

Wodór - paliwo przyszłości

Hydrogen - the fuel of the future

Michał Kwaśniewski, Klaudia Żmuda *)

Słowa kluczowe: wodór, paliwo przyszłości, transport wodoru, magazynowanie wodoru, produkcja wodoru, oczyszczanie wodoru, elektroliza wody, Reforming gazu naturalnego.

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę ekonomiczną sposobów magazynowania wodoru. Wskazano również metody wytwarzania, magazynowania i transportowania wodoru. W opracowaniu zawarto również kwestię bezpieczeństwa związanego z użytkowaniem paliwa wodorowego oraz porównano koszty magazynowania oraz transportu.

Keywords: hydrogen, fuel of the future, hydrogen transport, hydrogen storage, hydrogen production, hydrogen purification, water electrolysis, natural gas reforming.

Abstract

The article presents an economic analysis of hydrogen storage methods. Methods of producing, storing and transporting hydrogen are also indicated. The work also takes into account the safety issue related to the use of hydrogen fuel and compares the costs of storage and transport.

Wprowadzenie

Wodór zbudowany z jednego protonu i jednego elektronu tworzy najprostszy pierwiastek w przyrodzie. Jest głównym składnikiem wody, która stanowi około 70% powierzchni Ziemi, i występuje w większości materii organicznej. Cechuje się dużym ciepłem spalania w przeliczeniu na masę, wysoką temperaturą samozapłonu, niską energią zapłonu oraz małą gęstością masy. Wodór nie posiada barwy ani zapachu, nie jest toksyczny. Jako paliwo doskonale, gwarantuje najczystsze i najwydajniejsze spalanie. W porównaniu do paliw węglowych podczas spalania wodoru nie powstają szkodliwe związki. Podczas połączenia wodoru z tlenem w ogniu paliwowym, powstaje energia i czysta woda

1. Charakterystyka wodoru oraz metody jego produkcji

1.1. Metoda wytwarzania wodoru z odnawialnych źródeł energii

Do produkcji wodoru w praktyce wykorzystuje się dwie metody:

- proces elektrolizy wody,
- reforming parowy gazu naturalnego.



Rys.1. Elektroliza wody, [36]

Fig. 1. Water electrolysis, [36]

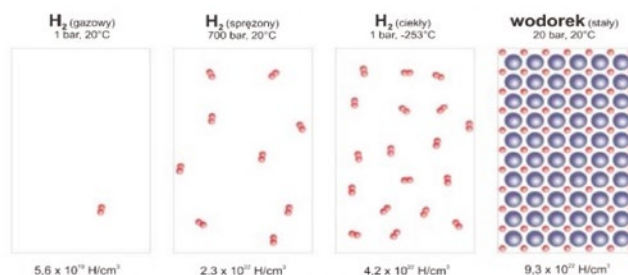


Rys.2. Reforming gazu naturalnego, [36]

Fig 2. Natural gas reforming, [36]

Produkcja wodoru z wykorzystaniem procesu elektrolizy wody przebiega z wykorzystaniem źródła prądu, które może być nazwane „zielonym źródłem” z energii słonecznej lub wiatrowej. Takie połączenie produktów procesu elektrolizy wody daje całkowicie ekologiczne źródło wodoru. [35].

Do rozpoczęcia procesu reformingu gazu naturalnego potrzebny jest czas. Proces odbywa się pod stałym obciążeniem. Użycie elektrolizerów wiąże się z możliwością włączania i wyłączania urządzenia na każdym etapie procesu oraz sterowania wydajnością.



Rys.3. Własności wodoru w zależności od gęstości. [18]

Fig. 3. Properties of hydrogen depending on the density. [18]

*) Michał Kwaśniewski, mgr inż., Polska Spółka Gazownictwa sp. z o.o. Oddział Zakład Gazowniczy w Warszawie, Zakład Inżynierii Środowiska - Państwowa Uczelnia Zawodowa w Ciechanowie. Klaudia Żmuda, inż., Państwowa Uczelnia Zawodowa w Ciechanowie.

1.2. Wytwarzanie wodoru w systemach morskich

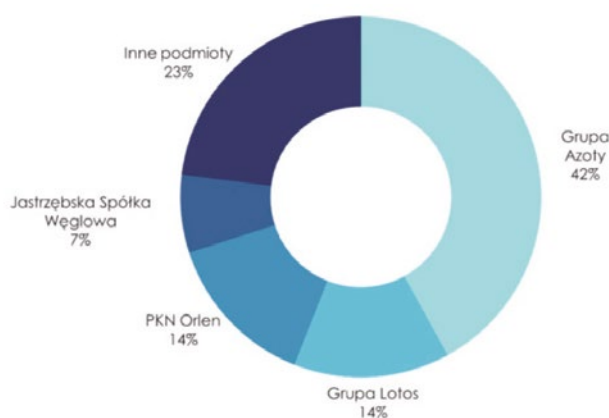
Obiecującą i rozwijaną metodą pozyskiwania wodoru z odnawialnych źródeł energii jest wytwarzanie go z wody morskiej w urządzeniach instalowanych na platformach „offshore”. W procesie tym energia elektryczna do elektrolizy produkowana jest przez turbiny wiatrowe. Urządzenia mogą być instalowane na nowych, przeznaczonych do tego celu platformach, na istniejących wydobywczych lub przetwórczych platformach ropy i gazu po ich odpowiedniej przeróbce. Zastosowanie i adaptacja istniejącej infrastruktury do wywarzania wodoru w dużych ilościach to obiecujący kierunek, który umożliwi stworzenie nowego obszaru w branży produkcji, konwersji i dystrybucji energii.[7]

1.3. Bilans produkcji wodoru w Polsce i na świecie

Wodór jest produktem ubocznym w przemyśle rafineryjnym i chemicznym. Produkcja światowa to ok. 120 Mt. Duża ilość wodoru jest wytwarzana i wykorzystywana w zakładach przemysłowych. Jego produkcja wynosi około 70 Mt z czego 76% wytwarza się z gazu ziemnego w procesie reformingu a 23% z węgla. Pozostała część produkcji pochodzi z ropy naftowej oraz elektrolizy wody. Do uzyskania całej ilości produkowanego wodoru za pomocą procesu elektrolizy konieczne byłoby zużycie około 3600 TWh energii elektrycznej. Warto jednak zaznaczyć iż produkcja energii elektrycznej na terenie Unii Europejskiej szacuje się na poziomie około 3300 TWh rocznie. Podczas wykorzystania tego procesu zużycie wody wyniosłoby ok 617 mln m³, co daje dwukrotnie większą ilość niż jej aktualne wykorzystanie w procesie reformingu gazu ziemnego.

W Europie jednym z głównych producentów wodoru jest Polska. W 2015r. łączna produkcja wyniosła 1 mln, co stanowi ponad 10% konsumpcji wodoru w Europie.

Powstaje on przy produkcji nawozów azotowych, gdzie w procesie reformingu parowego metanu oraz półspalania otrzymujemy wodór. Największe ilości wytwarzane są w Grupie Azoty (Puławy – 190 tys. t/rok, Kędzierzyn Koźle – ok. 77 tys. t/rok, Tarnowo – 73 tys. t/rok, Police – 88tys. t/rok) . W przemyśle petrochemicznym największą ilość wodoru w ciągu roku wytwarza PKN Orlen – ok. 140 tys. t oraz Grupa Lotos około 59 tys. t. Zdżeszowice i Przyjaźń to jedne z największych koksowni w Polsce, które łącznie wytwarzają 149 tys. ton wodoru rocznie. Wodór produkowany jest również przez przedsiębiorstwa działające w przemyśle tłuszczowym, gdzie ma zastosowanie podczas utwardzania oleju roślinnego.[2]



Rys. 4. Struktura produkcji wodoru w Polsce.[2]

Fig. 4. The structure of hydrogen production in Poland. [2]

2. Magazynowanie i transport wodoru

Głównym problemem w zastosowaniu wodoru, jako źródła energii jest sposób jego magazynowania oraz transportowania. Wynika to z faktu, iż jest on stosunkowo niebezpiecznym gazem. Dotych-

czas jedną z metod przechowywania wodoru były butle stalowe pod odpowiednim ciśnieniem, natomiast drugą możliwością było doprowadzenie go do postaci ciekłej przy pomocy obniżenia temperatury. Pozwalało to na zastosowanie naczynia Dewara, które dzięki właściwej izolacji przeciwdziałało szybkiemu odparowaniu. Obydwa rozwiązania są nadal problematyczne, ze względu na ciągłe wrzenie wodoru. Powoduje to konieczność odprowadzania ulatniającego się gazu. Butle stalowe są bardzo ciężkie a ich zależność wagowa w stosunku do wodoru jest bardzo mała. [23]

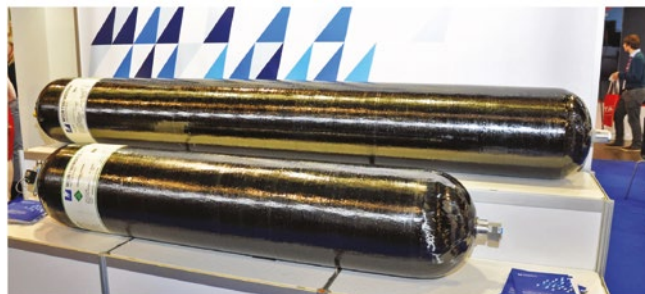
2.1 Sposoby magazynowania wodoru w stanie gazowym

Magazynowanie wodoru w postaci gazowej jest powszechną metodą magazynowania. Sprężanie wodoru do wysokiego ciśnienia umożliwia zwiększenie jego gęstości. Dwukrotnie zwiększając ciśnienie w zbiorniku podwaja ilość magazynowanej energii w jednostce objętości. Wykorzystywane w przemyśle znane urządzenia oraz technologie dopuszczają akumulowanie wodoru w stanie gazowym przy pomocy butli stalowych pod ciśnieniem 200-350 barów.

