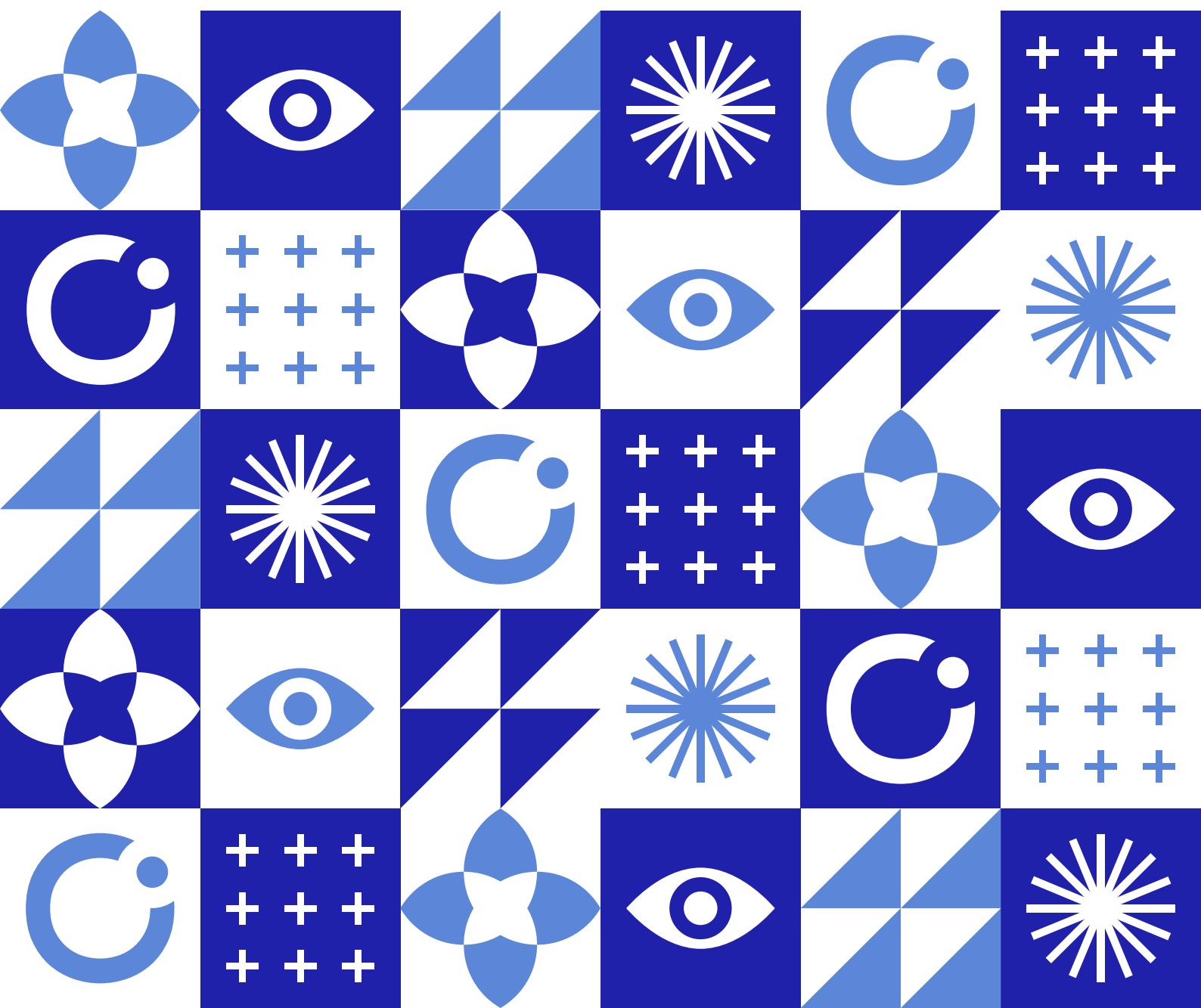




# SZKOŁA WODORCWA

Materiał edukacyjny przeznaczony dla studentów  
uczelni wyższych



# | SZKOŁA WODORCWA

Materiał edukacyjny przeznaczony dla  
studentów uczelni wyższych

Opracowano przez:

**Meet Hydrogen / mh.energy. Sp z o.o.**



**Ekspertsi merytoryczni:**

dr inż. Łukasz Lindner  
Instytut Fizyki Molekularnej PAN / mh.energy

dr Paweł Sobczak  
Akademia Nauk Stosowanych w Koninie

mgr Artur Zandecki  
mh.energy Sp. z o.o.

dr inż. Kamil Łodygowski  
Akademia Nauk Stosowanych w Koninie

**Korekta materiałów edukacyjnych:**

Grażyna Zwolińska

**Projekt okładki i opracowanie graficzne:**

Justyna Dobrowińska  
Mateusz Koziół  
Clara Shen

**Edytor:**

Magdalena Żółtowska

**Wersja polska powstała na zlecenie:**

Urząd Marszałkowski Województwa Wielkopolskiego w ramach programu „Budowa systemu wsparcia wysokiej jakości projektów B+R+I, w szczególności rozwijających technologie nisko i zeroemisyjne, ze szczególnym uwzględnieniem wodoru (BSW-H2)”,

Copyright © 2021 by Urząd Marszałkowski Województwa Wielkopolskiego



SAMORZĄD WOJEWÓDZTWA  
WIELKOPOLSKIEGO

Departament Gospodarki  
al. Niepodległości 34  
61-714 Poznań  
NIP: 778-13-46-888  
Internet: <http://www.umww.pl>  
Licencja CC BY-NC-SA 4.0



Wydawca Urząd Marszałkowski Województwa Wielkopolskiego  
ISBN 978-83-60782-31-6

# Spis treści

<b>1. Przyczyny poszukiwania rozwiązań opartych na wodorze</b>	<b>11</b>
1.1. Światowe zapotrzebowanie na energię	11
1.1.1. Obecny stan światowej energetyki	14
1.2. Przechowywanie energii	16
1.3 Środowisko i klimat	18
1.3.1. Efekt cieplarniany	19
1.4 Uniwersalność technologii wodorowych	24
1.5. Historia wykorzystania wodoru	24
<b>2. Aspekty społeczno - ekonomiczne</b>	<b>28</b>
2.1. Integracja nauki i biznesu	28
2.2. Kryteria rozwoju gospodarki wodorowej	35
2.3. Korzyści wynikające z gospodarki wodorowej	36
2.3.1. Bezpieczeństwo energetyczne	41
2.3.2. Środowisko	41
2.3.3. Gospodarka. Konkurencyjność	42
<b>3. Gospodarka wodorowa a przyszłość zawodowa</b>	<b>45</b>
3.1. Dostosowanie obecnych gałęzi gospodarki	45
3.2. Tworzenie nowych produktów/usług	50
3.3. Łańcuch wartości	53
<b>4. Kontekst polityczny i prawny</b>	<b>55</b>
4.1. Zobowiązania klimatyczne	55
4.2. Europejski Zielony Ład	58
4.2.1. Geneza, wizja i kierunki Europejskiego Zielonego Ładu	58
4.2.2. Neutralność klimatyczna do 2050 roku	59

4.2.3. Szanse płynące z Europejskiego Zielonego Ładu	61
4.2.4 Inicjatywy proponowane w ramach Zielonego Ładu	61
<b>5. Pozyskiwanie wodoru</b>	<b>65</b>
5.1. Reforming parowy i częściowe utlenianie	66
5.2. Gazyfikacja węgla	67
5.3. Biomasa	68
5.4. Elektroliza wody	68
5.5. Inne metody pozyskiwana wodoru	70
5.6. Koszty produkcji wodoru	70
5.7. Rodzaje elektrolizerów	72
5.7.1. Elektrolizer typu PEM	73
5.7.2. Elektrolizery alkaliczne	75
5.7.3. Elektrolizery stałotlenkowe	76
<b>6. Transport i dystrybucja</b>	<b>78</b>
6.1. Transport	78
6.2. Dystrybucja	84
<b>7. Magazynowanie energii</b>	<b>88</b>
7.1. Sprężony gaz	90
7.2. Wodór w stanie ciekłym	91
7.3. Magazyn krio-ciśnieniowy	92
7.4. Magazynowanie wodoru w materiałach	93
7.5. Podziemne magazyny wodoru	94
<b>8. Zastosowania wodoru</b>	<b>96</b>
8.1. Bezpośrednie paliwo i technologia Power-to-gas	97
8.2. Synteza paliw węglowodorowych	97
8.3. Wzbogacenie paliwa	98

8.4. Ogniw paliwowe	100
8.5. Zastosowania w lotnictwie	100
8.6. Zastosowanie w żegludze	100
8.7. Produkcja amoniaku	100
8.8. Zastosowania w farmaceutyce	101
8.9. Przemysł metalurgiczny	101
8.10. Napęd rakiet kosmicznych	102
<b>9. Ogniw Paliwowe</b>	<b>103</b>
9.1. PEM	109
9.2. PAFC	111
9.3. AFC	112
9.4 DMFC	114
9.5 SOFC	115
9.6. MCFC	117
9.7. SAFC	118
9.8. Zastosowanie ogniw paliwowych	120
9.8.1. Zastosowania stacjonarne	121
9.8.2. Urządzenia mobilne	121
9.8.3. Transport	122
9.9. Podsumowanie	123
<b>10. Wpływ gospodarki wodorowej na środowisko naturalne</b>	<b>126</b>



## Słowo wstępne

Samorząd Województwa Wielkopolskiego od 2019 r. aktywnie pracuje na rzecz rozwoju i wdrażania technologii opartych na wykorzystaniu wodoru jako nośnika energii w naszym regionie. Jedną z kluczowych kwestii, która pozwoli na przeprowadzenie zielonej transformacji w Wielkopolsce, jest edukacja i rozpowszechnienie wiedzy o funkcjonowaniu gospodarki wodorowej.

Pomimo iż wodór jest najliczniejszym pierwiastkiem we Wszechświecie, posiadającym ogromny potencjał w przechowywaniu czystej energii, co ma niebagatelne znaczenie dla osiągnięcia zrównoważonej gospodarki, tematyka wykorzystania wodoru nie jest szeroko omawiana w krajowych programach nauczania.

Dlatego, tak istotne znaczenie ma rozpowszechnienie informacji o wpływie technologii wodorowych na zmniejszenie negatywnych zmian klimatu, podniesienie konkurencyjności regionalnej gospodarki. Generować to będzie tworzenie nowych miejsc pracy w atrakcyjnych i innowacyjnych branżach gospodarczych.

„Szkoła Wodorowa” jest pierwszą inicjatywą w Polsce polegającą na uzupełnieniu programu nauczania w ramach lekcji fizyki, chemii, biologii o tematykę związaną z gospodarką wodorową. Niniejszy materiał ma na celu przygotowanie uczniów na nadchodzące

wyzwania, dostarczając nie tylko wiedzy na temat odnawialnych źródeł energii i wodoru jako nośnika energii, ale także wspierając tworzenie kluczowych umiejętności i kompetencji potrzebnych do pomyślnej kariery zawodowej w tym perspektywnym i sektorze gospodarki. Dzięki możliwości wykorzystania tej wiedzy uczniowie i studenci będą mieli szansę stać się specjalistami, którzy będą kształtować przyszłość Wielkopolski odpowiedzialnej pod względem gospodarczym, naukowym i środowiskowym.

Mam nadzieję, że dzięki wspólnemu zaangażowaniu szkół, uczelni wyższych, jednostek badawczych oraz Samorządu Województwa Wielkopolskiego w edukację uczniów i studentów, uda nam się w Wielkopolsce przygotować do przyszłych wyzwań związanych z zieloną transformacją gospodarczą. Jednocześnie dziękuję nauczycielom, wykładowcom i opiekunom kół naukowych za dotychczasowe działania i wkład w promowanie wśród młodzieży nisko i zeroemisyjnych źródeł energii oraz za podnoszenie świadomości dotyczących wyzwań związanych ze zmianami klimatycznymi.

Zapraszam do lektury!

**Jacek Bogusławski**

Członek Zarządu Województwa Wielkopolskiego,  
Przewodniczący Wielkopolskiej Platformy Wodorowej



# Wstęp

Rozwój cywilizacji zawsze jest związany z wykorzystaniem energii. Obecna jest ona we wszystkich aspektach życia, od przemieszczania się obiektów, łączenia małych elementów w większe konstrukcje, zasilania wszystkich urządzeń, a także podgrzewania żywności czy pomieszczeń. Obecnie stosowane źródła bazują głównie na paliwach kopalnych (ropa, gaz ziemny, węgiel) - zaspokajają one potrzeby człowieka. Jednak korzystanie z nieodnawialnych źródeł powoduje wiele negatywnych skutków w postaci poważnego zanieczyszczenia środowiska, wyczerpania światowych zasobów – może też prowadzić do politycznych i zbrojnych konfliktów. Ciągły wzrost zapotrzebowania na energię zmusza do szukania alternatywnych rozwiązań.

Transformacja, która zmieni cały ekosystem energetyczny, musi opierać się zatem na surowcach powszechnie występujących, łatwo dostępnych i takich, których użytkowanie będzie neutralne dla środowiska. Wszystkie te kryteria spełnia wodór, który jest najczęściej występującym pierwiastkiem we Wszechświecie i posiada ogromny potencjał do produkcji czystej energii. Co więcej, istnieje już odpowiednia gotowość technologiczna do zastosowania rozwiązań opartych na wodorze na szeroką, bo globalną skalę.

Szansę tę i związane z nią wyzwania dostrzegają wszystkie rozwinięte kraje. Gospodarka wodorowa jest integralną częścią długoterminowych strategii klimatycznych i rozwojowych. Tak, jak energia dotyczy każdego aspektu życia, tak transformacja energetyczna będzie odczuwalna na wielu płaszczyznach. Niniejszy podręcznik pokazuje zachodzące zmiany w szerokiej perspektywie i ma pomóc zrozumieć przyczyny i następstwa transformacji wodorowej. Całościowe podejście pozwala połączyć aspekty prawne, ekonomiczne, środowiskowe oraz technologiczne, natomiast stanowi ono dopiero wprowadzenie do świata opartego na technologiach wodorowych.

Rewolucja wodorowa staje się faktem, na który musimy się przygotować.

**dr inż. Łukasz Lindner**

# 1 Przyczyny poszukiwania rozwiązań opartych na wodorze

Energia, podobnie jak woda i powietrze, jest niezbędna do życia ludzi oraz technologicznego rozwoju społeczeństwa. Nikt z nas nie wyobraża już sobie życia bez energii.

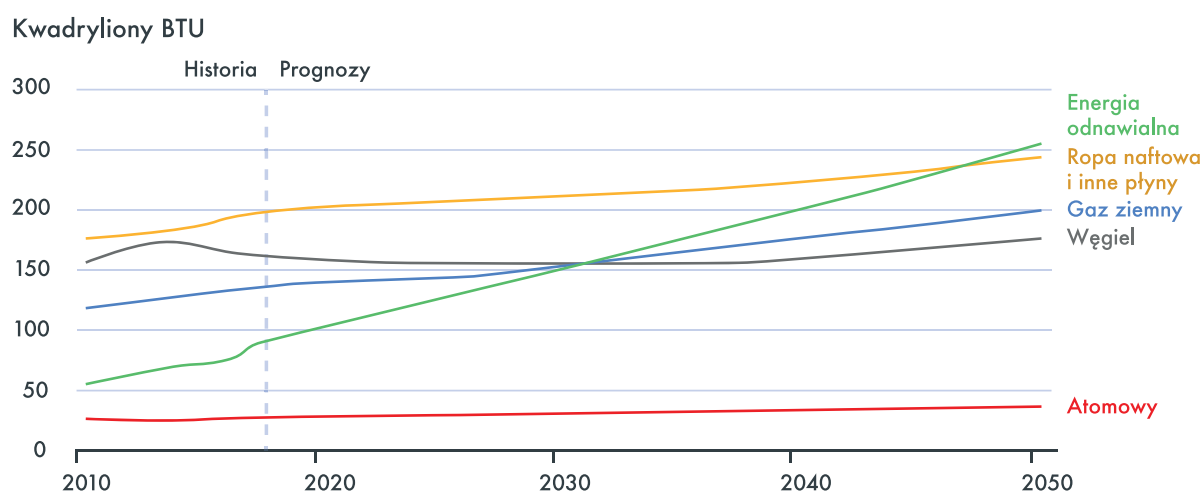
Jednak, choć trudno w to uwierzyć, nadal część społeczeństwa dotknięta jest problemem ubóstwa energetycznego - również w Polsce. Przyczyn poszukiwania nowych technologii w energetyce jest kilka, począwszy od aspektów środowiskowych, ekonomicznych, społecznych, po gospodarcze. Jeden z pomysłów, który zostanie zaprezentowany w tej książce, opiera się o rozwiązanie bazujące na wodorze, który jest zarazem nośnikiem energii, paliwem i surowcem. Na korzyść tego rozwiązania wpływa łatwość dostępu do surowca, brak zanieczyszczeń środowiska czy też możliwość uzyskania niezależności energetycznej. Wodór może okazać się paliwem przyszłości - dzięki swojej uniwersalności, pozwala magazynować energię w czasie nieciągłości czy też zmienności dostaw energii z odnawialnych źródeł energii, takich jak systemy fotowoltaiczne czy siłownie wiatrowe. Choć technik pozyskiwania wodoru jest kilka, jak zostało to przedstawione w drugiej części podręcznika, to nowy kierunek wyznacza tzw. zielony wodór, pozyskiwany podczas elektrolizy wody.

## 1.1 Światowe zapotrzebowanie na energię

Pod koniec XX wieku można było zaobserwować kilkukrotny wzrost wydobycia paliw kopalnych, zwłaszcza ropy naftowej. Obecnie nasza populacja konsumuje produkty ropopochodne w wielkości 100 tys. razy większej, niżeli kiedy zaczęła je wydobywać. W

czasie pandemii SARS-CoV-2 zapotrzebowanie na ropę oraz inne paliwa kopalne zmalało o kilka procent, jednak Międzynarodowa Agencja Energetyczna prognozuje, że globalny popyt na ropę ma powrócić do poziomu przed pandemią do końca 2022 roku. Prognozuje się, że do roku 2050 zużycie energii na świecie wzrośnie o połowę.<sup>2</sup> Pomimo że prognozy przewidują dynamiczny wzrost produkcji energii pochodzącej z odnawialnych źródeł energii (OZE), to i tak zakłada się wzrost produkcji energii z paliw kopalnych, choć dużo wolniejszy, niż z OZE. Symulacje zapotrzebowania na energię wykonała amerykańska agencja Energy Information Administration (EIA), będącą częścią Departamentu Energii USA.

Rysunek 1. Obecne i prognozowane zużycie energii na Świecie z podziałem na paliwa.



Na rysunku 1 została zaprezentowana przewidywana konsumpcja energii w czasie (w kwadrylionach BTU). Jak widać z wykresu (krzywa koloru zielonego), zakłada się ponad 2,5-krotnie większy udział OZE do 2050 roku w pozyskiwaniu energii w stosunku do 2018 roku. Choć przewiduje się, że początkowo zużycie energii pochodzące z węgla będzie spadać, to i tak w 2050 roku udział tego surowca w wytwarzaniu energii będzie wyższy, niż w roku 2018 (krzywa koloru czarnego). Kolorem żółtym zaznaczono planowane wykorzystanie ropy naftowej i innych paliw ciekłych wraz z biopaliwami, natomiast kolorem niebieskim wykorzystanie gazu ziemnego. Planuje się, że energia pochodzenia

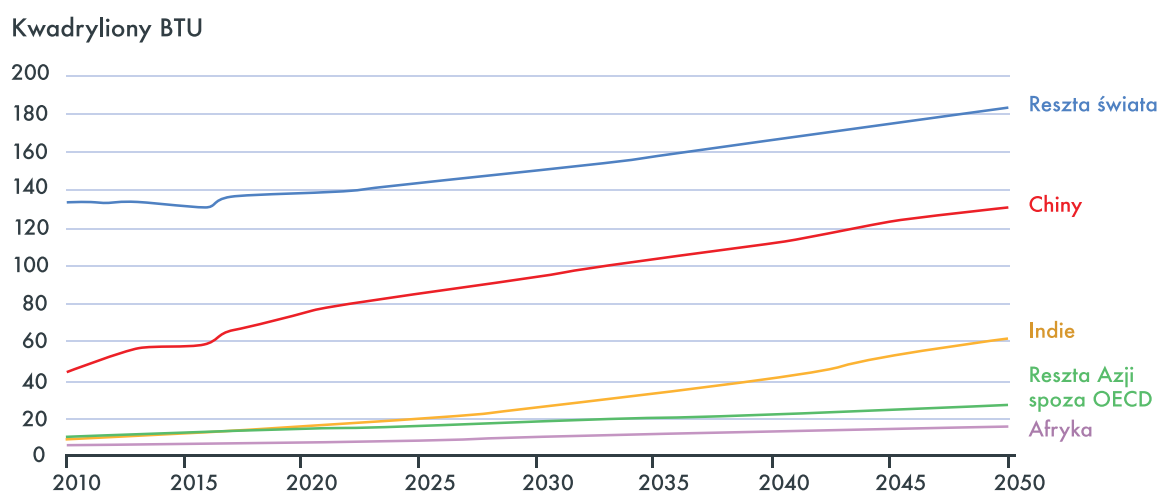
jądrowego będzie pozostawać na niezmiennym poziomie. Prognozy EIA<sup>2</sup> zakładają wzrost światowego PKB na poziomie 3% rocznie i wzrost światowej populacji na poziomie około 0,7% rocznie. Rozwój gospodarki, wzrost konsumpcji i światowej populacji to główne czynniki, które wpływają na wzrost światowego zapotrzebowania na energię.

**BTU** – British Thermal Unit, z ang. brytyjska jednostka ciepła - służy do określania energii generowanej przez urządzenia ciepłownicze. 1 BTU definiowany jest jako ilość energii potrzebnej do zmiany temperatury jednego funta wody o jeden stopień Fahrenheita. Jednostka ta jest głównie stosowana w USA i Wielkiej Brytanii w branży chłodniczej do określania wydajności chłodniczej.

$$1 \text{ BTU/h} = 0.00029307107 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 3412.142 \text{ BTU/h}$$

Rysunek 2. Obecne i prognozowane zużycie energii na świecie potrzebne do produkcji energii elektrycznej z podziałem na regiony.



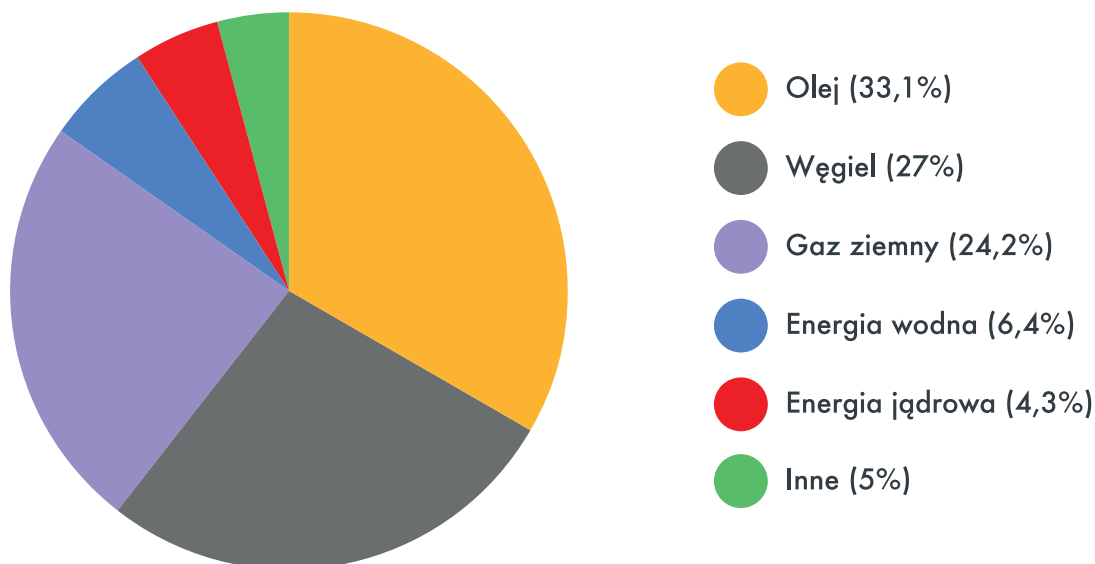
W przyszłości bez wątpienia zapotrzebowanie na energię będzie wyższe niż obecnie, gdyż globalnie liczba ludności rośnie - standard życia również. Gospodarka rozwija się coraz szybciej, co przekłada się na wysoki poziom PKB per capita i będzie to odwzorowane zwiększonym zapotrzebowaniem na energię dla krajów spoza OECD, takich jak Chiny czy Indie, gdzie gospodarka ciągle nabiera tempa. Jak zostało to przedstawione na rysunku 2, prognozuje się, że w najbliższych 30 latach największy wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną będzie w azjatyckich.

Pomimo tego, że w pędzie gospodarczym coraz bardziej zwracamy uwagę na aspekty ekologiczne, segregujemy śmieci, ograniczamy emisję gazów cieplarnianych, wprowadzamy urządzenia energooszczędne i budownictwo pasywne, nadal obserwujemy wykładniczy, a co najmniej liniowy wzrost zapotrzebowania na energię. Różne źródła podają różne wartości prognoz zużycia energii na świecie, jednak wszystkie mają tendencję wzrostową. Agencja Informacji Energetycznej USA (U.S. Energy Information Administration - EIA) zakłada roczną stopę wzrostu zapotrzebowania na energię na poziomie 1,2%,<sup>3</sup> natomiast Międzynarodowa Agencja Energetyczna (International Energy Agency – IEA) na poziomie 1,5%.<sup>4</sup> Zakłada się, że zużycie energii elektrycznej będzie rosło na poziomie 2% - 3% rocznie. Niepokojący jest fakt, że prognozowany wzrost zapotrzebowania na energię na świecie ma być pokrywany głównie z paliw kopalnych - choć zakłada się dynamiczny wzrost odnawialnych źródeł energii (OZE), nie jest on jednak wystarczający.

### **1.1.1. Obecny stan światowej energetyki**

Światowa energetyka opiera się głównie o paliwa kopalne, takie jak: węgiel kamienny i brunatny, ropę naftową i gaz ziemny. Początkowo podstawowym paliwem był węgiel, którego wydobycie napędzało rozwijający się przemysł. Z kolei w XX wieku na skutek rozwoju motoryzacji wydobycie ropy naftowej przewyższyło wydobycie węgla. Obecny rozwój przemysłu w krajach rozwijających (np. w Chinach) spowodował jednak ponowny wzrost wydobycia węgla. Jak zostało pokazane na rysunku 1. energia z odnawialnych źródeł pokrywa obecnie jedynie kilkunastoprocentowe zapotrzebowanie energię na Świecie. Mimo wszystko dynamika wzrostu pozyskiwania energii z OZE pozostaje największa. Optymistyczne prognozy zakładają, że w 2050 roku OZE będzie pokrywało około 20-30% całego zapotrzebowania na energię.

Rysunek 3. Światowe całkowite zużycie energii pierwotnej według paliw w 2019 roku.



