziej energochłonne i stosowane głównie w specyficznych przypadkach. W instalacjach SMR szczególnie korzystny jest wychwyt CO₂ z gazu syntezowego po reakcji WGS, gdzie jego stężenie jest wysokie. Możliwe jest także wychwytywanie CO₂ ze spalin, choć jest to rozwiązanie bardziej wymagające energetycznie.

4.4. Łańcuch technologiczny CCS w produkcji wodoru niebieskiego

Technologia wychwytu i składowania dwutlenku węgla (carbon capture and storage – CCS) stanowi podstawę produkcji wodoru niebieskiego. Obejmuje ona kilka etapów: wychwyt CO₂, jego sprężanie, transport oraz długoterminowe magazynowanie. Dwutlenek węgla powstający w instalacji SMR może być wychwytywany zarówno z gazu procesowego, jak i ze spalin. W przypadku gazu procesowego jego stężenie sięga 15–20%, co sprzyja efektywnej separacji. Po oddzieleniu CO₂ jest sprężany do ciśnienia około 100–150 bar, co umożliwia jego transport w stanie nadkrytycznym. Transport realizowany jest najczęściej rurociągami, rzadziej drogą morską. Następnie CO₂ zatłaczany jest do struktur geologicznych, takich jak wyeksploatowane złoża gazu i ropy lub formacje solankowe. W takich warunkach może być magazynowany przez bardzo długi czas. Zastosowanie technologii CCS pozwala ograniczyć emisję CO₂ nawet o 80–90%. Jednocześnie wiąże się z dodatkowymi kosztami, obejmującymi zarówno wychwyt, jak i transport oraz magazynowanie gazu [7].

4.5. Technologie neutralizacji CO₂ – CCS i CC

Wychwycony dwutlenek węgla może być zarówno magazynowany, jak i wykorzystywany w procesach przemysłowych. W przypadku technologii CCS CO₂ jest trwale składowany w strukturach geologicznych, co pozwala ograniczyć emisję netto nawet o 60–90%. Alternatywą jest CCU (carbon capture and utilization), czyli wykorzystanie CO₂ jako surowca, np. do produkcji paliw syntetycznych, chemikaliów lub materiałów budowlanych. Choć rozwiązanie to ma duży potencjał, jego zastosowanie w skali globalnej jest ograniczone. Integracja SMR

z technologią CCS prowadzi do powstania wodoru niebieskiego, który traktowany jest jako rozwiązanie przejściowe w procesie dekarbonizacji sektora energetycznego.

4.6. Koszty wychwytu i neutralizacji CO₂

Wdrożenie technologii wychwytu CO₂ wiąże się ze wzrostem kosztów inwestycyjnych i operacyjnych. W przypadku absorpcji aminowej koszty wychwytu wynoszą zazwyczaj 40–80 EUR/tCO₂. Technologie membranowe generują koszty rzędu 50–90 EUR/tCO₂, natomiast metody kriogeniczne mogą przekraczać 80–120 EUR/tCO₂. Do tego dochodzą koszty transportu i magazynowania, które wynoszą zazwyczaj 10–30 EUR/tCO₂. Łącznie koszt systemu CCS w instalacjach SMR wynosi około 50–110 EUR/tCO₂, co przekłada się bezpośrednio na wzrost kosztu produkcji wodoru [1].

4.7. Koszty produkcji wodoru niebieskiego

Koszt produkcji wodoru z gazu ziemnego bez wychwytu CO₂ wynosi około 1,2 USD/kgH₂. Zastosowanie technologii CCS zwiększa ten koszt do poziomu 1,6–2,4 USD/kgH₂. Wzrost kosztów wynika głównie z konieczności budowy dodatkowej infrastruktury oraz zwiększonego zużycia energii. Pomimo tego wódór niebieski pozostaje konkurencyjny wobec wodoru zielonego, którego koszt produkcji wynosi obecnie około 3–6 USD/kgH₂. W przyszłości przewiduje się spadek kosztów dzięki rozwojowi technologii oraz zwiększeniu skali produkcji [1, 12].