Konwencjonalnym i sprawdzonym sposobem przechowywania wodoru jest jego sprężanie i wtłaczanie go do stalowych zbiorników. Znajdują one zastosowanie w transporcie bądź alokacji stacjonarnej. Obecnie branża przemysłowa chętniej korzysta z zbiorników ciśnieniowych, które cechują się niższą wagą oraz zwiększonym ciśnieniem pracy, jednocześnie dysponują porównywalną objętością wodną do zbiorników wykonanych ze stopów metali. Ze względu na możliwość składowania sprężonego wodoru w obniżonej od – 120 do 196 °C temperaturze bardzo rozpowszechniana jest technika magazynowania w zbiornikach krio-ciśnieniowych.

Wodór magazynowany jest w pokojowej temperaturze, w przedziale ciśnień 150-800 bar. W branży samochodowej wykorzystywane są ciśnieniowe zbiorniki produkowane zazwyczaj z materiałów kompozytowych. Przykładem tego rodzaju alokacji jest zbiornik typu III z możliwością napełniania wodorem o ciśnieniu od 350 do 700 bar. Najbardziej współczesna technologia w/w zbiorników z zamontowanymi specjalnymi przeponami umożliwia składowanie wodoru w stanie gazowym pod ciśnieniem 700 bar.

Na rysunku nr 5. przedstawione są zbiorniki typu III do magazynowania wodoru.



Rys. 5. Zbiorniki typu III stosowane do alokacji oraz transportu wodoru.[21]

Fig. 5. Type III tanks used for the allocation and transport of hydrogen. [21]

2.2. Sposoby magazynowania wodoru w postaci ciekłej

Przekształcenie wodoru w postać ciekłą wymaga wykorzystania dużo większej energii niż jego sprężanie. Wodór w postaci skroplonej powinien być przechowywany w temperaturze 20 K, czyli – 253 °C, co generuje wysokie koszty. Przy obecnej technologii do skroplenia wodoru konieczne jest zużycie energii odpowiadającej 30% jego wartości cieplnej. Dodatkowo wodór odparowuje, dlatego kiedy nie jest pobierany w sposób stały nie powinien być przechowywany w formie ciekłej. Podstawową zaletą magazynowania wodoru w postaci ciekłej jest to, że zajmuje on zdecydowanie mniej miejsca niż w postaci gazowej. Zbiorniki ze skroplonym wodorem mają możliwość zmagazynowania ponad dwukrotnie więcej wodoru niż podobne objętościowo zbiorniki ze sprężonym wodorem. Skroplony wodór

magazynowany jest w specjalnych zbiornikach wysokociśnieniowych z izolacją termiczną. [26]

W stosunku do pierwiastków zawartych w powietrzu – tlenu, azotu, argonu oraz metanu w technologii przekształcenia wodoru w ciecz trzeba brać pod uwagę następujące właściwości tego pierwiastka:

- Temperatura przy której swoją wartość obniża dławiony gaz, tak zwana inwersja jest niższa, niż temperatura otoczenia i równa się 20K.
- Przed zjawiskiem przekształcenia w ciecz, wodór powinno się oczyścić z dodatków wody, dwutlenku węgla czy też innych gazów, z pominięciem helu. Ponieważ wszystkie te gazy kiedy wodór jest w stanie ciekłym są w stanie stałym. Oczyścić wodór z tlenu na pozór wydaje się proste, używając katalizatora spalamy część wodoru, wtedy tworzy się woda, którą za pomocą metody adsorpcyjnej usuwamy.
- Skroplony wodór nie może mieć kontaktu z powietrzem i tlenem, ponieważ skroplony tlen może być przyczyną wybuchu.
- Zbiorniki i instalacje do skroplonego wodoru muszą posiadać izolację próżniową, aby tlen nie dostał się do instalacji.
- Opary wodoru nie mogą wydostawać się bezpośrednio do otoczenia. Gazowy wodór z powietrzem to mieszanka wybuchowa. [21]



Rys. 6. Zbiornik ze skroplonym wodorem. [19]

Fig. 6. Tank with liquefied hydrogen. [19]

Skroplony wodór jest wykorzystywany jako paliwo statków kosmicznych. Ciekły wodór wykorzystywany jest w silnikach spalinowych i ogniach paliwowych pojazdów kosmicznych. Podczas spalania wodoru w silniku, wytwarzane są ogromne ilości energii, wody oraz znikome ilości ozonu i nadtlenu wodoru. [33]



Rys. 7. Zbiornik ciekłego wodoru w bazie NASA. [20]

Fig. 7. Liquid hydrogen tank at the NASA base. [20]

Nowością w zakresie magazynowania wodoru w postaci skroplonej są zbiorniki hybrydowe z kriogenicznym i dodatkowo sprężonym wodorem. W tej technologii wodór jest przechowywany w stanie sprężonej cieczy o ciśnieniu i temperaturze wyższych niż w sytuacji standardowego skroplonego wodoru. Do przekształcenia sprężonego wodoru w ciekły potrzebna jest znacznie mniejsza ilość energii. [5]

Ponadto w tego typu zbiornikach dostrzega się mniejsze straty związane z parowaniem wodoru.

Przykładowym zbiornikiem hybrydowym jest Gen-3, którego objętość wynosi 151 litrów i masa 123 kilogramy. Zbudowany został z aluminium o grubości 9,5 mm, przykrytego warstwą kompozytu z włókna węglowego o grubości 10 mm.

2.3. Porównanie technik magazynowania

Wodór gwałtownie reaguje z tlenem, który jest zawarty w powietrzu, dlatego sposób jego magazynowania jest bardzo istotny dla bezpieczeństwa zasilanych nim urządzeń.

W tabeli nr 1 zaprezentowano porównanie dwóch najpopularniejszych metod magazynowania wodoru.

Tabela 1 Porównanie metod magazynowania wodoru. [7]

Table 1 Comparison of hydrogen storage methods. [7]

	Wodór sprężony	Wodór skroplony
Warunki przechowania	250-500 bar	-253 °C
Ilość zmagazynowania w autocysternie	350-110 kg	Do 3000 kg
odparowanie	0%	1÷3%
Ilość zużytej energii	2÷6 kWh	7÷10 kWh
Koszt przetransportowania autocysterną	>EUR 0.4/> EUR1.0	>EURO 1.4

Bardzo ważne przy wytworzeniu wodoru jest jego późniejsze przechowywanie oraz transport. Wodór można magazynować w stanie gazowym pod ciśnieniem zbiornikach, lub w stanie ciekłym w cysternach i statkach przeznaczonych do transportu skroplonego gazu.

Wodór w postaci gazowej może być transportowany rurociągami lub w zbiornikach pod ciśnieniem. Przesyłanie skroplonego wodoru rurociągami jest mało opłacalne i wykorzystuje się go bardzo rzadko – transport na małe odległości. Najczęściej wodór w formie ciekłej przewozi się cysternami i tankowcami. [8]

2.4. Transport wodoru

Konstrukcja zbiorników do przechowywania wodoru w stanie gazowym, jest zbliżona do jednostek składowych sprężonych gazów takich jak:

- biogaz,
- metan,
- CNG.