Obecnie około 80% produkcji energii na świecie pochodzi z paliw kopalnych,<sup>6,7</sup> choć wyniki w raportach minimalnie się różnią. Ponad 10% energii pochodzi z OZE - reszta z energii jądrowej.

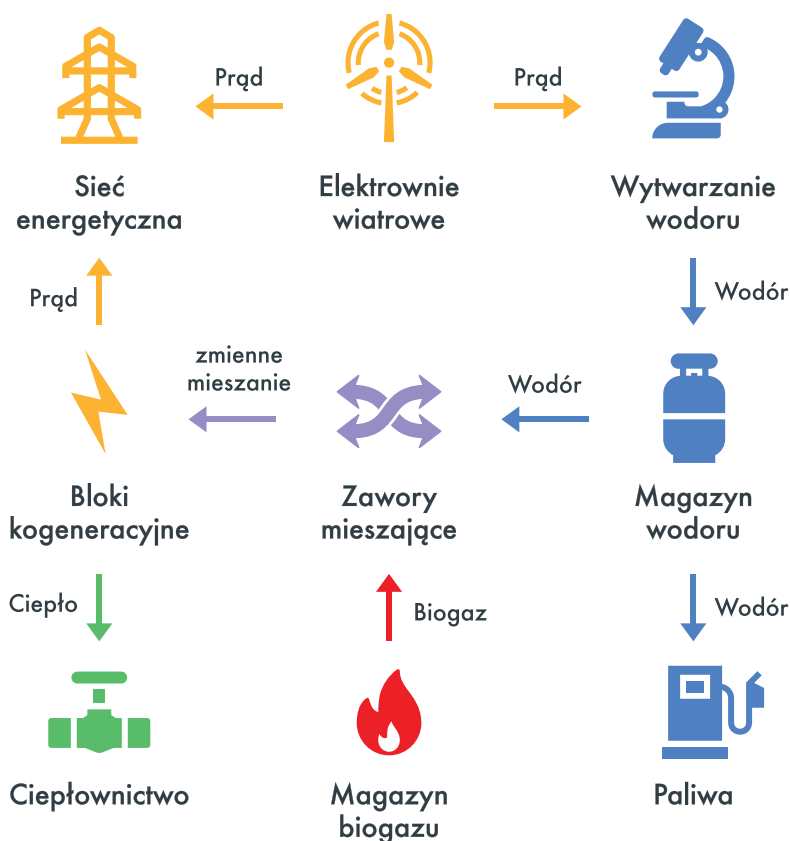
Warto zaznaczyć, że nie wszystkie kraje mają dostęp do paliw kopalnych, co powoduje dominację krajów bogatych w zasoby nad krajami bez tych zasobów - przekłada się też na ceny surowców. Rosnące zapotrzebowanie na energię w różnej formie winduje ceny, to z kolei determinuje do badań naukowych i wdrażania nowych technologii produkcji i magazynowania energii w celu dążenia do niezależności energetycznej. Dodatkowo dochodzą także uwarunkowania polityczne. Analizując zużycie energii na świecie nasuwa się jeden wniosek – należy zdecydowanie zwiększyć ilość niskoemisyjnych źródeł energii - zarówno atomu, jak i tych odnawialnych.

## 1.2. Przechowywanie energii

Cała energia, którą zużywamy na świecie, musi być produkowana, magazynowana i dystrybuowana w taki sposób, by zapewnić ciągły do niej dostęp. Techniki produkcji, magazynowania i dystrybucji różnią się w zależności od rodzaju paliwa. Największym problemem nie jest samo wytworzenie energii, ale jej zmagazynowanie i odpowiednie dostarczenie do klienta końcowego bez przerw w dostawach. Przeciętny człowiek nie zastanawia się, w jaki sposób jest magazynowana energia, choć tak naprawdę magazynuje energię w powerbankach, telefonach komórkowych, baku paliwa czy buforze ciepła. W przypadku paliw kopalnych możemy zapewnić stałą produkcję energii na określonym poziomie. Trudno to jednak zrobić w przypadku odnawialnych źródeł energii (np. energii ze Słońca czy wiatru). Oprócz zmienności produkcji należy wskazać zmienność odbioru energii przez klienta końcowego. Największe zapotrzebowanie na energię jest w godzinach pracy zakładów, a najmniejsze w trakcie nocy. Elektrownie muszą pracować w sposób ciągły, natomiast zapotrzebowanie na energię elektryczną jest zmienne (większe w ciągu dnia, mniejsze w nocy). Niestety nie potrafimy przechowywać energii w łatwy sposób, a magazyny energii są drogie. Do tej pory najpopularniejszymi rozwiązaniami były zbiorniki grawitacyjne czy też elektrownie szczytowo-pompowe. Magazynowanie energii polega na przepompowaniu wody na wyższy poziom w nocy (kiedy mamy nadmiar energii elektrycznej) oraz obniżanie poziomu wody przez turbiny w dzień i odzyskiwanie dzięki temu części energii. Innym sposobem jest magazynowanie energii w sprężonym powietrzu lub cieczy, czy też w postaci energii kinetycznej, np. koła zamachowego. Przechowywanie energii elektrycznej w bateriach jest mało skuteczne i niewykonalne na większą skalę. Ogniwa szybko się zużywają oraz występują trudności z recyklingiem zużytych ogniw, do tego dochodzą aspekty ekonomiczne. Ciekawostka: jeżeli w Kalifornii naładujemy każdą baterię, akumulator, powerbank, to energii elektrycznej wystarczy na 26 minut funkcjonowania miasta.

W tym miejscu należy już zasygnalizować innowacyjność wodoru (choć pełen opis znajduje się w podrozdziale „Uniwersalność technologii wodorowych”), który pozwala magazynować nadmiar energii, czy to z paliw kopalnych, czy OZE, i uwalniać ją, kiedy zachodzi taka potrzeba. Optymalnie jest produkować wodór za pomocą metody elektrolizy wody z wykorzystaniem np. farm fotowoltaicznych czy wiatrowych, zostawiając paliwa kopalne dla następnych pokoleń i redukując jednocześnie emisję gazów cieplarnianych.

Rysunek 4. Przykładowy schemat magazynowania energii w wodorze.



Powyższy schemat prezentuje, co możemy zrobić z wyprodukowanym wodorem, pozyskanym na przykład z elektrowni wiatrowych z nadwyżek energii podczas procesu elektrolizy wody. Zmagazynowany wodór możemy wykorzystać w dystrybutorach wodoru do tankowania samochodów z napędem wodorowym, czy też zamienić go z powrotem na prąd elektryczny za pomocą ogniw wodorowych w czasie niedoboru energii. Zmagazynowany wodór możemy wykorzystać również w układach kogeneracyjnych, które mogą pracować w sposób ciągły lub awaryjny w przypadku zaniku napięcia z sieci. Takie układy pozwalają zapewnić bezpieczeństwo energetyczne i niezależność od dostaw z sieci energetycznych. Paliwem może być gaz zmienny, zmiksowany w odpowiednich proporcjach z wodorem, który w wyniku spalania mieszaniny gazu napędza turbinę gazową, dokonując konwersji energii na elektryczną. Wodór może być mieszany z innymi gazami i wykorzystywany do ogrzewania domów czy też do gotowania na kuchenkach



gazowych. Możliwość wykorzystania wodoru jest kilka, najważniejsze jest to, że energię zmagazynowaną w wodorze możemy wykorzystać, kiedy jej potrzebujemy, a produkować możemy ją w sposób ciągły lub gdy mamy nadwyżki energii. Idealnie jest wówczas, gdy do produkcji wodoru wykorzystujemy odnawialne źródła energii, wówczas brak jest emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery.

## 1.3. Środowisko i klimat

Na samym początku należy zaznaczyć, że to działalność człowieka jest powodem wzrostu globalnego ocieplenia na Ziemi zespół międzynarodowych naukowców i ekspertów jest w pełni zgodny, co do tego faktu.<sup>8</sup> Bazowanie energetyki światowej na paliwach kopalnych spowodowały głębokie zmiany w środowisku naturalnym w postaci poważanego zanieczyszczenia, którego skutki odczuwamy obecnie i będziemy odczuwać jeszcze w przyszłości. Intensywna eksploatacja złóż powoduje wyczerpywanie się surowców lub wydobywanie ich z głębszych pokładów, co znacznie podnosi koszt ich wydobycia. Warto zauważyć, że odkrywamy coraz mniej nowych złóż paliw kopalnych, a wydobycie wrasta. Olbrzymia eksploatacja zasobów naszej planety powoduje pogorszenie się warunków życia dla organizmów żywych, w tym wyginięcie niektórych gatunków zwierząt. Klimat na Świecie się zmienia, topniejące lodowce, susze i kataklizmy wysyłają sygnały ostrzegacze na temat stanu Ziemi, co skłania do refleksji. W pogodzie można coraz częściej zaobserwować ekstremalne zjawiska, takie jak rosnące fale zimna i upałów, powodzie, susze, pożary i burze. Wzrost wydobycia paliw kopalnych, takich jak węgiel czy ropa, był podyktowany czynnikami ekonomicznymi i gospodarczymi. Początkowo paliwa te były tanie i stanowiły wydajne źródło energii, co zapoczątkowało rewolucję przemysłową i szybki rozwój gospodarki. Efektem spalania olbrzymich ilości paliw kopalnych jest globalne ocieplenie, czyli znaczący wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi w krótkim czasie na skutek działalności człowieka. Globalne ocieplenie ma olbrzymi wpływ na zmianę klimatu, a tym samym środowisko naturalne. Zmiany klimatu na Ziemi są zjawiskiem naturalnym pod warunkiem, że zachodzą w dziesiątkach, a nawet setkach tysięcy lat. Jeżeli wzrost temperatury powierzchni Ziemi obserwujemy w czasie np. wieku, to wówczas mamy do czynienia z globalnym ociepleniem. Choć wzrost średniej temperatury o 1 °C w ciągu wieku może wydawać mało znaczący, to efekt globalnego ocieplenia ma znaczący wpływ na życie ludzi i zwierząt na Ziemi. Dla przykładu, aby Ziemia ogrzała się w sposób naturalny o 1 °C

z powodu aktywności wulkanicznych czy też promieniowania słonecznego lub zmian chemicznych w atmosferze potrzeba czasu rzędu tysięcy lat, a nie, jak na skutek działalności człowieka, jednego wieku. Zmiany klimatu na Ziemi są dopuszczalne, jednak nie mogą być one tak gwałtowne, jak obserwujemy to w ostatnich latach. Za badania nad klimatem odpowiada Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), w skład którego wchodzi naukowcy z całego Świata jednoznacznie podkreślający, że klimat zmienia się w każdym regionie na Ziemi, a efekty tych zmian będą coraz bardziej dotkliwe. W ostatnim raporcie<sup>8</sup> możemy znaleźć m.in. informację o prognozie przekroczenia wzrostu globalnego ocieplenia o 1,5°C w najbliższych dekadach. Rozwiązanie jest tylko jedno - szybka i trwała redukcja emisji gazów cieplarnianych oraz osiągnięcia zerowej emisji CO<sub>2</sub>.

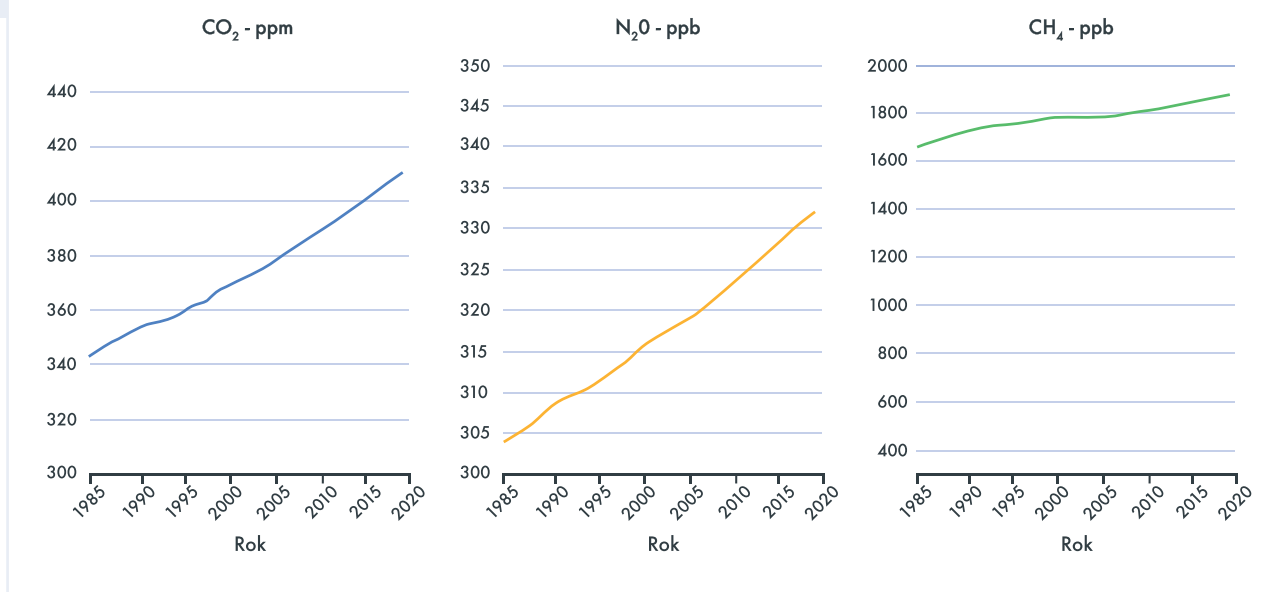
### 1.3.1. Efekt cieplarniany

Utrzymanie na planecie ciepła jest warunkiem koniecznym do egzystowania organizmów żywych. Promieniowanie słoneczne, które dociera do naszej planety, jest w większości absorbowane, jednak część promieniowania jest odbijana o atmosferę ziemską i trafia w przestrzeń kosmiczną. Ciepło jest akumulowane w lądach, oceanach, morzach, część energii absorbują rośliny, a część jest pobierana przez gazy w atmosferze ziemskiej i utrzymuje ciepło na Ziemi właśnie w wyniku efektu cieplarnianego. Jednak rosnący poziom stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze spowodowany działalnością człowieka (spalaniem paliw kopalnych) jest główną przyczyną zmian klimatycznych. Czym większa ilość gazów cieplarnianych w atmosferze, tym więcej ciepła pobrane. Część gazów cieplarnianych, znajdujących się w atmosferze, jest pochodzenia naturalnego - z erupcji wulkanów, powstałych kilka lub nawet kilkanaście milionów lat temu, czy też rozkładu roślin. Jeżeli mówimy o gazach cieplarnianych mamy na myśli głównie dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>), ale również metan (CH<sub>4</sub>) i podtlenek azotu (N<sub>2</sub>O). Niekiedy również za gaz cieplarniany przyjmuje się parę wodną, jednak jej wzrost jest ściśle związany z dwutlenkiem węgla. Jak zostało to zaprezentowane na rysunku 6. poziom gazów cieplarnianych ciągle wzrasta. Jako punkt odniesienia w analizie stężeń gazów cieplarnianych przyjmuje się czas przed rewolucją przemysłową. Według danych Światowej Organizacji Meteorologicznej (World Meteorological Organization - WMO) poziom gazów cieplarnianych w 2019 roku był następujący: dwutlenek węgla: 410,5±0,2 ppm (148%), metan: 1877±2 ppb (260%)

i podtlenek azotu:  $332,0 \pm 0,1$  ppb (123%)<sup>9</sup> (w nawiasach zostały podane wartości procentowe wzrostu stężenia gazów w odniesieniu do stężeń przed rewolucją przemysłową). Nawet pandemia w roku 2020 nie zatrzymała wzrostu poziomu gazów cieplarnianych<sup>9</sup> pomimo tego, że zużycie paliw kopalnych w tym roku było o kilka procent niższe.

Główną przeszkodą w ograniczaniu globalnych emisji CO<sub>2</sub> jest wzrost światowego zapotrzebowania na energię - głównie w krajach rozwijających. To stawia świat przed trudnym wyborem – zmniejszyć zużycie paliw kopalnych o 80% do 2050 roku lub ponieść konsekwencje globalnego ocieplenia. Odnawialne źródła energii w połączeniu z technologią magazynowanie energii w wodorze mogą być narzędziem do tego, by początkowo zatrzymać wzrost emisji gazów cieplarnianych, a dopiero w drugim kroku zmniejszyć ich wartość.

Rysunek 5. Poziom stężenia gazów cieplarnianych w latach 1985-2020.



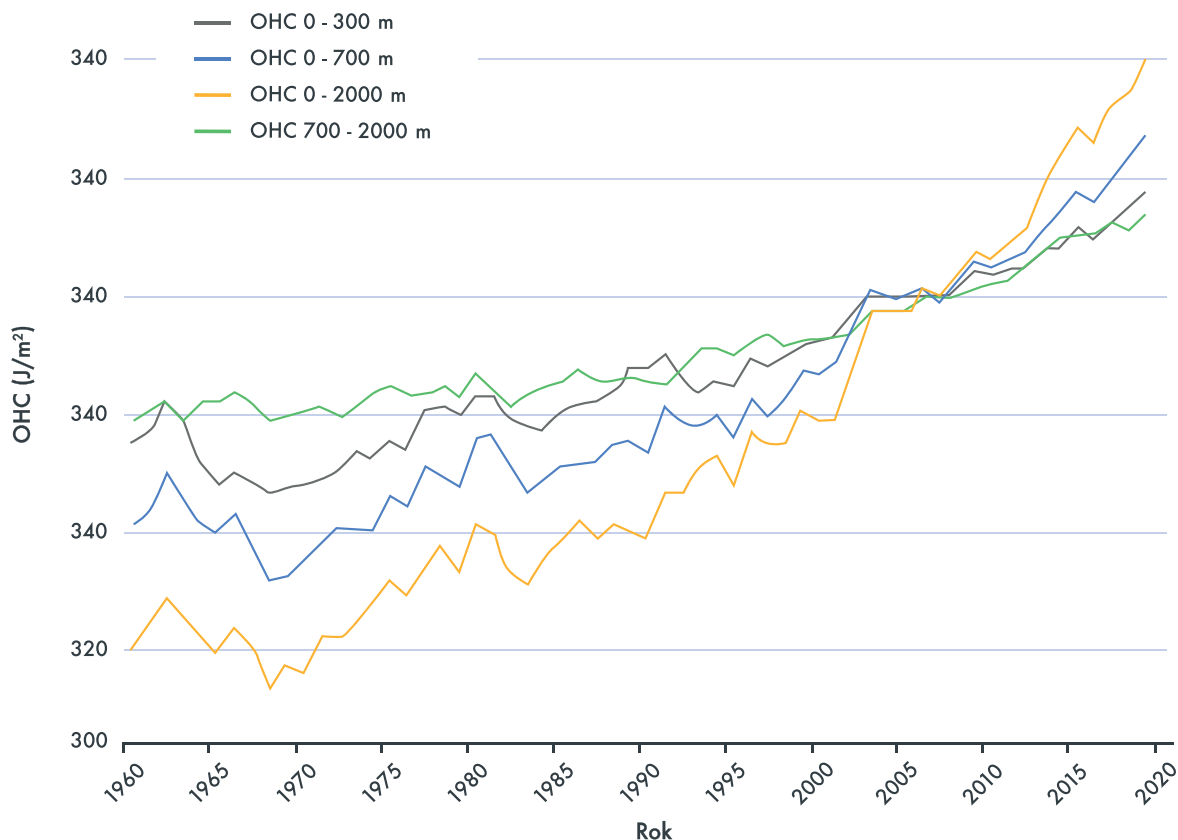
## Poziom morza

Nadmiar energii (około 90%), który się gromadzi wokół Ziemi na skutek rosnącego stężenia gazów cieplarnianych, absorbowany jest przez wody w morzach i oceanach, co skutkuje podwyższeniem ich temperatury. Efektem tego jest topnienie lodowców i podnoszenie się

poziomu mórz i oceanów. W wyniku topnienia lodowców część wysp zniknie z map, a linie brzegowe przesuną się, powodując migrację ludności i zwiększenie gęstości zaludnienia. Pesymistyczny scenariusz zakłada podniesienie poziomu wód mórz i oceanów o kilka metrów, a w przypadku topnienia lodu na Antarktydzie, gdzie znajduje się 90% lodu, nawet do kilkudziesięciu metrów. W celu określenia absorpcji energii w ocenach, mierzy się zawartość ciepła w oceanie (Ocean Heat Content - OHC), który jest miarą akumulacji ciepła w systemie ziemskim.

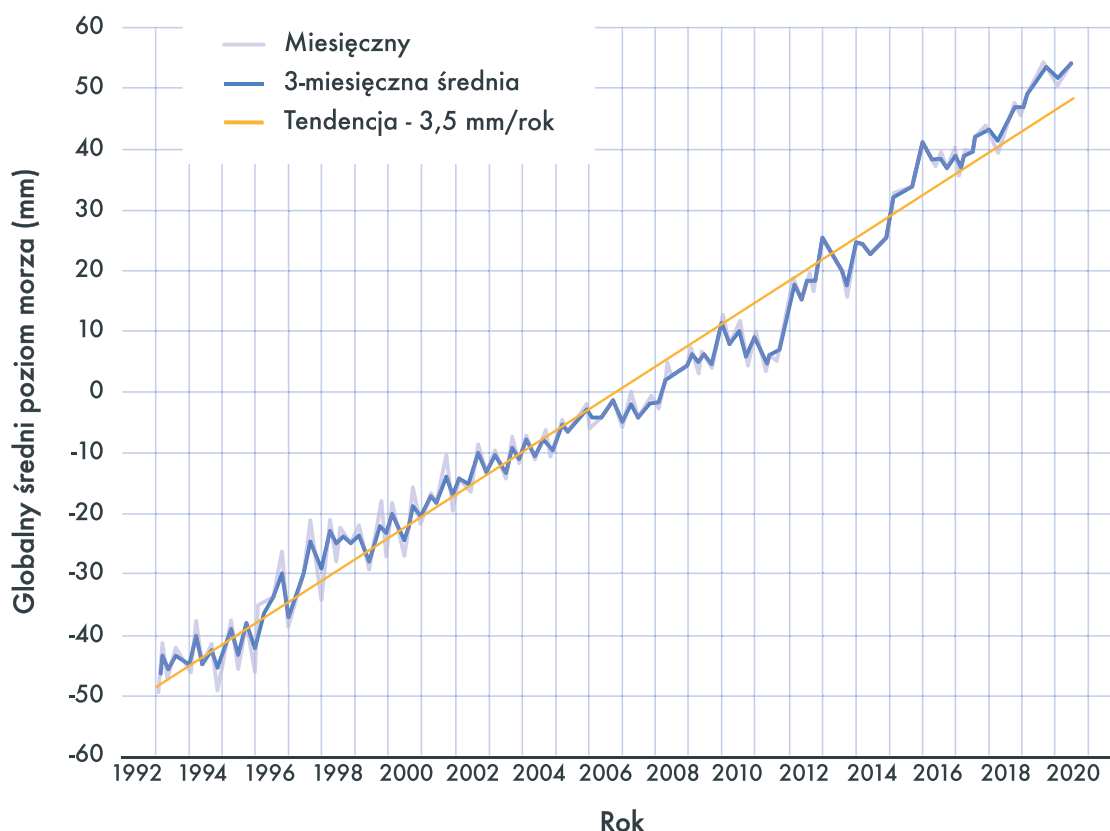
Pomiarów OHC dokonuje się na różnych głębokościach oceanu, aż do 2000 metrów. Jak zostało pokazane na rysunku 7., w roku 2019 wartość OHC pobiła dotychczasowe rekordy. Szacuje się również, że wartość ta będzie wyższa w roku 2020 i w kolejnych latach. Absorbacja nadmiarowej energii przez oceany i morza ma negatywny wpływ na organizmy żyjące w wodach, które i tak przez nadmiarowe i nielegalne połowy mają problem z

Rysunek 6. Zawartość ciepła w oceanie OHC w czasie.



zachowaniem swojej populacji. Dlatego również tak ważny jest zrównoważony rozwój. Wzrost poziomu mórz w [mm] został przedstawiony na rysunku 7. Widać wyraźny trend wzrostowy na poziomie 3,5 mm na rok.

Rysunek 7. Wzrost poziomu mórz w czasie.

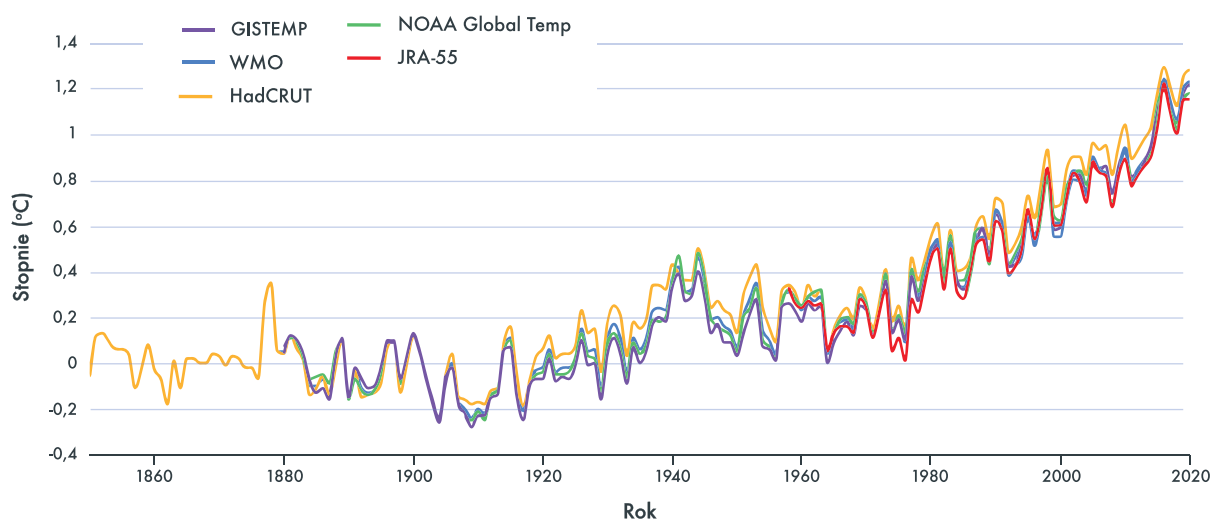


## Podwyższenie temperatury

Oprócz podnoszenia się temperatury i poziomów wód oceanów i mórz można zaobserwować wzrost temperatury na powierzchni Ziemi. Jak zostało to pokazane na rysunku 8. cały czas wzrasta średnia globalna temperatura powierzchni Ziemi (GMST), której bezpośrednią przyczyną jest wzrost stężenia gazów cieplarnianych (rysunek 6.). Jak wynika z danych [9] ostatnia dekada jest najcieplejszą w historii, a rok 2020 był jednym z trzech najcieplejszych

w historii. Średnia globalna temperatura powierzchni Ziemi (GMST) jest wyższa o  $1,2 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$  w porównaniu do temperatury przed rewolucją przemysłową (1850-1900) [9].

Rysunek 8. Różnica temperatur w odniesieniu do stanu przed rewolucją przemysłową.



