

Analiza porównawcza technologii wytwarzania wodoru

Comparative analysis of hydrogen production technologies

Kacper Pawłowski^{*)}

Słowa kluczowe: *Wodór, energetyka, transformacja wodorowa, wodór zielony, elektroliza, źródła odnawialne, zero emisyjność, power to gas.*

Streszczenie

Sytuacja na rynku energetycznym zmusza społeczeństwo do poszukiwania alternatywnych źródeł energii. Paliwa konwencjonalne zanieczyszczają środowisko i mają ograniczone zasoby. Wodór jest uznawany za przyszłościowe paliwo, ze względu na swój potencjał energetyczny i brak emisji zanieczyszczeń. Większość państw zaczyna już realizować transformację wodorową. Wyróżniamy 3 główne rodzaje wodoru: – wodór szary; – wodór niebieski; – wodór zielony. Artykuł ma za zadanie porównać ze sobą technologie produkcji oraz przedstawić przeszkody i wymagania na szlaku transformacji energetycznej oraz wyłonić efektywną metodę produkcji zarówno pod względem ekologicznym i jakościowym, a także ekonomicznym.

Keywords: *Hydrogen, energetics, hydrogen transformation, green hydrogen, electrolysis, renewable sources, zero emission, power to gas.*

Abstract

Situation on the Energy market forces the public to search alternative sources of energy. Conventional fuels pollute the environment and have limited resources. Hydrogen is called the future fuel because it has good energy potential and it is ecologic. A lot of countries begin to realise hydrogen transformation. There are 3 types of hydrogen: – grey hydrogen; – blue hydrogen; – green hydrogen.. The article aims to compare production technologies and shows the obstacles and requirements the hydrogen transformation road also select effective technology of production in terms of ecologic, quality and economic.

Wstęp

Przewiduje się że pokłady ropy starczą do 2052 r., gaz ziemny skończy się w 2060r., natomiast węgiel wyczerpie się w 2090 r. To sprawia, że zasoby energetyczne na których bazujemy dzisiaj, w niedalekiej przyszłości mogą po prostu zniknąć. Biorąc pod uwagę wysoki rozwój technologiczny na poziomie globalnym, a co za tym idzie zwiększoną konsumpcję paliw, konieczne jest znalezienie paliwa alternatywnego. Paliwo wodorowe może zrewolucjonizować przemysł energetyczny i transportowy i być świetną alternatywą. Proces spalania wodoru nie emituje żadnych zanieczyszczeń, dzięki czemu jako paliwo jest idealnym zastępstwem dla paliw kopalnych używanych obecnie. W wyniku spalania wodoru wydzielana jest para wodna oraz pierwiastki obecne w powietrzu. Znaczna większość świata dąży do upowszechnienia i uproszczenia produkcji wodoru. Aby wykorzystanie wodoru jako paliwa było optymalnym rozwiązaniem, jego produkcja musi być stosunkowo tania i łatwa, a przy okazji, aby rozwiązanie to nie było sprzeczne i produkcja, tak samo jak spalanie, nie może emitować zanieczyszczeń do atmosfery. Główne zadanie wodoru to dekarbonizacja naszego globu. Taka transformacja energetyczna mogłaby ograniczyć postęp globalnego ocieplenia i ograniczyć wzrost temperatury o nawet 2 stopnie Celsjusza. Wykorzystanie wodoru energetycznie pozwoliłoby na ograniczenie emisji zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych blisko o 60 %.

Polityka państw wysokorozwiniętych, takich jak np. USA czy państwa UE, stawia na wodór jako paliwo przyszłości. Zdaniem naukowców i rządzących paliwo to ma w pełni zastąpić znane i używane dotychczas paliwa konwencjonalne, które są efektywne ale niestety,

przez emisję zanieczyszczeń podczas ich spalania, potęgowany jest efekt cieplarniany, a co za tym idzie, znaczna degradacja środowiska, co może mieć bardzo negatywny skutek dla przyszłych pokoleń.

WPROWADZENIE

Wodór na tle paliw konwencjonalnych

Jako pojedynczy pierwiastek na Ziemi występuje bardzo rzadko, dlatego też nie można go tak po prostu wydobyć. Jednak jest obecny w bardzo wielu związkach chemicznych, jednym z takich związków jest np. woda. Za pomocą odpowiednich procesów chemicznych można go odseparować i wykorzystać energetycznie. Wodór w przeszłości był wykorzystywany jedynie w procesach produkcyjnych, m.in. w przemyśle rafineryjnym, spożywczym czy metalurgicznym. Jednak jego bogate właściwości energetyczne stawiają go w świetle alternatywnego źródła energii dla ludzkości. Odpowiedzialne pozyskanie oraz wykorzystanie tego pierwiastka jest argumentem, który stawia wodór jako nośnik energii oraz paliwo jutra. Obecnie rosnące zapotrzebowanie na ten pierwiastek zmusza ludzkość do znalezienia optymalnych metod jego pozyskiwania oraz wykazuje konieczność transformacji energetyki na wodór. Rozbudowa lub budowa nowych sieci przesyłowych, kombinatów produkcyjnych oraz przystosowanie infrastruktury jest kolejnym, ambitnym działaniem dla świata ale można powiedzieć, że jest działaniem koniecznym. Wodór jest pierwiastkiem łatwopalnym oraz skrajnie wybuchowym, należy to jednak postrzegać głównie jako zaletę. Takie właściwości przy odpowiedzialnym wykorzystaniu mogą przynieść ogrom korzyści.

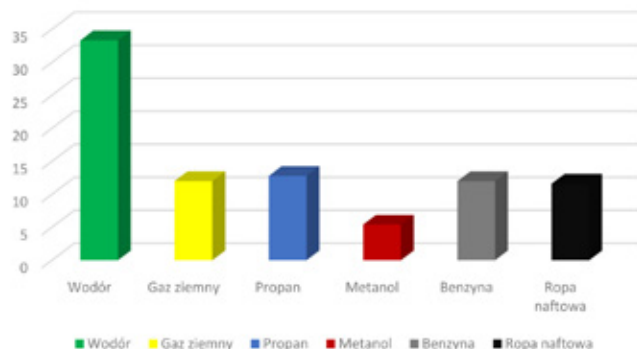
^{*)} Kacper Pawłowski; Inżynier środowiska. Absolwent Publicznej Uczelni Zawodowej w Ciechanowie. Pracownik Polskiej Spółki Gazownictwa w sekcji obsługi sieci gazowej. e-mail: pawlowskikacper51@gmail.com

Zarówno w energetyce jak i transporcie. Sektory, w których wodór miałby znaleźć zastosowanie to m.in.:

- transport lotniczy,
- transport kolejowy,
- transport morski,
- transport lekki,
- ogrzewanie budynków w postaci:
 - czysto wodorowej,
 - poprzez mieszaninę z gazem ziemnym,
 - poprzez ogniwa paliwowe.
- produkcja energii elektrycznej,
- magazynowanie produkcji elektrycznej z zasobów niestabilnych jak np. OZE,
- zasilanie rezerwowe oraz sieciowe.

Stawiając wodór jako potencjalne paliwo przyszłości, ważne są jego parametry energetyczne jak chociażby wartość opałowa czy ciepło spalania. Są to aspekty konieczne do opracowań ogniów paliwowych oraz urządzeń, służących do spalania wodoru. Dotychczas nauka nie definiowała wodoru w takiej postaci, tzn. źródła energii. Owszem, jego właściwości są bardzo dobrze zbadane i opisane lecz aby jego wykorzystanie w energetyce było optymalne i efektywne, potrzebne są badania i patenty z obszaru działań, gdzie wodór miałby znaleźć szerokie zastosowanie.

Zestawienie wodoru z obecnie stosowanymi nośnikami energii.



Wykres 1. Ilość energii z 1 kg paliwa, Źródło: Opracowanie własne.
Energy from 1 kilo of fuel

Wartości dla poszczególnych paliw:

- Wodór (33,3 kWh),
- Gaz ziemny (12 kWh),
- Propan (12,8 kWh),
- Metanol (5,4 kWh),
- Benzyna (12 kWh),
- Ropa naftowa (11,6 kWh).