W przypadku transportowania sprężonego wodoru, producenci zbiorników oferują rozwiązania techniczne, dzięki którym są w stanie sprostać wymaganemu poziomowi bezpieczeństwa. Jako przykład można posłużyć się zbiornikami typu IV, wykonanych z materiałów kompozytowych zbrojonych włóknem szklanym. W porównaniu ze zbiornikami z kompozytów epoksydowo-węglowego typu III, są bardziej efektywne. Dodatkowo, posiadają zabezpieczenia mechaniczne będące osobną konstrukcją ochronną, mającą na celu zwiększenie wytrzymałości na różnego rodzaju uszkodzenia mechaniczne, a także zgniecenia. Stanowią one, więc bezpieczny środek alokacyjny możliwy do stosowania w łańcuchu logistycznym a tym samym ułatwiają przewóz oraz dystrybucję sprężonego wodoru. [12]

Rozwój linii technologicznych, oraz prowadzenie inwestycji związanych z wykorzystaniem wodoru w transporcie, a także przygotowanie systemu wytwarzania zbiorników kompozytowych traktuje się jako technologię zaawansowaną. Stopień technologicznego rozwoju sposobów wytwarzania zbiorników postrzegany jest jako adekwatny do masowej produkcji, szczególnie w przypadku przemysłu samochodowego. Wykorzystywane technologie, restrykcyjne procedury kontroli jakości oraz zdobyta praktyka pozwalają na wydłużenie okresu eksploatacji, stosowanych do transportowania sprężonego wodoru, zbiorników kompozytowych z 10 do 30 lat. [15]

W przypadku transportowania wodoru drogą wodną temat bezpieczeństwa wydaje się oczywisty, a sposób optymalny ze względu na przemieszczanie większego wolumenu wodoru przy pomocy np. kontenerów zbiornikowych. Jednakże, sprężanie gazu do wyższego ciśnienia oraz obniżenie jego temperatury powoduje zwiększenie gęstości wodoru. Oddziałuje to na pojemność magazynową, a także gabaryt wodnego środka lokocji. Transport wodny sprężonego wodoru może zdać egzamin tylko w przypadku krótkich i średnich dystansów morskich oraz przy małych i średnich powierzchniach magazynowych.

2.5. Optymalizacja wyboru sposobu magazynowania i transportowania wodoru

Popularne jest używanie zbiorników ciśnieniowych Typu IV mające na celu magazynowanie wodoru w miejscu gdzie jest on produkowany tj. w miejscu elektrolizy przy elektrowniach słonecznych, wiatrowych, a także w miejscach gdzie wodór jest wykorzystywany – zakłady przemysłowe, stacje napełniania. [4].

Zbiorniki stalowe wyposaża się w króćce ze stali nierdzewnej oraz okładzinę z tworzywa sztucznego. Kompozytowe konstrukcje tworzone są z lekkiego o wysokiej wytrzymałości włókna szklanego oraz żywicy epoksydowej. Okres eksploatacji zbiorników może być bardzo długi, ponieważ nie mają właściwości korozyjnych. Zbiorniki z konstrukcją kompozytową są tolerancyjne w stosunku do temperatury, posiadają małą wagę, długi czas użytkowania oraz wysoki poziom bezpieczeństwa w porównaniu ze zbiornikami stalowymi.

Standardowym środkiem transportu i magazynowania wodoru są ciśnieniowe zbiorniki Typu III i IV służące do magazynowania wodoru na statkach oraz systemy transportowe dla kontenerów zgodne z normami ISO.[9]

3. Zastosowanie wodoru i aspekty bezpiecznego wykorzystania

Wodór posiada szerokie zastosowanie w przemyśle – jest nazywany paliwem przyszłości.

3.1 Możliwe zastosowania wodoru na świecie

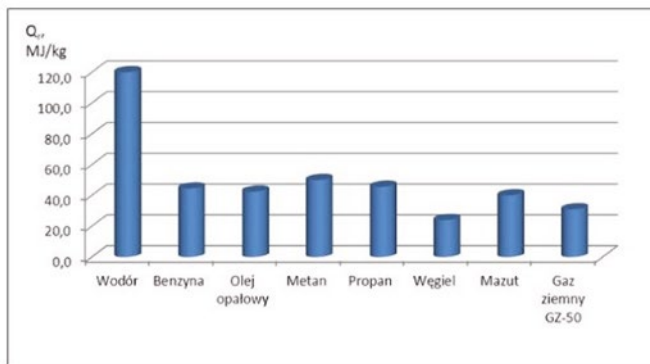
Istnieje wiele technologii wytwarzania wodoru. W zależności od stopnia czystości wodór dzielimy na:

- Szary wodór – jest wytwarzany z paliw kopalnianych z wykorzystaniem reformingu parowego metanu (SMR) lub zgazowania węgla;
- Niebieski wodór – reforming parowy wraz z wychwytem CO₂;
- Turkusowy wodór – łączy ze sobą wykorzystanie gazu ziemnego jako surowca bez produkcji dwutlenku węgla, w procesie pirolizy węgiel zawarty w metanie staje się stałą sadzą.
- Zielony wodór – oznacza wodór wytwarzany z energii odnawialnej. Umożliwia przejście na w pełni zrównoważoną energetykę. Malejące koszty energii wiatrowej i słonecznej oraz udoskonalenia technologiczne obniżają koszty produkcji zielonego wodoru.[3]

Zielony wodór wytwarzany z energii odnawialnej stanowi kluczowy związek między wytwarzaniem energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych a trudnymi do ograniczenia sektorami takimi jak przemysł i transport. Stał się uniwersalnym nośnikiem odpowiednim do zastosowań związanych z dekarbonizacją bez dostępu do sieci elektrycznej lub jako surowiec neutralny pod względem dwutlenku węgla. Swoje zastosowanie znajduje również w systemach zbudowanych na bardzo wysokim udziale energii odnawialnej. [40]

Powszechnie wykorzystywany wodór jest przyszłością. Stosowany jako paliwo, w którym w reakcji z tlenem produktem spalania jest woda oraz jako czynnik chemiczny wykorzystywany w procesie wytwarzania amoniaku a potem nawozów sztucznych. Wodór używa się również do utwardzania tłuszczów, hydrogenizacji, produkcji metanolu. W metalurgii proszków i spawalnictwie wodór stosuje się jako atmosferę ochronną o własnościach redukcyjnych.

Obecnie w Stanach Zjednoczonych większość wodoru zużywa się do produkcji amoniaku i nawozów sztucznych, a ogólne zużycie wynosi około 90 miliardów metrów sześciennych. Wodór ma bardzo duże ciepło spalania równe 120 MJ/ kg.



Rys.8. Porównanie wartości opalowych wodoru w stosunku do innych paliw.[21]
Fig 8. Comparison of the calorific value of hydrogen in relation to other fuels. [21]

Wodór wykorzystywany jest głównie jako paliwo do statków kosmicznych gdzie wytwarzana jest energia elektryczna w ogniach paliwowych zasilanych wodorem.

Wodór swoje zastosowanie znalazł także w przemyśle spożywczym, został dopuszczony jako dodatek do żywności tak zwany E949, gdzie w szczelnych opakowaniach chroni żywność przed utlenianiem. [46]

Istotną gałęzią przemysłu, w której wodór ma spory potencjał jest produkcja stali. Obecnie stosowane metody wpływają na bardzo dużą emisję dwutlenku węgla. Stal wytwarzana jest w procesach z użyciem elektrycznych pieców oraz tlenowych pieców zasadowych. Produkcja stali z użyciem wodoru pozwoli zredukować znaczną emisję dwutlenku węgla, może również okazać się bardziej opłacalna. [49]

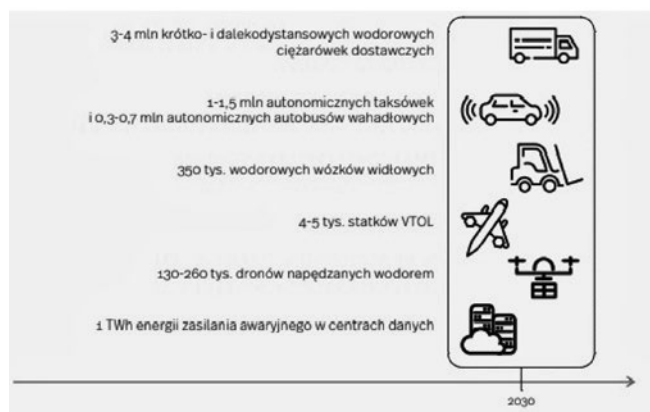
W metanizacji wodoru, dwutlenku węgla lub tlenku wytwarza się syntetyczny gaz ziemny. Wizja przyszłej gospodarki bez emisji dwutlenku węgla i innych szkodliwych substancji, może być spowodowana zastąpieniem gazu ziemnego, paliwami alternatywnymi. Korzyści przyniesie zastąpienie gazu wodorem, ze względu na błyskawiczną reakcję modyfikacji zapotrzebowania na energię. Wodór mógłby być wykorzystywany także do wytwarzania ciepła, ponieważ spełnia oczekiwania odnoszące się do kaloryczności to znaczy dotyczące objętości i gęstości. Ale z uwagi na jego bezwonną, bardzo szybką prędkość spalania oraz inne ryzyka, które nie zostały jeszcze zbadane nie można stosować go jako paliwo do urządzeń zasilanych gazem klasycznym. Wodór można wykorzystywać do produkcji energii tylko w specjalnych układach kogeneracyjnych, kotłach z palnikiem wodorowym i kotłach płomienicowo-płomieniówkowych.