## Rozprzestrzenianie się chorób

Emisja gazów cieplarnianych ma również wpływ na problemy zdrowotne ludzi na Ziemi. W krajach rozwijających się, gdzie gospodarka szybko przyspiesza, a węgiel jest tanim surowcem, można zaobserwować olbrzymie zanieczyszczenie powietrza, a nawet smog. Rosnące zapotrzebowanie na energię podyktowane wzrostem produkcji przemysłowej powoduje, że do atmosfery, oprócz gazów cieplarnianych, trafiają różne związki siarki, które opadają na ziemię i powodują kwaśne deszcze. To z kolei wpływa na pH gleby i rośliny, a pośrednio na zwierzęta i ludzi. Wysoki poziom pyłów i gazów w powietrzu działa negatywnie na układ oddechowy, powodując liczne choroby. Wzrost temperatury na Ziemi będzie powodował wzrost rozpowszechniania się chorób tropikalnych (malaria, żółta febra itd.), które związane są z rozpowszechnianiem się owadów, np. występowaniem komarów, które do rozmnażania potrzebują ciepłych obszarów. Obszary te wraz ze wzrostem temperatury będą się powiększać i będą się na nich pojawiać niespotykane dotąd owady tropikalne.

## 1.4. Uniwersalność technologii wodorowych

Uniwersalność wodoru polega na tym, że jest on zarazem nośnikiem energii, paliwem i surowcem. Na korzyść tego rozwiązania wpływa łatwość dostępu do surowca. Do produkcji wodoru potrzebujemy jedynie wody i energii elektrycznej z OZE oraz elektrolizera, nie występuje jakiegokolwiek zanieczyszczenie środowiska. Jeżeli chcemy wykorzystać zmagazynowaną w wodorze energię przy użyciu ogniwa paliwowego, wystarczy tlen zawarty w powietrzu i oczywiście wodór (produktem ubocznym, jest woda). Podsumowując, wodór możemy wytworzyć z wody, a podczas jego zużycia w ogniwach paliwowych wytwarza się energia elektryczna i znowu otrzymujemy czystą wodę. Tak naprawdę wodór można produkować z wszystkich paliw, również paliw kopalnych, jednak jedynie energia z OZE nie powoduje emisji gazów cieplarnianych. Wodór można wykorzystać we wszystkich warunkach i gałęziach przemysłu (transport, energia elektryczna, elektrociepłownie, technologie kosmiczne itp.). Docelowo należałoby wytarzać wodór z odnawialnych źródeł energii, ale możemy rozwijać infrastrukturę wodorową wykorzystując obecny stan gospodarki energetycznej. Jednocześnie odnawialne źródła energii mogą rozwijać się w niezurbanizowanych obszarach, bez konieczności doprowadzenia infrastruktury. Do produkcji wodoru wystarczy jedynie woda! Wodór generowany ze źródeł odnawialnych, takich jak panele słoneczne czy siłownie wiatrowe pozwala zmniejszyć emisję CO<sub>2</sub> poniżej 1%, co jest znaczną poprawą w porównaniu z obecną emisją z paliw kopalnych.

## 1.5. Historia wykorzystania wodoru

Wodór (symbol **H** w układzie okresowym) jest najczęściej występującym pierwiastkiem chemicznym we Wszechświecie (szacuje się, że stanowi aż 75% całości materii) i jednym z najczęściej spotykanych pierwiastków na Ziemi [wodor1, wodor2, wodor3] o liczbie atomowej 1. Występuje w gwiazdach, materii międzygwiazdowej oraz w przestrzeni międzyplanetarnej, z kolei na Ziemi w skałach i złożach gazu ziemnego. W standardowych warunkach wodór w postaci gazowej występuje w formie cząsteczkowej **H<sub>2</sub>** jako bezbarwny, bezwonny, bezsmakowy i nietoksyczny, ale łatwopalny, gaz. Wodór uznano za oddzielną substancję, po której spalaniu powstała woda.

Wydzielenia wodoru dokonał Henry Cavendish w latach 1766-81. Dotychczasowa produkcja przemysłowa wodoru odbywała się głównie metodą reformingu parowego gazu ziemnego, jednak coraz bardziej popularną i ekologiczną techniką jest elektroliza wody, dzięki podniesieniu sprawności elektrolizerów. Właśnie ta metoda może przyczynić się do zwiększenia roli wodoru w energetyce. Wytworzoną energię elektryczną, np. z ogniw fotowoltaicznych, możemy wykorzystać do wydzielenia wodoru z wody w procesie elektrolizy. Wodór jest doskonałym magazynem energii, którą możemy wykorzystać, chcąc zamienić go w prąd elektryczny po dostarczeniu wodoru i tlenu do ogniwa paliwowego. Jedynym produktem ubocznym jest woda i ciepło. Wodór oferuje źródło energii, które jest niewyczerpane, bezpieczne dla środowiska oraz zawsze dostępne, ponieważ mamy olbrzymie złoża wody na Ziemi. Ma on potencjał do bycia energią przyszłości, jednak idea użycia wodorowych ogniw paliwowych nie jest wcale taka nowa.

William Robert Grove, walijski sędzia, wynalazca i fizyk, wynalazł pierwsze ogniwo wodorowe w 1839 roku. Pomimo że jego wynalazek łączył wodór z tlenem w obecności elektrolitu oraz wytwarzał elektryczność i wodę, tak samo jak obecne ogniwa paliwowe, wytwarzana elektryczność nie była wystarczająco użyteczna, przez co dalsze udoskonalenia nie pojawiły się w tamtym czasie. W tej sekcji omówimy rozwój wodoru jako źródła energii, ale ponieważ istnieje on od ponad 150 lat, a ogniwa wodorowe oferują prawdopodobny sposób do osiągnięcia przyszłych celów dekarbonizacji na świecie, duży nacisk zostanie położony na ostateczne wydarzenia.

Kalendarium odkryć:

- **1766** – Odkrycie pierwiastka Wodór (ponad 250 lat temu)
- **1801** – Humphry Daw prezentuje zasadę działania ogniw paliwowych
- **1806** – Opracowanie silnika spalinowego napędzanego wodorem i tlenem
- **1839** – Sir William Grove prezentuje „baterię gazową”, znaną później jako ogniwo paliwowe
- **1842** – Potwierdzenie badań, iż wodór i tlen mogą wytwarzać prąd elektryczny
- **1889** – Charles Langer i Ludwig Mond opracowują ogniwo paliwowe



- **1955** – Konstrukcja ogniwa paliwowego z membraną do wymiany protonów (PEM)
- **1966** – Wykorzystanie ogniwa paliwowe w misjach kosmicznych (ponad 50 lat temu)
- **Lata 70 XX wieku** – Powstanie ogniw paliwowych z kwasem fosforowym (PAFC)
- **Lata 80 XX wieku** – Marynarka Wojenna Stanów Zjednoczonych wykorzystuje ogniwa paliwowe do napędzania okrętów podwodnych
- **Lata 90 XX wieku** – Duże stacjonarne ogniwa paliwowe są opracowywane dla lokalizacji komercyjnych i przemysłowych
- **2003** – Startuje pierwszy samolot z ogniwem paliwowym
- **2004** – Autobusy zasilane wodorem rozpoczynają kursować w Londynie
- **2008** – Wprowadzenie pierwszego samochodu z ogniwem paliwowym
- **2015** – Otwarcie pierwszej stacji tankowania wodoru w Wielkiej Brytanii
- **2016** – Startuje pierwszy samolot pasażerski z ogniwem paliwowym
- **2017** – Pierwsze na świecie tramwaje wodorowe są uruchamiane w Chinach
- **2018** – Pociągi napędzane wodorem zaczynają kursować w Niemczech,
- **2019** – Dron napędzany wodorem leci ponad godzinę z ładunkiem o wadze około 5 kg

## Źródła:

<sup>1</sup> International Energy Agency, Oil Market Report - June 2021 <https://www.iea.org/reports/oil-market-report-june-2021>,

<sup>2</sup> U.S. Energy Information Administration (EIA), U.S. Energy Information Administration's International Energy Outlook 2020 (IEO2020), *Center for Strategic and International Studies, October 14, 2020 | Washington, DC* <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2020.pdf>,

<sup>3</sup> U.S. Energy Information Administration (EIA), <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>

<sup>4</sup> International Energy Agency – IEA, <https://www.iea.org/>

<sup>5</sup> International Energy Agency – IEA, <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/economic-impacts-of-covid-19>

<sup>6</sup> World Energy Balances – Analysis". IEA. Retrieved 10 June 2021, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>

<sup>7</sup> Statistical Review of World Energy (2020). Retrieved 17 February 2021, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>

<sup>8</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2021, The Physical Science Basis [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf)

<sup>9</sup> World Meteorological Organization (WMO), The State of the Global Climate 2020, <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

<sup>10</sup> G.W.C. Kaye, T.H. Laby: *Tables of Physical & Chemical Constants (16th Edition 1995) 3.1.3 Abundances of the elements*. The National Physical Laboratory, 1995

<sup>11</sup> David N. Schramm: *The Big Bang and Other Explosions in Nuclear and Particle Astrophysics*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1996. ISBN 981-02-2024-3

<sup>12</sup> Viatcheslav Mukhanov: *Physical Foundations of Cosmology*. Cambridge University Press, 2005. ISBN 978-0-521-56398-7

# 2 Aspekty społeczno – ekonomiczne



Rola i znaczenie wodoru w gospodarce niewątpliwie dynamicznie rośnie. Wsparcie wodoru dla gospodarki światowej pozwoli na jej dekarbonizację, likwidację lub zminimalizowanie emisji, a w dłuższej perspektywie do obniżenia i stabilizacji cen energii. Z drugiej strony wprowadzenie wodoru do powszechnego obiegu gospodarczego pozwoli na pobudzenie wzrostu gospodarczego i stworzenia nowych miejsc pracy, w tym w zawodach, które dziś jeszcze nie istnieją. Realizacja tej wizji, zależy jednak od osiągnięcia kolejnych kamieni milowych w rozwoju technologicznym oraz wsparcia politycznego.

## 2.1. Integracja nauki i biznesu

Sama wola polityczna i przyjęta przez polityków promocja programów prowdorowych nie wystarczą, by napędzać rozwój gospodarki wodorowej. W walce ze zmianami klimatycznymi zasadnicze znaczenie ma odejście gospodarki i życia codziennego od jej bazy, opartej na paliwach kopalnych, na rzecz wykorzystania energii odnawialnej, w tym wodorowej, ze szczególnym uwzględnieniem zielonego wodoru. Wymaga to znacznych inwestycji w badania i rozwój technologii wodorowych. Pomoc na prace badawczo-rozwojowe dostępne w ramach odpowiedniej strategii wodorowej zapewnia wsparcie podstawowych badań nad technologiami wodorowymi i rozwojem zorientowanym na zastosowanie przez przedsiębiorstwa. Technologie wodorowe i związane z nimi zastosowania produktów często mogą być rozwijane nie tylko poprzez współpracę z firmami z innych branż, ale przede wszystkim we współpracy z ośrodkami lub jednostkami naukowymi. Przedsiębiorstwa są zwykle nie tylko narażone na ryzyko niepowodzenia nieodłącznie związane ze wszystkimi projektami badawczo-rozwojowymi, ale także muszą radzić sobie z ryzykiem i niepewnością wynikającymi z ram regulacyjnych, które są jeszcze szczątkowe. Wsparcie jednostek naukowych w realizacjach projektów z zakresu technologii wodorowych ogranicza ryzyko wynikające z samego charakteru projektów badawczych,

dlatego też przedsiębiorstwa znacząco na tym korzystają. Inwestycje w badania i rozwój czystych technologii energetycznych rosną z roku na rok, kosztem technologii opartych na paliwach konwencjonalnych. Rewolucja na światowych rynkach energii i transportu (dekarbonizacja) w niezbędnym zakresie niesie za sobą wysoką cenę i wymaga znaczącej kwoty finansowania, aby zapewnić rozwój i wdrożenie zielonych technologii wodorowych. W tym miejscu sektor prywatny może odegrać kluczową rolę, finansując przejście na czystą energię i rozwój technologii wodorowych, wykorzystujących zrównoważoną energię. Od pewnego czasu globalny rynek czystego wodoru rośnie, a wiele rządów na całym świecie coraz bardziej angażuje się nie tylko w dekarbonizację szeregu kluczowych sektorów swoich gospodarek, ale także w finansowanie badań niezbędnych do rozwoju i wprowadzenia zmian transformacyjnych. Bardzo dobrze pokazuje to raport „World Energy Investment 2020” wydany przez International Energy Agency (lipiec 2020). Wydatki rządowe na badania i rozwój w dziedzinie energii w 2019 r. wzrosły o 3% do 30 mld USD w 2019 r. i były skierowane głównie na niskoemisyjne technologie energetyczne. Najsilniejszy wzrost w tym kierunku odnotowano w Europie i Stanach Zjednoczonych - wydatki na publiczne badania i rozwój w dziedzinie energii wzrosły w obu gospodarkach o 7%. Patrząc perspektywicznie w najbliższą przyszłość zwiększenie badań i rozwoju w dziedzinie energii będzie głównym elementem dyskusji politycznych w Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Zielonego Ładu, inicjatyw, takich jak „Fit for 55”, i rozszerzonego programu badawczo-rozwojowego Horyzont Europa. Analizując dane o wydatkach na cele B+R należy pamiętać o okresach budżetowania. Wydatki te podlegają cyklicznym trendom w okresach budżetowych - dla przykładu słabsza dynamika wzrostu w 2019 roku wydatków na B+R w dziedzinie energii w Chinach była spowodowana zakończeniem planu pięcioletniego, z czym wiązała się stabilizacja chińskich publicznych wydatków na badania i rozwój w dziedzinie energii. Podobnie w Unii Europejskiej - wydatki na B+R zmniejszają



się w miarę upływu czasu w cyklach siedmioletnich. Obecnie (sierpień 2021) znacząca większość unijnych programów badawczych nie zdążyła jeszcze wystartować w ramach kolejnego okresu programowania (który notabene rozpoczął się w styczniu 2021 roku). Znaczące zwiększenie unijnych inwestycji w B+R planowane jest na rok 2022 - istnieją więc przesłanki, że technologie niskoemisyjne, w tym technologie wodorowe, mogą otrzymać impuls w najbliższych dwóch latach (2022-2023), co wynikać będzie ze skokowego wzrostu inwestycji w projekty B+R.

W 2019 r. około 80% wszystkich publicznych wydatków na badania i rozwój w dziedzinie energii dotyczyło technologii niskoemisyjnych – efektywności energetycznej, CCUS (wychwytywanie, utylizacja i składowanie dwutlenku węgla), odnawialnych źródeł energii, energii jądrowej, wodoru, magazynowania energii i zagadnień przekrojowych, takich jak inteligentne sieci. Na podstawie danych z raportów rocznych można stwierdzić, że firmy działające w sektorach technologii energetycznych w ciągu ostatniej dekady (od roku 2010) zwiększyły swoje całkowite roczne wydatki na badania i rozwój w dziedzinie energii o około 40%. Całkowite wydatki na badania i rozwój w dziedzinie energii w przedsiębiorstwach osiągnęły tym samym w 2019 r. poziom 90 mld USD, o 3% więcej niż w 2018 r. Popyt na elektromobilność i czystsze samochody pobudził ogólne badania i rozwój w zakresie energii w przedsiębiorstwach od 2010 r., podczas gdy odnawialne źródła energii rosły najszybciej (74%), a ropa naftowa i gaz – najmniej – 9%. Firmy działające w technologiach energii odnawialnej wydały o 74% więcej na badania i rozwój w latach 2010-2019, dodając ponad 2,5 miliarda dolarów na wysiłki na rzecz udoskonalenia swoich własnych technologii, uzupełniając ponad 4 miliardy dolarów wydane przez rządy na badania i rozwój w zakresie odnawialnych źródeł energii. Niezmiennie dużą rolę w finansowaniu sektora B+R innowacyjnych technologii wodorowych pełni tzw. kapitał wysokiego ryzyka, czyli rozmaite fundusze typu venture capital (średnio- i długoterminowe inwestycje w przedsiębiorstwa niepubliczne znajdujące się we wczesnych fazach rozwoju). Wprawdzie jest to nieco mniejsza rola w kwotach bezwzględnych w stosunku do wydatków rządowych i korporacyjnych, o których mowa powyżej, ale prywatny kapitał ryzyka odgrywa ważniejszą rolę dla technologii gotowych do wprowadzenia na rynek (tworzenie rynku i zwiększanie skali).

Przegląd ciekawszych inwestycji VC w spółki z zakresu technologii wodorowych prezentuje poniższa tabela, opracowana na podstawie danych IEA (2020), World Energy Investment 2020.

<b>Spółka</b>	<b>Produkt</b>	<b>Wartość inwestycji (mln \$)</b>
<b>Jiangsu Guofu Hydrogen Technology (Chiny)</b>	Elektrolizer, magazynowanie, tankowanie pojazdów	60
<b>Ergosup (Francja)</b>	Elektrolizer	12,5
<b>Joi Scientific (USA)</b>	Produkcja wodoru	9,8
<b>Szygygy Plasmonics (USA)</b>	Produkcja wodoru z gazu ziemnego lub amoniaku	9,74
<b>Nikola Motors (USA)</b>	Samochód zasilany wodorem	250
<b>Sunfire (Niemcy)</b>	Elektrolizer, stacjonarne ogniwo paliwowe	28,7
<b>FirstElement Fuel (USA)</b>	Sieć tankowania pojazdów	24
<b>Hydrogenious LOHC (Niemcy)</b>	Magazynowanie wodoru	18,8

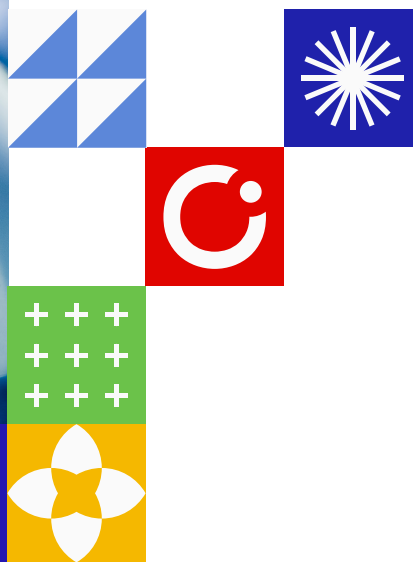
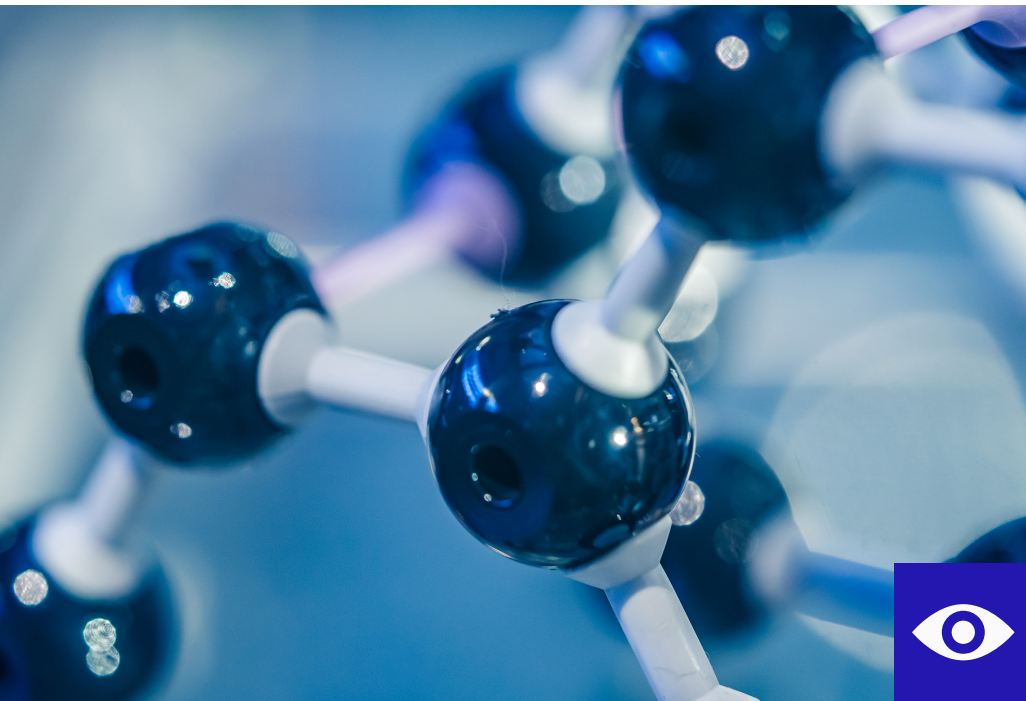
Badania i rozwój mają do odegrania ważną rolę dla dalszego rozwoju technologii i przemysłu wodorowego. Wynikiem prac badawczo-rozwojowych są innowacje, czyli przekształcanie pomysłów w nowatorskie rozwiązania. Innowacje z kolei stanowią podstawę długofalowego postępu gospodarczego, ponieważ pozwalają przedsiębiorstwom lub krajom stać się bardziej konkurencyjnymi, skuteczniej dostosowywać się do zmian i poprawiać standardy życia.

W przypadku powstającego przemysłu wodorowego badania i rozwój pozwolą na realizację celu strategicznego, jakim jest ochrona klimatu przed niekorzystnymi działaniami wynikającymi z czynników antropogenicznych poprzez:

- Obniżenie kosztów kapitałowych i operacyjnych poprzez wprowadzenie ulepszeń w dojrzałych i powstających technologiach. Te ulepszenia i zdolność do produkcji wodoru na dużą skalę są istotne, aby wspierać rozpowszechnianie technologii wodorowych (obniżenie ceny pozwala na osiągnięcie powszechności) oraz pomagać w zaspokojeniu przewidywanego przyszłego zapotrzebowania na wodór. Dla przykładu Japonia ma jasne, długoterminowe cele dotyczące wodoru wraz z docelowymi cenami (3 USD/kg do 2030 r. i 1,30 USD/kg do 2050 r.). Spełnienie tych długoterminowych celów i

zaspokojenie zapotrzebowania Japonii na wodór będzie wymagało znacznej poprawy kosztów, którą mogą umożliwić badania i rozwój.

- Dostarczanie przełomowych technologii poprzez identyfikowanie i rozwijanie możliwości, które mogą przynieść korzyści w postaci skokowej zmiany w całym łańcuchu wartości wodoru. Wykorzystanie B+R do opracowania możliwości ograniczenia lub eliminacji etapów procesu (co również spowoduje obniżenie kosztów i w konsekwencji powszechność technologii wodorowych) na przykład poprzez wyeliminowanie potrzeby przetwarzania danego surowca do produkcji wodoru. Przełomowe technologie mogą również umożliwić wykorzystanie alternatywnych surowców, takich jak biomasa lub strumienie odpadów.
- B+R jako wsparcie w opracowaniu i zapewnieniu bezpieczeństwa w produkcji, przechowywaniu, transporcie i stosowaniu wodoru. Podobnie jak w przypadku wielu nośników energii należy zapewnić bezpieczną produkcję, magazynowanie, dystrybucję i wykorzystanie wodoru. Chociaż wodór jest już wykorzystywany przez różne gałęzie przemysłu w wielu krajach, badania i rozwój mają szerokie pole do rozwoju przemysłu wodorowego i wykorzystywania wodoru w nowatorskich zastosowaniach. Jednym z głównych wyzwań stojących przed wizją gospodarki wodorowej są kwestie bezpieczeństwa i ochrony środowiska, biorąc pod uwagę jego właściwości. Wodór to wysoce łatwopalny pierwiastek, który w przypadku wycieku może spowodować eksplozję. Ta właściwość wodoru może sprawić, że będzie on niebezpieczny w zamkniętych pomieszczeniach, takich jak podziemne tunele lub parkingi. Wodór jest również bezwonny, a jego płomień



są prawie niewidoczne gołym okiem, co stanowi wyzwanie zarówno dla bezpieczeństwa, jak i wykrywania. Prace badawczo-rozwojowe są konieczne także do wdrożenia norm i przepisów dotyczących użytkowania, transportu i przechowywania wodoru.

- Zrozumienie i zminimalizowanie wpływu na środowisko wielkoskalowego przemysłu wodorowego. Pomimo tego, że wodór jest z natury nośnikiem czystej energii, wymagane będzie zrozumienie i minimalizacja wpływu wielkoskalowego przemysłu wodorowego na środowisko. Na przykład minimalizowanie skutków inwestycji w przemysł wodorowy na etapie budowy i eksploatacji.
- Informowanie społeczności poprzez działania, takie jak badania społeczne, towarzyszące demonstracjom projektów. Takie projekty mogą pokazać społeczeństwu, jak przy minimalnych zakłóceniach może nastąpić bezpieczne wprowadzenie technologii wodorowych i jakie korzyści gospodarcze i środowiskowe może to przynieść krajowi.
- Zapewnienie naukowego wsparcia oraz kierunku w zakresie wymagań dotyczących demonstracji i zwiększania skali, a także pomoc w zmniejszaniu ryzyka inwestycji komercyjnych. W miarę dojrzewania i zwiększania skali technologii wodorowych należy zwiększać i optymalizować zdolność do integracji z istniejącymi systemami, takimi jak np. sieć energetyczna. Będzie to wymagało szeregu działań związanych z modelowaniem badań i demonstracji.
- Badania i rozwój w zakresie wodoru mogą również wspierać światową gospodarkę poprzez stymulowanie międzynarodowej współpracy oraz dzielenie się wiedzą. Może to pomóc we wspieraniu budowania relacji międzynarodowych z wykorzystaniem nauki (jednostek naukowych) do wspierania możliwości współpracy między przedsiębiorstwami oraz jako narzędzia międzynarodowej kooperacji. Może również pomóc w rozwoju przedsiębiorstw technologicznych, produkcyjnych i usługowych, które zapewniają wysoce konkurencyjne rozwiązania dla przemysłu wodorowego.
- Badania i rozwój pozwolą na przyspieszenie absorpcji technologii wymaganej do produkcji, przechowywania, transportu i wykorzystywania wodoru jako źródła energii zarówno na skalę przemysłową, jak i handlową. Poprzez inwestycje w sferę B+R istnieje nadzieja, że rządy, korporacje i osoby prywatne zaczną wdrażać i instalować technologię niezbędną do wspierania gospodarki wodorowej w szybszym tempie, niż następuje to obecnie.



Najciekawszą obecnie inicjatywą z zakresu gospodarki wodorowej, pokazująca siłę integracji nauki i biznesu, jest koncepcja Doliny Wodorowej. Według przyjętej definicji jest to „obszar geograficzny – miasto, region, wyspa lub klaster przemysłowy – gdzie kilka zastosowań wodoru jest połączonych razem w zintegrowany ekosystem wodorowy, który zużywa znaczną ilość wodoru, poprawiając ekonomikę projektu. W idealnym przypadku powinien obejmować cały łańcuch wodorowy: produkcję, magazynowanie, dystrybucję i ostateczne wykorzystanie”. W związku z tym Doliny Wodorowe oferują ścieżkę rozwoju i uczynienia tej technologii opłacalnym rozwiązaniem. Doliny wodorowe pełnią funkcję demonstratorów technologii wodorowej, ale także są głównymi motorami rozwoju przemysłowego i tworzenia miejsc pracy. Koncepcja Doliny Wodorowej jest wciąż młoda - ponad 85% Dolin Wodorowych jest nadal w różnych fazach rozwoju, podczas gdy mniej niż 15% zostało w pełni wdrożonych. Pojawiają się trzy typowe konfiguracje:

- projekty lokalne, na małą skalę i skoncentrowane na mobilności,
- warianty lokalne, średniej skali i branżowe,
- projekty na dużą skalę i eksport.