Wartość opałowa wodoru jest z największa spośród wszystkich znanych obecnie paliw, jednak porównując wodór z innymi paliwami, pod względem stosunku masy do wartości energetycznej, wypada niekorzystnie. Ze względu na małą gęstość pierwiastka jakim jest wodór, konieczne jest dostarczenie jego znacznie większych ilości, aby był w stanie zastąpić paliwa używane dotychczas. Jest to kolejne wyzwanie na szlaku transformacji wodorowej. Konieczna jest przebudowa infrastruktury lub chociaż jej rozbudowa.

Produkcja wodoru

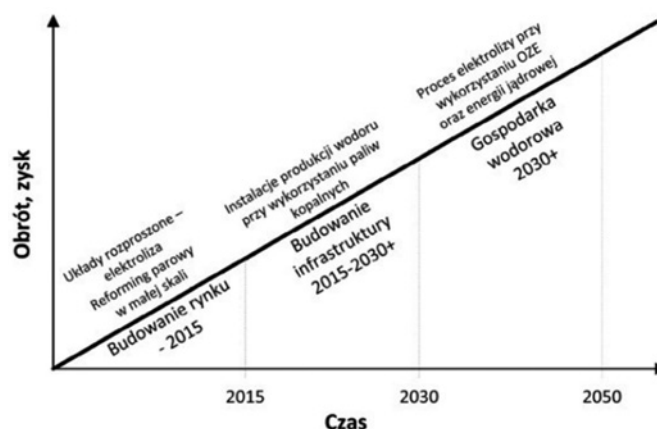
Warunkiem koniecznym, aby wodór był wykorzystywany powszechnie jako paliwo, jest stosunkowo łatwa, wydajna i przede wszystkim tania metoda jego produkcji.

Należy pamiętać również ,że główne kryteria jakie są stawiane dla wodoru to:

- ekologiczne, niezatrujące środowiska paliwo,
- uniezależnienie od paliw kopalnych, których zasoby są ograniczone,
- podniesienie efektywności w obszarze produkcji energii oraz paliw,
- zdolność do zaspokojenia potrzeb energetycznych w postaci paliw, energii elektrycznej oraz ciepłej.
- Obecnie rozróżnia się 3 główne rodzaje wodoru.
- wodór szary (pozyskiwany jest z gazu ziemnego poprzez reforming parowy),
- wodór niebieski (pozyskiwany jest z gazu ziemnego poprzez reforming parowy, jednakże podczas tego procesu CO₂ jest wychwytywany i neutralizowany),
- wodór zielony (wykorzystuje odnawialne źródła energii do zasilenia procesu elektrolizy, podczas którego nie wydzielane są zanieczyszczenia).

Różnice wynikają właśnie z metod jego otrzymywania, ponieważ produkt z poszczególnych procesów w każdym przypadku jest taki sam. Teoretycznie wodór zielony jest najczystszy spośród wszystkich, co czyni go najefektywniejszym energetycznie, jednak różnice są nieznaczne i nie mają dużego wpływu na końcową jakość produktu.

Wodór zielony stanowi zaledwie 4% światowej jego produkcji, reszta, czyli 96% to wodór produkowany z paliw kopalnych jak węgiel, gaz czy ropa naftowa. Wynika to z faktu, że technologia produkcji wodoru zielonego wymaga ogromu dodatkowej infrastruktury jaką są źródła OZE oraz całego osprzętu do jego pozyskiwania jak elektrolizery i armatura. nie do końca na potrzeby energetyczne. Wodór zielony jest na tą chwilę blisko 4 razy droższy.



Wykres.2. Prognoza rozwoju gospodarki wodorowej

Hydrogen economy development forecast

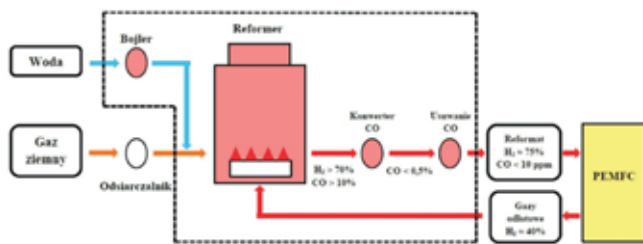
Źródło: „Energetyka wodorowa” T. Chmielniak; Wydawnictwo PWN

WODÓR SZARY

Szary wodór to produkt procesu reformingu parowego metanu. Należy podkreślić, że reforming parowy metanu jest sposobem nie ekologicznym, ponieważ podczas produkcji jednej tony wodoru emitowane jest do atmosfery 10 ton CO₂. Reforming parowy jest dziś najszerzej stosowaną metodą produkcji wodoru szarego, ze względu na najmniejszą emisję zanieczyszczeń spośród wszystkich paliw kopalnych oraz najwyższą efektywność energetyczną i ekonomiczną.

Reforming parowy gazu ziemnego odpowiada za 48% światowej produkcji wodoru z wykorzystaniem paliw kopalnych. W 2018r. wyprodukowano 115 mln ton wodoru ,z czego 55 mln ton to wodór szary, zanieczyszczając tym samym środowisko dwutlenkiem węgla na poziomie 830 mln ton. Wodór pochodzący z szarej produkcji jest wykorzystywany w przemyśle chemicznym, rafineryjnym i metalurgicznym. Perspektywnie wodór szary nie jest więc rozwiązaniem optymalnym. Może za to stanowić fundament i doświadczenie produkcyjne dla wodoru niebieskiego.

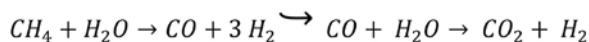
Sam proces produkcji jest stosunkowo prosty. Para wodna reaguje z metanem w wyniku czego powstaje tlenek węgla oraz wodór. Warunkiem koniecznym do zajścia reakcji jest obecność katalizatora metalicznego. Reakcja następuje w temperaturze od 700 do 1100 stopni Celsjusza. Proces może również przebiegać w dwóch fazach, jest to pierwszy reforming, który jest prowadzony w rurach z zawartością katalizatora niklowego, osadzonym na nośniku glinowym. Natomiast poprzez spalanie odrębnej porcji gazu ziemnego produkowane jest ciepło, które jest podawane przez ścianki rur od zewnątrz. Otrzymany produkt to gaz syntezowy, który po dalszej obróbce dzieli się na CO₂ i wodór. Największą wadą tego procesu jest ogromna emisja dwutlenku węgla oraz wymagane ilości energii cieplnej. Ważnym aspektem, mającym wpływ na efektywność produkcji oraz jakość produktu końcowego czyli wodoru, jest jakość dostarczonego gazu.



Rys. 1. Schemat instalacji do produkcji wodoru szarego

Fig. 1. Diagram of the grey hydrogen production unit

Źródło: <http://archiwum.inig.pl/INST/nafta-gaz/nafta-gaz/Nafta-Gaz-2012-10-02.pdf>



Gaz oraz woda trafiają do syntezytorów, które je rozdzielają. Zaczodzi tam reakcja parowej konwersji tlenku węgla. Gaz syntezowy ulega rozkładowi, w wyniku czego powstaje dwutlenek węgla oraz gazowy wodór. Wodór jest wyłapywany i składowany jako gaz lub tworząc ogniwo paliwowe. Część gazów odlotowych jest ponownie wykorzystana do podgrzania reformera, natomiast dwutlenek węgla jest uwalniany do atmosfery.

Obecnie wodór szary jest najpopularniejszym i najtańszym rodzajem tego paliwa. Jednakże jego produkcja, mająca negatywny wpływ na środowisko, wyklucza go jako paliwo przyszłości. Roczna produkcja szarego wodoru przekracza liczbę 55 ton. Znajduje on zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu i nie jest obszarem działalności badaczy jako potencjalne paliwo, ze względu na dużą emisję zanieczyszczeń oraz zależność od paliw kopalnych.

WODÓR NIEBIESKI

Proces produkcji wodoru niebieskiego jest identyczny jak w przypadku wodoru szarego, jednak znaczącą różnicę wnosi to, że podczas jego wytwarzania wychwytywane jest CO₂.