Wodór może być doskonałym rozwiązaniem dla zasilania awaryjnego ogniwo paliwowych, zastępując ogólnie stosowane oleju napędowego w silnikach Diesla. Działanie różnych firm związane jest z dużym zużyciem energii w związku z potrzebą podwójnego zasilania serwerów czy zapewnienia odpowiedniej wilgotności i temperatury pomieszczeń. Koszty energii elektrycznej zużywanej przez te instytucje może stanowić nawet połowę całkowitych kosztów operacyjnych, dlatego coraz częściej stosuje się własny wyrób energii. Funkcjonowanie niektórych firm lub instytucji potrzebuje lokalizacji w specjalnych miejscach, przez co wybór technologii energetycznych jest mocno utrudniony, a szczególnie jeśli chcemy energię z odnawialnych źródeł energii. Z tego względu wodór jest tutaj najlepszym rozwiązaniem, wykorzystywany w ogniach paliwowych do produkcji energii. W postaci płynnej przed użyciem jako paliwo może być wykorzystany do chłodzenia serwerów, a wytwarzane ciepło w czasie pracy ogniwa można używać w chłodzeniu absorpcyjnym.[35]

Ciągle rosnące zapotrzebowanie na energię oraz coraz mniejsze zasoby ropy naftowej i gazu ziemnego nakładają ludzkość do poszukiwania nowych źródeł energii. Wodór jest uważany za przyszłość jako paliwo alternatywne dla energii elektrycznej. W kwestii ogniw paliwowych w pojazdach mechanicznych koszty nakładu są wyższe, ale koszty inwestycyjne równają się z pojazdami akumulatorowymi. Bateria ma 10 razy mniejszą gęstość energetyczną niż zbiornik wodoru, co w przypadku pojazdu o masie 18 ton przekłada się na rozstawienie przeniesienia napędu o masie 1,8 – 2,1 kg w sytuacji wodoru, a 4,5 – 5,5 kg w przypadku baterii.[21] Jest dobrą alternatywą dla autonomicznych pojazdów, które stanowią przyszłość. Szacuje się, że w 2030 r. po ulicach będzie jeździć ok. 20 milionów autonomicznych pojazdów użyteczności publicznej. Aby zmaksymalizować czas użytkowania takich pojazdów do 24 godzin na dobę oraz zminimalizować koszty użytkowania potrzebne jest takie paliwo, które w tym pomoże. A ładowanie samochodów elektrycznych zmniejsza czas ich wykorzystania o ponad półgodziny. Czas tankowania pojazdów zasilanych wodorem wynosi maksymalnie 5 minut co przekłada się na większe zyski. Mniejszy czas postoju pojazdów podczas tankowania pozytywnie wpływa na zmniejszenie ilości liczby takich stacji. Miejsca tankowania wodoru zajmują około 15 razy mniej miejsca niż elektryczne stacje ładowania pojazdów obsługujących tą samą liczbę samochodów.

W przyszłości jako taksówki mogą być stosowane statki powietrzne z zastosowaniem pionowego startu i lądowania. Ogromnym plusem takiego zastosowania może być zaoszczędzenie czasu spędzonego w korkach. Wykorzystanie wodoru w tego typu pojazdach ma więcej korzyści od innych technologii ze względu na dużą gęstość energii wodoru oraz jak wyżej wspomniano możliwości szybkiego napełniania zbiornika paliwem. [33]

Samochody dostawcze, wózki widłowe czy drony w perspektywie przyszłości mogą zapewnić dowóz przez całą dobę przy małych kosztach operacyjnych oraz w krótkim czasie. Mając na uwadze użytkowanie długodystansowych aut, będzie potrzebne stosowanie paliwa o dużej gęstości. Pod względem środowiskowym paliwem najlepszym jest również wodór. [40]



Rys.9 Zastosowanie wodoru do 2030 roku [40]

Fig. 9 Use of hydrogen until 2030 [40]

3.2. Oczyszczanie wodoru

Produkowany wodór nie jest czysty, jest zazwyczaj zmieszany z innymi pierwiastkami i związkami chemicznymi. Wykorzystanie wodoru jako paliwa wymaga dużego poziomu czystości, liczonego w procentach jako zawartość czystego wodoru w mieszaninie. Proces oczyszczania wodoru ma wpływ na końcowy koszt produkcji, ponieważ wymogi poziomu oczyszczania różnią się zależnie od zastosowania co zwiększa koszty. Najbardziej oczyszczonego wodoru wymaga produkcja układów półprzewodnikowych. [40]. W tabeli nr 2 przedstawiono poziomy czystości wodoru do wybranych zastosowań.

Tabela 2. Wymagany poziom czystości wodoru do poszczególnych zastosowań.[14]

Table 2. The required level of hydrogen purity for each application. [14]

Stan skupienia	Poziom weryfikacji czystości	Wykorzystanie	Wymagany poziom czystości (%)
Gaz	B	Przemysł	99,95
	D	Uwodornianie i przemysł wodny	99,99
	F	Oprzędkowanie i gaz paliwowy	99,995
	L	Półprzewodniki i specjalne zastosowanie	99,9999
Ciecz	A	Paliwa i gaz paliwowy, wymagania standardowe	99,995
	B	Paliwa i gaz paliwowy, wysokie wymagania	99,999
	C	Półprzewodniki	99,9997

Ogniwa paliwowe to jedna z przyszłościowych technologii w energetyce. Wodór stosowany jako paliwo wymaga czystości na poziomie minimum 99,7 procent. Wodór w tak wysokim gatunku ma swoje uzasadnienie w praktyce. Określone pierwiastki i związki chemiczne zanieczyszczające wodór, są w stanie nie tylko osłabiać wydajność maszyn, ale i ostatecznie uszkodzić urządzenie wykorzystujące to źródło energii. Nawet mały poziom helu czy argonu może osłabić sprawność ogniw paliwowych. Woda może prowadzić do powstania lodu oraz niepotrzebnej jonizacji, natomiast tlenek węgla zanieczyści katalizatory.[36]

Metody oczyszczania są wciąż ulepszone, a jednocześnie trwają prace nad przygotowaniem nowych technologii. Do znacznej części zastosowań wysokotechnologicznych wymagany jest wodór o czystości powyżej 99,99 procent. Zyskanie tak dużego stopnia oczyszczenia wodoru jest możliwe przy użyciu dwóch metod:

- adsorpcji zmiennociśnieniowej PSA
- technik dyfuzji membranowych

Czyszczenie katalityczne z tlenu oraz tlenku węgla pomimo odpowiednich efektów niemalże całkowicie pomija inne niepotrzebne związki chemiczne i pierwiastki, wobec tego możliwości zastosowania tej metody zostają ograniczone. [10]

W tabeli nr 3 przedstawiono porównanie metod oczyszczania wodoru.

Tabela 3. Metody oczyszczania wodoru – porównanie.[6]

Table 3. Hydrogen purification methods – a comparison. [6]

Metoda oczyszczania	Wprowadzona substancja	Czystość wodoru (%)	Odzysk wodoru (%)
Rozdzielenie kriogeniczne	Gazy odlotowe z przemysłu petrochemicznego oraz rafinerii	90-98	95
Dyfuzja membranowa	Gazy odlotowe z rafinerii i oczyszczony amoniak w formie gazowej	92-98	>85
Separacja wodorkami metali	Oczyszczony amoniak w formie gazowej	99	75-95
Stałe polimerowe ogniwa elektrolitowe	Wodór z cykli termochemicznych	99,8	95
Adsorpcja zmiennociśnieniowa	Każdy gaz bogaty w wodór	99,999	70-85
Oczyszczanie katalityczne	Wodór zanieczyszczony tlenem	99,999	<99
Dyfuzja membraną palladową	Każdy gaz zawierający wodór	>99,999	<99

Przebieg adsorpcji zmiennociśnieniowej opiera się na działaniu selektywnych gazów na stałych sorbentach. W czasie adsorpcji pożądanym składnikiem czyli wodór jest w pierwszej kolejności odkładany na złożu adsorbentu, a kolejno po jego nasyceniu poddawany zjawisku desorpcji. Proces ten może być powtarzalny. Jego głównym minusem jest względnie duża utrata wodoru podczas jego oczyszczania. Dyfuzja bazuje na założeniu przepuszczalności membrany dopuszczającej migrację tylko cząsteczek wodoru. Proces przebiega z wykorzystaniem następująco adsorpcji, dysocjacji, jonizacji, dyfuzji, rekombinacji i desorpcji. Za pomocą membrany palladowej dyfuzja pozwala oczyścić wodór z poziomu co najmniej „4N”, czyli 99,99% do poziomu „9N”, czyli 99,9999999 % . [6]