Prawie wszystkie Doliny Wodorowe są zaangażowane w produkcję wodoru, z czego 85% obejmuje magazynowanie lub przetwarzanie, a także transport. Połowa Dolin Wodorowych wytwarza również energię pierwotną, niezbędną do produkcji wodoru z odnawialnych źródeł energii. Doliny wodorowe są również częścią projektu Polskiej Strategii Wodorowej. Według planów NCBR (Narodowego Centrum Badań i Rozwoju) w Polsce powstanie jedna główna dolina stanowiąca centrum badawcze dla całej gospodarki związanej z surowcem oraz szereg mniejszych ośrodków, które wyspecjalizują się w określonych zagadnieniach.

Aktywacja rynku wodorowego i wykorzystanie szans wymagają inwestycji wśród różnych grup interesariuszy (np. przedsiębiorstw, funduszy podwyższonego ryzyka, rządów, jednostek badawczo-rozwojowych). Tylko w ten sposób przemysł wodorowy będzie mógł nadal rozwijać się w skoordynowany sposób. Podczas gdy globalny rozwój przemysłu wodorowego rozwiąże wiele wyzwań związanych z aktywacją rynku, badania i rozwój są niezbędne do przezwyciężenia obecnych barier i pomocy w kreowaniu popytu. Co ważne, rozwiązanie zidentyfikowanych wyzwań może zwiększyć popyt na wodór – szczególnie w dużych zakładach przemysłowych, co zachęci do dalszej redukcji kosztów, poprzez poprawę wydajności i ekonomii skali (dla całej gospodarki wodorowej). Ponadto może pomóc w

rozwoju przedsiębiorstw technologicznych, produkcyjnych i usługowych, które zapewniają wysoce konkurencyjne rozwiązania dla przemysłu wodorowego i są zróżnicowane pod względem nauki, technologii i innowacji.

## 2.2. Kryteria rozwoju gospodarki wodorowej

Gospodarka wodorowa, jak każda gałąź gospodarki, musi być osadzona w realiach rynkowych, ale także mieć solidne fundamenty w postaci zaplecza technologicznego oraz uwarunkowań prawnych. Dodatkowo ma służyć społeczeństwu, więc niezbędna jest świadomość końcowego odbiorcy, obecność założeń gospodarki wodorowej w planach samorządów na poziomie lokalnym, jak i ogólnokrajowym. Ponadto cała transformacja energetyczna prowadzona jest w kontekście ochrony klimatu, więc aspekty środowiskowe także są niezwykle istotne we wdrażaniu rozwiązań wodorowych w rzeczywistość. Wszystkie te wyznaczniki możemy przedstawić w następujący sposób:

### Ekonomia

- Relacje biznesowe i handlowe
- Dostęp do finansowania, kredyty, ulgi, zwolnienia z podatku, dopłaty
- Ułatwienia w prowadzeniu biznesu (inkubatory, start-upy, projekty sektorowe)

### Środowisko

- Wytwarzanie zielonego wodoru i konsumpcja lokalna/krajowa
- Infrastruktura importowo-eksportowa dużych ilości wodoru (dostosowane porty, magazyny)
- Źródła energii OZE pokrywające zapotrzebowanie
- Zorganizowana sieć logistyczna (dostawcy, odbiorcy, rurociągi). Minimalizacja kosztów dostaw i czasu realizacji

## Technologie

- Doświadczenie, zasoby eksperckie, rozwój technologii w instytucjach, zdolność do globalnej konkurencji
- Zdolność obsadzenia całego łańcucha wartości procesu wodorowego
- Zdolność elastycznej adaptacji do zmian w technologiach oraz łańcuchach procesowych

## Polityka

- Stabilność polityki rządu, ciągłość realizowania strategii i wdrażania technologii wodorowych
- Regulacje prawne wynikające z przepisów unijnych, globalnych i specyfikacji krajowej
- Transparentność działań regulacyjnych, uniezależnienie od subiektywnych interesów politycznych.

## 2.3. Korzyści wynikające z gospodarki wodorowej

Światowe zapotrzebowanie na energię stale rośnie w szybkim tempie. World Economic Forum przewiduje, że do 2050 roku globalne zapotrzebowanie na energię będzie od 30 do 40% wyższe, niż obecnie, nawet przy założeniu, że świat stanie się znacznie bardziej energooszczędny. Obecnie większość źródeł energii na świecie jest uzależniona od emisji gazów cieplarnianych (w szczególności dwutlenku węgla) do atmosfery. W związku z tym sektor OZE skoncentrował się na rozwoju odnawialnych i czystych źródeł energii, takich jak energia słoneczna, wiatrowa, jądrowa, wodna i biopaliwa, jako alternatyw dla paliw kopalnych. Energia wodorowa, jako OZE, choć znana od dawna, wydawała się być cieniem innych, bardziej rozpowszechnionych i popularnych, ekologicznych odnawialnych źródeł energii. W ostatnich latach możliwość wykorzystania wodoru powróciła do tzw. mainstreamu, ponieważ społeczność międzynarodowa stara się odpowiedzieć na światowe wyzwania energetyczne i klimatyczne, szczególnie w świetle celów wyznaczonych przez paryskie porozumienie klimatyczne z 2015 roku i inne działania na rzecz klimatu na całym świecie.

Termin „gospodarka wodorowa” odnosi się do wizji wykorzystania wodoru jako czystego, niskoemisyjnego źródła energii w celu zaspokojenia światowych potrzeb energetycznych, zastępującego tradycyjne paliwa kopalne i stanowiącego istotną część portfela czystej energii. Według Hydrogen Council do 2050 r. wartość międzynarodowego rynku wodoru może wynieść nawet 2,5 biliona dolarów, zaspokajając 18% światowego zapotrzebowania na energię, zapewniając 30 milionów miejsc pracy na całym świecie i zmniejszając emisję dwutlenku węgla o 6 gigaton rocznie.

Wskazuje się kilka najważniejszych powodów, dla których wodór ponownie jest poważnie rozważany jako alternatywne źródło energii:

- dążenia do bardziej przyjaznych dla środowiska źródeł paliw,
- udoskonalenia technologii wodorowych,
- rosnące wsparcie rządowe dla przyjaznej dla klimatu dywersyfikacji paliw (np. w krajach takich jak USA, Japonia, Korea i kraje Unii Europejskiej),
- zmiany w globalnej polityce energetycznej, w normach emisji oraz w globalnym krajobrazie technologicznym,
- obiecujące wyniki projektów B+R.

Powyższe czynniki jednoznacznie przemawiają za aktywnym rozwojem gospodarki wodorowej. Powszechnie uznaje się również, że wodór ma potencjał do dekarbonizacji wielu gałęzi przemysłu, co zostało postawione za cel klimatyczny m.in. Unii Europejskiej, w ramach inicjatywy „Fit for 55” (a także wcześniejszych zobowiązań). Wodór, który można eufemistycznie nazwać wschodzącą gwiazdą sektora energii odnawialnej, jest wszechstronnym, łatwo dostępnym i przyjaznym dla środowiska zasobem, który podczas spalania wytwarza czystą wodę i ciepło. Wodór w przeszłości był tradycyjnie używany jako surowiec w kilku procesach przemysłowych (takich jak synteza amoniaku i rafinacja ropy naftowej), jednak osiągnięcia badawcze ostatnich 20 lat wykazały, że wodór może być również wykorzystywany do wielu innych zastosowań, w tym wytwarzania energii elektrycznej, transportu i magazynowania energii z okresowych źródeł odnawialnych. Wodór ma również wady, jak każde źródło energii, niemniej na całym świecie trwają prace badawcze, które być może pozwolą na ich eliminację.

Zalety wodoru pomogą przenieść ludzkość do zrównoważonej gospodarki energetycznej,

### Zalety wodoru jako źródła energii

1. Wodór jest odnawialnym źródłem energii, a jego zasoby są w zasadzie nieograniczone.

2. Mnogość źródeł do lokalnej produkcji wodoru. Wodór może być wytwarzany na miejscu gdzie będzie wykorzystywany lub centralnie, a następnie dystrybuowany. Gaz wodorowy można wytwarzać z metanu, benzyny, biomasy, węgla lub wody. Czynniki, takie jak ilość zanieczyszczeń, wyzwania techniczne i wymagania energetyczne, różnią się w zależności od używanych źródeł.

3. Wodór to praktycznie źródło czystej energii. Gdy wodór jest spalany w celu wytworzenia paliwa, produkty uboczne są całkowicie bezpieczne - nie mają znanych skutków ubocznych.

4. Energia wodorowa jest nietoksyczna. Oznacza to, że wodór jest przyjazny dla środowiska i nie powoduje żadnych szkód ani zniszczeń dla zdrowia ludzkiego. Ten aspekt sprawia, że powinien być preferowany w porównaniu z innymi źródłami paliwa, takimi jak energia jądrowa, gaz ziemny, które są niebezpieczne lub zniechęcające do bezpiecznego wykorzystania. Pozwala również na stosowanie wodoru w miejscach, w których inne formy paliwa mogą być niedozwolone lub niemożliwe do wykorzystania.

### Wady wodoru jako źródła energii

1. Energia wodorowa jest droga. Różnorodne przeszkody, jakie napotyka wodór, można w rzeczywistości zredukować do jednego: kosztu. Elektroliza i reforming parowy (dwa główne procesy ekstrakcji wodoru), są niezwykle kosztowne. To jest prawdziwy powód, dla którego nie jest intensywnie wykorzystywany na całym świecie. Obecnie szary wodór kosztuje około 1,50 euro/kg, niebieski wodór 2-3 euro/ kg, a zielony 3,50-6 euro/ kg. Szacuje się, że cena 50-60 euro za tonę węgla może sprawić, że niebieski wodór będzie konkurencyjny w Europie. Z drugiej strony, na całym świecie trwają projekty badawcze, które pomogą upowszechnić technologie wodorowe, a więc również obniżyć koszty. Europa jest światowym liderem w technologii elektrolizy. W ciągu ostatnich 10-15 lat złożyła około dwukrotnie więcej patentów i publikacji niż jej najbliżsi konkurenci - USA, Chiny i Japonia.

2. Przechowywanie wodoru jest co najmniej trudne. Transport i powszechne stosowanie wodoru są na dziś mało wykonalne. Właściwością wodoru jest to, że ma małą gęstość. Oznacza to, że musi być skompresowany do stanu płynnego i przechowywany w ten sam sposób w niższych temperaturach, aby zagwarantować jego skuteczność i wydajność jako źródła energii.

3. Niebezpieczne źródło energii. Wodór jest wysoce łatwopalną i lotną substancją stanowiącą potencjalne zagrożenie. Wodór nie ma zapachu co sprawia, że wykrycie nieszczelności jest prawie niemożliwe. Aby wykryć nieszczelności należy zainstalować czujniki, co zwiększa koszty.

4. Utrudnienia i wysokie koszty w transporcie wodoru. Trudno jest transportować wodór ze względu na jego lekkość.

5. Zastosowanie wodoru znacznie zmniejsza zanieczyszczenie. Kiedy wodór łączy się z tlenem w ogniwie paliwowym wytwarzana jest energia elektryczna, która może być wykorzystywana do napędzania pojazdów lub napędzania silnika elektrycznego jako źródła ciepła oraz do wielu innych zastosowań. Gdy łączy się z tlenem, jedynymi produktami ubocznymi są woda i ciepło, co jest zaletą stosowania wodoru jako nośnika energii. Zastosowanie wodorowych ogniw paliwowych nie uwalnia dwutlenku węgla, innych gazów cieplarnianych ani cząstek stałych, gdy w procesie produkcji wykorzystywane są źródła odnawialne, takie jak woda lub energia słoneczna.

5. Energia wodorowa nie jest w stanie samodzielnie zaspokoić potrzeb populacji w zakresie energii. Wodoru na świecie jest bardzo dużo, wręcz są to nieograniczone i niemierzalne ilości. Koszt wykorzystania wodoru (produkcja + transport + magazynowanie) ogranicza jego powszechne i intensywne wykorzystanie.

6. Jest bardziej wydajny niż inne źródła energii. Wodór jest wydajnym rodzajem energii, ponieważ może przetranszować więcej energii na każdą jednostkę paliwa w porównaniu z olejem napędowym lub gazem.

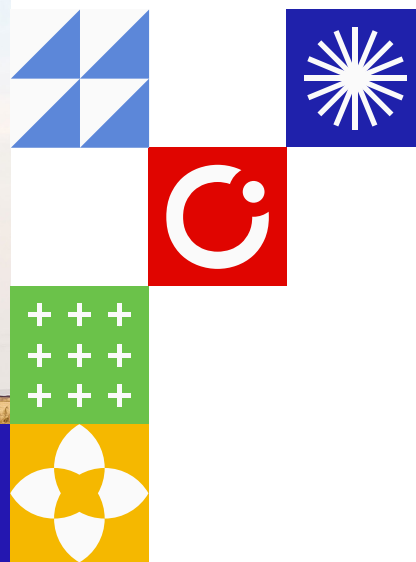
7. Może być używany do zasilania wszelkich pojazdów – od motocykli i samochodów po statki kosmiczne. Jest to również najbezpieczniejsza forma energii do wykonywania energochłonnego zadania. W rzeczywistości energia wodorowa jest 3 razy silniejsza niż benzyna i inne paliwa kopalne. Wydajność i moc energii wodorowej sprawiają, że jest to idealne źródło paliwa dla statków kosmicznych.

8. Istnieje zrównoważony system produkcji. Elektroliza to metoda, w której woda jest rozdzielana na wodór i tlen. W tym przypadku energię odnawialną można wykorzystać do zasilania elektrolizerów do produkcji wodoru z wody, co zapewnia zrównoważony system niezależny od produktów naftowych; dodatkowo nie zanieczyszcza środowiska, nie wytwarza żadnych emisji. Do zasilania elektrolizerów można wykorzystać inne źródła OZE, takie jak energia wiatrowa, wodna, słoneczna i pływów.

która jest celem, zgodnie z paryskimi zobowiązaniami klimatycznymi. Aby lepiej zrozumieć korzyści płynące z wodoru, należy zrozumieć, że obecna gospodarka energetyczna absolutnie nie jest zrównoważona:

- Zapotrzebowanie na energię rośnie, a surowce dla gospodarki opartej na paliwach kopalnych maleją. Dostawy ropy naftowej, węgla i gazu ziemnego nie są uzupełniane w miarę ich zużywania, dlatego należy znaleźć alternatywę.
- Większość ludzi, którzy zużywają paliwa kopalne, nie mieszka tam, gdzie paliwa są wydobywane. Rodzi to pole do konfliktów, ponieważ fakt ten stwarza ogromną motywację ekonomiczną dla narodów-konsumentów do prób przejęcia kontroli nad regionami dostarczającymi paliwa.
- Emisje z paliw kopalnych znacznie pogarszają jakość powietrza na całym świecie, zwłaszcza w regionach silnie zurbanizowanych i uprzemysłowionych. Powstałe w ten sposób produkty uboczne związane z węglem znacząco zmieniają klimat na świecie. Dla wielu ludzi i rządów wynikający z tego wpływ na zdrowie i klimat jest nie do zaakceptowania.
- Gospodarka paliw kopalnych stawia ludzi i narody pod nieuprawnionym wpływem krajów -dostawców energii. Ten brak niezależności ekonomicznej jest nie do zaakceptowania dla wielu przedsiębiorstw i rządów.

Korzyści wynikające z gospodarki wodorowej należy podzielić na 3 części dotyczące różnych aspektów społeczno-gospodarczych.



## 2.3.1. Bezpieczeństwo energetyczne

Wskaźnik zależności energetycznej (The dependency rate) pokazuje stopień, w jakim gospodarka polega na imporcie w celu zaspokojenia swoich potrzeb energetycznych. Mierzony jest udziałem importu netto w krajowym zużyciu energii brutto. Zależność energetyczna UE (2017 rok) wynosi ponad 55%. Bezpieczeństwo energetyczne Unii Europejskiej może być zagrożone, jeśli zbyt duża część importu będzie pochodziła z niewielu źródeł. Tymczasem 2/3 importu ropy spoza Unii pochodziło z Rosji - 30,3%, Norwegii - 11,4%, 8,2% z Iraku, a także Kazachstanu - 7,4% i Arabii Saudyjskiej - 6,6%. Więcej niż połowa ropy naftowej zużywanej w Stanach Zjednoczonych jest importowana i przewiduje się, że odsetek ten wzrośnie w dającej się przewidzieć przyszłości (kraje arabskie, Meksyk). Największe gospodarki świata są zmuszone, aby zapewnić alternatywne paliwo, które może być produkowane na miejscu. Wodór (wraz z biopaliwami) jest uniwersalnym nośnikiem energii, który jest przyjazny dla środowiska, czysty i może być produkowany w całości, w dużych ilościach ze źródeł krajowych. Tradycyjne źródła energii – paliwa kopalne, tj. gaz ziemny i węgiel; energia odnawialna tj. promieniowanie słoneczne, wiatr, pływy i biomasa oraz energia jądrowa mogą być wykorzystana do produkcji wodoru. Jego wykorzystanie jako głównego nośnika energii zapewniłoby światu bardziej zróżnicowany mikst energetyczny i tym samym bezpieczeństwo energetyczne.

## 2.3.2. Środowisko

Zajmując się kwestią bezpieczeństwa energetycznego, należy mieć również na uwadze kwestie środowiskowe. Jakość powietrza jest poważnym problemem niemal na całym świecie, ze szczególnym uwzględnieniem aglomeracji oraz terenów przemysłowych. Według danych WHO poziom zanieczyszczenia powietrza pozostaje niebezpiecznie wysoki w wielu częściach świata, a 9 na 10 osób oddycha powietrzem zawierającym wysokie stężenia substancji zanieczyszczających. Zanieczyszczenie powietrza powoduje ponad 400 000 zgonów rocznie na terenie samej tylko Unii Europejskiej. Szacuje się, że 60% Amerykanów mieszka na obszarach, na których poziom zanieczyszczeń powietrza jest wystarczająco wysoki, aby wpłynąć na zdrowie publiczne i/lub środowisko. Emisja gazów cieplarnianych, takich jak dwutlenek węgla i metan, jest wymieniana jako jeden z głównych czynników



globalnych wpływających na zmiany klimatyczne. Wyjątkową okazją rozwiązania tego problemu byłoby upowszechnienie czystych technologii wodorowych. Jeśli wodór jest produkowany z wody, mamy zrównoważony system produkcji. Elektroliza to metoda rozdzielania wody na wodór i tlen. Energia odnawialna może być wykorzystywana do zasilania elektrolizerów do produkcji wodoru z wody. Korzystanie z energii odnawialnej zapewnia zrównoważony system, który jest niezależny od produktów naftowych i nie zanieczyszcza środowiska. Niektóre z OZE, wykorzystywanych do zasilania elektrolizerów, to energia wiatrowa, wodna, słoneczna i pływów. Po wytworzeniu wodoru w elektrolizerze można go wykorzystać w ogniwie paliwowym do produkcji energii elektrycznej. Produktami ubocznymi procesu ogniw paliwowych są woda i ciepło. Jeśli ogniwa paliwowe działają w wysokich temperaturach, system może być skonfigurowany jako kogenerator, z energią odpadową, wykorzystywaną do ogrzewania.

Zdaniem naukowców nie można mówić o neutralności klimatycznej bez wykorzystania wodoru jako źródła czystej energii. Należy oczywiście pamiętać, że wodór jest źródłem energii pozbawionym emisji, o ile pozyskujemy go w bezemisyjny sposób, np. w procesie elektrolizy zasilanej z wykorzystaniem OZE (tzw. zielony wodór). Nie jest zatem rozwiązaniem wykorzystywanie wodoru szarego (a nawet błękitnego), ponieważ nie zmienia to bilansu zanieczyszczeń – te rodzaje wodoru obarczone są dużym śladem węglowym. Wbrew pozorom, postępująca degradacja środowiska naturalnego, a zwłaszcza negatywne zmiany klimatyczne, w tym ocieplanie się planety, pozwolą na znaczące przyspieszenie implementacji czystych źródeł energii. Aby tak się stało, niezbędne jest zwiększenie środków finansowych na prace R&D z zakresu czystych technologii wodorowych.

### **2.3.3. Gospodarka. Konkurencyjność**

Obfita, niezawodna i przystępna cenowo energia jest niezbędnym elementem zdrowej gospodarki. Gwałtowne wzrosty cen paliw węglowodorowych (ropa, gaz) w trakcie tzw. kryzysów paliwowych, wynikające z nagłego ograniczenia lub przerwania dostaw, szczególnie uderzają w grupy osób o niskich dochodach. Wodór oferuje wyjątkowe możliwości wzrostu efektywności, z jaką wytwarzamy i wykorzystujemy energię. Ponieważ może być wytwarzany z szerokiej gamy zasobów dostępnych w zakładanych miejscach produkcji, możliwe jest znaczące zmniejszenie wpływu efektów zewnętrznych na ceny energii. Sukces techniczny

i ekonomiczny wodorowych systemów energetyki rozproszonej będzie stymulować nowe przedsięwzięcia biznesowe. Elektrownie wodorowe zapewnią ścieżkę rozwoju gospodarczego dla zintegrowanej produkcji usług energetycznych, takich jak energia elektryczna, paliwa transportowe oraz ogrzewanie i chłodzenie. Implementacja modelu gospodarki wodorowej prowadzić będzie niechybnie do tworzenia zaawansowanych technologicznie miejsc pracy w celu budowy i utrzymania systemów energetyki wodorowej.

Każdy przyszły system energetyki wodorowej będzie podlegał preferencjom rynku i konkurencji ze strony innych nośników energii. Wybory dokonywane przez gospodarkę rynkową w zakresie usług energetycznych będą miały wpływ na wykorzystanie wodoru i surowców wodorowych oraz charakter technologii końcowego wykorzystania wodoru. Największą zaletą wykorzystania wodoru jako źródła energii jest jego zdolność do dekarbonizacji różnych gałęzi przemysłu, w tym transportu i energetyki. Jeśli wodór jest produkowany przy użyciu energii ze źródeł odnawialnych, to nie tylko przemysł ulegnie dekarbonizacji, ale cały łańcuch produkcji i wykorzystania wodoru jako źródła energii nie będzie wytwarzał szkodliwych emisji i zanieczyszczeń. Wodór ma znaczny potencjał, aby pomóc w dekarbonizacji wielu gałęzi przemysłu i w związku z tym jest to bardzo atrakcyjna opcja OZE dla wielu krajów i korporacji na całym świecie.

Globalny rynek produkcji wodoru podwoi się w ciągu następnej dekady dzięki aktywnym działaniom rządów, wprowadzających gospodarkę wodorową. Według raportu firmy badawczej Frost & Sullivan globalna produkcja wodoru wzrośnie z obecnych 71 milionów ton do 168 milionów do 2030 roku. Oczekuje się, że przychody na rynku wzrosną z 177,3 mld USD w 2020 r. do 420 mld USD w 2030 roku.

Na drodze do realizacji wizji gospodarki wodorowej istnieją poważne przeszkody. Wyróżnić należy najbardziej fundamentalne wyzwania technologiczne i gospodarcze:

- opracowanie i wprowadzenie opłacalnych, trwałych, bezpiecznych i pożądaných dla środowiska systemów ogni w paliwowych i systemów magazynowania wodoru,
- rozwój infrastruktury zapewniającej wodór dla użytkownika pojazdów lekkich (samochody, motory),
- znaczące obniżenie kosztów produkcji wodoru z odnawialnych źródeł energii (zielony wodór).

## Źródła:

Petroleum Economist – Hydrogen scales up

<http://www.who.int/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

EEA (2017 r.) Air quality in Europe – 2017 report (Jakość powietrza w Europie – sprawozdanie za 2017 r.). Europejska Agencja Środowiska

# 3 Gospodarka wodorowa a przyszłość zawodowa

Gospodarka wodorowa to biznes rozwijający się w zawrotnym tempie. Trzeba patrzeć w przyszłość, myśląc o nowych miejscach pracy, programach edukacyjnych, szkoleniach, które zapewnią przyszłym pracodawcom dobrze opłacaną, wysoko wykwalifikowaną siłę roboczą. Będzie to miało wpływ na zyski i koszty stałe przedsiębiorstwa.

## 3.1. Dostosowanie obecnych gałęzi gospodarki

Sektorem gospodarki, który ulegnie stopniowemu zmniejszeniu, jest górnictwo oraz sektory z nim powiązanie. Z perspektywy Polski aż 8 z 20 największych przedsiębiorstw związanych jest z sektorem wydobywania i jego pochodnymi, generując około 5% PKB. W samym górnictwie zatrudnienie znajduje 150.000 osób i szacuje się, że około 550.000 kolejnych zatrudnionych jest w sektorach bezpośrednio z nim związanych (stan na rok 2019). Rynek pracy wchłonie dużą liczbę pracowników w nowo powstałych gałęziach opierających się na wodorze, niemniej ciężko jest obecnie oszacować skutki ekonomiczne i stopę bezrobocia tego procesu. Osoby zatrudnione w górnictwie często mają bardzo wysokie kompetencje, ale jednocześnie wąskie specjalizacje. Branża górnicza, budując kompetencje wśród specjalistów, oferuje stabilne, wieloletnie ścieżki kariery zawodowej, co wiąże się z długim stażem pracy. Nowa gałąź gospodarki wodorowej bazować będzie na innowacyjności i wyścigu technologicznym. Z definicji musi cechować się dużą elastycznością i zmiennością, więc częsta zmiana pracodawców i warunki zatrudnienia zdecydowanie będą różniły się od standardów, jakie obecnie oferują przedsiębiorstwa górnicze. To może powodować problemy z dostosowaniem się do nowych realiów. Drugim ważnym czynnikiem, który trzeba brać pod uwagę, planując i realizując transformację energetyczną w górnictwie, jest jego lokalność. W regionach tradycyjnie związanych z wydobywaniem mogą powstać „enklawy ubóstwa”, czyli obszary ze wzrostem bezrobocia,

przestępczości czy alkoholizmu. Część osób znajdzie zatrudnienie w „szarej strefie”. Budżety lokalne z jednej strony będą silnie obciążone z tytułu przeciwdziałania wymienionym wyżej negatywnym skutkom, a jednocześnie wpływy z górnictwa będą małe. W celu łagodzenia skutków odejścia od tradycyjnego górnictwa powstał Fundusz Sprawiedliwej Transformacji w ramach funduszy Unii Europejskiej, którego celem jest tworzenie nowych miejsc pracy dla osób odchodzących z górnictwa i branży okołogórnicznej, finansowanie programów przekwalifikowań, dywersyfikacja gospodarcza regionów węglowych, czy naprawa stanu środowiska naturalnego. Program skierowany jest bezpośrednio do obszarów, w których górnictwo miało silną tradycję i jest szansą na rozwój całych regionów. Proces odchodzenia od wydobywania węgla ma charakter oddolny przy współpracy wszystkich zaangażowanych grup społecznych i władz samorządowych. Wykorzystanie środków jest więc sprawą silnie lokalną, niemniej przewiduje się rozwój branż związanych z zieloną energią, zrównoważonym transportem czy też sektorów, które cierpiały dotychczas w wyniku wydobywania węgla, takich jak turystyka.