Tym samym skutek uboczny, jakim jest zatrucie środowiska, jest eliminowany i wodór niebieski staje się niejako potencjalnym paliwem „jutra”. Do produkcji wodoru niebieskiego wykorzystywany jest wyłącznie gaz ziemny wysokiej jakości, za sprawą swojej wysokiej efektywności energetycznej oraz najmniejszym stopniu emisji zanieczyszczeń.

TECHNOLOGIE WYCHWYTU CO₂

Obecnie wyróżniamy wiele metod wychwytywania CO₂, różnią się one jednak znacznie technologią i obszarem zastosowania. Najczęściej wykorzystywane metody to m.in.:

- **Absorbacja aminowa.** Spaliny trafiają do absorbera gdzie obecny jest rozpuszczalnik który absorbuje CO₂. Następnie rozpuszczalnik wraca do desorbera, gdzie uwalniany jest dwutlenek węgla. Spaliny

w ten sposób zostają oczyszczone z CO₂, a przechwycony pierwiastek w postaci gazowej jest oczyszczony, sprężony i ponownie wykorzystany lub składowany.

- **Membrany energooszczędne.** Technologia ta wykorzystuje membrany, które dzielą się na membrany absorpcyjne i separujące. Na separujących membranach gaz jest rozdzielany, co wynika z różnic fizykochemicznych poszczególnych pierwiastków gazowych. Jeden ze składników gazu zawsze przenika w głąb membrany a następnie dyfunduje na drugą stronę. Dzięki temu membrana dzieli gaz na strumień zatrzymany oraz przenikający.
- **Metoda kriogeniczna.** Polega na wydzielaniu CO₂ w postaci ciekłej, po uprzednim sprężeniu i schłodzeniu gazu do temperatury ok. – 58 stopni Celsjusza. Metoda działania tej technologii wynika z różnych właściwości kriogenicznych poszczególnych składowych mieszaniny gazowej.
- **Wychwytywanie przed spalaniem.** Technologia ta dotyczy reformingu paliw konwencjonalnych oraz zgazowania węgla. Procesy te umożliwiają konwersję związków węglowych w paliwa. CO i H₂ są ich podstawowymi składnikami.
- **Tlenowe spalanie węgla.** Powietrze wykorzystywane do spalania paliwa, jakim jest węgiel, jest uprzednio rozdzielone aby było bogatsze w tlen, w tym celu usuwany jest azot. Stosuje się również recyrkulację spalin aby zwiększyć koncentrację dwutlenku węgla i obniżyć temperaturę ogniwa.

NEUTRALIZACJA DWUTLENKU WĘGLA

Co dalej dzieje się z uprzednio wychwyconym, szkodliwym dwutlenkiem węgla? Otóż należy go zneutralizować, aby nie oddziaływał negatywnie na środowisko naturalne. W tym celu wychwycony dwutlenek węgla jest składowany, dzięki czemu nie przedostaje się do atmosfery i proces ten jest neutralny dla klimatu.

Stosowane technologie neutralizacji to:

CCS (Carbon Capture Storage) Jest to technologia składowania dwutlenku węgla, aby ten nie przedostał się w głąb atmosfery, co za tym idzie, nie potęgował efektu cieplarnianego i ogólnego, negatywnego wpływu na środowisko.

CCU (Carbon Capture Utilization). W tym procesie wychwycony dwutlenek węgla jest ponownie wykorzystany do produkcji potrzebnych substancji czy produktów takich jak np.: alkohole, biopaliwa lub tworzywa sztuczne.

O ile ponowne wykorzystanie dwutlenku węgla wydaje się być korzystne o tyle długofalowe jego przechowywanie nie gwarantuje neutralności dla środowiska. Obecnie nie jest znany wpływ tej technologii na stan naszej planety.

Niebieski wodór w tej chwili jest uznawany za technologię przejściową między wodorem szarym a zielonym. W końcu do jego produkcji potrzebny jest gaz ziemny co sprawia że wcale nie rezygnujemy z paliw kopalnych tylko zmieniamy ich zastosowanie. Ponadto badania naukowców wykazują że wodór niebieski w swoim pełnym cyklu życia jest nawet bardziej emisyjny niż paliwa kopalne takie jak wspomniany gaz ziemny.

Wszystkie negatywne cechy niebieskiego wodoru są determinowane głównie przez potrzebny do jego produkcji gaz ziemny, problem ze składowaniem wychwyconego dwutlenku węgla oraz wysokiej energochłonności całego procesu. Dodatkową przeszkodą dla wodoru niebieskiego jest wysoka cena instalacji do wychwytu dwutlenku węgla oraz proces technologiczny jego neutralizacji.

WODÓR ZIELONY

Wodór zielony jest najczystszy spośród wszystkich znanych obecnie wodorów. Wynika to głównie z technologii jego produkcji, która jest stosunkowo najprostsza. Jego czystość sięga poziomu 99%. To pozwala na wykorzystywanie go w ogniwach paliwowych

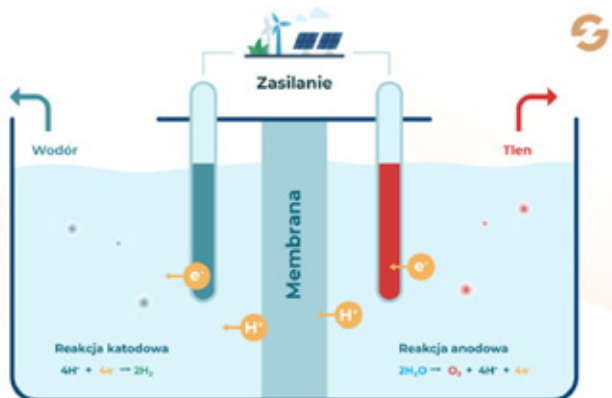
silników napędowych co jest argumentem dosyć wysoko przekonywującym biorąc pod uwagę plany transformacji gałęzi mobilności i transportu. Proces produkcji wodoru zielonego jest tak naprawdę jedynym procesem, które nie emituje zanieczyszczeń. Przez co jest zestawiany jako najrozsądniejsza alternatywa dla paliw konwencjonalnych. Najbardziej rozpowszechnione są dwie metody produkcji, są to:

- zgazowanie biomasy
 - elektroliza zasilana energią elektryczną ze źródeł odnawialnych,
- Ta pierwsza cechuje się nie tyle zerową emisją dwutlenku węgla co nawet ujemną.

Jest to metoda dosyć obiecująca lecz bardzo droga, nawet kilkakrotnie droższa niż proces elektrolizy. Wymaga również ogromnych ilości biomasy do produkcji jak i również jako produkt uboczny co jest znaczącym problemem.

Proces elektrolizy to technologia otrzymania wodoru zielonego, do której wykorzystywany jest prąd pochodzący z Odnawialnych Źródeł Energii. Produkcja wodoru zielonego jest więc zeroemisyjna. Jako odnawialne źródła energii stawia się głównie farmy fotowoltaiczne oraz wiatrowe, głównie ze względu na czynniki lokalizacyjne i urbanistyczne. Rzadziej mówi się o prądzie pochodzącym z elektrowni wodnych, ponieważ to definiuje powstawanie centr produkcyjnych wodoru właśnie w sąsiedztwie obiektów hydrologicznych. Biorąc pod uwagę fakt transformacji wodorowej energetyki, transportu oraz przemysłu ilości produkowanego nowego paliwa będą ogromne. Stąd też konieczność stosowania źródeł bardziej uniwersalnych lokalizacyjnie ze względu na potencjalnie wysokie koszty budowy sieci przesyłowej lub transportu, a co za tym idzie również magazynowania.

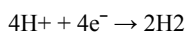
Elektroliza wody to rozkład wody na pierwiastki chemiczne pod wpływem prądu elektrycznego. Jest to dysocjacja na jony pod wpływem napięcia co najmniej 1,229V. Do tego celu wykorzystywane są elektrolizery, których typy i budowa są zróżnicowane. Jednak sam proces przebiega bardzo podobnie. Produkty końcowe są identyczne. Wysoka cena elektrolizerów jest główną przeszkodą w upowszechnieniu produkcji wodoru zielonego.



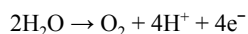
Rys. 2. Schemat elektrolizera alkalicznego

Fig. 2. Diagram of the alkaline electrolyser

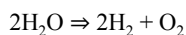
Źródło: <https://gaia.solar/blog/innowacje-w-oze-zielony-wodor/>



Reakcja zachodząca na katodzie.