Należy podkreślić, że oczyszczanie wodoru jest znaczącym kosztem jego pozyskiwania. Aktualnie oczyszczanie wodoru metodą SMR z wykorzystaniem adsorpcji zmiennociśnieniowej powiększa ostateczny koszt produkcji wodoru o około 2,7 zł/ kgH₂. W oparciu o prognozy na 2025 r., jeżeli wprowadzone zostaną nowe udoskonalenia techniczne, koszt ten może zmniejszyć się do 1,5 zł/kg. [25]

3.3. Ryzyko związane z użytkowaniem wodoru

Bardzo często poruszaną kwestia jest publiczne poparcie w kwestii wdrażania nowych technologii. Akceptacja dla nowych projektów pozwala na sprawną adaptację. Zaś brak publicznego poparcia może wiązać się z trudnościami komercjalizacji i implementacji danego systemu. [17] Wzorem może być protest głodowy pewnego mieszkańca koreańskiego Incheonu wbrew powstaniu fabryki ogniw paliwowych. W konsekwencji według protestującego stanowisko władz zostało skierowane z punktu zanieczyszczenia środowiska na kwestię bezpieczeństwa wodoru jak również na infrastrukturę związaną z produkcją ogniw. W końcu miasto zdecydowało się ponownie na powtórne rozpatrzenie istniejących zagrożeń.

Niektóre właściwości wodoru w stosunku do innych wykorzystywanych paliw świadczą o wyższym poziomie bezpieczeństwa. Na przykład w stanie gazowym wodór jest aż 57 razy lżejszy od oparów benzyny, jak również lżejszy od powietrza aż 14 razy, dzięki czemu jest w stanie w krótkim czasie rozproszyć się w powietrzu w porównaniu do innych gazów. Odgrywa to zasadniczą rolę względem bezpieczeństwa na otwartym terenie. Wodór posiada podobną temperaturę samozapłonu co gaz ziemny i zdecydowanie wyższą od oparów benzyny. Duża dyfuzyjność oraz mała lepkość sprawiają, że wodór może być wyjątkowo podatny na ulatnianie i wycieki. W sytuacji ograniczonej strefy wyciek może spowodować akumulację stężenia wodoru w powietrzu oraz gwałtowny zapłon. Przedział łatwopalności wodoru w stosunku do pozostałych paliw jest bardzo wysoki i wynosi od 4 do 75 procent stężenia gazu. W związku z optymalnymi warunkami spalania, energia wymagana do rozpoczęcia reakcji spalania wodoru jest w znacznym stopniu niższa niż w sytuacji innych popularnych paliw. Ponadto w związku z niską gęstością wodoru bardzo szybko się ulatnia, praktycznie nigdy, nie kumuluje się w dolnych częściach pomieszczenia jak gaz ziemny czy tlenek węgla. [38] W okresie lat 1985-2006 liczba przypadków w Unii Europejskiej związanych z wybuchami kontenerów, wyciekami, eksplozjami, pęknięciami rur, pożarami oraz innymi nieokreślonymi zdarzeniami wyniosła 38. Największa liczba incydentów dotyczyła bezpośrednio eksplozji, łącznie 18 a najmniejsza pęknięcia rur oraz wybuchów kontenerów. Całkowita liczba osób poszkodowanych w wyniku przypadków związanych z wodorem wyniosła 156, w tym 126 osób ucierpiało w wyniku eksplozji, a reszta przez pożary. [14]

Wiedza w kwestii projektowania urządzeń i instalacji wodorowych wymaga wiele postępowań analitycznych i rzeczoznawczych celem przygotowania warunków do bezpiecznego użytkowania tych technologii. Poniżej zostały wymienione ryzyka stanowiące potencjalne zagrożenie bezpieczeństwa, na które należy zwrócić uwagę:

- palność – jedną z cech wodoru jest niska temperatura zapłonu;
- przenikalność – cząsteczka wodoru posiada najmniejszą masę atomową, przez co może bez problemu przenikać przez struktury go otaczające ;
- podatność materiałów na kruchość wodorową – odmiana korozji indukowana przez wodorowe atomy spajające się na poziomie sieci krystalicznej żelaza w cząsteczki wodoru;
- niskie temperatury w czasie transportu – w postaci ciekłej temperatura wodoru wynosi – 252°C, dlatego bardzo ważne jest dobranie właściwych komponentów na zbiorniki odpornych na szok temperatury;
- wybuchowość wodoru – wodór ma bardzo szeroki zakres wybuchowości, dużą zdolność do dyfuzji, gromadzenia się pary w górnej części zbiorników a także prędkość rozchodzenia się fali 3,15 m/s;
- wyciek wodoru – może stwarzać niebezpieczeństwo ponieważ wodór to pierwiastek bezbarwny, bezwonny oraz nie posiada smaku;
- mieszanina wodoru z innymi gazami – w przyszłości transport na większe odległości planuje się poprzez połączenie wodoru z innymi gazami i przesyłanie poprzez rurociągi;
- wysokie ciśnienie w postaci gazowej – podczas transportu wodoru w stanie gazowym potrzebujemy specjalnych parametrów oraz certyfikatów. [38]

Poniżej w tabeli 4 zostały opisane zagrożenia mające związek z użytkowaniem wodoru oraz sposoby ich ograniczania. W transporcie, przechowywaniu i użytkowaniu wodoru najbardziej niebezpiecznym zagrożeniem jest wyciek wodoru powodujący pożar. Aby było możliwe skuteczne wdrożenie na rynek wodoru trzeba zapewnić wysoką klasę bezpieczeństwa, które wiąże się z dużymi nakładami.

Tabela 4. Zagrożenia związane z wykorzystaniem wodoru. [40]

Table 4. Hazards related to the use of hydrogen. [40]

Zjawisko	Rozwiązanie
Wyciek wodoru	Dopasowanie urządzeń i odpowiednio zaprojektowanie instalacji – zawory, uszczelnienia, detektory wycieków, urządzenia pomiarowe,
Kruchość wodorowa, degradacja materiałów	Używanie barier ochronnych materiałów.
Względnie wysoka łatwopalność ciekłego wodoru, duża zdolność do jego koncentracji	Dobór odpowiednich mechanizmów przeciwybuchowych i instalacji elektrycznych oraz reszty elementów mogących stanowić potencjalne źródło zapłonu.

4. Ocena kosztów magazynowania wodoru.

Z punktu widzenia energetyki wodór to mocno obiecujące przedsięwzięcie na przyszłość. Może wyprzeć gaz ziemny, wspierać odnawialne źródła energii i posłużyć jako wsparcie przy rozwoju fotowoltaiki i energetyki wiatrowej. Jest również jedną z podstawowych opcji magazynowania energii ze źródeł odnawialnych.

4.1 Analiza generowanych kosztów w związku z przemysłowym wytwarzaniem wodoru.

Sektor przemysłowy jest wiodącym konsumentem wodoru, w 2020 r. zużyto 87,1 miliona ton. Wodór wykorzystywany jest w rafineriach, przemyśle chemicznym i hutnictwie. To duże i scentralizowane zapotrzebowanie ma kluczowe znaczenie dla rozwoju sektora wodoru. [27]

Stworzenie opłacalnego, ekologicznego systemu wodorowego w oparciu o uzgodnienia międzynarodowe, będzie wymagało wspólnych wysiłków ze strony rządów, przemysłu, społeczeństwa i naukowych organów technicznych.