Odmienna od górnictwa będzie sytuacja w sektorach rafineryjnych i petrochemicznych. Z jednej strony ograniczy się zapotrzebowanie na paliwa ropopochodne, stanowiące główny produkt, z drugiej, na podobnym poziomie pozostanie zapotrzebowanie na tworzywa sztuczne (polietylen, polipropylen itd.) oraz surowce syntezy organicznej (etylen, propylen, toluen, fenol, aceton). Powstający przemysł wodorowy będzie początkowo opierał się na sektorze naftowym z kilku powodów - wodór jest w nim silnie obecny ze względu na wykorzystanie go w syntezie chemicznej amoniaku, metanolu, benzyny czy chlorowodoru i innych procesach związanych z uwodornianiem węgla czy olejów.



Eksperti, którzy już mają duże doświadczenie w pracy z tym pierwiastkiem będą absorbowani do innych, rozwijających się sektorów gospodarki opartej na wodorze, a same rafinerie będą stanowiły doskonałe zaplecze technologiczne z dużym zasobem wiedzy i doświadczenia. Drugim, niezwykle ważnym aspektem jest produkcja wodoru szarego. Obecnie 95% produkcji wodoru pochodzi z paliw kopalnych. Docelowo udział ten ma maleć na korzyść technologii zeroemisyjnych, jednak dynamiczny wzrost zapotrzebowania na wodór spowoduje, że nominalnie więcej wodoru będzie produkowane w rafineriach – przynajmniej w pierwszych latach wdrażania transformacji wodorowej. Sektor petrochemiczny czeka zatem dalszy rozwój i ewolucja w stronę niskoemisyjności. Zapotrzebowanie na węgiel i surowce ropopochodne systematycznie będzie spadało, co dla gospodarek opartych w dużej mierze na tych surowcach będzie niemałym wyzwaniem.

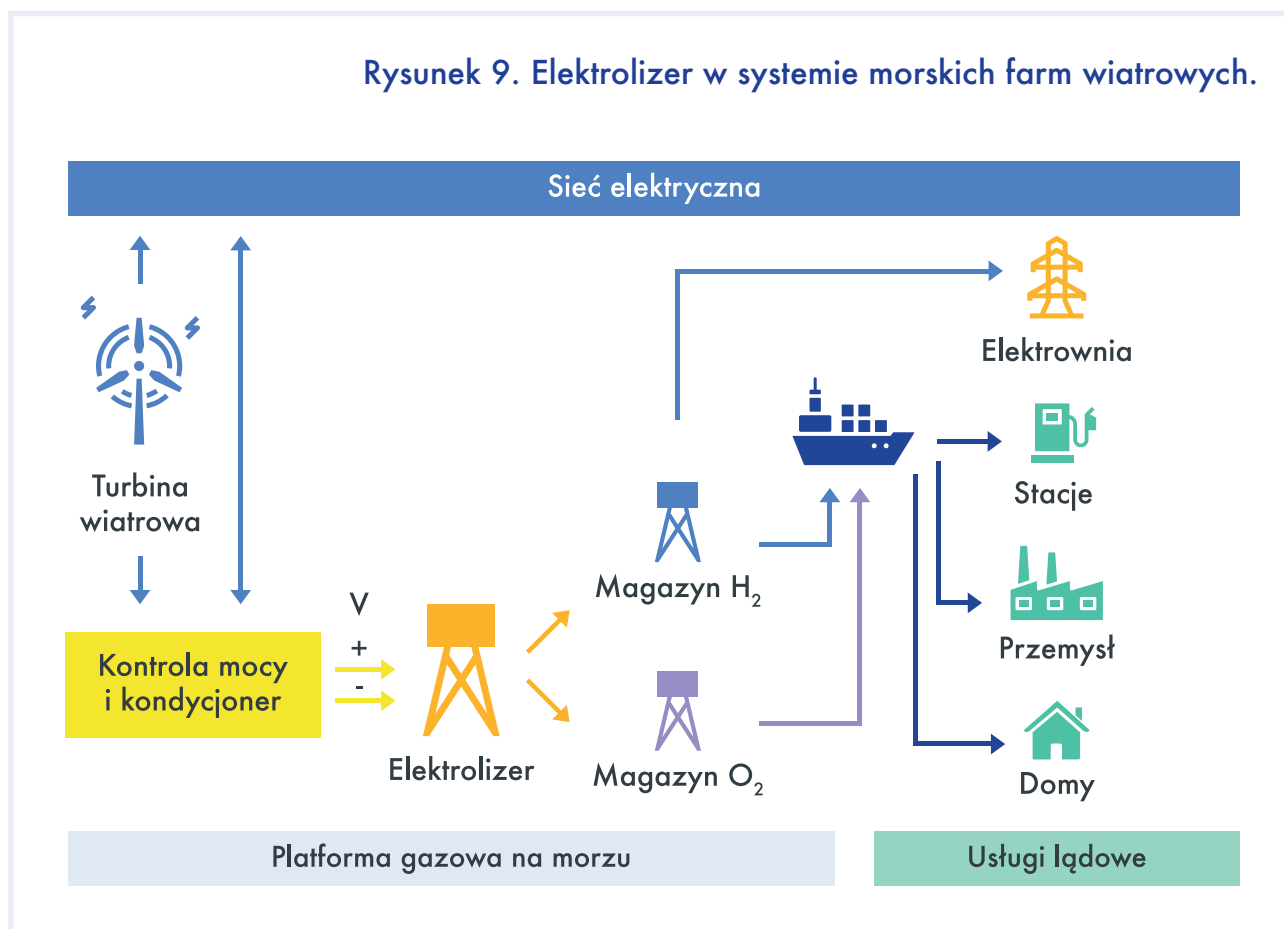
Pozostając jeszcze w sektorach związanych z energetyką należy wspomnieć o odnawialnych źródłach energii, które od dwóch dekad są silnie rozwijane. Dążenie w kierunku gospodarki opartej na wodorze spowoduje przyspieszenie powstawania nowych instalacji, a udział OZE w mikście energetycznym będzie systematycznie rósł. Zapotrzebowanie na energię elektryczną, poza utrzymaniem dodatniego trendu związanego z rozwojem społeczeństwa, powiększone zostanie jeszcze o zapotrzebowanie sektora transportowego. Samochody na wodór, ale także przenośne czy stacjonarne systemy oparte na ogniwach paliwowych, będą miały duży udział w rynku elektroenergetycznym, który dotychczas zaspokajany jest przez paliwa kopalne. Powstające w szybkim tempie nowe instalacje OZE sprawiają, że na rynku pracy zacznie brakować instalatorów, serwisantów, operatorów czy specjalistów od szeroko pojętej elektroenergetyki. Wodór odegra tutaj kluczową rolę, bo z jednej strony bezpośrednio wykorzystywany będzie w sektorze transportowym, ale także, albo przede wszystkim, umożliwi stawianie instalacji w obszarach dotychczas niedostępnych. Plany budowy farm wiatrowych czy fotowoltaicznych na obszarach mało zurbanizowanych napotykać problemy związane z brakiem infrastruktury. Bardzo często brak odpowiedniej sieci przesyłowej skazuje takie projekty na porażkę. Wysokie koszty uzupełnienia sieci energetycznej zmniejszają sens ekonomiczny przedsięwzięcia, a czasami budowa odpowiedniej infrastruktury jest wręcz niemożliwa. Wytwarzanie energii elektrycznej i przetwarzanie jej w procesie elektrolizy na czysty wodór otwiera zupełnie nowe perspektywy. Możliwe będzie wykorzystanie nieużytków rolnych, czy obszarów słabo zurbanizowanych, a potrzebny będzie tylko dostęp do wody. Wodór powstały w ten sposób można albo wykorzystać lokalnie, albo transportować do docelowych odbiorców.

Cały system energetyczny przejdzie więc transformację na bardziej rozproszony (co jest już obserwowane od dekady), a udział prosumentów w sektorze będzie systematycznie wzrastał. Na każdym etapie potrzebni będą jednak specjaliści, przede wszystkim elektrofachowcy; rozwinię się także system wodociągowy oraz stworzy się specjalistyczny rynek dedykowany bezpiecznemu transportowi wodoru. Ponadto, tak dynamicznie rozwijająca się sieć OZE jest znakomitym bodźcem do powiększenia się już istniejących fabryk produkujących panele fotowoltaiczne czy elementy elektrowni wiatrowych. Dodatkowo generuje ekosystem do tworzenia nowych firm, zarówno składających końcowy produkt, jak i dostarczających podzespoły. Cały łańcuch wartości zawiera także osprzęt elektryczny, systemy kontroli, systemy odbioru mocy, ale także badania nowych rozwiązań czy powstanie bazy hotelowo-usługowej, szkoleniowej w miejscach do tej pory marginalizowanych. Lokalne korzyści to też dostarczanie materiałów w pobliżu inwestycji. Co więcej, powiększą się budżety samorządów z tytułu uzyskiwanych przychodów czy dzierżawy gruntów.

Bardzo ważną rolę w rynku OZE będą pełniły morskie farmy wiatrowe. Budowa wiatraków na morzu umożliwia wykorzystanie terytorium przybrzeżnego oraz naturalnie występujących wiatrów. W porównaniu do wiatraków lądowych możliwe jest stawianie na morzu większych jednostek, co oznacza oszczędność miejsca na nowe instalacje, a także stosowanie turbin i generatorów większej mocy - do 10-15 MW. Wodór może odgrywać tutaj kluczową rolę. W momencie, gdy wiatr jest zbyt silny, system energetyczny nie jest w stanie odebrać generowanego prądu, czy to przez ograniczenie sieci przesyłowej. Efektem jest wyłączenie części wiatraków, co wydłuża zwrot inwestycji. Magazynowanie energii w postaci wodoru i budowa zintegrowanego systemu opartego na elektrolizerach i magazynie wodoru, który może pracować w każdych warunkach, wydaje się bardzo dobrym buforem. Technicznie budowa takiego systemu nie jest trudna do skonstruowania i może okazać się opłacalna, tym bardziej, że dostępna na miejscu jest zarówno energia elektryczna, jak i woda niezbędna do elektrolizy. Wzrost opłacalności i stabilność pracy mogą przełożyć się na wzrost zainteresowania inwestorów i szybsze stawianie kolejnych instalacji. Łańcuch wartości zawiera podobne elementy jak OZE budowane na lądzie, trzeba mieć jednak na uwadze gigantyczne wymiary konstrukcji. Łopaty mają ponad 100 metrów długości, a generatory masę kilkuset ton. Spowoduje to rozwój samych portów czy potrzebę budowania statków instalacyjnych, a do tego niezbędne będą badania geologiczne podłoża morskiego. Za każdym z tych elementów stoi człowiek, który ma odpowiednie kwalifikacje i doświadczenie. Warto dodać, że praca przy wiatrakach morskich wymaga

najwyższych uprawnień SEP (Stowarzyszenia Elektryków Polskich), a obsługa serwisowa i konserwacja farm – stałego personelu. Technologie wiatraków morskich oczywiście nie są nowe, ale wraz z transformacją energetyczną będą jeszcze powszechniejsze i docelowo mogą stać się podstawowym elementem przyszłej gospodarki energii odnawialnej. Zastosowanie technologii wodorowych będzie temu sprzyjało.

Rysunek 9. Elektrolizer w systemie morskich farm wiatrowych.



Instalacje wodorowe są rodzajem instalacji gazowych, tak więc silnie rozwinię się także sektor gazownictwa. Gaz ziemny wykorzystywany jest jako paliwo przejściowe do produkcji wodoru, ale sam komponent wodorowy zmusi przedsiębiorstwa do rozwinięcia wśród zatrudnionych wysokich kompetencji związanych z użyciem tego surowca, a to wygeneruje dodatkowe miejsca pracy. Ważną funkcję spełni przesył wodoru, przy którym wykorzystana będzie obecna sieć gazociągów lub nowopowstałe instalacje dedykowane rozwiązaniom wodorowym. Budowa i dostosowanie systemu gazowego wymagać będzie zastosowania wysokiej jakości stali, co z jednej strony stworzy nowe miejsca pracy w hutach czy stalowniach,



a z drugiej kluczowym elementem instalacji będą wysokojakościowe spawy. Specjaliści mający wysokie kompetencje mogą liczyć na bardzo duże zainteresowanie zarówno w mniejszych inwestycjach krajowych, jak i wielkoskalowych projektach międzynarodowych. Wraz z rozwojem i wdrażaniem technologii wodorowej nakładane będą ograniczenia na sektory charakteryzujące się wysoką emisyjnością CO<sub>2</sub>. Powstanie konieczność modyfikacji istniejących systemów do nowych norm. Dążenie do gospodarki zeroemisyjnej to nie tylko korzystanie z czystej technologii, ale także podniesienie sprawności energetycznej poszczególnych urządzeń. Wymagać to będzie sporo pracy, choć nie będzie ona bezpośrednio związana z technologiami wodorowymi.

## 3.2. Tworzenie nowych produktów/ usług

Dzięki tworzeniu i rozwijaniu systemu wydobywania i dystrybucji paliw, technologia rozwijała się w ciągu ostatnich dwóch stuleci szybciej, niż w całej wcześniejszej historii. Rewolucja wodorowa może nie tylko podtrzymać ten trend, ale jeszcze znacząco go wzmocnić. Obecny system budowaliśmy całe dziesięciolecia i jego dostosowanie także zajmie przynajmniej 2-3 dekady, ale docelowo dostępność taniej i czystej energii nie będzie już hamować innowacyjności i nowych przedsięwzięć. W międzyczasie powstaną nowe specjalizacje, produkty i usługi.

W pierwszej kolejności potrzebni będą specjaliści w dziedzinie technologii wodorowych, którzy zajmą się ekspertyzami, audytami, doradztwem technologicznym czy tworzeniem planów rozwojowych przedsiębiorstw. Spowodowane to będzie przede wszystkim dużą ilością możliwych zastosowań wodoru, począwszy od małej elektroniki, poprzez sektor transportowy i budowanie zeroemisyjnych domów pasywnych, kończąc na włączeniu wodoru w system energetyczny. Do każdego zastosowania dedykowane są odpowiednie ogniwa paliwowe czy elektrolizery, a ich końcowa opłacalność zależy od zaprojektowania indywidualnego rozwiązania. Poza specjalistami technologicznymi niezwykle ważny będzie udział prawników odpowiedzialnych za dostosowanie projektów do norm prawnych. Wraz z wdrażaniem technologii wodorowych powstanie wiele firm konsultingowych, łączących wyżej wymienione kompetencje.

Przedsięwzięcia wodorowe będą drogie, a ich stopa zwrotu rozłożona na dłuższy okres. Głównymi aktorami w początkowym etapie będą duże firmy, spółki Skarbu Państwa z branży paliwowo-energetycznej czy też samorządy. Z punktu widzenia tych podmiotów, poza dokładnie przemyślaną strategią długofalową, bardzo ważną kwestią będzie społeczna akceptacja nowych technologii. Brak przyzwolenia społecznego może skutkować problemami dla komercjalizacji i wdrażania nowych rozwiązań, dlatego działań edukacji i marketingu odgrywać musi znaczącą rolę. Powstaną kampanie dedykowane transformacji i technologii energetycznej, ale także media i dziennikarze specjalizujący się w energetyce zaczną pełnić nowe role.

Edukacja jest niezbędna na każdym szczeblu, zaczynając od szkół podstawowych, a na powstawaniu nowych kierunków studiów wyższych kończąc. Z uwagi na fakt, iż wodór jest potencjalnie materiałem niebezpiecznym, niezbędne będą szkolenia w zakresie obsługi urządzeń, a także w instytucjach związanych pośrednio z technologiami wodorowymi, takich jak administracja publiczna, przedsiębiorstwa komunalne czy komunikacyjne.

Poza osobami mającymi wiedzę techniczną, rynek poszukiwać będzie osób z doświadczeniem i tzw. kompetencjami miękkimi, nazywanymi także zdolnościami osobistymi i interpersonalnymi, które także mogą rozwijać gospodarkę wodorową. Tacy liderzy są niezbędni do komercjalizowania rozwiązań wodorowych. Rola doświadczenia będzie tutaj ogromna i możliwe, że wystąpi konieczność sprowadzenia pracowników z krajów mających bardziej rozwiniętą gospodarkę wodorową.

Powstanie rynku wodorowego z jednej strony generować będzie popyt na wodór, a z drugiej relatywnie rosła będzie podaż. Niewątpliwie znajdą się przedsiębiorstwa, które spróbują wykorzystać tę niszę. O ile w ostatnich latach obserwuje się dynamiczny wzrost instalacji fotowoltaicznych i, co za tym idzie, prosumentów, to nic nie stoi na przeszkodzie, aby podobny trend zaistniał przy produkcji wodoru. Tym bardziej, że dostępne będą obszary



obecnie niedostępne ze względu na brak infrastruktury. Wizja, że prywatni właściciele elektrowni fotowoltaicznych łączą swoje instalacje, aby zasilać komunalny elektrolizer/stację paliwową, wydaje się całkiem realna i sensowna. Podobnie z uzyskiwaniem wodoru z biogazu rolniczego czy odpadów komunalnych. Bardzo prawdopodobne będzie powstanie silnie rozproszonej sieci producentów wodoru, tak jak rozproszone są możliwości jego wytwarzania.

Ponieważ systemy wytwarzania wodoru oraz elektryczności mają być zintegrowane i w pewnej części konkurują ze sobą, to krytycznym punktem będzie zarządzanie systemem tak, aby optymalizować efektywność. Oprogramowanie i zautomatyzowanie całej instalacji wymaga zbudowania systemu EMS (ang. Energy Management System) z wbudowanymi algorytmami genetycznymi, uczeniem maszynowym, a że stosowane rozwiązania będą indywidualne w zależności od potrzeb, to cała branża oprogramowania także się powiększy. Wzrośnie również zapotrzebowanie na podzespoły niezbędne do zbudowania Internetu Rzeczy.

Gospodarka wodorowa to innowacyjna gospodarka. Trudno wymienić wszystkie obszary, w których wodór może znaleźć zastosowanie, ale ogniwa paliwowe stosowane będą tak powszechnie, jak dostępny będzie wodór. Robotyka, egzoszkielety, drony-taksówki, autonomiczne pojazdy – te wszystkie rozwiązania zdecydowanie będą preferowały nowoczesne formy zasilania, więc wodór może okazać się elementem napędzającym innowacyjność, a możliwości są wręcz nieograniczone. Zastosowanie ogniw paliwowych będzie powszechne także w urządzeniach dostępnych dzisiaj, takich jak samochody, samoloty, statki. Ten skokowy i globalny wzrost zapotrzebowania na technologie wodorową sprawi, że firma, która opracuje jakieś rozwiązanie dające technologiczną lub ekonomiczną przewagę, będzie miała szansę na globalny sukces. Niekoniecznie musi być to całe ogniwo paliwowe - wystarczy, że wyprodukuje przykładowo lepsze lub tańsze katalizatory, zawory wysokociśnieniowe, filtry czy przepływomierze. Każdy podzespół otwiera drogę do międzynarodowego rynku. Takie środowisko sprzyja powstawaniu start-upów i jednocześnie jest to idealne pole do współpracy jednostek naukowych i przedsiębiorstw w celu rozwijania prac badawczo-rozwojowych. W kontekście rozwoju gospodarczego regionu jednym z podstawowych elementów budowania przewag konkurencyjnych jest skuteczne wykorzystywanie wiedzy, w tym przede wszystkim wyników badań.

Sektorem odnotowującym dynamiczny wzrost związany z wykorzystaniem wodoru jest przemysł kosmiczny. Wodór to podstawowe paliwo zasilające napęd rakiet kosmicznych. Prawdopodobnie pierwszym materiałem wydobywanym w kopalni kosmicznej będzie właśnie woda. Następnie w procesie elektrolizy uzyskamy wodór i tlen, czyli paliwo raketowe. Górnictwo kosmiczne jest bezpośrednio związane z technologiami wodorowymi, a doświadczenie w konstrukcji maszyn górniczych w połączeniu z ogniwami paliwowymi może okazać się specjalizacją przyszłości wielu firm. Reasumując, wodór stwarza wiele obszarów innowacji międzybranżowych, jak również nowe branże i sektory gospodarcze na styku istniejących już specjalizacji. Taka synergia może przynieść wiele korzyści i przekształcić regiony w doliny wodorowe, co jeszcze bardziej sprzyjać będzie innowacji, a jednocześnie pozwoli uzupełnić łańcuch wartości i usprawnić łańcuch dostaw.

### 3.3. Łańcuch wartości

Funkcjonowanie gospodarki wodorowej możemy przedstawić za pomocą łańcucha wartości, w którym poszczególne firmy włączają się w konkretne sektory lub działają międzysektorowo. Taki zintegrowany łańcuch, odnoszący się do produkcji i dystrybucji wodoru, przedstawiono poniżej. Każda część łańcucha generuje wartość dodaną - brak któregośkolwiek ogniw powoduje, że należy korzystać z usług know-how firm zewnętrznych, zagranicznych.

Rysunek 10. Łańcuch wartości gospodarki wodorowej.



Warto dodać, że dostawcy/produccenci nie zawsze faktycznie produkują wszystkie elementy - często korzystają z podwykonawców, co generuje możliwości włączenia się łańcuch wartości. Ze względu na fakt, iż rynek jest na etapie kształtowania się, ważną rolę odegra dział B+R. W tym ogniwie jest miejsce na start-upy, rozwijanie technologii, adaptację istniejących rozwiązań z branż pokrewnych, ale też na projektowanie wyrobów na indywidualne potrzeby, zakupy podzespołów, pozyskiwanie środków finansowych z programów wspomagających rozwój. Produkcja wodoru może reprezentować model wielu dostawców lub scentralizowane wytwarzanie, ale dopiero określenie priorytetów w kwestii koloru wodoru będzie miało przełożenie ze względu na cenę końcową, ale także na zapotrzebowanie odbiorców. Czystość wodoru związana jest z możliwością zastosowania go w różnych urządzeniach, ale także sposobem przesyłu i przechowywania. Magazynowanie, przetwarzanie, logistyka i dystrybucja mogą być ze sobą powiązane, ale także ze względu na specyfikę produktu mogą stanowić zupełnie odrębne ogniwa łańcucha. Marketing i usługi serwisowe mają podobny charakter i wyzwania, jakie występują w innych sektorach gospodarki.

Sprawne działanie łańcucha wartości musi być wspomagane przez odpowiednią infrastrukturę, budowę doświadczonych zespołu ludzi i dużej koncentracji nad podążaniem za rozwojem technologii, szczególnie, że gałąź gospodarki wodorowej będzie silnie innowacyjna. Osobnym punktem jest organizacja łańcucha dostaw na każdym etapie. Wybór modelu skoncentrowanego w jednym państwie/regionie czy sieć globalnie rozproszona może mieć w poszczególnych przedsięwzięciach różne atuty. Biorąc jednak pod uwagę, że gospodarka wodorowa związana jest z bezpieczeństwem energetycznym kraju, należałoby rozwijać wszystkie elementy łańcucha lokalnie. Pandemia COVID-19 pokazała, jak łatwo zerwany może być globalny łańcuch zaopatrzenia, co przełożyło się na zmniejszenie bezpieczeństwa zdrowotnego ze względu na brak środków ochrony osobistej czy wyrobów medycznych. Nagłe przerwanie łańcucha dostaw w gospodarce wodorowej może mieć równie poważne konsekwencje związane z bezpieczeństwem energetycznym.

# 4 Kontekst polityczny i prawny



W przeciągu ostatnich dekad, budowało się polityczne wsparcie niezbędne dla rozwoju technologii wodorowych oraz gospodarki opartej na wodorze. Proces ten rozpoczął się w latach dziewięćdziesiątych XX wieku, a jego najnowszym akcentem jest przyjęcie przez Komisję Europejską pakietu legislacyjnego Fit for 55, który zakłada zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o 55% (względem stanu z 1990 roku) do roku 2030 i zerowej emisji netto do roku 2050 roku. W ostatnich latach bardzo mocno zarysowała się wiodąca rola Unii Europejskiej w światowym wyścigu do bezemisyjnej gospodarki.

## 4.1. Zobowiązania klimatyczne

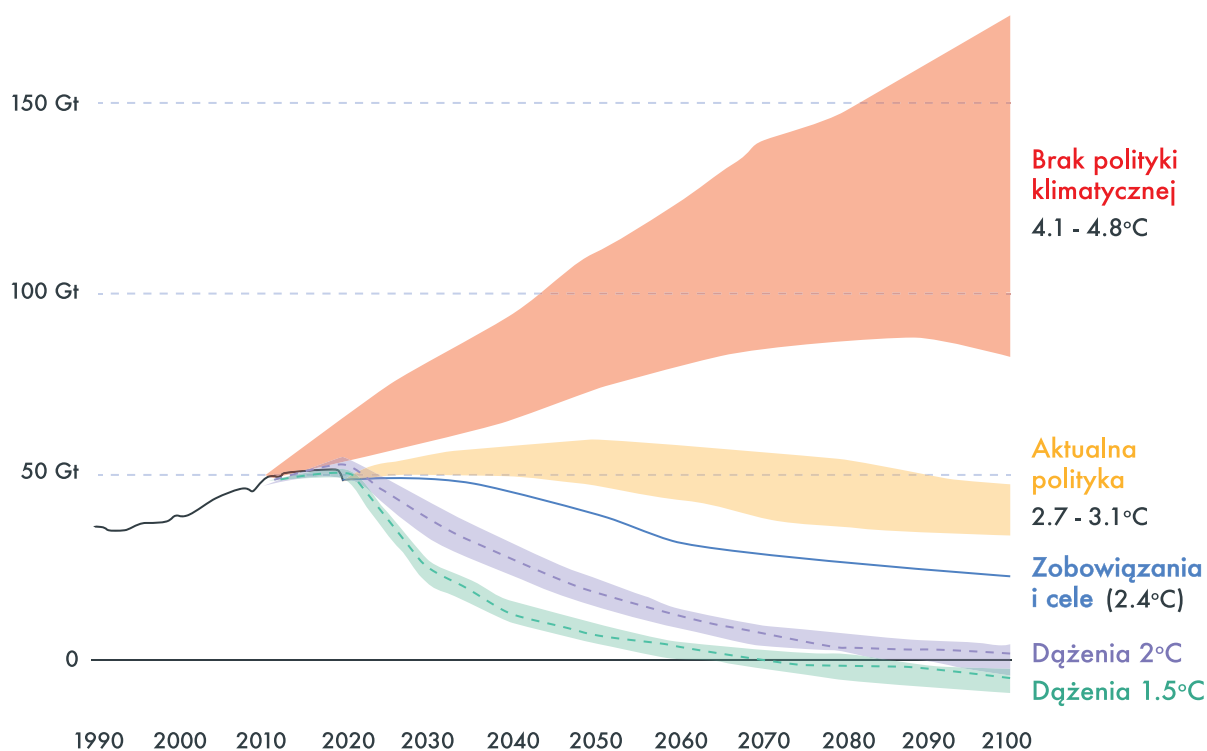
Pierwszą znaczącą inicjatywą na rzecz ochrony środowiska i klimatu była Konferencja Organizacji Narodów Zjednoczonych „Środowisko i Rozwój” (ang. United Nations Conference on Environment and Development, UNCED), zwana potocznie “Szczytem Ziemi”, która odbyła się 3-14 czerwca 1992 roku w Rio de Janeiro z udziałem przywódców i przedstawicieli 162 państw świata oraz wielu organizacji międzynarodowych. Konferencja była ważną inicjatywą, natomiast nie wniosła żadnych wiążących ustaleń w kwestii zobowiązań klimatycznych.