4.8. Porównanie dojrzałości technologicznej (TRL) metod produkcji wodoru

Poziom gotowości technologicznej (technology readiness level – TRL) umożliwia ocenę stopnia rozwoju poszczególnych metod produkcji wodoru. Reforming parowy metanu należy do technologii w pełni dojrzałych (TRL 9) i szeroko stosowanych przemysłowo. Elektroliza wody z wykorzystaniem OZE również osiągnęła wysoki poziom rozwoju, choć jej zastosowanie ograniczają koszty energii. Technologie takie jak piroliza metanu, gazyfikacja odpadów czy procesy termochemiczne znajdują się na niższych poziomach TRL i wymagają dalszego rozwoju. Najbardziej innowacyjne metody, takie jak fotoliza czy procesy biologiczne, pozostają na etapie badań. Porównanie wybranych technologii przedstawiono w tabeli 1.

5. Analiza ekonomiczna produkcji wodoru metodą reformingu parowego metanu

Ekonomika produkcji wodoru stanowi jeden z kluczowych czynników determinujących wybór technologii w skali przemysłowej. Reforming parowy metanu jako technologia dojrzała i szeroko stosowana, charakteryzuje się relatywnie niskimi kosztami wytwarzania wodoru w porównaniu z alternatywnymi metodami. O konkurencyjności ekonomicznej procesu decydują przede wszystkim koszty surowca, zapotrzebowanie energetyczne instalacji oraz nakłady związane z ograniczaniem emisji dwutlenku węgla.

Tabela 1. Porównanie wybranych metod produkcji wodoru, na podstawie [13, 14]
Table 1. Comparison of selected hydrogen production methods, based on [13, 14]

Metoda	Źródło energii / surowiec	Typ wodoru	TRL	Status, emisyjność i charakterystyka technologiczna
Elektroliza – OZE (wiatr)	Energia wiatrowa	Zielony	8–9 (ALK, PEM), 6–8 (SOEC)	ALK i PEM komercyjne; SOEC w komercjalizacji. Bardzo niska emisyjność operacyjna; zależność od zmienności generacji energii.
Elektroliza – OZE (fotowoltaika)	Energia słoneczna (PV)	Zielony	8–9 (ALK, PEM), 6–8 (SOEC)	Technologie komercyjne dla ALK i PEM. Bardzo niska emisyjność; efektywność zależna od nasłonecznienia i sezonowości.
Elektroliza – energia jądrowa	Energia jądrowa	Fioletowy	8–9	Technologie niskotemperaturowe komercyjne; wysokotemperaturowe w rozwoju. Bardzo niska emisyjność dzięki stabilnemu źródłu energii.
Elektroliza – sieć krajowa	Miks energetyczny KSE	Zależny od miks	9	Technologia komercyjna; emisyjność zależna od miks (w Polsce ok. 30–35 kgCO ₂ /kgH ₂). Koszt zależny od cen energii i regulacji.
Reforming parowy metanu (SMR)	Gaz ziemny	Szary	9	W pełni dojrzała technologia przemysłowa; wysoka emisyjność CO ₂ ; relatywnie niskie koszty jednostkowe przy rozwiniętej infrastrukturze.
Reforming parowy biogazu	Biogaz	Niskoemisyjny / bio	6–8	Wczesna komercjalizacja; proces analogiczny do SMR; niższa emisyjność netto dzięki odnawialnemu surowcowi.
Piroliza metanu	Gaz ziemny (metan)	Turkusowy	5–7	Projekty demonstracyjne; brak emisji CO ₂ w reakcji, produktem ubocznym jest węgiel stały wymagający zagospodarowania.
Gazyfikacja odpadów + PSA	Odpady komunalne / przemysłowe	Zależny	5–7	Wstępna komercjalizacja; gazyfikacja (700–800°C) i separacja PSA; średnia emisyjność i złożoność operacyjna.
Procesy termochemiczne (S-I, Cu-Cl)	Wysokotemperaturowe źródło ciepła	Zależny	4–6	Zaawansowane badania przedkomercyjne; emisyjność zależna od źródła ciepła; wieloetapowe cykle chemiczne.
Metody innowacyjne (fotoliza, fermentacja, membrany)	Energia słoneczna, biomasa, procesy biologiczne	Zielony (potencjalnie)	2–4	Etap B+R; potencjalnie bardzo niska emisyjność; wysoka niepewność technologiczna i brak określonego horyzontu komercjalizacji.

5.1. Struktura kosztów produkcji wodoru w procesie SMR

Koszty produkcji wodoru metodą reformingu parowego metanu dzielą się na koszty inwestycyjne oraz koszty operacyjne. Koszty inwestycyjne obejmują nakłady związane z budową instalacji, w tym reformera rurowego, pieca reformingowego, systemów wymiany ciepła, układów konwersji tlenku węgla, instalacji separacji wodoru oraz infrastruktury pomocniczej. Wysoki poziom dojrzałości technologicznej procesu SMR pozwala jednak na ograniczenie ryzyka inwestycyjnego oraz długoterminową, stabilną eksploatację instalacji.