Zielony wodór może odgrywać ważną rolę w strategiach dekarbonizacji, głównie tam, gdzie jest bezpośrednia elektryfikacja

w miejscach, które nie są przygotowane na takie zmiany, takich jak na przykład produkcja chemikaliów, stali, transport długodystansowy, transport lotniczy oraz żegluga. Mimo to podstawową blokadę w produkowaniu wodoru odgrywają przepisy, koszty wytwarzania oraz uformowanie rynku. Bezwzględnie potrzebne jest wyrównanie szans oraz minimalizowanie różnic kosztów produkowania zielonego wodoru i paliw kopalnych. Dzięki konkurencyjnym nakładom przy wytwarzaniu wodoru możemy zbudować ogromny system energetyczny, posługujący się nowoczesnymi technologiami. Aktualnie ekologiczny wodór jest nawet trzykrotnie droższy od swojego krewnego, czyli niebieskiego wodoru. Koszty produkcji zielonego wodoru zależą od stawki odnawialnej energii, wartości zainstalowania elektrolizera oraz czasu jego działania. Odnawialne źródła energii w wielu miejscach na świecie pojawiają się już jako najtańsze. Produkowana z całkiem małym nakładem energia elektryczna jest bezwzględnie potrzebny warunkiem konkurencyjności produkcji ekologicznego wodoru, poza tym muszą ulec obniżeniu także koszty instalowania maszyn do elektrolizy. Wykwalifikowani fachowcy nieustannie pracują nad strategiami i polityką czego efektem będzie zmniejszenie kosztów elektrolizerów poprzez modyfikacje oraz usprawnienia działania, dzięki czemu elektrolizery zwiększą moc z obecnego poziomu megawatów do multi-gigawatów. Masowa produkcja elektrolizerów przyczyni się do zmniejszenia kosztów. Przy użyciu energii ze źródeł odnawialnych, której zakładany koszt wyniesie 20 USD za megawatogodzinę, urządzenia elektrolityczne mogłyby produkować ekologiczny wodór przy kosztach porównywalnych do kosztów produkcji niebieskiego wodoru. Jeżeli w następnym dziesięcioleciu nastąpi szybka i masowa podaż elektrolizerów, ekologiczny wodór w wielu krajach mógłby dorównywać kosztowo niebieskiemu wodorowi, stając się jedną z tańszych alternatyw źródeł niskoemisyjnych.[17]. Dane wskazują, że produkcja wodoru z odnawialnych źródeł energii, takich jak wiatr i biomasa, jest bardziej kosztowna w porównaniu z wytwarzaniem wodoru z konwencjonalnych źródeł. Analiza kosztów produkcji wodoru w Stanach Zjednoczonych pokazuje, że wodór produkowany elektrolitycznie jest znacznie droższy ze względu na zużycie energii elektrycznej. Jednak produkcja wodoru z energii słonecznej jest znacznie tańsza niż wykorzystanie komercyjnej energii elektrycznej, a nawet czyni ją konkurencyjną w stosunku do wodoru produkowanego z gazu. Energia słoneczna musi obniżyć cenę modułu o jedną trzecią, aby była konkurencyjna w stosunku do energii elektrycznej wytwarzanej z paliw kopalnych. Naukowcy pracują nad rozwojem fotowoltaiki obniżając koszt modułu. Trwają prace nad zebraniem organicznych i nieorganicznych nanostruktur w ogniwa słoneczne. Ogniwa fotochemiczne są również wykorzystywane do bezpośredniej konwersji energii słonecznej na wodór w oparciu o materiały półprzewodnikowe. Niezwykle ważne jest dopasowanie komponentów, gdy systemy energii odnawialnej są połączone z systemem wytwarzania wodoru, aby zapewnić płynne działanie. Pakiet powinien być zoptymalizowany w taki sposób, aby zmaksymalizować wydajność systemu, obniżyć koszty kapitałowe i obniżyć jego złożoność.[49]

4.2 Trend optymalizacji kosztów produkcji wodoru w latach 2020 – 2050

Rynek wodoru może się powiększyć niemal trzykrotnie do 2050 r. dzięki malejącym kosztom produkcji, wzrostom cen uprawnień do emisji dwutlenku węgla oraz dofinansowaniom rządowych na wprowadzanie rozwiązań wodorowych. Koszty niebieskiego i zielonego wodoru mogą mieć tendencję spadkową, by w perspektywie 30-letniej przyszłości uzyskać do 1 USD za tonę. Jednak aby uczynić zielony wodór opłacalnym elementem zrównoważonego koszyka energetycznego, potrzebne są ciągłe innowacje i konsekwentna polityka. Dotyczą one regulacji konstrukcji rynku oraz kosztów produkcji energii i elektrolizera.

Ponieważ świat dąży do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcia neutralności pod względem emisji dwutlenku węgla do

2050r. energochłonne branże i transport stanowią poważne wyzwanie. Emisje są szczególnie trudne do zmniejszenia w sektorach takich jak produkcja stali, lotnictwo, transport morski długodystansowy. Wodór oparty na odnawialnych źródłach energii, czyli zielony wodór stał się niezbędnym nośnikiem czystej energii. Jest to jedyny rodzaj energii w pełni zgodny z celami zerowej emisji i zrównoważonym, bezpiecznym wykorzystaniem dla klimatu. Szary i niebieski wodór również mogą zwiększyć dostawę energii ale niestety bez eliminacji paliw kopalnych. [26]

Plany energetyczne zaczęły uwzględniać ekologiczny wodór z kilku powodów:

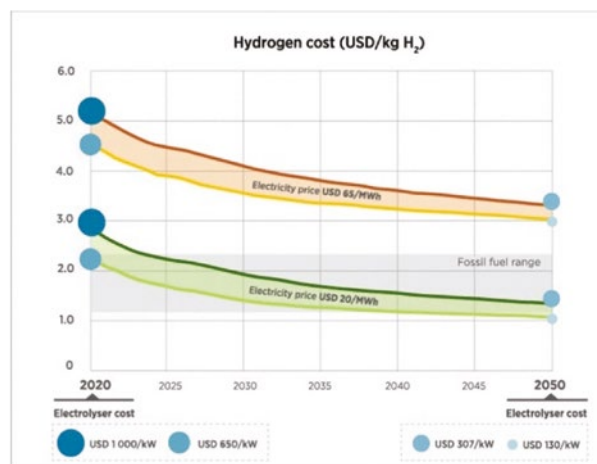
- Nie powoduje resztkowej emisji gazów cieplarnianych;
- Może zwiększać elastyczność systemu, w szczególności poprzez magazynowanie sezonowe, integrując większy udział energii słonecznej i wiatrowej;
- Choć obecnie jego ceny są wysokie, stanie się bardziej konkurencyjny ze względu na szybko spadające koszty energii ze źródeł odnawialnych. Koszty fotowoltaiki słonecznej i energii wiatrowej spadły już odpowiednio o 80 i 40% w ciągu ostatniej dekady, przy czym szacuje się że tendencje te będą się utrzymywać.

Odnawialna energia elektryczna nie jest jedynym czynnikiem, który należy brać pod uwagę. Elektrolizery, które dzielą wodę na wodór i tlen muszą również zostać zwiększone i ulepszone aby zapewnić konkurencyjność cenową ekologicznego wodoru. Ich koszty, które spadły o 60%, mogą spaść o kolejne 40% w krótkim okresie i 80% w przyszłości. Osiągnięcie tych redukcji zależy od innowacji mających na celu poprawę wydajności elektrolizera i zwiększenie wydajności produkcyjnej czyli standaryzacja i rosnące korzyści skali. Może to pomóc w obniżeniu kosztów zielonego wodoru nawet o 2 USD za kilogram.

Poniżej przedstawione zostały filary polityki, które pomogłyby w przejściu na ekologiczny wodór z niszy do głównego nurtu:

- Zaprojektowanie krajowych strategii wodorowych określających poziom ambicji każdego kraju mogące stanowić cenny punkt odniesienia dla prywatnych inwestycji i finansowania projektów;
- Uporządkowanie priorytetów, wraz ze wskazaniem wodoru jako podstawowe źródło energii;
- Wymaganie gwarancji pochodzenia, potrzebne są jasne etykiety, aby odzwierciedlić emisję dwutlenku węgla w całym cyklu życia wodoru. Zwiększyłyby to świadomość konsumentów i umożliwiłyby zachęty do korzystania z ekologicznego wodoru;

Potrzebna jest ciągła praca nad innowacją w celu zmiany zasad dotyczących efektywności energetycznej oraz dekarbonizacji zielonego wodoru. Aby osiągnąć swój potencjał wodór musi być przystępny cenowo, w tym dla rozwijających się gospodarek poszukujących niedrogich sposobów budowy przyszłych systemów energetycznych. Przy właściwej polityce wdrożeniowej, może wkrótce stać się kamieniem węgielnym światowego odchodzenia od paliw kopalnych.[26]



Rys. 10. Przewidywane zmiany kosztów produkcji energii.[26]

Fig. 10. Expected changes in energy production costs. [26]

4.3 Ocena kosztów magazynowania na podstawie przedstawionych metod

Uogólniony koszt wodoru to wykorzystany koszt cyklu życia wodoru i eksploatacji aktywów produkcyjnych, wyrażony jako koszt na jednostkę wytworzonego wodoru. Obejmuje wszystkie istotne koszty ponoszone przez producenta, w tym koszty kapitałowe eksploatacyjne, paliwowe i finansowe. Zaś koszt technologii produkcji wodoru to stosunek całkowitych kosztów instalacji do całkowitej ilości wodoru, która ma być wyprodukowana w całym okresie eksploatacji instalacji. Oba są wyrażone w wartościach bieżących netto.