Dopiero trzecia konferencja z tej serii, odbywająca się w Kioto w 1997 roku, uznawana jest za przełomową, bowiem w jej trakcie podjęto konkretne zobowiązania dotyczące ograniczenia emisji. Obecnie uważa się ten podpisany w Kioto akt prawa międzynarodowego za kluczowy dokument z zakresu ochrony środowiska, zawierający ważne zobowiązania państw członkowskich obecnych na UNCED do redukcji emisji (do 2012 roku) oraz instrumenty ekonomiczne służące realizacji tego celu. Strategia obejmuje działania UE do 2020 roku i zakłada m.in. konieczność redukcji emisji CO<sub>2</sub> o 20%. W ten sposób UE wypełnia nałożoną na siebie rolę światowego lidera w ochronie środowiska. Protokół

z Kioto miał wejść w życie po ratyfikacji przez minimum 55 krajów, które odpowiadają za nie mniej niż 55% ogólnoświatowej emisji CO<sub>2</sub>. Pierwszy warunek został osiągnięty stosunkowo szybko, ponieważ jej sygnatariuszami stały się w pierwszej kolejności małe kraje o niewielkim udziale w emisji zanieczyszczeń. Drugi warunek nie został osiągnięty, bowiem z podpisania Protokołu z Kioto wycofały się Stany Zjednoczone, obawiające się zmniejszenia konkurencyjności swojej gospodarki w wyniku przyjętych zobowiązań. Polska ratyfikowała Protokół w 2002 roku jako 10. kraj w kolejności. W 2015 roku 190 krajów przystąpiło do Porozumienia Paryskiego (będącego wynikiem 21. konferencji z serii UNCED), które stało się pierwszym prawnie wiążącym porozumieniem w zakresie ochrony środowiska i klimatu. Sygnatariuszami porozumienia zostali m.in. Chiny, Rosja, Unia Europejska i USA (decyzją polityczną USA najpierw wystąpiły z porozumienia w roku 2017, a następnie do niego powróciły na skutek decyzji prezydenta Joe Bidena).



Rysunek 11. Światowa emisja gazów cieplarnianych w kontekście realizacji celów polityk klimatycznych.



Najważniejsze postanowienia Porozumienia Paryskiego to:

- utrzymanie wzrostu średniej temperatury na świecie znacznie niższego niż 2°C powyżej poziomu sprzed epoki przemysłowej,
- dążenia do ograniczenia wzrostu temperatury do 1,5°C, co pozwoli obniżyć ryzyko i skutki zmiany klimatu,
- konieczność szybkiego osiągnięcia w skali świata punktu zwrotnego – maksymalnego poziomu emisji,
- doprowadzenie do szybkiej redukcji emisji i osiągnięcia równowagi między emisjami a pochłanianiem gazów cieplarnianych.

Unia Europejska dąży do roli światowego lidera w obszarze neutralności klimatycznej i rozwoju OZE. Jednym z pierwszych kroków w tym kierunku były cele postawione w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE (tzw. Pakiet klimatyczno-energetyczny na rok 2020).

- 20% ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w UE w stosunku do poziomów z 1999 r.,
- 20% poprawa wydajności energetycznej UE,
- 20% energii UE ze źródeł energii odnawialnej (wiatrowej, słonecznej, biomasy).

Kolejnym krokiem, poczynionym w 2019 roku, było przyjęcie przez Radę Europejską celu neutralności klimatycznej w 2050 r.

Jednakże za najbardziej kluczowy i kompleksowy program, zawierający wizję gospodarki neutralnej klimatycznie, uznaje się Europejski Zielony Ład, który został opublikowany w dokumencie Czysta Planeta dla Wszystkich i zaprezentowany 28 listopada 2018 roku. EZŁ opiera się na ośmiu kierunkach działań strategicznych, tj.:

- Klimat
- Energia
- Rolnictwo



- Przemysł
- Środowisko i oceany
- Transport
- Finanse i rozwój regionalny
- Badania naukowe i innowacje.

## 4.2. Europejski Zielony Ład

### 4.2.1. Geneza, wizja i kierunki Europejskiego Zielonego Ładu

Najważniejszą inicjatywą UE w zakresie polityki klimatycznej jest Europejski Zielony Ład (EZŁ). Transformacja energetyczna postępuje w bezprecedensowym tempie. W raporcie Międzynarodowej Agencji Energetycznej Renewables 2020 wskazano rok 2025, w którym produkcja energii z odnawialnych źródeł energii będzie wyższa, niż produkcja energii z węgla. Szacuje się, że ponad 50% energii pochodzić będzie z elektrowni wodnych, a reszta z pozostałych źródeł odnawialnych z przewagą elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych. Inne scenariusze wskazują, że udział OZE w sektorze energetycznym wyniesie 30-45% do 2040 roku oraz 50-70% do roku 2050 („The Geopolitics of Renewable Energy “). Bez względu na to, który ze scenariuszy okaże się prawdziwy, należy odnotować, że dywersyfikacja źródeł energii w mikście energetycznym jest faktem. Wynika to nie tylko z decyzji inwestycyjnych, realizowanych przez przedsiębiorstwa głównych gospodarek na świecie, ale również ze stymulacji regulacyjnych rządów krajów rozwiniętych (i równocześnie największych emitentów) oraz Unii Europejskiej, której ambicją jest stanie się liderem w obszarze neutralności klimatycznej i rozwoju OZE.

## 4.2.2. Neutralność klimatyczna do 2050 roku

Nowy Zielony Ład w wydaniu zaproponowanym przez Komisję Europejską skupia się na podstawowym i głównym celu – do 2050 r. Europa stanie się neutralna dla klimatu. Oznacza to, że do 2050 roku państwa członkowskie będą emitować tyle gazów cieplarnianych, ile są w stanie pochłoniąć. Źródłami emisji są przede wszystkim:

- energetyka – 30% emisji (+8% wydobyć),
- przemysł – 20%,
- transport – 20%,
- budowa i eksploatacja budynków mieszkalnych, biurowych i handlowych – 10%,
- wylesianie i spalanie biomasy – 10%.

W praktyce oznacza to, że do 2050 roku niemal wszystkie sektory będą musiały być zdekarbonizowane. Oczywiście produkcja energii zmieni się w pierwszej kolejności, ponieważ wszystkie scenariusze prowadzące do neutralności klimatycznej zakładają całkowite wycofanie się z węgla przy jednoczesnym zastąpieniu energii z paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii.

Podnieść w tym miejscu należy kwestie energii atomowej, ponieważ część państw chce jej likwidacji lub ograniczenia, a część wprost przeciwnie – niektóre państwa się z niej wycofują (np. Niemcy, Belgia), tymczasem inne (np. Francja) zmniejszają lub planują zmniejszać udział atomu w mikście energetycznym, a jeszcze inne (np. Polska, Rumunia) planują budowę nowych instalacji atomowych. Dekarbonizacja niektórych sektorów gospodarki może być bardzo problematyczna i kosztowna (koszty zarówno finansowe, jak i społeczne). Aby zmniejszyć emisję w rolnictwie, konieczne będzie zmniejszenie ilości produktów odzwierzęcych w diecie (hodowla bydła odpowiada za większość emisji w sektorze). Rolnictwo ma olbrzymi potencjał w zakresie ograniczania emisji, począwszy od wykorzystania innowacyjnych technologii, po poprawę wydajności w sposobie hodowli zwierząt gospodarskich.

Dekarbonizacja w transporcie opierać się musi na rozwoju ekologicznego transportu zbiorowego, promocji samochodów elektrycznych i wodorowych oraz zmianach w

transporcie lotniczym, co jest szczególnie trudne z uwagi na niewystarczający postęp technologiczny w tym zakresie. Zakłada się więc z góry, że niektóre gałęzie przemysłu nie będą mogły ulec niezbędnym przekształceniom - w związku z tym pozostaje możliwość absorpcji CO<sub>2</sub> z atmosfery. Technologia CCS (carbon capture and storage), czyli sekwestracja dwutlenku węgla, może pozwolić na przechwytywanie części emisji z instalacji (na przykład z instalacji przemysłowych) lub wprost z atmosfery (np. w najbardziej zanieczyszczonych obszarach aglomeracyjnych). Obecnie technologia ta nie jest doskonała i nie wiadomo, czy kiedykolwiek będzie możliwa do powszechnego zastosowania. Stosunkowo łatwe i tanie jest wykorzystanie lasów do celów masowego przechwytywania CO<sub>2</sub>. Konieczne więc będzie zwiększenie zalesienia kontynentu oraz skuteczne zarządzanie istniejącymi lasami. Wydaje się, że lasy mogą pochłonąć jedynie niewielką część europejskich emisji (według różnych szacunków nie więcej niż 11% emisji CO<sub>2</sub>). Z drugiej strony zdaniem ONZ rolnictwo, leśnictwo i zmiany użytkowania gruntów łącznie przyczyniają się do 21% globalnej emisji gazów cieplarnianych.

Podsumowując, neutralność klimatyczna jest możliwa do osiągnięcia - będzie jednak wymagać nie tylko ogromnych nakładów inwestycyjnych (w OZE oraz modernizację wszystkich gałęzi przemysłu), ale również zmiany stylu życia Europejczyków – w tym zmiany diety, przyzwyczajeń związanych z codziennym transportem, zmiany wzorca zachowań, a nawet ograniczenia podróży międzynarodowych.



### 4.2.3. Szanse płynące z Europejskiego Zielonego Ładu

Aby osiągnąć cele wyznaczone w Europejskim Zielonym Ładzie zaplanowano dokonanie w kolejnym dziesięcioleciu zrównoważonych inwestycji o wartości co najmniej 1 bln euro. 30% budżetu UE (na lata 2021–2028) oraz instrumentu NextGenerationEU (NGEU) ustanowionego do wsparcia gospodarki po pandemii COVID19, przeznaczone zostanie na inwestycje ekologiczne. Dodatkowo kraje UE muszą przeznaczyć 37% środków otrzymanych w ramach instrumentu na rzecz Odbudowy i Zwiększania Odporności na cele klimatyczne. Zaplanowano emisję zielonych obligacji, poprzez które Komisja Europejska chce zebrać 30% funduszy w ramach NGEU. Wprowadzono plan inwestycyjny na rzecz Europejskiego Zielonego Ładu, co również będzie stanowić potężny impuls do zielonego rozwoju gospodarczego krajów wspólnoty. Szacuje się, że suma wszystkich środków finansowych, przeznaczonych na realizację EZŁ, które zbierze Komisja Europejska, osiągnie wartość 1,8 bln euro. Polska będzie mogła skorzystać z ponad 776 mld PLN wsparcia, w tym 623 mld PLN jako dotacje i 153 mld PLN jako pożyczki, z czego, zgodnie z powyższymi proporcjami, około 30% wspomaga transformację i zielone inwestycje. Komisja Europejska zaplanowała wykorzystać walkę z negatywnymi zmianami klimatu jako koło zamachowe dla gospodarki. Dodatkowo zapowiada się współpraca między Chinami i USA w celu stawienia czoła kryzysowi klimatycznemu (na te dwa kraje przypada prawie 50% emitowanych do atmosfery pyłów i gazów cieplarnianych powodujących ocieplanie się klimatu). Ma to oczywisty związek z powrotem Amerykanów do Porozumienia Paryskiego, z którego Stany Zjednoczone wycofał poprzedni republikański prezydent Donald Trump.

### 4.2.4 Inicjatywy proponowane w ramach Zielonego Ładu

Do celów realizacji założeń Europejskiego Zielonego Ładu Komisja Europejska zaproponowała szereg inicjatyw i narzędzi:

1. **Europejskie prawo klimatyczne** – jest rozporządzeniem unijnym i każde państwo członkowskie ma obowiązek przestrzegania jego przepisów; określa m.in. prawnie

wiążące cele neutralności klimatycznej UE do 2050 roku oraz redukcji emisji o 55% do 2030 roku (w porównaniu z 1990 rokiem).

2. **Unijna strategia na rzecz bioróżnorodności 2030** – strategia jest długoterminowym planem mającym na celu ochronę przyrody i odwrócenie procesu degradacji ekosystemów.
3. **Strategia „od pola do stołu”** - strategia zakłada ewolucję obecnego systemu żywnościowego UE na model zrównowazony, co pozwoli pomóc osiągnąć neutralność klimatyczną do 2050 r.
4. **Europejska strategia przemysłowa i plan działania dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym** – Komisja Europejska opublikowała założenia nowej unijnej strategii przemysłowej, która ma prowadzić i umożliwić transformację ekologiczną i cyfrową, a unijny przemysł uczynić bardziej konkurencyjnym na arenie międzynarodowej. Głównym podmiotem strategii jest sektor MŚP, w tym przedsiębiorstwa w fazie start-up. W zamyśle komisji sektor MŚP ma być głównym motorem innowacji w różnych ekosystemach.
5. **Mechanizm sprawiedliwej transformacji** – UE wprowadziła mechanizm sprawiedliwej transformacji, by finansowo i technicznie wesprzeć regiony, które w największym stopniu ucierpią w wyniku przechodzenia w kierunku zielonej gospodarki. Planuje się przeznaczenie 100 mld EUR na lata 2021–2027 z przeznaczeniem na łagodzenie społecznych i gospodarczych skutków transformacji, skupiając się na regionach, gałęziach przemysłu i pracownikach dotkniętych największymi problemami.
6. **Czysta, przystępna cenowo i bezpieczna energia** – według różnych danych, na które powołuje się Komisja Europejska, największym emitentem gazów cieplarnianych w UE jest sektor energetyczny, a więc kluczową rolę w dążeniu do neutralności klimatycznej UE odgrywa modernizacja sektora w kierunku dekarbonizacji.

W ramach instrumentu unijni ministrowie energii przyjęli konkluzje, obejmujące dostępne źródła czystej energii:

#### **Energia z morskich źródeł odnawialnych:**

- pływające morskie farmy wiatrowe

- farmy wiatrowe
- instalacje energii fal i pływów oceanicznych
- pływające instalacje fotowoltaiczne
- wykorzystanie alg do produkcji biopaliw

## **Wodór.**

Wodór, gdy jest produkowany z odnawialnych źródeł energii, nie emituje węgla, a zatem pomaga w dekarbonizacji gospodarki. Wodór jest postrzegany jako nośnik energii przyszłości, który może pomóc w dekarbonizacji sektorów o wysokiej emisji, takich jak przemysł energochłonny i transport. Komisja Europejska przyjęła swoją strategię dotyczącą wodoru w lipcu 2020 r. i wskazała wodór jako priorytet inwestycyjny w unijnym planie odbudowy. Zainicjowała europejski sojusz na rzecz czystego wodoru angażujący przemysł, społeczeństwo obywatelskie oraz władze krajowe i regionalne, aby wspierać inwestycje i pobudzać popyt w sektorze energetycznym. W konkluzjach z grudnia 2020 r. Rada uznała ważną rolę, jaką wodór, zwłaszcza wodór ze źródeł odnawialnych, odgrywa w:

- osiągnięciu celów UE w zakresie dekarbonizacji,
- osiągnięciu ożywienia gospodarczego w kontekście COVID-19,
- przyczynianiu się do konkurencyjności UE na arenie światowej.

**7. Unijna strategia w zakresie chemikaliów na rzecz zrównoważoności** – instrument ten, będący integralną częścią EZŁ, pozwoli zapewnić środowisko pozbawione toksycznych substancji, co pozwoli na lepszą ochronę ludzi oraz środowiska naturalnego. Strategia zakłada także wsparcie konkurencyjności przemysłu chemicznego. Strategia postuluje wprowadzenie zakazu stosowania szkodliwych substancji chemicznych w produktach przeznaczonych dla konsumentów, ze szczególnym uwzględnieniem produktów takich jak m.in.: zabawki, kosmetyki, artykuły pielęgnacyjne dla dzieci, meble, detergenty, tekstylia lub materiały mające kontakt z żywnością.

**8. Zrównowazona i inteligentna mobilność** – dokument określa 82 konkretne inicjatywy w ramach planu działań realizowanego przez 4 lata. Realizacja strategii przyczyni się do stworzenia neutralnego klimatycznie, cyfrowego i odporniejszego europejskiego systemu

transportu. Dokument zawiera 10 kamieni milowych z założeniem ich osiągnięcia kolejno do 2030, 2040 i 2050 roku. Kamienie milowe zakładają m.in. neutralność klimatyczną miast, zwiększenie znaczenia transportu kolejowego, radykalny wzrost liczby samochodów elektrycznych, wprowadzenie do użytku zeroemisyjnych samolotów i statków.

## Źródła:

Konkluzje Rady Europejskiej z 12 grudnia 2019 r.

Art. 2 pkt 1 lit. a Porozumienia Paryskiego

Komunikat Europejski Zielony Ład [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0016.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF)

Komunikat Czysta Planeta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/pl/TXT/?uri=COM:2018:0773:FIN>

Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/852 z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie ustanowienia ram ułatwiających zrównoważone inwestycje, zmieniające rozporządzenie (UE) 2019/2088  
link: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32020R0852>

Konkluzje Rady Europejskiej z 11 grudnia 2020 r.

<https://www.gov.pl/web/fundusze-regiony/europejski-zielony-lad-szanse-dla-polskiej-gospodarki>

<https://www.isp.org.pl/pl/publikacje/zielony-lad-dla-europy-uwarunkowania-narzedzia-perspektywy>

<https://serwisy.gazetaprawna.pl/ekologia/artykuly/8209397,pakiet-klimatyczny-europejski-zielony-lad.html>

<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>

# 5 Pozyskiwanie wodoru



Wodór jest pierwszym, najprostszym i najlżejszym pierwiastkiem chemicznym układu okresowego, jest też najpowszechniejszym składnikiem we Wszechświecie – stanowi około 75% całkowitej masy materii.

Na Ziemi rzadko występuje jednak w formie cząsteczkowej i niezwiązanej. Najlepszym przykładem powszechności wodoru jest ludzkie ciało, gdzie wodór jest co 3 pierwiastkiem i znajduje się w postaci wody, węglowodanów, tłuszczu, białek, kwasów nukleinowych, witamin oraz hormonów, ponadto w przyrodzie istnieje niezliczona ilość związków zawierających wodór. Tak różnorodne i powszechne występowanie wodoru sprawia, że powstało kilka metod pozyskiwania tego surowca. Obecnie 96% światowego wodoru produkuje się z paliw kopalnych – ok. 48% z gazu ziemnego, 30% z ropy naftowej oraz ok. 18% z węgla w procesach emisyjnych CO<sub>2</sub>.

Ponieważ cała transformacja energetyczna ma sprzyjać uzyskaniu neutralności klimatycznej, to nadano kolory procesom produkcyjnym wodoru na podstawie ilości emisji gazów cieplarnianych. Pomimo że sam wodór zawsze jest bezbarwnym i bezwonny gazem, to najbardziej pożądanym jest tzw. wodór zielony – wytworzony przy wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii. Z drugiej strony skali jest wodór w odcieniach szarości i czerni – czyli uzyskiwany z gazu ziemnego czy węgla, z dużym śladem węglowym dla środowiska. Wspomniane wcześniej 96% obecnej produkcji wodoru na świecie jest zaszeregowane w ciemnych kolorach. Strategie poszczególnych krajów koncentrują się z jednej strony na zwiększeniu całej gospodarki wodorowej i jednocześnie wspierają rozwiązania produkcji nisko i zeroemisyjnej. Należy się spodziewać, że w najbliższej dekadzie udział zielonego wodoru znacząco wzrośnie.



## 5.1. Reforming parowy i częściowe utlenianie

Produkcja wodoru za pomocą reformingu parowego (SMR, ang. Steam reforming lub steam methane reforming) jest najpowszechniejszą i najtańszą metodą. Wykorzystuje ona gaz ziemny, który podgrzewany jest do temperatury 700-1100°C w obecności pary wodnej. W tej temperaturze zachodzi endotermiczna reakcja rozbitcia metanu i uzyskanie tlenku węgla oraz wodoru. Katalizatorem zazwyczaj jest nikiel:

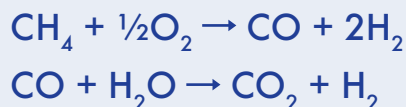


W drugim kroku, w temperaturze około 360°C uzyskuje się dodatkowo wodór, wykorzystując tlenek węgla pozostały z pierwszej reakcji:



Proces ten jest najtańszy, ale jednocześnie wysoce zanieczyszczony z dwóch powodów. Przede wszystkim generuje około 9 kg CO<sub>2</sub> (nawet do 12kg, w zależności od składu gazu ziemnego) na każdy kilogram wodoru, z drugiej strony uzyskany wodór należy oczyścić z tlenku węgla, dwutlenku węgla oraz pozostałych składników gazu ziemnego, szczególnie związków siarki.

Alternatywą dla reformingu parowego jest częściowe utlenianie. Metan i inne składniki gazu ziemnego reagują w atmosferze ubogiej w tlen. Ilość dostarczanego tlenu nie wystarcza do całkowitego utlenienia węglowodorów do dwutlenku węgla i wody. Niższa stechiometria preferuje produkty składające się głównie z tlenku węgla oraz wodoru, natomiast w mniejszym stopniu inne związki. W dalszym etapie także wykorzystywany jest drugi proces, identyczny jak z reformingiem parowym. Reakcje możemy zapisać:



Z reakcji wynika, że przy tym samym paliwie uzyskiwane jest mniej wodoru, niż w reformingu parowym. Z drugiej strony częściowe utlenianie jest znacznie szybszym procesem i wymaga mniejszego reaktora.

Uzyskany z gazu ziemnego w tych procesach wodór oznaczony jest **kolorem szarym**. Istnieje możliwość wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (CCUS ang. Carbon Capture, Utilization, and Storage) - wówczas wodór przyjmuje umowny kolor  **błękitny/ niebieski**.

## 5.2. Gazyfikacja węgla

**Czarny wodór** wykorzystuje węgiel jako główne paliwo. Pod względem chemicznym potocznie rozumiany węgiel (nie pierwiastek) jest silnie zmienną substancją występującą w różnych związkach. Zagazowanie jest procesem, w którym węgiel miesza się w obecności tlenu oraz pary wodnej w wysokiej temperaturze i pod wysokim ciśnieniem. Powstaje gaz syntetyczny, składający się z tlenku węgla, dwutlenku węgla, wodoru oraz innych produktów.



W kolejnych krokach ekstrahuje się tlenek węgla z mieszaniny i podobnie, jak w reformingu parowym, w obecności pary wodnej możliwe jest uzyskanie dodatkowej ilości wodoru. **Czarny wodór** także może być zmieniony w **niebieski**, jeżeli w procesie produkcji wychwytywany będzie dwutlenek węgla. Należy podkreślić, że na każdy kilogram wodoru uzyskanego w procesie gazyfikacji węgla przypada aż 20 kg CO<sub>2</sub>.

## 5.3. Biomasa

Do uzyskania wodoru można, zamiast paliw kopalnych, wykorzystać biomasę, przykładowo z organicznych odpadów komunalnych, czy pozostałości z hodowli zwierząt i upraw rolniczych. Produkcja wodoru może przebiegać na drodze podobnej do reformingu parowego lub na drodze zagazowania. Przykładowe reakcje można zapisać:

### Gazyfikacja glukozy:



### Reforming parowy etanolu:



Ponieważ w trakcie uprawy biomasy wychwytywany jest dwutlenek węgla z atmosfery, to emisja netto CO<sub>2</sub> przy produkcji wodoru w tej metodzie jest niska. O ile wpływ na środowisko jest dużo korzystniejszy (szczególnie przy wykorzystaniu CCUS), to niestety koszty produkcji wodoru w ten sposób są znacznie wyższe, niż przy wykorzystaniu paliw kopalnych. Wytwarzanie wodoru z biomasy zostało oznaczone kolorem **turkusowym**.

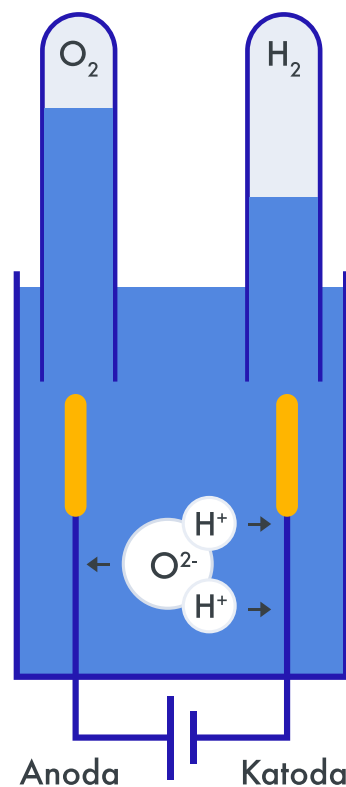
## 5.4. Elektroliza wody

Do produkcji wodoru można wykorzystać elektrolizę wody, czyli proces wykorzystywania energii elektrycznej do rozdzielenia wody na wodór i tlen. W najprostszej postaci elektrolizer składa się z dodatnio naładowanej anody i ujemnie naładowanej katody. Po przyłożeniu napięcia każda z elektrod przyciąga przeciwnie naładowane do siebie jony. W przypadku wody H<sub>2</sub>O będzie to jon wodoru H<sup>+</sup>, przyciągany przez katodę oraz jon tlenu O<sup>-</sup>, dążący do anody.

Dla układu idealnego, bez żadnych strat, minimalne napięcie potrzebne do rozerwania cząsteczki wody wynosi 1.48 V. Ze wzoru strukturalnego widać, że w procesie tym uzyskiwane są dwa atomy wodoru na jeden tlenu - nie powstaje żaden inny produkt. Wodór uzyskany w ten sposób ma wysoką czystość. Do produkcji wodoru potrzebny jest tylko prąd elektryczny i woda. **Zielony wodór** powstaje w wyniku zasilania energią elektryczną, wytwarzaną ze źródeł odnawialnych, takich jak woda, wiatr czy słońce. Zakładając, że energia elektryczna pochodzi wyłącznie z odnawialnych źródeł energii (i jeśli używana jest woda słona, to proces odsalania jest w 100% zasilany energią słoneczną i wiatrową), emisje gazów cieplarnianych podczas procesu produkcyjnego są równe zero. W przypadku wykorzystania nadwyżki energii elektrycznej, powstałej w elektrowni jądrowej, wodór przyjmuje kolor **fioletowy** i także nie występuje ślad węglowy w procesie jego wytwarzania. Jeżeli elektrolizer zasilany będzie po prostu z sieci elektrycznej o mieszanym pochodzeniu to mowa jest o **wodorze żółtym**. Ten ostatni kolor charakteryzuje się szczególnie wysoką emisją dwutlenku węgla. Odpowiednio 18 kg CO<sub>2</sub> oraz 40 kg CO<sub>2</sub> na każdy kilogram wodoru przy produkcji prądu z gazu ziemnego i węgla.