Koszty operacyjne stanowią dominującą część całkowitych kosztów produkcji wodoru. Obejmują one przede wszystkim koszt gazu ziemnego, który pełni funkcję zarówno surowca procesowego, jak i paliwa dostarczającego energii cieplnej. Dodatkowo składniki kosztów operacyjnych stanowią zużycie energii elektrycznej, koszty utrzymania ruchu, wymiany katalizatorów oraz koszty pracy. w strukturze kosztów operacyjnych udział gazu ziemnego jest czynnikiem decydującym o konkurencyjności ekonomicznej technologii SMR.

5.2. Wpływ cen gazu ziemnego i energii na ekonomikę procesu

Cena gazu ziemnego ma kluczowy wpływ na koszt produkcji wodoru metodą reformingu parowego metanu. w literaturze wskazuje się, że koszt surowca może odpowiadać za 50–70% całkowitego kosztu wytworzenia wodoru. w regionach charakteryzujących się dostępem do taniego gazu ziemnego technologia SMR pozostaje najbardziej konkurencyjną ekonomicznie metodą produkcji wodoru w skali przemysłowej. Znaczenie kosztu energii elektrycznej jest mniejsze, lecz niepomijalne. Energia elektryczna wykorzystywana jest głównie do napędu sprężarek, pomp oraz urządzeń pomocniczych. Jej udział w całkowitym koszcie produkcji wodoru zależy od stopnia integracji cieplnej instalacji oraz sprawności systemów pomocniczych. w instalacjach o wysokim stopniu odzysku ciepła wpływ kosztu energii elektrycznej na ekonomikę procesu pozostaje ograniczony.

5.3. Koszt jednostkowy produkcji wodoru metodą SMR

Koszt jednostkowy produkcji wodoru metodą reformingu parowego metanu stanowi jeden z najczęściej stosowanych wskaźników oceny konkurencyjności ekonomicznej tej technologii. Wartość ta zależy od szeregu czynników technologicznych, ekonomicznych oraz lokalnych uwarunkowań rynkowych, spośród których kluczowe znaczenie mają cena gazu ziemnego, skala instalacji, stopień integracji cieplnej oraz konfiguracja układu technologicznego.

Na podstawie danych literaturowych koszt produkcji wodoru metodą SMR, bez uwzględnienia kosztów neutralizacji dwutlenku węgla, szacowany jest zazwyczaj w przedziale 1,0–2,0 EUR/kgH₂. Dolna granica tego zakresu dotyczy dużych instalacji przemysłowych pracujących w regionach o niskich cenach gazu ziemnego i wysokim stopniu odzysku ciepła. Wyższe wartości obserwowane są w przypadku mniejszych instalacji lub w warunkach podwyższonych cen surowca energetycznego.

Istotny wpływ na koszt jednostkowy wodoru ma skala produkcji. Efekt skali powoduje, że wraz ze wzrostem wydajności instalacji maleje jednostkowy koszt inwestycyjny, a koszty stałe rozkładają się na większą ilość produktu. Z tego względu technologia SMR jest szczególnie konkurencyjna w dużych wytwórniach wodoru zintegrowanych z instalacjami przemysłu chemicznego, rafineryjnego oraz nawozowego.

Znaczenie ma również stopień integracji energetycznej instalacji. Rozbudowane systemy odzysku ciepła, wykorzystanie gazów odpadowych z procesu separacji wodoru jako paliwa oraz optymalizacja parametrów pracy pieca reformingowego pozwalają na obniżenie zużycia paliwa i tym samym zmniejszenie kosztu jednostkowego wodoru. Instalacje o niskim stopniu integracji cieplnej charakteryzują się wyższymi kosztami operacyjnymi, co bezpośrednio przekłada się na koszt końcowy produktu.

Na koszt produkcji wodoru wpływają także warunki rynkowe i regulacyjne. w regionach objętych systemami handlu uprawnieniami do emisji dwutlenku węgla koszt jednostkowy wodoru produkowanego metodą SMR może ulec zwiększeniu w wyniku konieczności ponoszenia opłat za emisje. z drugiej strony brak takich regulacji lub niskie ceny uprawnień do emisji sprzyjają utrzymaniu konkurencyjności ekonomicznej technologii SMR.