Reakcja zachodząca na anodzie.



Równanie sumaryczne reakcji.

Podczas tej reakcji wydziela się wodór i tlen. Wodór obecny jest na anodzie, czyli elektrodzie ujemnej, natomiast tlen na katodzie, czyli elektrodzie dodatniej. Separator jonowy jest odpowiedzialny za utrzymanie gazów o odrębnych zasobnikach.

Technologia produkcji wodoru zielonego bazuje na urządzeniach nazywanych elektrolizerami. Dzięki nim możemy produkować wodór bez dużych nakładów energetycznych. Proces elektrolizy nie wymaga dostarczenia ciepła (z wyjątkiem elektrolizy wysokotemperaturowej). Jest to technologia dosyć efektywna i obiecująca.

Postęp transformacji wodorowej rynku energetycznego i transportu jest ściśle związany z elektrolizerami współpracującymi z odnawialnymi źródłami energii. Łączna moc stosowanych obecnie instalacji to ok. 84 MW, z czego elektrolizery alkaliczne to 45 MW, polimerowe PEM ok. 38 MW. Moc elektrolizerów SOEC, czyli wysokotemperaturowych, oscyluje w okolicach 1MW. Szacuje się, że na przełomie najbliższych lat liczby te będą wielokrotnie większe. Obecnie średnia moc pojedynczej instalacji to ok. 1MW. Trwają prace nad budową instalacji których moc będzie sięgać nawet 100MW.

Tabela 1. Parametry elektrolizerów i ich potencjalny rozwój

Table 1. Specifications of electrolyzers and potential development

Stan rozwoju	Elektrolizery alkaliczne			Elektrolizery polimerowe (PEM)			Elektrolizery tlenkowe (SOEC)		
	obecnie (2018)	2030	> 2030	obecnie (2018)	2030	> 2030	obecnie (2018)	2030	> 2030
Parametr									
Sprawność elektryczna [%], Wd]	63–70	65–71	70–80	56–60	63–68	67–74	74–81	77–84	77–90
CAPEX [USD/kW _{el}]	500–1400	400–850	200–700	1100–1800	650–1500	200–900	2800–5600	800–2800	500–1000
Ciśnienie pracy [bar]	1–30			30–80			1		
Temperatura pracy [°C]	60–80			50–80			650–1000		

Czas pracy [h]	60 000–90 000	90 100 000	100 000–150 000	30 000–90 000	60 000–90 000	100 000–150 000	10 000–30 000	–40 000–60 000	75 000–100 000
Zakres obciążenia (% w stosunku do nominalnego)	10–110			0–160			20–100		
Wskaźnik powierzchniowy [m ² /kW _{el}]	0,095			0,048			brak danych		

Źródło: „Energetyka wodorowa” T. Chmielniak; Wydawnictwo PWN

GENERATORY WODORU

Generator wodoru to zespół urządzeń służących do produkcji wodoru na szeroką skalę, przy zachowaniu jak najbardziej optymalnego współczynnika efektywności.

Elementy składające się na generator wodoru:

- komórki elektrolizerów,
- instalacje przygotowania substratów,
- wymienniki ciepła,
- instalacja przygotowania składu elektrolitu,
- układ regulacji,
- wentylatory,
- pompy obiegowe,

- sprężarki,
- separatory,
- pozostałe elementy instalacji.

Moduły to elementy składowe generatorów wodoru. Znajdują się w nich komórki, gdzie zachodzi proces elektrolizy. Stosowanie generatorów pomaga znacznie zwiększyć ilość produkowanego wodoru oraz ją scentralizować, co z kolei wpływa korzystnie na jego cenę. Szereg urządzeń, tj. wymienniki ciepła, pompy czy sprężarki, umożliwią sprawny przebieg całego procesu produkcyjnego. Substraty dostarczane do cel elektrolizerów są w takiej instalacji oczyszczane i gruntownie przygotowywane do wykorzystania, dzięki czemu generator jest samowystarczalny. Moc takich instalacji generatorów wodoru określa się ilością połączonych bloków. Dla elektrolizerów alkaicznych moc pojedynczego bloku wynosi 1MW. Więc, aby uzyskać instalację o łącznej mocy 5MW konieczne jest połączenie 5 bloków. Analogicznie, do uzyskania instalacji o mocy 100 MW potrzeba 20 bloków. Dolna granica eksploatacji takich instalacji to 20 % wydajności, natomiast górna 100%.

Tabela 2. Parametry generatorów alkaicznych 5MW i 100MW
Table 2. Specifications of 5MW and 100 MW alkaine electrolyzers

Parametr	5 MW	100 MW
Dojrzałość technologiczna	stan obecnej techniki	2030
Typ	atmosferyczny	atmosferyczny
Wydajność każdego bloku (modułu), Nm ³ /h	200	1000
Liczba bloków	5	20
Całkowita wydajność, Nm ³ /h	1000	20 000
Jednostkowe zużycie energii (AC/DC), kWh/Nm ³	4,7/4,2	4,7/4,2
Sprawność bloku (DC, Q _{sp}), %	84	84
Sprawność generatora (Q _{sp}), %	68	68-72
Strata biegu luzem, %	2	2
Zakres obciążenia, %	20-100	20-100
Temperatura pracy, °C	80	90-95
Napięcie zasilania, kV	0,4	0,4
Czas życia, h	60 000	100 000
Czas eksploatacji instalacji pomocniczych i infrastruktury pomiarowej, lata	10-30	10-30

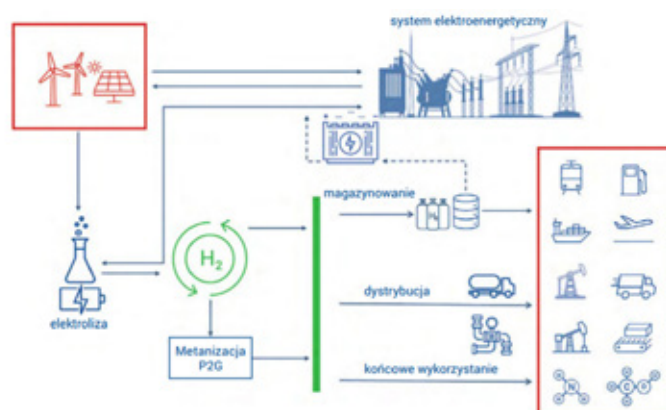
Źródło: „Energetyka wodorowa” T. Chmielniak; Wydawnictwo PWN