Ważną cechą wodoru produkowanego w elektrolizerach jest jego czystość. Ponieważ w reakcji uczestniczy tylko woda, to uzyskiwany wodór nie jest zanieczyszczony substancjami węglowymi czy siarkowymi i może być bezpośrednio magazynowany i używany w ogniwach paliwowych.

Rysunek 12. Elektroliza wody.



## 5.5. Inne metody pozyskiwana wodoru

**Termochemiczne rozdzielanie wody** – polega na uzyskaniu wysokiej temperatury 500-2000°C, niezbędnej do szeregu reakcji chemicznych, w których powstaje wodór. Użyte substraty tworzą zamknięty cykl i zużywana jest tylko woda.

**Foto-elektro-chemiczne rozdzielanie wody** – metoda wykorzystująca półprzewodniki, które wykorzystują energię świetlną do bezpośredniej dysocjacji cząstek wody na wodór i tlen.

**Procesy fotobiologiczne** – wykorzystanie procesów biologicznych występujących naturalnie w środowisku. Mikroorganizmy, takie jak zielone mikroalgi lub sinice, pod wpływem światła słonecznego rozszczepiają cząsteczki wody.

**Mikrobiologiczna konwersja biomasy** – ta metoda oparta jest na fermentacji. Wykorzystuje bakterie i drobnoustroje, które rozkładają materię organiczną i jednocześnie uwalniają wodór. W procesie tym nie jest potrzebne światło, więc czasami nazywany jest metodą „ciemnej fermentacji”.

## 5.6. Koszty produkcji wodoru

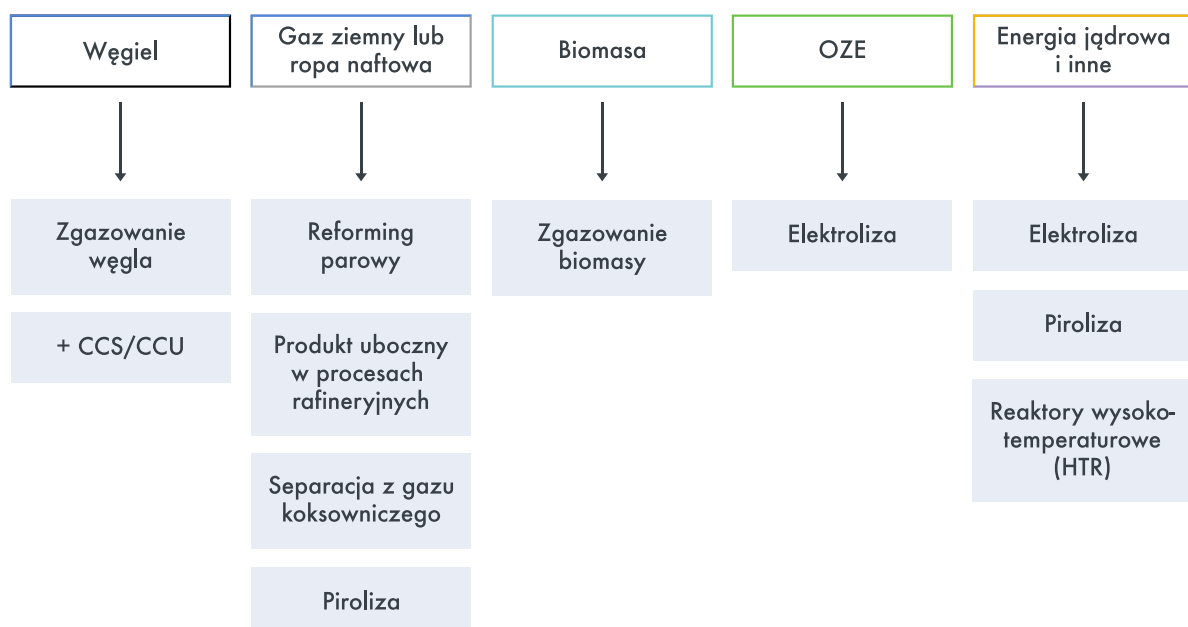
Rozpowszechnienie rozwiązań wodorowych musi być poparte ich ekonomiczną opłacalnością. Troska o środowisko wpływa znacząco na końcową cenę produkcji wodoru - z jednej strony poprzez nakładanie podatków za emisję gazów cieplarnianych, z drugiej strony poprzez ulgi i zachęty promujące rozwiązania nisko- i zeroemisyjne. Innym czynnikiem, wpływającym na wysokość kosztów produkcji wodoru, jest dojrzałość rynku odbiorców wodoru i dostępność technologiczna wykorzystania wodoru, a także dostępność surowców, z których wodór ma być produkowany. Z informacji tych wynika dość duże zróżnicowanie cenowe produkcji wodoru dla różnych regionów geograficznych. Średnie ceny wodoru zielonego wynoszą 3-5 USD/kg, niebieskiego 2 USD/kg i szarego 1,5 USD/kg. Bardziej szczegółowe dane zebrano na rysunku 8.<sup>2</sup> Należy jednak pamiętać, że rynek wodorowy dynamicznie się rozwija i ceny będą się bardzo zmieniały. Docelowo szacuje się,

	Gaz ziemny	Gaz ziemny + CCUS	Węgiel	Węgiel + CCUS	Elektroliza z sieci elektrycznej	Elektroliza z OZE
<b>USA</b>	1 \$	1,5 \$	1,1-1,34 \$	1,47-1,63 \$		
<b>UE</b>	1,7 \$	2,4 \$			4,84 \$	2,87 \$
<b>Polska</b>	7 zł		5,5-6,5 zł			

że cena wodoru zielonego będzie dążyć do 1 USD/kg w roku 2050, przy czym w latach 20 nastąpi gwałtowny spadek do poziomu ok. 2 USD/kg.<sup>2</sup>

Ceny wodoru zielonego opatrzone są dużą rozpiętością, wynika to z faktu, że jeszcze nie ma dużych instalacji do wytwarzania wodoru z elektrolizy. Łączna moc elektrolizerów pracujących w roku 2019 jest w granicach 200-250 MW, przy czym niewiele instalacji przekraczało moc 1MW. Rynek wodorowy jest obecnie na etapie wstępnym, gdzie dominują rozwiązania prototypowe i demonstracyjne, a rozbudowa infrastruktury będzie nabierała tempa do roku 2030.

Rysunek 13. Metody wytwarzania wodoru i jego kolory.



Dopiero po tym terminie nastąpi gwałtowny rozwój gospodarki wodorowej, natomiast na chwilę obecną trudno jest oszacować, czy rozpowszechnią się na dużą skalę rozwiązania wodoru niebieskiego, czy od razu przejdziemy do epoki technologii wodoru zielonego. Tak czy inaczej szacuje się wzrost zapotrzebowania na wodór z obecnych 115 Mt do poziomu 800 Mt rocznie, co stanowić będzie około 15-20% zapotrzebowania na energię w roku 2050.<sup>3</sup>

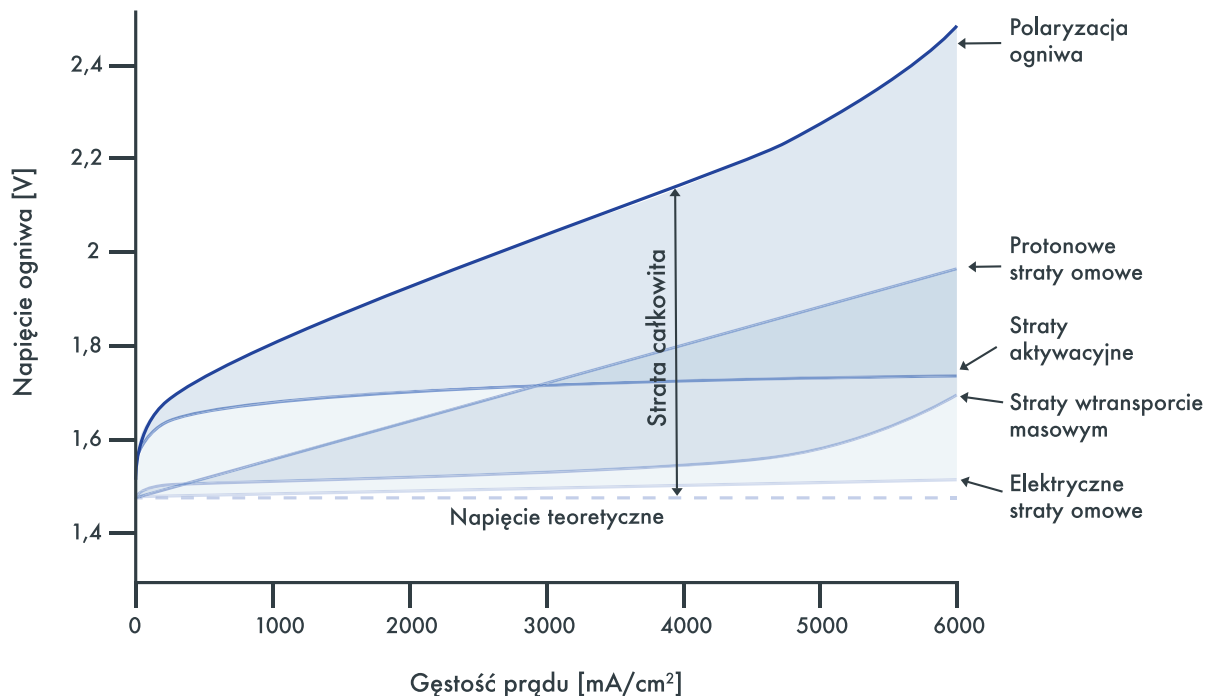
## **5.7. Rodzaje elektrolizerów**

Elektrolizery mogą mieć różne rozmiary - od małych urządzeń, które są dobrze przystosowane do rozproszonej produkcji wodoru na małą skalę, po wielkoskalowe, centralne zakłady produkcyjne, które mogą być bezpośrednio powiązane z odnawialnymi lub innymi, nieemitującymi gazów cieplarnianych formami produkcji energii elektrycznej. Reakcja zachodząca w elektrolizerach jest tą samą reakcją, co w ogniwach paliwowych, zmienia się tylko jej kierunek. Budowa, zalety i ograniczenia elektrolizerów i ogniw paliwowych będą więc w dużej części się pokrywać. Bardziej szczegółowe opisy elektrolizerów znajdują się w kolejnych podrozdziałach, natomiast informacje o ogniwach paliwowych opisane są w rozdziale 9.

Najprostszy elektrolizer składa się z katody i anody oraz z elektrolitu, znajdującego się między nimi. Podobnie jak ogniwa paliwowe, elektrolizery można łączyć w stosy, uzyskując w ten sposób większą gęstość prądu i wyższą wydajność.

W przypadku ogniw paliwowych teoretyczne napięcie wynosi 1.23 V i spada wraz ze stratami na poszczególnych elementach ogniwa. Dla elektrolizerów sytuacja jest odmienna. Przede wszystkim woda jest w postaci ciekłej, a nie gazowej, więc bazowe napięcie, które należy przyłożyć, wynosi 1,48 V. Straty powodują, że żeby reakcja elektrolizy zaszła, należy przyłożyć wyższe napięcie - około 2 V. Podobnie, jak dla ogniw paliwowych, straty można przedstawić na wykresie prądowo-napięciowym.

Rysunek 14. Krzywa polaryzacji i rejony strat napięcia.



### 5.7.1. Elektrolizer typu PEM

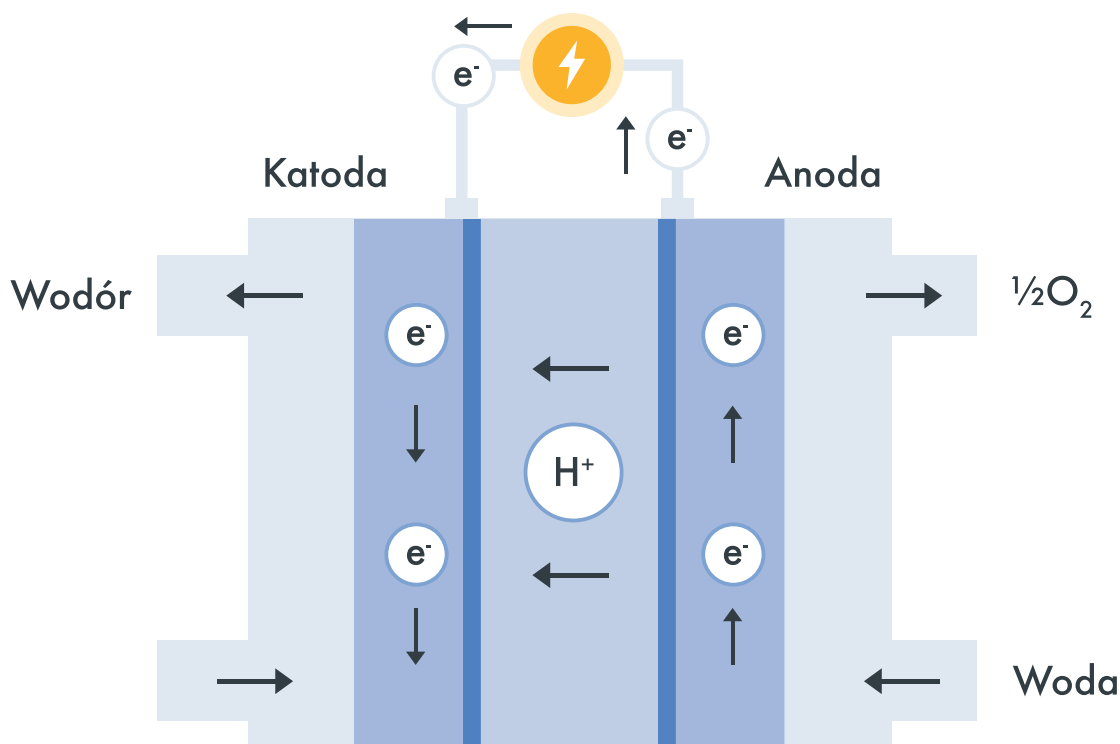
Elektroliza wody zachodzi na anodzie, gdzie cząsteczka wody rozkładana jest na dwa jony wodoru  $H^+$  oraz cząsteczkę tlenu. Obojętny cząsteczkowy tlen ulatnia się i może być magazynowany lub wypuszczony do atmosfery. Dodatnio naładowany jon wodoru przyciągany jest przez katodę, natomiast między elektrodami umieszczona jest membrana, która selektywnie transportuje protony (jony wodoru  $H^+$ ). Membrana stanowi identyczny materiał, jak w ogniwach paliwowych, i jest to najczęściej Nafion<sup>®</sup> opracowany przez firmę DuPont. Na katodzie zachodzi rekombinacja wodoru, który jest magazynowany w postaci cząsteczkowej. Ponieważ w reakcji uczestniczy tylko woda, to uzyskiwany wodór ma wysoką czystość rzędu 99.999% i może być bezpośrednio magazynowany czy używany w ogniwach paliwowych. Reakcje zachodzące bezpośrednio na elektrodach można zapisać jako:





Podobnie jak w ogniwach paliwowych, pojedyncze membrany łączą się w stosy, katalizatorem jest platyna, a zakres temperatury pracy związany jest z rodzajem elektrolitu. Elektrolizery typu PEM mogą pracować w zakresie temperatur 20 – 80 °C i przy ciśnieniach do 80 atmosfer. Przewagą elektrolizerów typu PEM nad innymi rozwiązaniami jest wysoka gęstość prądu, niska temperatura pracy i szybki czas rozruchu, dzięki czemu mogą być stosowane w instalacjach charakteryzujących się dynamicznymi zmianami, tj. wykorzystujących energię słońca czy wiatru. Wadą jest koszt, który obecnie jest na wysokim poziomie, ale będzie malał wraz z masową produkcją elektrolizerów.

Rysunek 15. Elektrolizer z elektrolitem polimerowym (PEM)

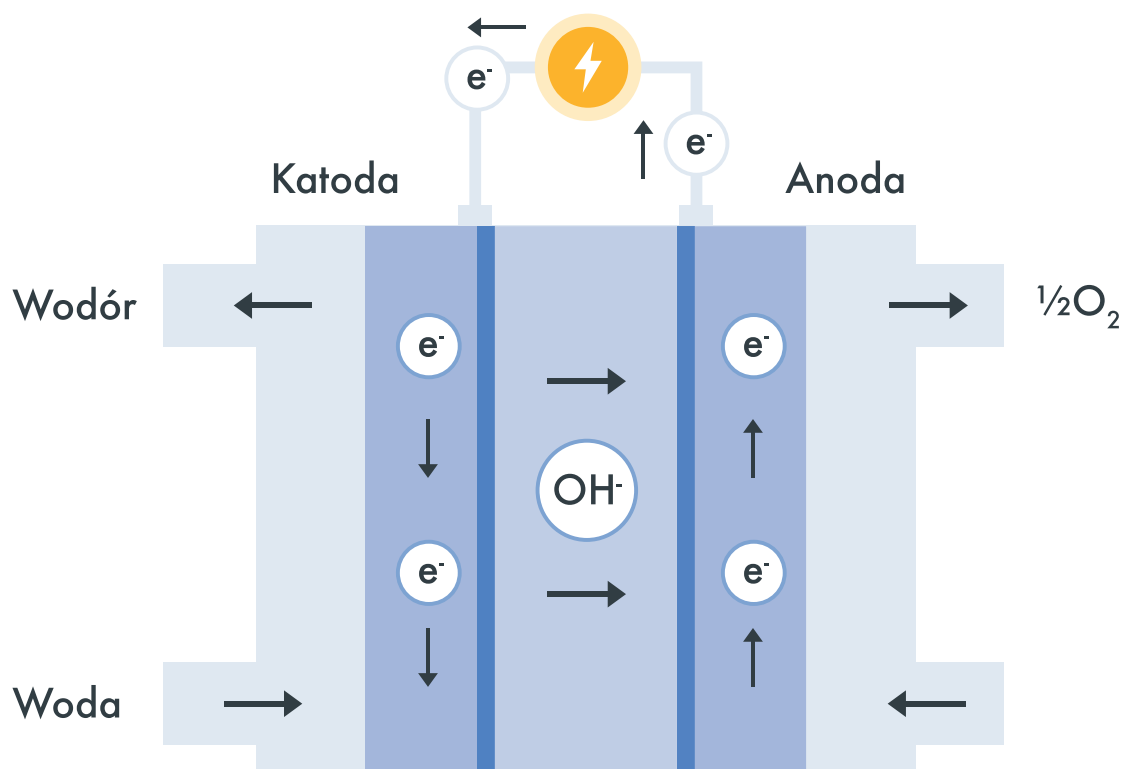


## 5.7.2. Elektrolizery alkaliczne

Elektrolizery alkaliczne są najstarszą i najlepiej poznaną technologią elektrolizy wody, po raz pierwszy zastosowaną 1789 roku. Elektrolitem jest roztwór wodorotlenku potasu (KOH) lub wodorotlenku sodu (NaOH). Elektroliza zachodzi początkowo po stronie katody, gdzie dwie cząsteczki wody rozbijane są na jedną cząsteczkę wodoru i dwie grupy hydroksylowe  $\text{OH}^-$ . Wodór jest magazynowany, a grupy  $\text{OH}^-$  transportowane do anody przez porowatą przesełkę. Na anodzie zachodzi rekombinacja do cząsteczki wody i tlenu.



Rysunek 16. Elektrolizer alkaliczny.



Elektrolizery alkaliczne pracują w temperaturze w przedziale 30-80°C, katalizatorem jest nikiel, natomiast przesłona zbudowana jest z azbestu. Przekłada się to na niższe ceny elektrolizerów, a dodatkowo istnieje możliwość wymiany elektrolitu, co skutkuje dłuższym czasem pracy. Do wad należy zaliczyć niższe ciśnienie pracy (do 30 atmosfer) oraz mniejszą gęstość prądu, co przekłada się na niższą sprawność (50-65%). Duże nadzieje wiąże się z rozwijającymi membranami przewodzącymi anionowo, które mogą zastąpić azbest i poprawić warunki pracy elektrolizerów alkalicznych.

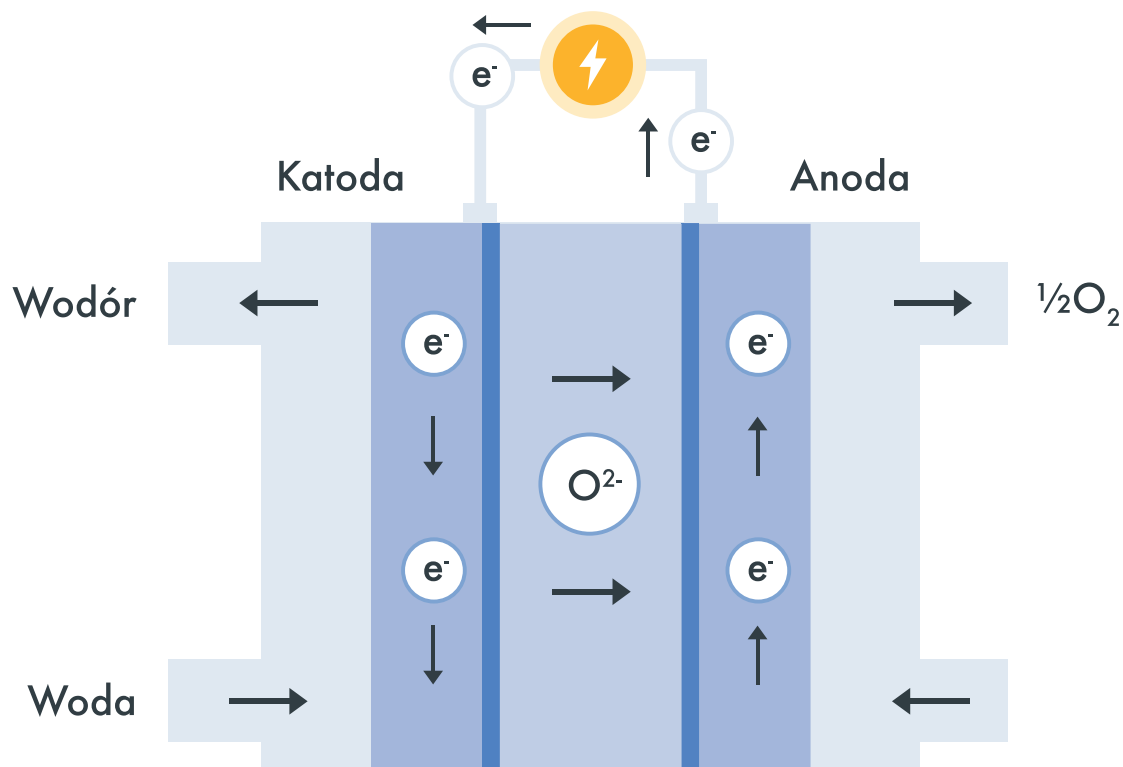
### 5.7.3. Elektrolizery stałotlenkowe

Elektrolizery stałotlenkowe są odpowiednikiem stałotlenkowych ogniwo paliwowych SOFC. Elektrolitem jest ceramika przewodząca jony tlenu, dlatego temperatura pracy musi być wysoka - rzędu 500-850 °C. Woda w tym układzie jest dostarczana w postaci pary wodnej i rozkładana bezpośrednio na katodzie, a jony tlenu transportowane są do anody.



Wraz ze wzrostem temperatury maleje ilość energii elektrycznej, niezbędnej do elektrolizy wody, jednocześnie elektrolizery stałotlenkowe mogą wykorzystywać ciepło dostępne z różnych źródeł, w tym z elektrowni jądrowej. Sprawność układu jest wysoka, czas życia jest długi, koszty eksploatacji niskie, a dodatkowo możliwe jest stosowanie różnych paliw. Wadą natomiast jest długi czas rozruchu oraz fakt, że wysoka temperatura prowadzi do rozszerzalności cieplnej, co może doprowadzić do nieszczelności. Elektrolizery stałotlenkowe stosuje się w pracy ciągłej i nie nadają się one do instalacji ze skokowymi nadmiarami energii elektrycznej.

Rysunek 17. Elektrolizer ze stałym elektrolitem tlenkowym.



<sup>1</sup> Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review, *Materials Science for Energy Technologies 2* (2019) 442–454

<sup>2</sup> Tadeusz Chmielniak, *Wodór w energetyce*, Academia, 65 (2021) 72-78

<sup>3</sup> "Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy" ETC, kwiecień 2021

<sup>4</sup> *Polska strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.*

# 6 Transport i dystrybucja

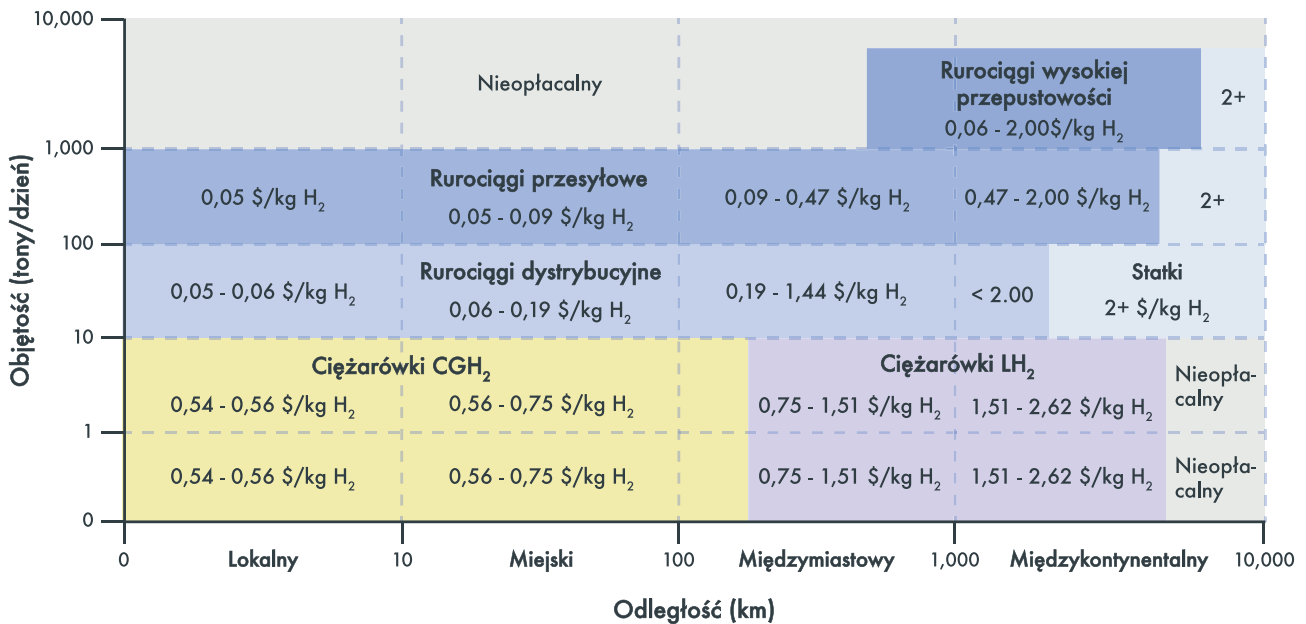


Niezależnie czy produkcja wodoru będzie prowadzona w centralnych zakładach na dużą skalę, czy w systemie mocno rozproszonym, to osobną kwestią pozostanie dostarczenie surowca do końcowego odbiorcy. Odległość dzieląca miejsce produkcji i użycia może wynieść nawet kilka tysięcy kilometrów, a sam wódór może być transportowany w rurociągach, cysternach czy tankowcach. Podobnie charakter użycia wodoru będzie decydował, zarówno o postaci transportu wodoru (ciekły wódór, sprężony gaz) jak i o rozbudowie sieci stacji tankowania. Warunki wytwarzania wodoru muszą być skorelowane z infrastrukturą dystrybucji, ale także zgodne z zapotrzebowaniem. Transport i dystrybucja będą więc mocno zależeć od ekonomii, polityki i długoczasowej perspektywy.