Pomimo rosnących wymagań środowiskowych reforming parowy metanu pozostaje obecnie najtańszą metodą produkcji wodoru w skali przemysłowej. Niski koszt jednostkowy wodoru stanowi podstawowy argument przemawiający za dalszym wykorzystaniem tej technologii, zwłaszcza jako rozwiązania przejściowego w procesie transformacji energetycznej, do czasu osiągnięcia porównywalnej konkurencyjności kosztowej przez technologie niskoemisyjne.

5.4. Porównanie kosztowe reformingu parowego metanu z innymi technologiami produkcji wodoru

Porównanie kosztowe technologii produkcji wodoru stanowi istotny element oceny ich potencjału wdrożeniowego w skali przemysłowej (Tab.2). Reforming parowy metanu jako technolo-

gia o najwyższym poziomie dojrzałości technologicznej, jest powszechnie traktowany jako punkt odniesienia w analizach ekonomicznych innych metod wytwarzania wodoru. W porównaniu z reformingiem parowym metanu reforming autotermiczny charakteryzuje się zbliżonym poziomem kosztów inwestycyjnych, jednak strukturą kosztów operacyjnych o innym rozkładzie. w procesie ATR część energii niezbędnej do przebiegu reakcji generowana jest bezpośrednio w reaktorze w wyniku częściowego utleniania metanu, co ogranicza zapotrzebowanie na zewnętrzne źródła ciepła. Jednocześnie konieczność dostarczania tlenu lub sprężonego powietrza powoduje wzrost kosztów operacyjnych oraz zwiększa złożoność instalacji. w rezultacie koszt jednostkowy wodoru produkowanego metodą ATR jest zazwyczaj porównywalny lub nieco wyższy niż w przypadku SMR, przy czym ATR uznawany jest za technologię korzystniejszą z punktu widzenia integracji z systemami wychwytywania CO₂.

Proces katalitycznego częściowego utleniania metanu charakteryzuje się krótszym czasem reakcji oraz prostszą aparaturą w porównaniu z klasycznym reformingiem parowym. z drugiej strony uzyskiwany gaz syntezowy zawiera niższy udział wodoru, co ogranicza efektywność procesu w przypadku produkcji wodoru o wysokiej czystości. Koszt jednostkowy wodoru wytwarzanego metodą POX jest zazwyczaj wyższy niż w SMR, co wynika z konieczności dalszego przetwarzania gazu syntezowego oraz mniejszej wydajności wodorowej procesu.

Elektroliza wody, zarówno w technologii alkalicznej, jak i PEM (proton exchange membrane), charakteryzuje się znacznie wyższym kosztem produkcji wodoru w porównaniu z reformingiem parowym metanu. Głównym czynnikiem kosztotwórczym jest cena energii elektrycznej, która w strukturze kosztów elektrolizy stanowi dominującą pozycję. w obecnych warunkach rynkowych koszt jednostkowy wodoru produkowanego metodą elektrolizy wody szacowany jest na poziomie 3,0–6,0 EUR/kgH₂, co znacząco ogranicza konkurencyjność tej technologii w porównaniu z SMR, zwłaszcza w regionach o wysokich cenach energii elektrycznej [1].

Produkcja wodoru w procesach zgazowania paliw stałych, takich jak węgiel, cechuje się wysokimi nakładami inwestycyjnymi oraz znacznym obciążeniem środowiskowym. Pomimo wysokiego poziomu dojrzałości technologicznej procesy te wymagają rozbudowanych systemów oczyszczania gazu oraz wychwytywania dwutlenku węgla, co prowadzi do wzrostu kosztów całkowitych. w rezultacie zgazowanie węgla jest obecnie konkurencyjne ekonomicznie jedynie w regionach o niskich kosztach surowca i ograniczonych restrykcjach środowiskowych. Zgazowanie biomasy oraz inne technologie wykorzystujące surowce odnawialne charakteryzują się wyższym kosztem jednostkowym wodoru w porównaniu z SMR. Wynika to z ograniczonej skali instalacji, niestabilności surowca oraz wyższych kosztów operacyjnych. Pomimo potencjalnych korzyści środowiskowych technologie te pozostają mniej konkurencyjne ekonomicznie w krótkiej i średniej perspektywie czasowej.