WYKORZYSTANIE WODORU

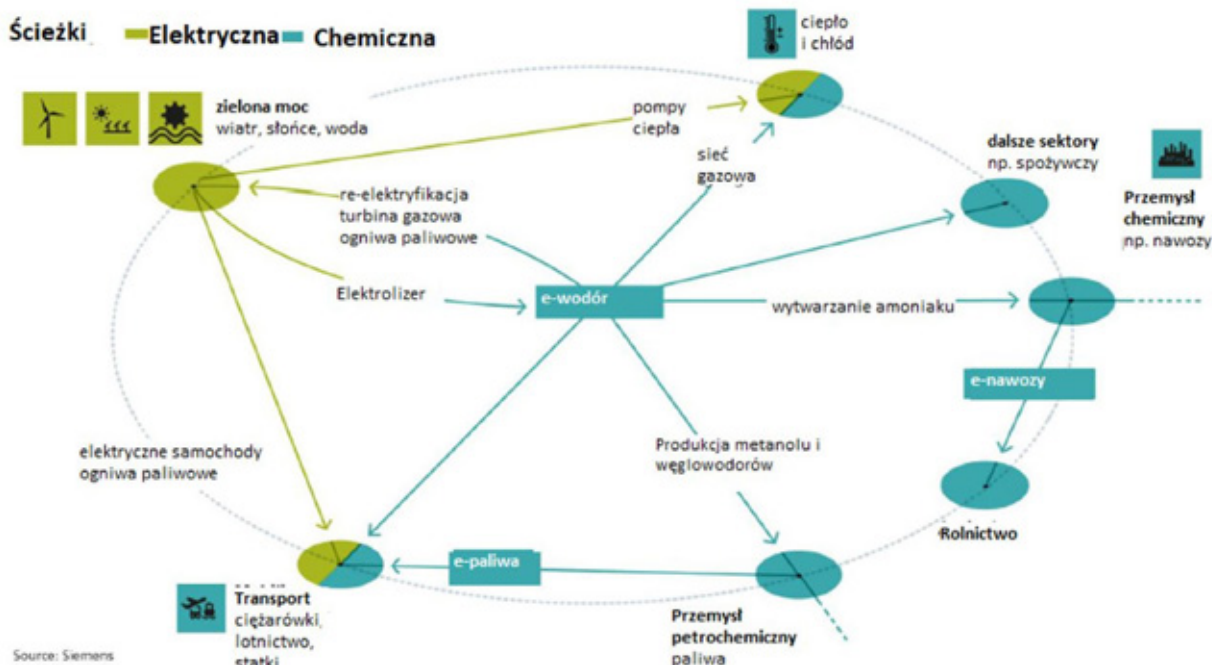
Wodór znajduje zastosowanie w każdej gałęzi przemysłu energetycznego oraz produkcyjnego. Może być wykorzystywany jako paliwo w transporcie, zastępując produkty ropopochodne, jak chociażby benzyna. Oczywiście wymaga to opatentowania silników przystosowanych do spalania wodoru ale już trwają prace nad takimi projektami. Toyota jest prekursorem w tej dziedzinie. Model Mirai wykorzystuje ogniwa wodorowe jako źródło energii i jest już dostępny w sprzedaży. Branża energetyczna stawia na wodór, zarówno jako paliwo jak i magazyn energii elektrycznej. Jako paliwo miałby zastąpić np. gaz ziemny, wykorzystywany do produkcji ciepła. Jako magazyn energii elektrycznej stanowi odpowiedź na przyszłość branży Odnawialnych źródeł energii i niweluje ich niestabilność poprzez proces re-elektryfikacji.

P2G czyli Power To Gas definiuje wykorzystanie wodoru jako produkt konwersji energii elektrycznej na gaz, który pełni funkcję:

- magazynu energii do wykorzystania w przyszłości,
- wykorzystania końcowego poprzez jego zużycie lub wykorzystanie
- dystrybucji na szeroką skalę



Rys. 4. Schemat gospodarki wodorowej z wykorzystaniem technologii P2G i źródeł OZE
Fig. 4. Diagram of the hydrogen management with P2G and renewable energy sources support
Źródło: <http://psew.pl/wp-content/uploads/2021/12/Raport-Zielony-Wodor-z-OZE-77MB.pdf>



Rys. 3. Schemat wykorzystania wodoru

Fig. 3. Diagram of hydrogen use

Źródło: <https://wysokienapiecie.pl/32899-kto-zarobi-na-polskim-wodorze/>

Ambitne plany gospodarcze głównie Unii Europejskiej, USA oraz Chin odnośnie paliwa wodorowego, wymuszają na producentach poszukiwania coraz to lepszych i wydajniejszych rozwiązań produkcyjnych. Perspektywa zastąpienia dotychczas znanych paliw wodorem w ciągu najbliższych kilkudziesięciu lat kładzie nacisk na upowszechnienie tanich i ogólnie dostępnych metod produkcji, jak i dystrybucji wodoru. Jest to niejako również otwarcie furty biznesowej dla potencjalnych korporacji, zajmujących się energetyką wodorową. Bardzo pożądaną kwestią, w zakresie budowy i eksploatacji generatorów wodorowych, jest ich wydajność i żywotność. Dokładne badania oraz doświadczenia w tym obszarze niewątpliwie pozwolą jak najszybciej uzyskać zakładane plany transformacji wodorowej.

ANALIZA PORÓWNAWCZA RODZAJÓW WODURU STOSOWANEGO JAKO PALIWO ORAZ NOŚNIK I MAGAZYN ENERGII

Na chwilę obecną wodór nie jest wykorzystywany jako paliwo na szeroką skalę. Jednak jego potencjał energetyczny, a co najważniejsze zerowy poziom degradacji środowiska, pozwala stawiać go jako paliwo rozwojowe i w pełni alternatywne dla paliw ze źródeł kopalnianych. Niewątpliwie, aby wszystkie stawiane wodorowi warunki były spełnione, konieczna jest transformacja rynku energetycznego na produkcję oraz konsumpcję wodoru zielonego. Wodór niebieski sam w sobie nie jest przyszłościowy, ponieważ do jego produkcji nadal potrzebne są paliwa kopalne, o których eliminację tak mocno walczymy. Drugą sprawą jest długotrwały wpływ wychwyconego dwutlenku węgla na środowisko.

Do tego dochodzi kwestia efektu skali. Jeżeli wodór ma zastąpić większość paliw konwencjonalnych i miałby być w większości pozyskiwany w sposób reformingu z wychwytem CO₂, to mielibyśmy ogromne ilości dwutlenku węgla.

Tabela 3. Wady i zalety poszczególnych rodzajów wodoru

Table 3. Advantages and disadvantages of hydrogen types

Wodór Szary	
Wady	Zalety
Wysoka emisja zanieczyszczeń	Niska cena produkcji
Zależność od paliw kopalnych	Stabilność produkcji
Otrzymywanie wodoru bardziej zanieczyszczonego	Dostosowana infrastruktura i rynek

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 4.

Wodór niebieski	
Wady	Zalety
Zależność od paliw kopalnych	Brak emisji zanieczyszczeń
Problem z ilością produkowanego CO ₂	Stosunkowo tania produkcja
Negatywny, długofalowy wpływ na środowisko	Stabilność produkcji i dostosowana infrastruktura

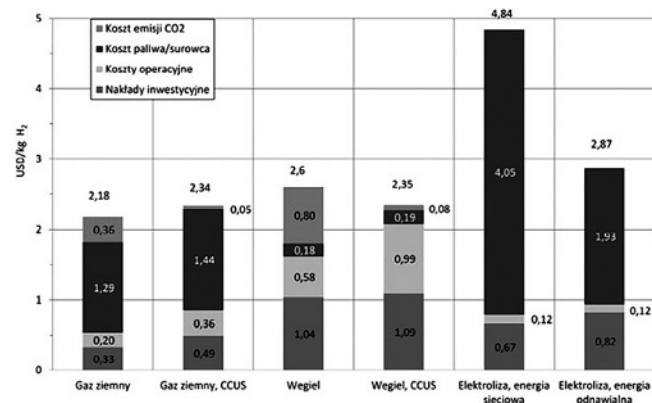
Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 5.

Wodór zielony	
Wady	Zalety
Wymaga nowej, kosztownej infrastruktury produkcyjnej oraz OZE	Brak jakiegokolwiek emisji zanieczyszczeń
Zależność od OZE, a co za tym idzie od warunków pogodowych.	Rozwój sektora Odnawialnych Źródeł Energii
Wysoka cena wodoru zielonego	Niemal zerowy ślad węglowy w całym obszarze działań

Źródło: Opracowanie własne.