Skraplanie wodoru czy magazynowanie w postaci sprężonego gazu wymaga stosowania sprężarek. Koszty sprężarki zależą od ilości pracy zrealizowanej przez sprężarkę, która oparta jest na ciśnieniu wlotowym, wylotowym i natężeniu przepływu. Duże ciśnienie robocze zwiększa koszt sprężarki. Najczęściej używa się sprężarek tłokowych. Koszty takiej sprężarki wahają się od 100 000 do 170 000 USD.

Proces skraplania wodoru sprowadza się do schłodzenia gazu do postaci cieczy. System skraplania wykorzystuje kombinację sprężarek, silników rozprężnych, wymienników ciepła oraz zaworów dławiących, aby uzyskać potrzebne chłodzenie. Koszt instalacji ciekłego wodoru można oszacować na podstawie wskaźnika produkcji wodoru. Koszty kapitałowe można podzielić procentowo w następujący sposób, 10% planowanie, 60% wyposażenie i 30% wykonanie. Ceny takiej instalacji wahają się od 20 000 000 USD do 50 800 000 USD. Największym kosztem jest energia potrzebna do procesu skraplania wodoru. Potrzebne są dodatkowo nieduże ilości azotu i wody chłodzącej. Koszty rozkładają się w następujący sposób: 1,1 USD/kg na sprzęt do sprężania i narzędzia, 0,20 USD/kg za zbiornik do przechowywania, koszty są niższe od zbiornika na sprężony gaz, 1,5 USD/kg za energię elektryczną. Do wydatków należy również doliczyć odparowanie ciekłego wodoru, oczywiście zależy to od zbiornika w jakim jest magazynowany, ale typowy współczynnik odparowania wynosi 0,8% dziennie. Prędkość przepływu czy też szybkość produkcji w przypadku ciekłego wodoru jest uwzględniana w celu uwzględnienia strat, związanych z odparowaniem wodoru. Do obliczenia wykorzystuje się proste równanie wykładnicze, ilość magazynowanego wodoru zależy od zaprogramowanego natężenia przepływu i okresu przechowywania.

Magazynowanie wodoru w postaci sprężonej gazu wydaje się najprostszym rozwiązaniem, ponieważ wymagane wyposażenie to tylko sprężarka i zbiornik ciśnieniowy. Problemem jest jego niska gęstość przechowywania, która zależy od ciśnienia. Magazynowanie wodoru odbywa się zazwyczaj w zbiornikach cylindrycznych lub kulistych o ciśnieniu do 30 MPa. Wykorzystywane są również niskociśnieniowe kuliste zbiorniki o dużych średnicach. Koszt takiego zbiornika wynosi od 180 000 USD do 840 000 USD. Największym kosztem magazynowania sprężonego wodoru jest energia potrzebna do kompresji, do tego należy doliczyć koszty sprężarki. Całkowity koszt magazynowania sprężonego gazu wynosi: 0,57 USD/kg za zbiornik magazynowy, 0,1 USD/kg – koszty związane ze sprężarką i około 70,06 USD/kg za energię potrzebną do zasilenia sprężarki. Wymagania dotyczące magazynowania oblicza się na podstawie szybkości produkcji i czasu w jakim ma być zmagazynowany wodor. Zużycie energii zależne jest od natężeniu przepływu i ciśnienia wylotowego. Koszty sprężarki zależne są od mocy i są dostosowywane do ciśnienia wylotowego.

Przeprowadzono analizę w celu oszacowania kosztów magazynowania wodoru w oparciu o główne wydatki kapitałowe i operacyjne. W sytuacji magazynowania najważniejszymi czynnikami wpływającymi na koszty są tempo produkcji i czas przechowywania. Tempo produkcji zależy od doboru skraplaczy i sprężarek. Prędkość produkcji pomnożona przez liczbę dni magazynowania, daje potrzebną pojemność przechowywania, a dzięki temu możemy oszacować koszty kapitałowe. [51]

Aby wodor był dostępny jako powszechnie stosowane paliwo konieczne będzie przetransportowanie jego znacznych ilości na różne odległości. Koszty transportu wiążą się z inwestowaniem w rurociągi. Należy zauważyć, że prace związane z budową i renowacją infrastruktury rurociągów, mogą znacznie się różnić w zależności od regionu geograficznego.

Rurociągi transportują gazowy wodor są najtańszą metodą dystrybucji. Z drugiej strony transport ciężarówkami jest bardziej korzystny w przypadku niewielkiego zapotrzebowania, z dodatkową możliwością transportu wodoru w stanie ciekłym i gazowym.[52]

Tabela 5. Dane dotyczące kosztów wykorzystania wodoru w sektorze transportu.[51]
Table 5. Data on the costs of using hydrogen in the transport sector. [51]

Segment transportowy	Koszty produkcji (mln EUR)	Zużycie wodoru (kg/pojazd/rok)	Całkowity koszt posiadania (EUR/km)
Pojazdy ciężkie	0.12 – 0.19	4 600 – 9 200	
Autobusy	0.36 – 0.67	2 078 – 9 800	
Pociągi	5.57 – 5.88	8 010 – 27 000	
Statki oceaniczne	1.99 – 17.1	494 000	

Transport sprężonego wodoru odbywa się najczęściej ciężarówkami z naczepą rurową. Koszty takiej naczepy zależą od ciśnienia roboczego, pojemności magazynowanej. Wyższe ciśnienia robocze, zwiększa pojemność naczepy, ale tym samym zwiększają koszt jej zakupu. Przykładowo naczepa z szesnastoma rurami o łącznej pojemności 460 kg wodoru kosztuje około 300 000 USD, do tego należy doliczyć koszt ciągnika siodłowego tj. około 160 000 USD, oraz koszty operacyjne takie jak paliwo, wynagrodzenia, ubezpieczenie samochodów. Wodor można również transportować rurociągiem do sprężonego gazu, koszt budowy 100 km rurociągu to około 85 000 000 USD. Do tego doliczyć należy koszty operacyjne związane z eksploatacją i sprężarką. Transport wodoru rurociągiem opłaca się tylko przy założeniu dużej dystrybucji. Dwa główne czynniki wpływające na koszt transportu to szybkość produkcji i odległość dostawy. Koszty inwestycyjne obejmują koszt kontenera magazynowanego, koszt ciężarówki oraz koszt podwozia przyczepy lub koszty budowy i instalacji rurociągu.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wodor to najmniejsza pierwiastek z największą wartością opałową, wyraźnie ma on zastosowanie w rewolucji energii odnawialnej. Jednak wymaga jeszcze dalszych badań rozwojowych. Magazynowanie wodoru jest głównym czynnikiem wpływającym na koszty, ponieważ w przypadku jednostek magazynujących większej pojemności, koszty kapitałowe są niższe. W przypadku małych ilości ciekły wodor byłby kosztowniejszy niż sprężony wodor ze względu na wysoki koszt upłynienia a do tego duży współczynnik odparowania podniósłby ten koszt jeszcze bardziej. Przy niewielkiej produkcji, magazynowanie ciekłego wodoru nie jest ekonomiczne, ponieważ koszty inwestycyjne skraplaczy są stosunkowo wysokie. Przy niewielkiej prędkości produkcji koszt kapitałowy zbiornika ciśnieniowego jest wysoki, ale ekonomia skali zmniejsza ten koszt przy większych prędkościach produkcji, koszt

magazynowania zostanie ostatecznie zmniejszony przez zmniejszenie kosztów energii elektrycznej sprężarki. Jednocześnie długi okres magazynowania zwiększa jego koszt jednostkowy. Im dłuższy jest okres przechowywania wodoru, tym bardziej opłacalne jest zastosowanie ciekłego wodoru. W przypadku magazynowania krótkoterminowego najtańsze jest przechowywanie wodoru w postaci sprężonego gazu. Podczas magazynowania wodoru sprężonego i ciekłego, koszty energii są dość wysokie, jeśli natomiast jest dostępna tania energia na przykład z odnawialnych źródeł energii koszty te będą znacznie niższe. Sprężony wódor w stanie gazowym może być stosowany w rozwiązaniach stacjonarnych, z uwagi na ciężar zbiorników oraz niebezpieczeństwo związane z wybuchem. Gęstość sprężonego wodoru sprawia, że nawet pod dużym ciśnieniem gromadzone są małe ilości energii użytecznej oraz wykorzystuje się dużej objętości zbiorniki, co prowadzi do wysokich kosztów materiałów. Do podtrzymania wodoru w stanie skroplonym potrzebne są bardzo niskie temperatury, z tego powodu zbiorniki muszą być nieustannie chłodzone oraz izolowane termicznie od otoczenia. Obniżenie kosztów przechowywania wodoru ma istotne znaczenie dla rozwoju jego zastosowań w przemyśle a szczególnie w motoryzacji. Z pewnością etapy przechowywania, transportu oraz dystrybucji powodują znaczny wzrost cen wodoru, która do tej pory wynosiła 8-10 USD/kg. Potwierdzono, że magazynowanie wodoru pod wysokim ciśnieniem jest najbardziej słuszną metodą magazynowania w fazie ciekłej w obiektach zdecentralizowanych tak jak na stacjach tankowania. Magazynowanie energii przynosi zyski wówczas, gdy końcowy koszt produkcji energii elektrycznej jest wyższy niż koszt przechowywania i odzyskiwania energii zwiększony o koszt energii, która jest tracona podczas magazynowania. Podstawowe znaczenie dla dalszego rozwoju energii wodorowej ma przewidywany rozwój pojazdów napędzanych wodorem. Według prognoz za kilka lat koszty zakupu i eksploatacji takich pojazdów mają konkurować z kosztami samochodów konwencjonalnych. ■