Podsumowując, reforming parowy metanu pozostaje najbardziej konkurencyjną kosztowo technologią produkcji wodoru w skali przemysłowej. Alternatywne metody, mimo dynamicznego rozwoju i potencjalnych korzyści środowiskowych, charakteryzują się obecnie wyższymi kosztami jednostkowymi lub więk-

szym ryzykiem inwestycyjnym. z tego względu SMR pełni rolę punktu odniesienia w analizach ekonomicznych i stanowi istotny element przejściowy w procesie transformacji sektora wodorowego.

Tabela 2. Porównanie kosztów produkcji wodoru w wybranych technologiach, na podstawie [1, 3, 7, 10]

Table 2. Comparison of hydrogen production costs in selected technologies, based on [1, 3, 7, 10]

Technologia produkcji wodoru	Główny surowiec	Koszt produkcji wodoru [EUR/kgH ₂]	Uwagi ekonomiczne
Reforming parowy metanu (SMR)	Gaz ziemny	1,0–2,0	Najniższy koszt, wysoka dojrzałość technologiczna
SMR z CCS (wodór niebieski)	Gaz ziemny	1,5–3,0	Wyższe koszty, redukcja emisji CO ₂
Reforming autotermiczny (ATR)	Gaz ziemny + tlen	1,5–2,5	Korzystny do integracji z CCS
Elektroliza wody (alkaliczna, PEM)	Woda + energia elektryczna	3,0–6,0	Koszt silnie zależny od ceny energii
Elektroliza SOEC	Woda + energia cieplna	> 4,0	Technologia w fazie rozwoju
Zgazowanie węgla	Węgiel	2,0–3,5	Wysokie emisje CO ₂ , wysokie CAPEX
Zgazowanie biomasy	Biomasa	3,0–5,0	Ograniczona skala, wyższe koszty

5.5. Wpływ kosztów neutralizacji dwutlenku węgla oraz cen uprawnień do emisji CO₂ na ekonomikę SMR

Integracja procesu reformingu parowego metanu z technologiami wychwytywania i składowania dwutlenku węgla prowadzi do istotnego wzrostu kosztów produkcji wodoru. Całkowity koszt neutralizacji CO₂ w instalacjach SMR zintegrowanych z systemami CCS, obejmujący wychwyt, sprężanie, transport oraz składowanie, szacowany jest na 50–110 EUR/tCO₂, w zależności od zastosowanej technologii oraz lokalnych uwarunkowań infrastrukturalnych.

Koszty te przekładają się bezpośrednio na wzrost kosztu jednostkowego wodoru o około 0,5–1,5 EUR/kgH₂, co prowadzi do powstania tzw. wodoru niebieskiego, droższego od wodoru szarego, lecz nadal konkurencyjnego wobec wodoru zielonego. Pomimo wzrostu kosztów produkcji zastosowanie technologii CCS umożliwia znaczące ograniczenie emisji netto CO₂, co ma istotne znaczenie w kontekście zaostrzającej się polityki klimatycznej. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na ekonomikę procesu SMR są ceny uprawnień do emisji dwutlenku węgla w ramach systemów handlu emisjami, takich jak EU ETS. Przy emisji rzędu 9–12 kgCO₂ na każdy kilogram wyprodukowanego wodoru koszt związany z zakupem uprawnień do emisji CO₂ może istot-

nie zwiększyć koszt końcowy produktu. Przy cenie uprawnień wynoszącej przykładowo 80 EUR/tCO₂, dodatkowy koszt emisji może wynosić nawet 0,7–1,0 EUR/kgH₂ [1].

W warunkach rosnących cen uprawnień do emisji CO₂ integracja SMR z technologiami CCS staje się coraz bardziej uzasadniona ekonomicznie. Ograniczenie emisji prowadzi do zmniejszenia obciążeń wynikających z konieczności zakupu uprawnień, co częściowo kompensuje wzrost kosztów inwestycyjnych i operacyjnych związanych z instalacją systemów wychwytu CO₂. W dłuższej perspektywie ekonomicznej wodór niebieski może stanowić konkurencyjne kosztowo rozwiązanie przejściowe pomiędzy wodorem szarym a wodorem zielonym.