ANALIZA EKONOMICZNA TECHNOLOGII PRODUKCJI WODURU



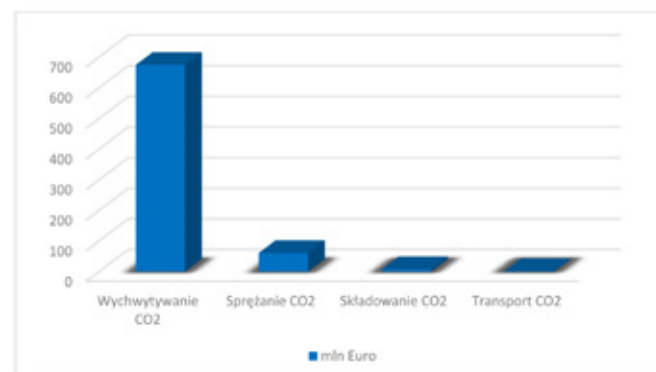
Wykres 3. Prognoza kosztów produkcji wodoru w Europie w roku 2030

Forecast of the production costs in Europe in 2030

Źródło: „Energetyka wodorowa” T.Chmielniak; Wydawnictwo PWN

Niewątpliwie najtańszym rodzajem wodoru jest **wodór szary**, ale wynika to z faktu, że jego zaplecze produkcyjne jest szeroko rozwinięte. Do jego produkcji wykorzystywane są technologie znane od stuleci i szeroko, wręcz globalnie praktykowane. Na tą chwilę szary wodór kosztuje od 1 USD za kilogram do 1,8 USD za kilogram. Cena wodoru szarego jest uzależniona od ceny gazu ziemnego, ponieważ jest to surowiec niezbędny do jego produkcji. Warto nadmienić że paliwa kopalne są surowcem strategicznym i ich cena może gwałtownie rosnąć ale też gwałtownie spadać. Co w efekcie końcowym wpływa również na cenę wodoru. **Wodór niebieski** jest nieco droższy mimo tego że jest produktem tych samych procesów produkcyjnych co wodór szary. Jego cena wynika z tego że do jego wytworzenia potrzebne jest zaplecze technologiczne w postaci urządzeń i osprzętu potrzebnego do wychwytu dwutlenku węgla. Aktualne ceny wodoru niebieskiego to od 1,4 USD za kilogram do 2,4 USD za kilogram. Ostateczna cena wodoru niebieskiego analogicznie do wodoru szarego uzależniona jest od aktualnej ceny gazu ziemnego na rynku paliw. Jednoznacznie wyższą cenę wodoru niebieskiego kształtuje koszt instalacji do wychwytu dwutlenku węgla oraz dostarczenie do niej potrzebnej energii.

Koszty wynikające z neutralizacji CO₂ na przykładzie średniej wielkości elektrociepłowni w powiecie płockim.



Wykres 4. Koszty neutralizacji CO₂

Neutralisations costs of CO₂

Źródło: Opracowanie własne.

Wychwytywanie dwutlenku węgla to koszt rzędu 675 mln Euro w skali roku. Jest to ogromny dodatkowy wydatek dla obiektów energetycznych. Wynika to głównie z wysokiej ceny utrzymania

instalacji i urządzeń do wychwytywania dwutlenku węgla. Koszt sprężania kształtuje się na poziomie 61,3 mln Euro, 7,9 mln Euro pochłanianie, natomiast transport 2,2 mln Euro.

Wodór będący produktem elektrolizy, czyli **wodór zielony**, który niejako stanowi fundament przyszłości energetycznej ma przed sobą bardzo wybitne zadanie. Obecnie kosztuje od 2,5 USD za kilogram do nawet 6,8 USD za kilogram. Jego wysoka cena wynika z faktu, że do jego produkcji aby można było nazwać go wodorem zielonym potrzebne są źródła OZE. Czyli prąd wykorzystany w procesie elektrolizy musi w pełni pochodzić ze źródeł odnawialnych. Przykładowy koszt farmy fotowoltaicznej w Polsce kształtuje się na poziomie ok. 3 mln złotych. Należy jednak podkreślić że jest to cena za farmę zdolną do wyprodukowania 1 MW energii elektrycznej. Aby zapewnić moc wymaganą do prawidłowego funkcjonowania generatorów wodorowych konieczna jest budowa farm fotowoltaicznych o mocy co najmniej kilkukrotnie wyższej. Zapotrzebowanie to będzie z roku na rok coraz większe lecz konieczne do zaspokojenia jeżeli wodór ma być nośnikiem energii. Farmy wiatrowe wydają się być lepszym rozwiązaniem w obszarze Rzeczypospolitej, w końcu wiatru mamy dużo więcej niż słońca. Koszt instalacji będącej w stanie wyprodukować 1 MW energii elektrycznej to ok. 7 MLN złotych. A więc, instalacja OZE jest droga w budowie i niestabilna ale trwają prace nad jej magazynowaniem. Jedną z takich opcji mógłby być wodór i technologia Power to Gas omawiana wyżej. Do tego dochodzą koszty instalacji a głównie elektrolizerów, które są znaczne ale za to jednorazowe. Koszty utrzymania instalacji i jej konserwacja. Najważniejszym aspektem przy produkcji wodoru zielonego jest fakt dostarczenia surowca do elektrolizera czyli wody oraz tlenu. Aby wyprodukować 1kg wodoru potrzebne jest 9 litrów wody, oraz 8 kilogramów tlenu. Woda musi spełniać odpowiednie warunki. Mianowicie jej czystość powinna kształtować się na poziomie niemal 100%. Woda nadająca się do produkcji wodoru powinna mieć postać czysto chemiczną czyli H₂O. Energia elektryczna jaka jest potrzebna do uzyskania 1kg wodoru to 50 kWh. To wpływa znacznie na lokalizację obiektu przemysłowego do produkcji wodoru zielonego. Konieczne jest sąsiedztwo instalacji OZE, która aby była w stanie pokryć zapotrzebowanie wymaga odpowiedniej wielkości terenu. Drugim bardzo ważnym aspektem jest źródło wody. Biorąc pod uwagę potencjalny, gwałtowny rozwój wodoru zielonego ilości dostarczanej wody będą ogromne.

Obecne średnie ceny poszczególnych rodzajów wodoru mogą nasuwać wniosek, że najbardziej opłacalną formą wodoru jest wodór niebieski, w końcu produkcja nie emituje zanieczyszczeń a cena jest

Tabela 6. Przykładowe nakłady inwestycyjne oraz jednostkowe dla generatorów
Table 6. Examples of investment and unit costs for generators

	GENERATOR ALKAICZNY		GENERATOR PEM	
	5MW	100MW	5MW	100MW
NAKLADY INWESTYCYJNE	5,333 MLN EURO (2,2 MLN EURO ELEKTROLIZER)	52,13 MLN EURO (40 MLN EURO ELEKTROLIZER)	4,8 MLN EURO	36,5 MLN EURO
NAKLADY JEDNOSTKOWE	1070 EUR/ kW	521 EUR/ kW	1034 EUR/ kW	396 EUR/ kW

Źródło: Opracowanie własne na podstawie : „ Energetyka wodorowa” T. Chmielniak; Wydawnictwo PWN

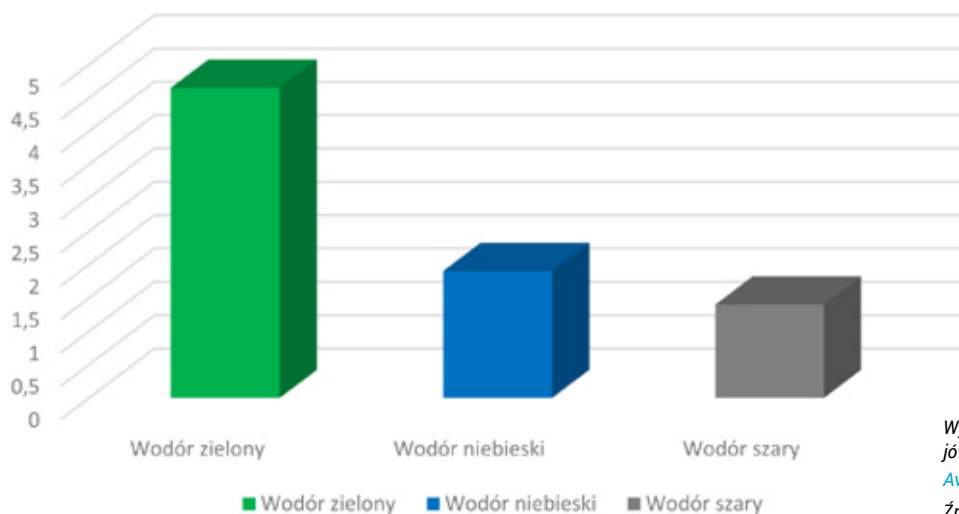
dosyć korzystna. Nic bardziej mylnego, biorąc pod uwagę cały cykl powstania wodoru niebieskiego ,napotykamy na jeden sprzeczny aspekt, spalamy paliwa kopalne, które są tańsze, aby powstał droższy wodór. Z punktu ekonomicznego jest zupełnie bezsensowne. Jedyna zaleta wodoru niebieskiego to brak zanieczyszczania środowiska. Na dzień dzisiejszy gospodarki państwowe, jak i prywatne przedsiębiorstwa, dopiero wkraczają w rynek wodoru jako zeroemisyjnego zastępstwa paliw kopalnych.