LITERATURA

- [1] A. ZUTTEL, Materials for hydrogen storage, *Materials Today*, September 2003
- [2] ARGONNE NATIONAL LABORATORY, Technical Assessment of Cryo-Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications, raport, internet: <http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2010/01/65821.pdf>.
- [3] AIR LIQUIDE. "Air Liquide to build first world scale liquid hydrogen production plant dedicated to the supply of Hydrogen energy markets." November 26, 2018.
- [4] BERNARDO, G. I IN., Recent advances in membrane technologies for hydrogen purification, „International Journal of Hydrogen Energy”, nr 12.(2019)
- [5] BOSSEL U., ELIASSON B., The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak, internet: <http://www.planetforlife.com/pdf/files/h2report.pdf>.
- [6] BRAXENHOLM, D., By-Product Hydrogen to Fuel Cell Vehicles, Goteborg, (2016) <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/237961/237961.pdf>
- [7] CIHLAR J., Hydrogen generation in Europe: Overview of costs and key benefits (2020) <https://www.apren.pt/contents/publicationsothers/hydrogen-generation-in-europe.pdf>
- [8] CORNISH, A.J. Hydrogen Fueling Station Cost Reduction Study. In Survey Results and Analysis of the Cost and Efficiency of Various In-Operation Hydrogen Fueling Stations; Engineering, Procurement & Construction, LLC: Lakewood, CO, USA, 2011. Available online: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1120569> (accessed on 28 August 2019).
- [9] CZAPLICKA-KOLARZ K., Scenariusze rozwoju technologicznego kompleksu paliwowo-energetycznego dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju. Część 1.
- [10] DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, Fuel Cell System Cost (2017)
- [11] EL-SHAFIE, M.KAMBARA, S. HAYAKAWA, Hydrogen Production Technologies Overview, „Journal of Power and Energy Engineering” (2019)
- [12] FHC Hydrogen Roadmap Europe – a Sustainable Pathway for the European Energy Transition, Fuel Cells And Hydrogen Joint Undertaking, Bietlot, Belgia (201)
- [13] FIGIEL, H. Perspektywy energetyki wodorowej wodorowej (2006), <http://www.fis.agh.edu.pl/doc/pl/seminarium/figiel.pdf>
- [14] Fraile, D. i in. (2015), Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas, CertifHy, Bruksela
- [15] GALASSI, M.C. I IN, HIAD – Hydrogen incident and accident database, „International Journal of Hydrogen Energy”, nr 22. (2012)
- [16] GIM KAWERNA, Gas Storage Poland (2019)
- [17] GUPTA, N., FISCHER, A.R.H., FREWEL, L.J, Socio-psychological determinants of public acceptance of technologies: A review, *Public Understanding of Science*, Bristol. (2012)
- [18] <https://www.bep-sa.pl/aktualnosci/chiyodas-spera-hydrogen-technology.html>
- [19] <https://biznesalert.pl/polska-strategia-wodorowa-2030-nowa-klasyfikacja-walka-srodkami-unijne-energetyka-innowacje-wodor/>
- [20] <https://wme-z1.pwr.edu.pl/wp-content/uploads/2020/01/3-Magazynowanie-wodoru-2019.pdf>
- [21] <https://cng-Ing.pl/motoryzacja/technika/W-STAKO-powstaja-zbiorniki-wodorowe,artykul,9043.htm>
- [22] <http://www.instsani.pl/381/instalacje-wodor>
- [23] <http://hho-yes.manifo.com/wodor-paliwem-przyszlosci>
- [24] HYDROGEN COUNCIL (2018), New opportunities for the energy and mobility system, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2018/10/Hydrogen-Council-Hydrogen--Meets-Digital-2018.pdf>
- [25] IEA – The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities (2019)
- [26] IRENA Coalition for Action Decarbonising end-use sectors: Green hydrogen certification, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. (2022), https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Certification_Brief_2022.pdf
- [27] IRENA, Green Hydrogen: A guide to policy making (2020) https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf
- [28] IRENA Green hydrogen for industry: A guide to policy making, (2022) https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Industry_2022.pdf
- [29] IRENA, Sector coupling in facilitating integration of variable renewable energy in cities, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.(2021) https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Oct/IRENA_Sector_Coupling_in_Cities_2021.pdf
- [30] KENNETH E.COX,K.D WILLIAMSON, Jr Hydrogen: its technology and implications, volume I Hydrogen Production Technology, 2017
- [31] KRALEVA E., SOKOLOV S., SCHNEIDER M., EHRICH H., Support effects on the properties of Co and Ni catalysts for the hydrogen production from bio-ethanol partial oxidation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38, 4380-4388
- [32] KUPECKI J. (ed.), Selected aspects of mathematical modeling of SOFC stacks during dynamic operation [in Polish], Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, 2018.
- [33] KWINT WOJCIECH, Magazynowanie wodoru. Ciężki los lekkiego gazu https://www.cire.pl/pliki/2/mag_wodoru770087150.pdf
- [34] MINISTERSTWO KLIMATU I ŚRODOWISKA Polska strategia wodorowa do 2030 z perspektywą do 2040 r. (2021)
- [35] NREL; Technical Report NREL/TP-5400-6090948 January 2015
- [36] OHI, J.M. I IN. Hydrogen Fuel Quality Specifications for Polymer Electrolyte Fuel Cells in Road Vehicles, U.S. Department of Energy, Waszyngton. (2016),
- [37] OHLIG, K. AND DECKER, L. "Hydrogen Liquefaction." *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2013)
- [38] PNNL, Hydrogen Compared with Other Fuels | Hydrogen Tools, H2 Tools, (2015) <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>
- [39] POLITYKA ENERGETYCZNA POLSKI (PEP 2040) <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polski>
- [40] POLSKI INSTYTUT EKONOMICZNY, Kierunki rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce (Warszawa, 2019)
- [41] POLSKI REJESTR STATKÓW, Publikacja 48/P – Wymagania dla gazowców – lipiec 2021
- [42] POLSKI REJESTR STATKÓW, Publikacja Informacyjna 11/I, Bezpieczne wykorzystanie wodoru jako paliwa w komercyjnych zastosowaniach przemysłowych (Gdańsk, czerwiec 2021)
- [43] POLSKIE STOWARZYSZENIE ENERGETYKI WIATROWEJ Zielony wodór z OZE w Polsce (Wrocław, 2021)SZYMAK P. Magazynowanie wodoru, ogniwa paliwowe PEM
- [44] RINKIN C., BURGESS r. AND BUTTNER W., Hydrogen Technologies Safety Guide,
- [45] SDANGHI G. Towards Non-Mechanical Hybrid Hydrogen Compression for Decentralized Hydrogen Facilities (2020)
- [46] SOLAS Convention, amendments 2014 (MSC.365(93), Regulation 20-1 "Requirements for vehicle carriers carrying motor vehicles with compressed hydrogen or natural gas in their tanks for their own propulsion as cargo".
- [47] STAFFELL IAIN, The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system (2019)
- [48] TARKOWSKI, r. Wybrane aspekty podziemnego magazynowania wodoru, „Przegląd Geologiczny”, (2017), <https://www.pgi.gov.pl/dokumenty-pig-pib-all/publikacje-2/przegląd-geologiczny/2017/maj-6/4832-wybrane-aspekty-podziemnego-magazynowania/file.html>
- [49] URZĄD REGULACJI ENERGETYKI, Czy wodór i technologia P2G zoptymalizują system energetyczny? Kolejne rekomendacje ACER i CEER
- [50] <https://www.ure.gov.pl/pl/urzad/informacje-ogolne/aktualnosci/9307,Czy-wodor-i-technologia-P2G-zoptymalizuja-system-energetyczny-Kolejne-rekomendac.html>
- [51] WADE A. AMOS, NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, Cost of Storing and Transporting Hydrogen (November, 1998)
- [52] WONGA J., GAMBONE L., 70 MPa Fueling Station for Hydrogen Vehicles, Materiał