6. Kierunki rozwoju technologii reformingu parowego metanu

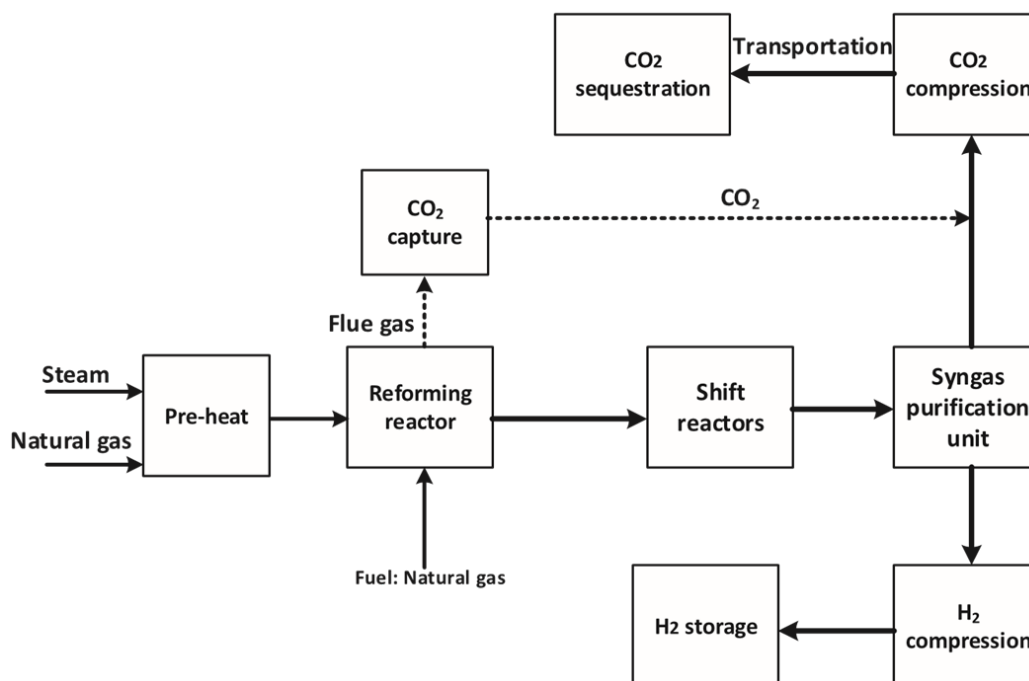
Reforming parowy metanu, mimo wysokiego poziomu dojrzałości technologicznej, pozostaje przedmiotem dalszych prac rozwojowych. Wynikają one przede wszystkim z potrzeby poprawy efektywności energetycznej, ograniczenia emisji dwutlenku węgla oraz dostosowania technologii do wymagań transformacji energetycznej. Współczesne kierunki rozwoju koncentrują się na udoskonaleniu katalizatorów, poprawie integracji cieplnej, intensyfikacji procesu oraz integracji SMR z odnawialnymi źródłami energii i technologiami wychwytu CO₂.

6.1. Rozwój katalizatorów nowej generacji

Katalizatory stosowane w procesie SMR w istotny sposób wpływają na jego wydajność oraz stabilność pracy instalacji. Najczęściej wykorzystywane katalizatory niklowe, mimo swojej wysokiej aktywności, wykazują podatność na koksowanie, spiekanie oraz dezaktywację w obecności zanieczyszczeń, zwłaszcza związków siarki. Rozwój technologiczny obejmuje przede wszystkim modyfikację składu katalizatorów poprzez zastosowanie promotorów, takich jak tlenki magnezu, wapnia, ceru czy cyrkonu. Ich obecność poprawia odporność na tworzenie depozytów węglowych oraz zwiększa stabilność termiczną materiału. Równoległe prowadzone są badania nad optymalizacją struktury nośników katalitycznych, w tym zwiększeniem ich porowatości i odporności mechanicznej. Alternatywą są katalizatory oparte na metalach szlachetnych, które charakteryzują się większą aktywnością oraz odpornością na dezaktywację. Ze względu na wysokie koszty ich zastosowanie ogranicza się jednak do rozwiązań specjalistycznych. Istotnym kierunkiem badań pozostaje również możliwość prowadzenia reformingu w niższych temperaturach, co pozwoliłoby ograniczyć zużycie energii oraz wydłużyć trwałość aparatury.