Być może w przyszłości za sprawą globalizacji wodoru zielonego i upowszechnienia jego produkcji cena za kilogram będzie oscylować w granicach 1 USD.

Taka cena jest na tą chwilę równoważna z kilogramem LNG, ale miejmy na uwadze, że gaz ziemny ma ograniczone rezerwy oraz jego spalanie emituje zanieczyszczenia. Zestawiając w ten sposób ze sobą obydwaj paliwa wniosek jest jednoznaczny. Jeżeli kilogram wodoru zielonego osiągnie cenę kilograma gazu ziemnego, czy ropy naftowej, to zdeklasuje te paliwa i w pełni je zastąpi.

PRODUKCJA WODORU W POLSCE

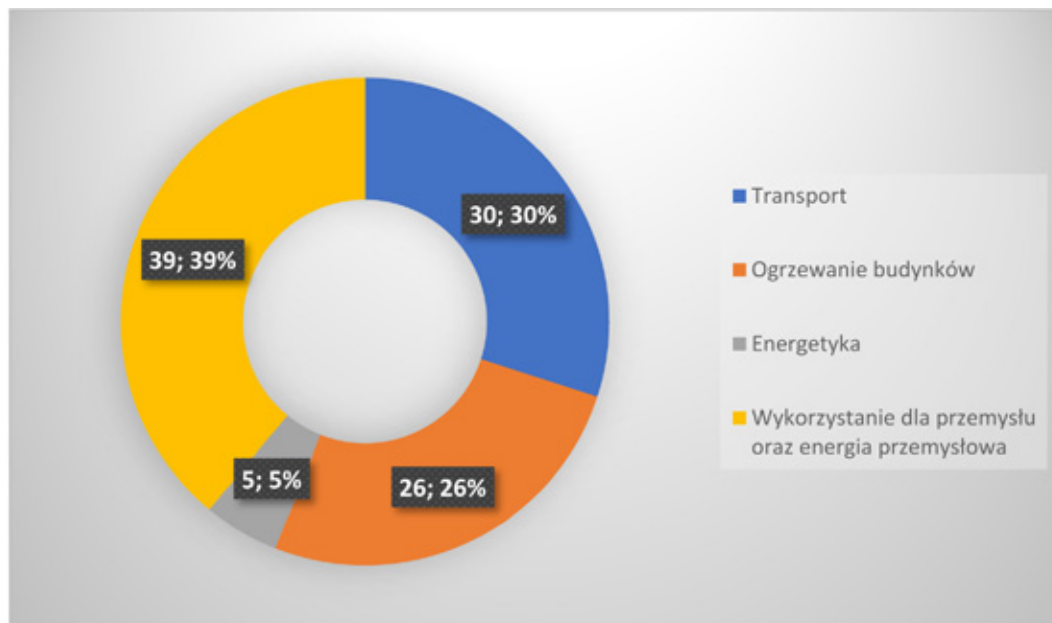
Polska jako państwo stawia na program strategii wodorowej, co przekłada się na transformację energetyczną, wykorzystującą wodór nie tylko jako paliwo bezpośrednie ale również nośnik energii. Swego rodzaju magazyn prądu, pozyskiwanego z Odnawialnych Źródeł Energii. Również sieć gazowa wprowadza w życie plany wzbogacenia gazociągów w paliwo wodorowe, a w przyszłości zastąpienie gazu ziemnego. Opracowywane są projekty przebudowy infrastruktury i budowy nowej. Zarówno produkcyjnej jak i transportowej czy dystrybucyjnej. Powstał dokument rządowy o nazwie: „Polska strategia



Wykres 5. Średnie ceny poszczególnych rodzajów wodoru (USD/kg)

Average hydrogen prices (USD/kg)

Źródło: Opracowanie własne.



Wykres 6. Wykorzystanie wodoru
Use of hydrogen
Źródło: Opracowanie własne.

wodorowa do 2030 roku z perspektywą do roku 2040”. Zakłada on 6 strategicznych punktów odnoszących się do poszczególnych kategorii gospodarczych.

1. Wdrożenie technologii wodorowych w energetyce i ciepłownictwie
2. Wykorzystanie wodoru jako paliwo alternatywne w transporcie
3. Wsparcie dekarbonizacji przemysłu
4. Produkcja surowca w nowych instalacjach
5. Sprawny i bezpieczny przesył, dystrybucja i magazynowanie wodoru
6. Stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego.

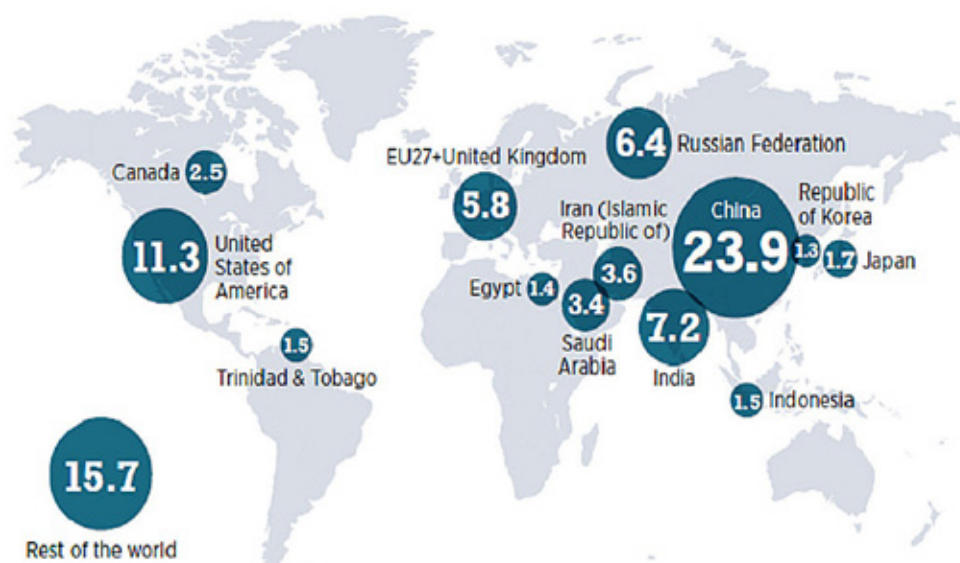
PRODUKCJA WODURU W UNII EUROPEJSKIEJ

„Strategia wodorowa dla Europy neutralnej dla klimatu” to dokument opracowany przez komisję europejską, który stawia wodór jako klucz do zeroemisyjności kontynentu do 2050 roku. Unia Europejska planuje w pełni wdrożyć wodór w dziedzinie energetyki. Warto podkreślić, że główne działania UE skupiają się w większości na wodorze zielonym. Wodór zielony określany jest jako wodór odnawialny. Strategia Unii Europejskiej zakłada do 2025 roku wy-

budowanie elektrolizerów o łącznej mocy 6GW. W kolejnych latach łączna moc elektrolizerów ma być rozbudowana do poziomu 40 GW. Rok 2050 miałby w pełni zaspokajać zapotrzebowanie Europy na wodór jako paliwo i magazyn energii a jego pochodzenie w 100% byłoby zdefiniowane przez produkcję z elektrolizy, do której prąd w 100% pochodzić będzie ze źródeł odnawialnych.

Obecnie w całej Unii Europejskiej roczna produkcja wodoru oscyluje w okolicach 12 milionów ton rocznie. Jest on wykorzystywany głównie przez rafinerie i do produkcji amoniaku. Niewielki procent przemysłu chemicznego, spożywczego itp. Używa wodoru do procesów produkcyjnych czy jako składnik gotowych produktów.

Takie założenia jak np. zakaz sprzedaży kotłów na paliwa kopalne do 2030 roku czy chociażby ambitne plany koncernów motoryzacyjnych, rezygnujących z silników spalinowych co jest zdeterminowane coraz to intensywniejszymi normami emisji spalin zmusza społeczeństwo do skutecznego poszukiwania alternatyw. Takie rozwiązania jak samochody elektryczne, pompy ciepła czy źródła ciepła zasilane prądem siła rzeczy mają nadal negatywny wpływ na środowisko ponieważ ciągną za sobą tak zwany ślad węglowy.

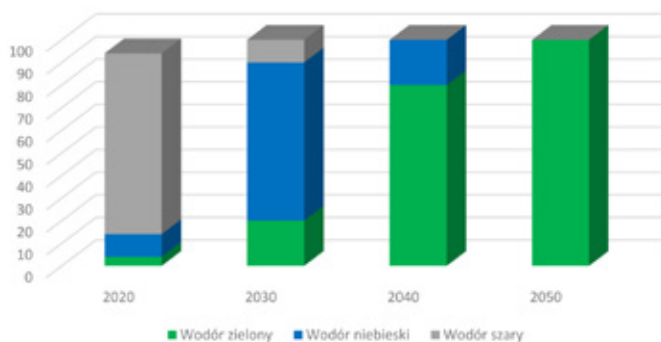


Rys. 5. Produkcja wodoru na świecie
Fig. 5. World hydrogen production
wodorowy
Źródło: <https://www.cire.pl/artykuly/brak-kategorii/geopolityka-transformacji-energetycznej-czynnik> –

PRODUKCJA WODURU NA ŚWIECIE

Obecnie cały świat podobnie jak Unia Europejska dąży do dekarbonizacji gospodarki właśnie za pomocą wodoru. Aby to zjawisko miało oddźwięk globalny i spełniało stawiane mu zadania potrzebna jest spójna polityka oraz współpraca międzynarodowa. Ponad 30 państw posiada na tą chwilę plany i strategie wodorowe na najbliższe lata oraz wspólnie ustaliły, że będą pracować razem nad produkcją oraz wdrażaniem wodoru zielonego i niebieskiego. Gwałtowna transformacja na rynku paliw drastycznie zmieni sytuację geopolityczną oraz gospodarczą świata. Dzisiejsi giganci sprzedający paliwa kopalne, takie jak ropa naftowa czy gaz ziemny, mogą bardzo szybko stracić większość zysków pochodzących właśnie ze sprzedaży tych surowców. Według strategii niemal każde państwo będzie w jakimś stopniu niezależne wodorowo, a co za tym idzie, przynajmniej teoretycznie, rynek wodorowy nie będzie zmonopolizowany.

Obecnie największym producentem oraz konsumentem wodoru są Chiny. Zużywają go niemal 24 mln ton rocznie. Jednak wynika to z faktu wykorzystania wodoru w celach przemysłowych w branży chemicznej czy metalurgicznej. Jednak fakt, że Chiny są gigantem jeśli chodzi o produkcję wodoru szarego, dosyć łatwo wydają się transformacja tego rynku na wodór niebieski. Co w początkowej fazie realizacji strategii wodorowych może być kluczowe, dopóki jeszcze nie będzie rozwinięta infrastruktura produkcji i dostaw wodoru zielonego. Spadek ceny za technologie Odnawialnych Źródeł Energii potęguje i ułatwia realizację założonych celów transformacji wodorowej.



Wykres 7. Globalny planowany udział rodzajów wodoru w rynku
Global planned participation types of hydrogen

Źródło: Opracowanie własne.

W nadchodzących latach ponad 140 państw zadeklarowało działania dążące do zerowej emisji netto. Jak te plany będą realizowane i czy te działania będą skuteczne? Tego nie wiemy ale pewne jest to że niemal cały świat dąży do wyparcia paliw kopalnych właśnie przez wodór bo to wodór jest na tą chwilę uznawany za paliwo przyszłości.

PODSUMOWANIE

Wodór jako paliwo przyszłości budzi dziś wiele kontrowersji. Niewątpliwie wymaga szeregu nowych rozwiązań w branży energetycznej oraz rozbudowy tych obecnie stosowanych.

Aby można było nazywać wodór paliwem o zerowej emisji gazów cieplarnianych i neutralnym wpływie na klimat konieczna jest produkcja wodoru zielonego. Wodór niebieski choć uznawany za ekologiczny może nie podołać temu wyzwaniu na drodze globalizacji rynku i znacznemu zwiększeniu się zapotrzebowania. Współpraca większości państw niewątpliwie przyspieszy okres transformacji wodorowej. Planowanie odejścia od paliw kopalnych w dzisiejszych czasach jest koniecznością. Na pierwszym miejscu stawiana jest

oczywiście ekologia ale należy pamiętać o ograniczonych zasobach paliw konwencjonalnych.

Wodór zielony jest odpowiedzią na wszystkie pytania dotyczące przyszłości i stabilności rynku energetycznego. Należy pamiętać że proces strategii wodorowych już się rozpoczął. Nie jest to futurystyczny plan nie wnoszący nic szczególnego w rynek. Każde z państw które przystąpiło do populacji wodoru prężnie działa w tym kierunku i przeznaczają ogromne pieniądze na badania oraz budowę zaplecza przemysłowego potrzebnego do produkcji oraz dystrybucji wodoru. Wniosek jest jeden, paliwem przyszłości jest Wodór Zielony. ■

LITERATURA

- [1] „Energetyka wodorowa” T. Chmielniak; Wydawnictwo PWN
- [2] <https://wysokienapiecie.pl/29964-unijna-strategia-wodorowa-stawia-na-czysty-wodor/>
- [3] https://pl.wikipedia.org/wiki/Wod%C3%B3r_jako_paliwo_konwencjonalne
- [4] <https://www.tuv.com/landingpage/pl/hydrogen-technology/main-navigation/allgemein/>
- [5] <https://klimat.rp.pl/zielone-technologie/art18740001-niebieski-wodor-nie-jest-wcale-przyjazny-dla-klimatu>
- [6] <https://www.tuv.com/landingpage/pl/hydrogen-technology/main-navigation/production/>
- [7] <https://powermeetings.eu/kolory-wodoru-znaczenie-zastosowanie-potencjal/>
- [8] <https://seshydrogen.com/stacje-hydrowodorowe-juz-w-polsce/>
- [9] https://pl.wikipedia.org/wiki/Sekwestracja_dwutlenku_w%C4%99gla
- [10] <https://www.e-education.psu.edu/meteo469/node/223>
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_utilization
- [12] <https://e-magazyny.pl/magazyny-energii/elektroliza-wody-metoda-produkcji-zielonego-wodoru/>
- [13] https://fiw.arp.pl/sites/default/files/zalaczniki/usuwanie_co2.pdf
- [14] <https://nauka.tvp.pl/55965959-nowe-techniki-wychwytu-co2-moga-powstrzymac-zmiany-klimatyczne>
- [15] https://se.min-pan.krakow.pl/pelne_teksty19/k19_uliasz-i-inni.pdf
- [16] http://zs9elektronik.pl/inne/karolina/podr_4_elektrolizery.pdf
- [17] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301>
- [18] <https://transformacja2050.pl/project/1-usd-za-kg-zielonego-paliwa-wodorowego/>
- [19] <https://przemyslprzyszlosci.gov.pl/polskie-plany-wodorowe/>
- [20] <https://www.cire.pl/artykuly/brak-kategorii/geopolityka-transformacji-energetycznej-czynnik-wodorowy>
- [21] <https://www.gramzielone.pl/wodorr/106934/w-unii-ma-powstac-40-gw-elektrolizerow-ke-bierze-sie-za-przepisy>
- [22] <http://psew.pl/wp-content/uploads/2021/12/Raport-Zielony-Wodorr-z-OZE-77MB.pdf>
- [23] Wpływ składu mieszaniny absorpcyjnej na efektywność usuwania CO₂
- [24] Andrzej WILK, Lucyna WIĘCŁAW-SOLNY, Aleksander KRÓTKI, Dariusz ŚPIEWAK – Centrum Badań Procesowych, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze
- [25] <http://archiwum.inig.pl/INST/nafta-gaz/nafta-gaz/Nafta-Gaz-2012-10-02.pdf>
- [26] Wpływ składu mieszaniny absorpcyjnej na efektywność usuwania CO₂; Andrzej WILK, Lucyna WIĘCŁAW-SOLNY, Aleksander KRÓTKI, Dariusz ŚPIEWAK – Centrum Badań Procesowych, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze
- [27] <https://gaia.solar/blog/innowacje-w-oze-zielony-wodorr/>