6.2. Optymalizacja bilansów cieplnych i intensyfikacja procesu

Proces reformingu parowego metanu wymaga dostarczenia znacznych ilości energii cieplnej, dlatego rozwój technologii koncentruje się również na poprawie jego efektywności energetycznej. Obejmuje to przede wszystkim maksymalne wykorzystanie



Rys. 1. Uproszczony schemat przepływu procesu reformingu parowego metanu z wychwytem i składowaniem dwutlenku węgla (SMR-CCS) [7]

Fig. 1. Simplified flow diagram of the steam methane reforming process with carbon capture and storage (SMR-CCS) [7]

ciepła zawartego w spalinach oraz gorących strumieniach procesowych. W nowoczesnych instalacjach stosuje się zaawansowane systemy wymiany ciepła, umożliwiające odzysk energii i jej ponowne wykorzystanie do podgrzewania surowców lub wytwarzania pary technologicznej. Rozwiązania te pozwalają ograniczyć zużycie paliwa oraz poprawić sprawność całej instalacji. Równolegle rozwijane są nowe konstrukcje reaktorów, które umożliwiają intensyfikację procesu. Należą do nich m.in. reaktory zintegrowane z układami spalania, reformery z wbudowanymi wymiennikami ciepła oraz reaktory membranowe pozwalające na jednoczesną konwersję metanu i separację wodoru. Choć rozwiązania te wykazują duży potencjał, ich zastosowanie przemysłowe jest na razie ograniczone.

6.3. Integracja SMR z odnawialnymi źródłami energii

W odpowiedzi na rosnące wymagania środowiskowe rozwijane są koncepcje integracji technologii SMR z odnawialnymi źródłami energii. Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie energii elektrycznej z OZE do częściowego pokrycia zapotrzebowania cieplnego procesu, np. poprzez elektryczne systemy grzewcze. Innym podejściem jest współprzetwarzanie gazu ziemnego z biometanem lub wodorem odnawialnym. Dodatek paliw odnawialnych pozwala ograniczyć ślad węglowy produkowanego wodoru bez konieczności zasadniczych zmian technologicznych.

Rozwijane są również systemy hybrydowe, w których nadwyżki energii elektrycznej z OZE wykorzystywane są do produkcji wodoru w procesie elektrolizy. Wodór ten może być następnie wykorzystywany w instalacji SMR, co zwiększa elastyczność systemu energetycznego.

6.4. Reforming parowy metanu zintegrowany z technologią CCS jako metoda produkcji wodoru niebieskiego

Integracja reformingu parowego metanu z technologią wychwytu i składowania dwutlenku węgla (CCS) stanowi jedno z najważniejszych rozwiązań umożliwiających ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w produkcji wodoru. W klasycznych instalacjach SMR emisje CO₂ powstają zarówno w wyniku reakcji chemicznych, jak i spalania paliwa w piecu reformingowym. Zastosowanie technologii CCS pozwala na ich znaczącą redukcję i prowadzi do wytwarzania tzw. wodoru niebieskiego.

Dwutlenek węgla może być wychwytywany z dwóch głównych strumieni procesowych. Pierwszym z nich jest gaz procesowy po reakcji konwersji tlenku węgla, zawierający wysokie stężenia CO₂, co sprzyja efektywnej separacji. Drugim źródłem są gazy spalinowe z pieca reformera, w których stężenie CO₂ jest niższe, co powoduje większe zużycie energii i wyższe koszty wychwytu. W praktyce przemysłowej często stosuje się wychwytywanie z obu strumieni jednocześnie, co pozwala osiągnąć poziom re-

dukcji emisji na poziomie 80–90%. Najczęściej stosowaną metodą separacji CO₂ jest absorpcja chemiczna z wykorzystaniem roztworów aminowych, takich jak monoetanolamina (MEA) lub dietanolamina (DEA). Proces obejmuje absorpcję CO₂ w kolumnie kontaktowej oraz jego desorpcję w kolumnie regeneracyjnej poprzez podgrzewanie roztworu. Alternatywnie rozwijane są technologie membranowe oraz kriogeniczne, jednak ich zastosowanie przemysłowe jest obecnie ograniczone. Po wychwyceniu dwutlenku węgla poddawany jest sprężaniu do ciśnienia rzędu 100–150 bar, co umożliwi jego przejście w stan nadkrytyczny. W tej postaci CO₂ może być efektywnie transportowany, najczęściej za pomocą rurociągów wysokociśnieniowych. W przypadku większych odległości stosuje się również transport morski lub kolejowy. Ostatnim etapem łańcucha technologicznego CCS jest geologiczne magazynowanie CO₂. Dwutlenek węgla wtłaczany jest do struktur geologicznych na głębokości przekraczającej 800 m, takich jak wyeksploatowane złoża ropy i gazu lub głębokie formacje solankowe. W takich warunkach CO₂ pozostaje w stanie nadkrytycznym i może być bezpiecznie magazynowany przez bardzo długi czas.

Zastosowanie technologii CCS pozwala na ograniczenie emisji CO₂ z poziomu około 9–12 kgCO₂ na 1 kg wodoru nawet o 50–90%, w zależności od konfiguracji instalacji. Jednocześnie integracja z CCS prowadzi do wzrostu kosztów produkcji wodoru – z około 1,2 USD/kgH₂ do poziomu 1,7–2,3 USD/kgH₂. Największy udział w kosztach systemu CCS stanowi proces wychwytu CO₂. Pomimo wyższych kosztów technologia SMR zintegrowana z CCS uznawana jest za jedno z najbardziej realistycznych rozwiązań umożliwiających szybkie ograniczenie emisji w sektorze wodorowym. W wielu scenariuszach transformacji energetycznej wodór niebieski pełni rolę rozwiązania przejściowego, umożliwiającego wykorzystanie istniejącej infrastruktury gazowej do czasu upowszechnienia technologii produkcji wodoru o zerowej emisyjności.

6.5. Rola SMR w transformacji sektora wodorowego

W perspektywie długoterminowej znaczenie SMR będzie stopniowo maleć na rzecz technologii opartych na odnawialnych źródłach energii. Mimo to proces ten pozostaje istotny ze względu na wysoką dojrzałość technologiczną oraz rozwiniętą infrastrukturę. W krótkim i średnim okresie SMR, szczególnie w połączeniu z CCS, umożliwia zwiększenie produkcji wodoru przy ograniczonej emisyjności. Jego rola polega przede wszystkim na zapewnieniu ciągłości dostaw wodoru w okresie transformacji energetycznej.

6.6. Znaczenie wodoru niebieskiego w transformacji energetycznej

Wodór stanowi jeden z podstawowych nośników energii przyszłości i znajduje zastosowanie w wielu sektorach gospodarki. Wodór niebieski umożliwia ograniczenie emisji CO₂ przy jed-

noczesnym wykorzystaniu istniejącej infrastruktury gazowej. W najbliższych dekadach będzie on pełnił rolę technologii przejściowej, wspierającej rozwój gospodarki wodorowej do czasu osiągnięcia pełnej konkurencyjności przez wodór zielony. Jednocześnie przyczynia się do zwiększenia elastyczności systemu energetycznego oraz integracji odnawialnych źródeł energii.

7. Bibliografia

- [1] Borowiecki, T., & Pańczyk, M. (2012). Otrzymywanie i zastosowanie gazu syntezowego. W: J. Ryczkowski (red.), *Adsorbenty i katalizatory – wybrane technologie a środowisko* (s. 275–287). Uniwersytet Rzeszowski.
- [2] Demusiak, G. (2012). Otrzymywanie paliwa wodorowego metodą reformowania gazu ziemnego dla ogniw paliwowych małej mocy. *Nafta-Gaz*, 10, 661-673.
- [3] Enayatizade, H., Chahartaghi, M., Hashemian, S. M., Arjomand, A., & Ahmadi, M. H. (2019). Techno-economic evaluation of a new CCHP system with a hydrogen production unit. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14(2), 170-186. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz017>
- [4] IEAGHG. (2017). *Techno-economic evaluation of SMR-based standalone (merchant) hydrogen plant with CCS*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.
- [5] International Energy Agency. (2019). *The future of hydrogen*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [6] International Energy Agency. (2022). *Global hydrogen review 2022*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- [7] Oni, A. O., Anaya, K., Giwa, T., Di Lullo, G., & Kumar, A. (2022). Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions. *Energy Conversion and Management*, 254, 115245. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115245>
- [8] North Sea Transition Authority. (n.d.). *Blue hydrogen technology review*. <https://www.nstauthority.co.uk/media/8605/blue-hydrogen-technology-review.pdf>
- [9] International Renewable Energy Agency. (n.d.). *Green and blue hydrogen – technologies and pathways*. <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>
- [10] Lazard. (2023). *Levelized cost of storage analysis (LCOS)*. <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-storage>
- [11] Szablowski, L., Wojcik, M., & Dybinski, O. (2025). Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. *Energy*, 316, 134540. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134540>
- [12] Pawłowski, K. (2023). Analiza porównawcza technologii wytwarzania wodoru. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* 97(4), 1-9. <https://doi.org/10.15199/17.2023.4.1>
- [13] Instytut Energetyki – Państwowy Instytut Badawczy. (2020). Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku. https://klasterwodorowy.pl/images/zdjecia/9_Analiza_potencjalu_tehnologii_wodorowych_opracowanie.pdf