## 6.1. Transport

Na świecie występuje 2.000.000 km<sup>2</sup> pustyni kamiennej, która potencjalnie nadaje się na miejsce do produkcji energii elektrycznej poprzez wykorzystanie słonecznej energii cieplnej lub tej bazującej na panelach fotowoltaicznych. Obszar ten stanowi zaledwie 1% powierzchni Ziemi i nie jest przeznaczony do uprawy roli czy urbanizacji. Z obecną technologią może jednak wytwarzać około 100 000 TWh/rok energii w postaci odnawialnego, zielonego wodoru (światowe zapotrzebowanie na energię elektryczną w roku 2019 wyniosło ok. 23 000 TWh). Główny powód, dla którego ten potencjał nie jest wykorzystany wynika z położenia tych obszarów w regionach, które nie mają wysokiego zapotrzebowania na energię. Sprowadza się to do konieczności stworzenia efektywnego eksportu energii słonecznej na rynek energetyczny. Możliwe jest to za pomocą linii przesyłowych wysokiego napięcia (HVDC ang. high voltage direct current) lub konwersji i transportu za pomocą rurociągów. Wódór może być transportowany w postaci zarówno sprężonego gazu (CGH<sub>2</sub> ang. compressed gaseous hydrogen), jak i w postaci płynnej (LH<sub>2</sub> – liquid hydrogen).<sup>1,2</sup> Rodzaj transportu zależy od dwóch czynników: odległości i ilości przesyłanej masy/energii.

Na rysunku poniżej zebrano optymalne formy transportu i ich szacowany koszt.<sup>3</sup>



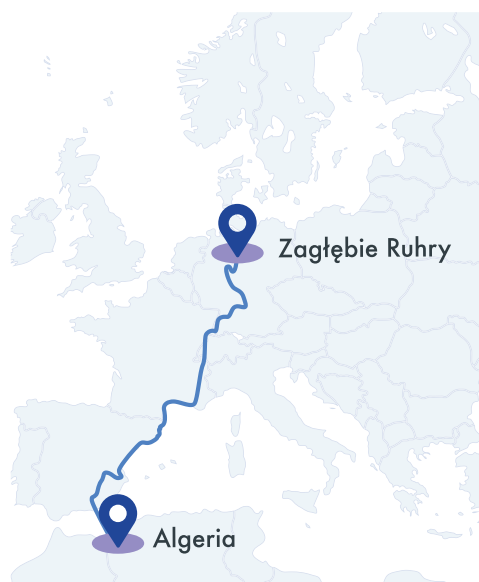
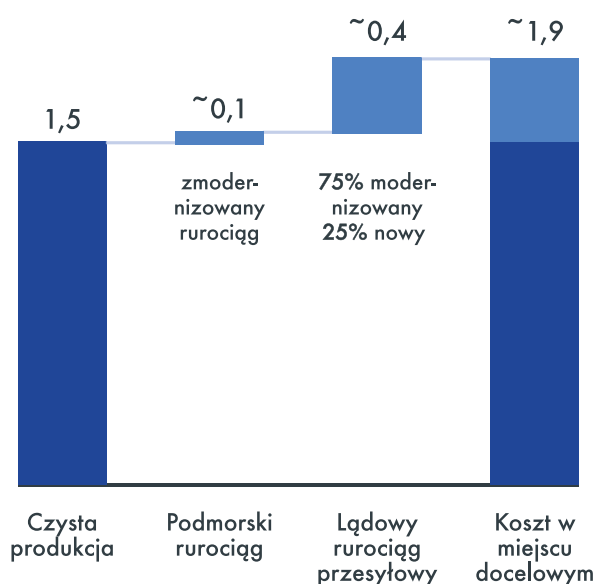
Poza ilością energii i odległością ważną sprawą są też wymogi odbiorcy końcowego. Jeżeli wodór ma być używany ostatecznie w postaci ciekłej, to warto rozważyć rurociąg umożliwiającą transport w tym stanie skupienia. Konieczne jest schłodzenie do wartości około 20K (-253°C) i transport w próżniowych, superizolowanych naczyniach (rurociągach lub zbiornikach) pod ciśnieniem do 10 MPa. Przesył możliwy jest już od relatywnie niskich objętości – kilkanaście ton ciekłego wodoru na dzień, co odpowiada mocy kilkunastu MW. Ilość minimalnego transportu linią wysokiego napięcia, kabla morskiego lub w gazociągu CGH<sub>2</sub> z ekonomicznego punktu widzenia zaczyna się przy przynajmniej 2GW (2000 MW), a preferowana ilość mocy przesyłowej to 4-6 GW. System rurociągów na ciekły wodór jest jednak bardzo drogi, dlatego realizuje się tylko krótkie odcinki, nieprzekraczające 1km. Najczęściej odbiorcą są duże kampusy naukowe (CERN, DESY) czy ośrodki związane z programami kosmicznymi (NASA, ESA).

Dużo powszechniejszy jest transport LH<sub>2</sub> na większe odległości w zbiornikach kriogenicznych. Około 85% komercyjnego wodoru w USA transportowane jest w postaci LH<sub>2</sub> na drogach i na torach. Transport w postaci CGH<sub>2</sub> odbywa się zazwyczaj na krótkich dystansach do 300km. Proporcje te będą się zmieniały wraz z rozbudową sieci gazociągów wodorowych oraz z powstawaniem nowych podmiotów produkujących wodór. Osobną kwestią jest dalekozasięgowy transport morski, w tym przypadku kontenerowce przewożące LH<sub>2</sub> pozostaną najbardziej korzystną opcją.

Transport wodoru gazociągiem w postaci sprężonego gazu może być z powodzeniem stosowany na duże odległości rzędu 1000 km czy nawet kilkunastu tysięcy kilometrów. Należy jednak pamiętać, że koszt transportu, w porównaniu do przesyłu gazu ziemnego, będzie wyższy około 1.5 raza. Wynika to z prostego faktu, że wodór wymaga 3.5 razy większej kompresji do przesłania tego samego ekwiwalentu energii. To sprawia, że infrastruktura musi być zwiększona o odpowiednią ilość kompresorów. Podobnie zapewnienie minimalnej ilości przesyłu wodoru wraz z pozyskiwaniem go z niestabilnych źródeł energii (słońce, wiatr) sprawia, że konieczne jest zbudowanie magazynów energii na początku układu. Możliwość przesyłu dużej ilości wodoru na duże odległości sprawia, że opracowywane są strategie produkcji zielonego wodoru w korzystniejszych lokalizacjach i przesył do docelowego rynku odbiorców. Przykładowe szacowania przedstawione są na rysunku nr 15.

Rysunek 18. Koncepcja transportu dalekozasięgowego gazociągiem.

Rurociąg z Algierii do Europy Środkowej, 2800 km      Koszt: USD/kg H<sub>2</sub>



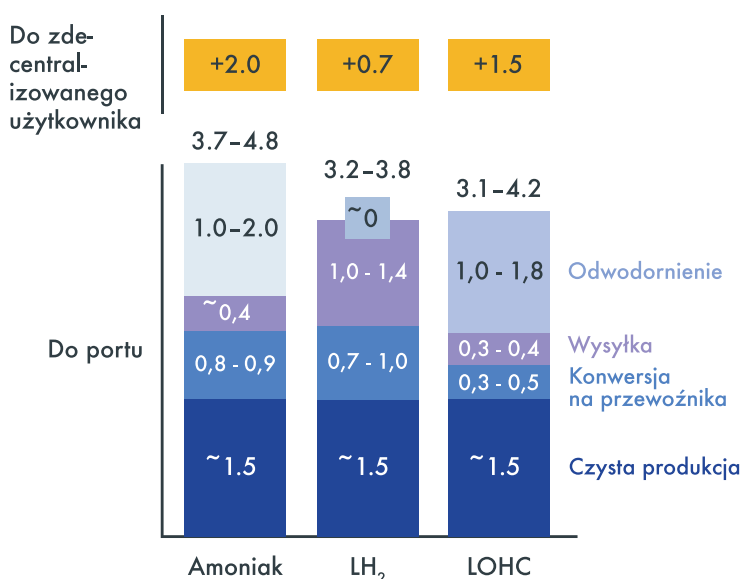
Transport i dystrybucja wodoru możliwa jest też przy wykorzystaniu obecnie istniejącej sieci gazociągów, poprzez domieszkowanie gazu ziemnego. Jest to zdecydowana oszczędność dostarczania dużych ilości wodoru i zdecydowanie szybsze włączenie tego

paliwa do powszechnego użytku, ponieważ nie wymaga nakładów na tworzenie nowej sieci. Niestety istnieją pewne kwestie, które muszą być wcześniej rozważone. Wodór ma skłonność do kruszenia stali i spoiw, co z jednej strony wymaga stworzenia mapy rurociągów z uwzględnieniem jakości stali, a z drugiej strony częstszych i rzetelnych kontroli przecieków.

Rysunek 16. Koncepcja transportu dalekozasięgowego drogą morską.

Trasa z Arabii Saudyjskiej do Europy przez Kanał Sueski, 8700 km

Koszt: USD/kg H<sub>2</sub>



Krytycznym elementem infrastruktury będą sprężarki, zarówno ich ilość w sieci, jak i wykorzystane technologie do sprężania gazu. Poza technologicznymi wyzwaniem, ważną kwestią jest przeznaczenie wodoru u odbiorcy końcowego i jakość mieszanki gazu ziemnego z wodorem. Dopuszczalna przez normy ilość wodoru ze względu na parametry energetyczne wynosi 36% (wartość opałowa gazu maleje wraz ze wzrostem stężenia wodoru), natomiast ze względu na bezpieczne i efektywne spalanie w urządzeniu końcowym już tylko 15%. Jeszcze większe ograniczenia wynikają ze względu na bezpieczeństwo przeciwybuchowe urządzeń przeznaczonych do stosowania w strefie zagrożenia wybuchem, które określone jest na poziomie 8%.<sup>4</sup> Zespół ds. Rozwoju Przemysłu OZE i Korzyści dla Polskiej Gospodarki przygotował mapę dla gazociągów w Polsce z uwzględnieniem możliwości przesyłu wodoru:

Dyskusja o możliwości wykorzystania obecnej sieci gazowej do transportu wodoru trwa





Rysunek 17. Mapa dopuszczalnej zawartości wodoru w gazociągach na terenie Polski.<sup>5</sup>

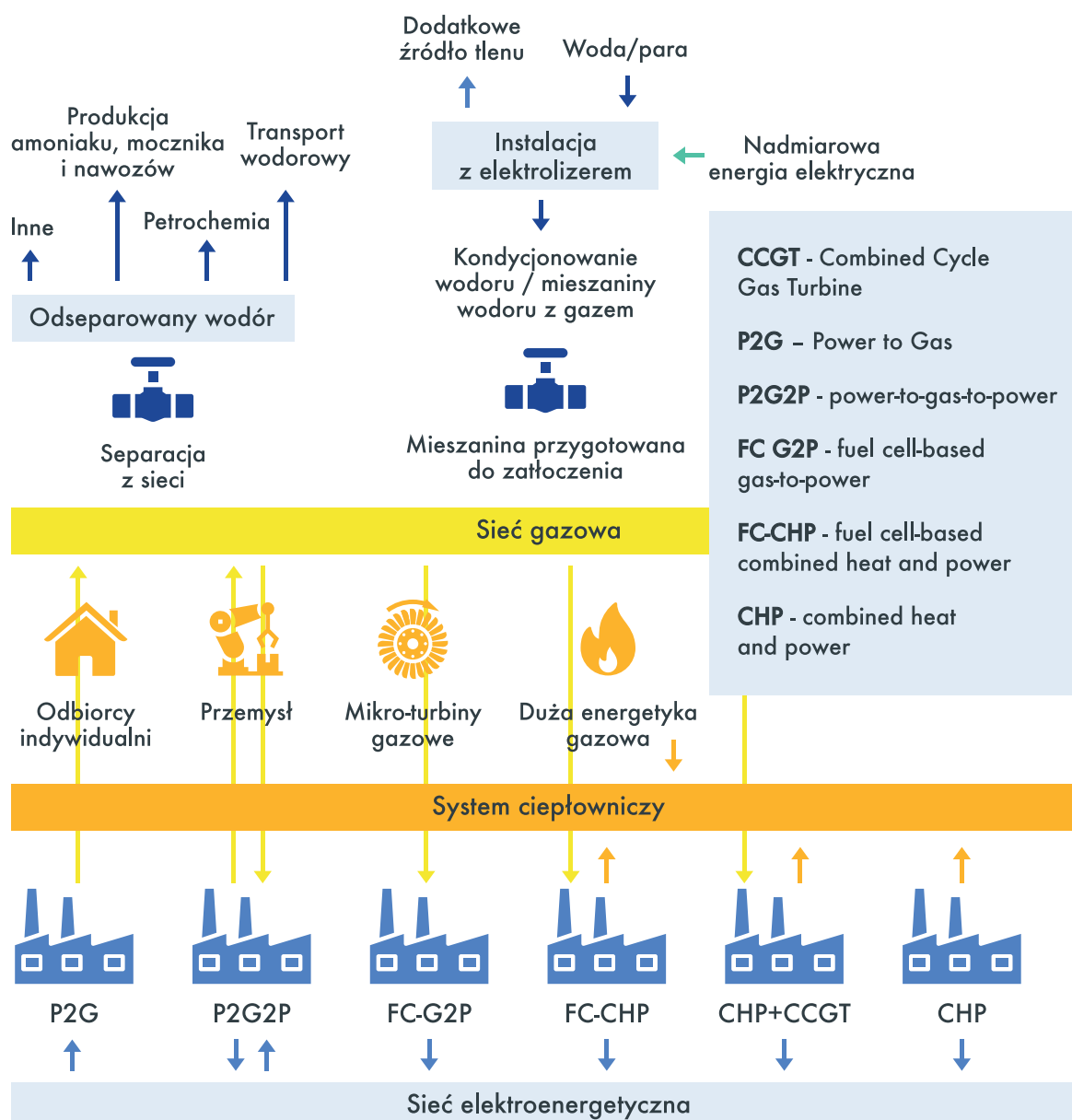


na całym świecie. Ważnym argumentem w debacie jest perspektywa wzrostu znaczenia wodoru w systemie energetycznym, jednocześnie przewiduje się spadek zapotrzebowania na gaz ziemny. Wizja, że obecne rurociągi w przyszłości przestaną być użytkowane, dodaje dużo emocji do dyskusji.

Przewiduje się, że z rozwojem gospodarki wodorowej nastąpi głębsza integracja sektora sieci gazowej, elektroenergetycznej oraz ciepłowniczej, co spowoduje naturalny wzrost znaczenia

sieci gazowej. Technologie wodorowe mogą mieć swój udział w każdym z tych segmentów: produkcji energii elektrycznej (FC G2P - fuel cell-based gas-to-power), kogeneracji ciepła i prądu (FC-CHP, fuel cell-based combined heat and power) oraz stanowić bufor całego systemu w postaci magazynu energii (P2G2P, power-to-gas-to-power).<sup>5</sup> Schematycznie zaprezentowano to na rysunku 18.

Rysunek 18. Integracja sieci gazowej, elektroenergetycznej oraz ciepłowniczej z wykorzystaniem technologii wodorowych.<sup>5</sup>



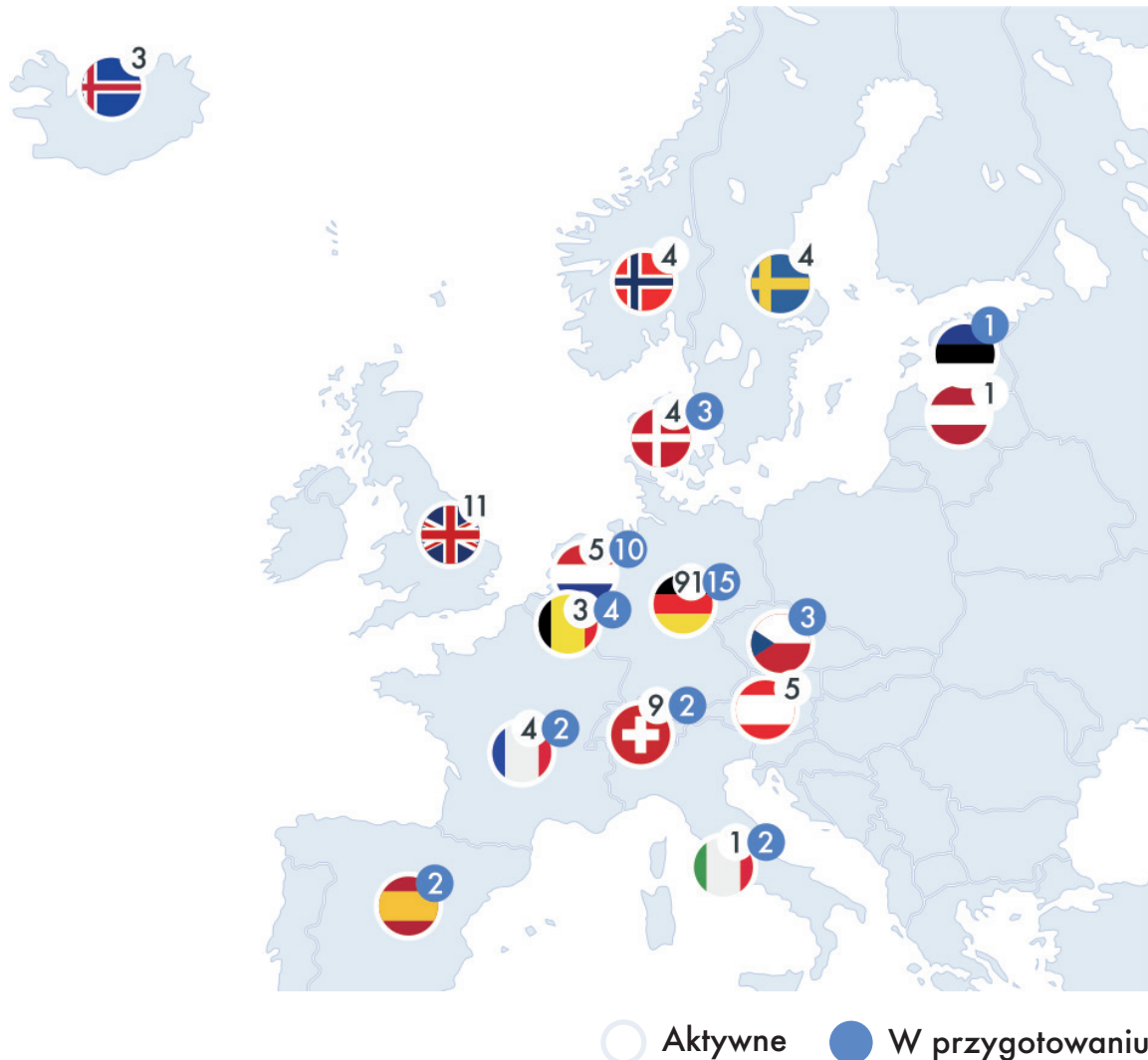
Niezależnie od kursu, który obiorą poszczególne kraje, rynek P2G (power to gas) będzie się prężnie rozwijać.

## 6.2. Dystrybucja

Poza przemysłem, docelowym odbiorcą wodoru ma być sektor transportowy. Wykorzystanie pojazdów napędzanych wodorowymi ogniwami paliwowymi wymagać będzie rozwinięcia infrastruktury o kolejne stacje tankowania wodoru. Ilość stacji H<sub>2</sub> w Europie w roku 2020 wynosiła 125, co jest liczbą skromną w porównaniu ze stacjami benzynowymi (92.000) czy LPG (32.000). Zupełnie inną perspektywę daje fakt, że pierwsze publiczne stacje ładowania pojazdów elektrycznych w Europie pojawiły się w roku 2010, natomiast dekadę później (stan na rok 2020) było ich już ponad 225.000.<sup>6</sup>

Rozbudowa sieci stacji wodorowych zajmie kilka lat i przewidziana jest w strategiach wodorowych większości państw europejskich. Polska strategia wodorowa przewiduje budowę 32 stacji tankowania wodoru do roku 2025. Nie oznacza to, że do tego czasu rozwój transportu z wykorzystaniem ogniw paliwowych będzie hamowany. Koncerny energetyczne przewidują budowę tymczasowych, mobilnych stacji, które będą w stanie dostarczyć paliwo w miejsce, gdzie będzie zapotrzebowanie (zarówno do transportu, jak i do firm wchodzących na rynek wodorowych czy instytucji naukowych i przemysłowych). W zależności od realnego zapotrzebowania w obszarach tych przewiduje się stawianie stacjonarnych stacji i przenoszenie rozwiązań mobilnych w inne miejsca. W ten sposób można pokryć jak największy obszar kraju w stosunkowo krótkim czasie. Ważną rolę w rozwijaniu sieci odegrają autobusy miejskie, napędzane ogniwami paliwowymi – warto dodać, że Polska jest już jednym z czołowych dostawców autobusów wodorowych na rynku europejskim. Wymiana floty autobusów i zastąpienie silników dieslowych samochodami bezemisyjnymi poprawią jakość powietrza w dużych aglomeracjach miejskich i jednocześnie zbudują rynek zapotrzebowania na wodór. Należy też brać pod uwagę, że dopuszczalne normy spalania będą coraz ostrzejsze, a zielone strefy w centrach miast będą się rozszerzały. W naturalny sposób transport przy wykorzystaniu wodoru będzie coraz bardziej korzystny, a poprzez efekt skali produkcja i dystrybucja wodoru tańsza. Rynek transportu to także ciężki transport kołowy, kolejowy, morski, rzeczny i powietrzny. W każdym z tych segmentów przewidziany jest rosnący udział rozwiązań wodorowych.

Rysunek 19. Mapa stacji wodorowych w Europie.<sup>6</sup>

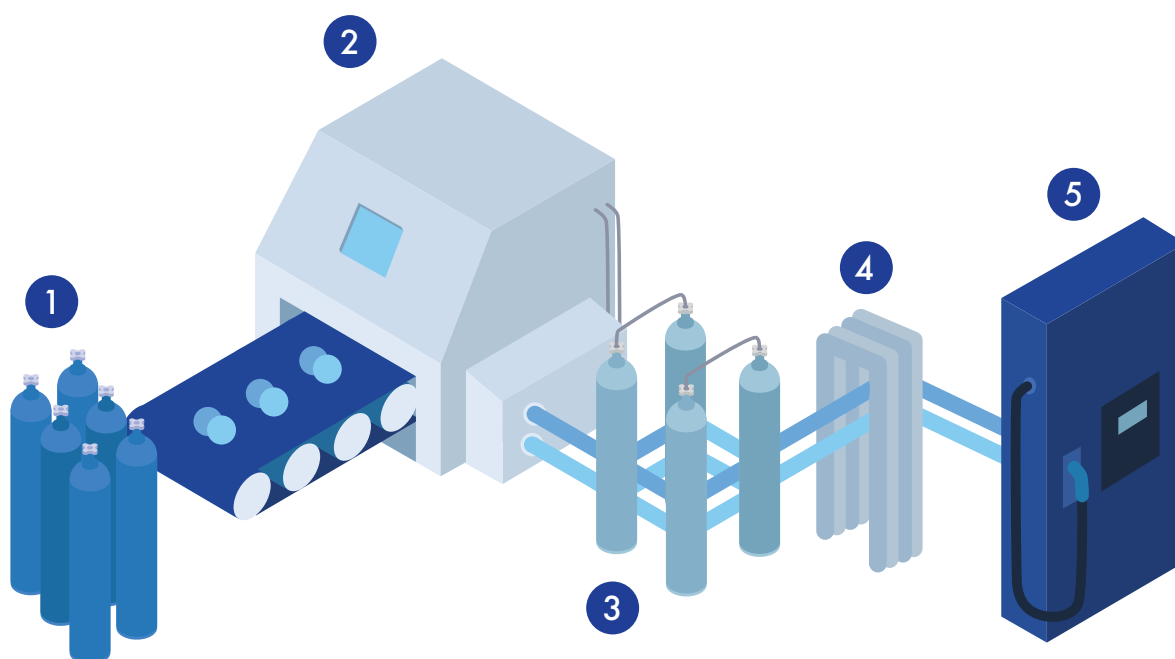


Stacje wodorowe różnią się od stacji tradycyjnych, głównie ze względu na spełnienie różnych standardów bezpieczeństwa, ale także przez fakt, że możliwe jest produkowanie wodoru na miejscu. Zasadniczo każda stacja składa się z zasobnika wodoru oraz dystrybutora. Wodór sprężony jest do dwóch ciśnień, które są standardem w pojazdach 700 bar – samochody osobowe oraz 350 bar – ciężkie pojazdy, autobusy, ciężarówki. Temperatura gazu do tankowania wynosi  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , i rośnie w trakcie tankowania samochodu. W momencie przekroczenia temperatury  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  może dojść do uszkodzenia wykładziny zbiornika. Czujniki temperatury automatycznie zamykają elektrozawór, jeśli wartości temperatury są zbyt wysokie. Podobnie dzieje się w przypadku nieprawidłowego podłączenia pistoletu

lub wykrycia nieszczelności czy wycieku paliwa. Ścisłe kontrolowanie przepływu gazu jest krytycznym czynnikiem podczas tankowania. Wszystkie powyższe elementy sprawiają, że pistolet jest znacznie cięższy. Dodatkową różnicą jest pomiar ilości wodoru w kilogramach, a nie litrach. Podobnie jak w tradycyjnych stacjach cała procedura tankowania zajmuje 3-5 minut, a zasięg pojazdów wynosi ponad 600 km.



Rysunek 20. Budowa stacji wodorowej.



1. Źródło wodoru -  $H_2$  jest przechowywany w butlach gazowych w 200 barach.
2. Proces kompresji -  $H_2$  jest sprężane pod ciśnieniem 350 lub 700 barów.
3. Bufory - Przechowywanie  $H_2$  pod wysokim ciśnieniem.
4. Wymiennik ciepła -  $H_2$  jest schładzany do  $-40$  stopni przed dostawą.
5. Dystrybutor -  $H_2$  jest przelewany do zbiornika pojazdu.

W przypadku, kiedy stacja pełni także rolę producenta wodoru, funkcje te muszą być fizycznie oddzielone tak, żeby nie było publicznego dostępu do infrastruktury produkcyjnej. Moduł produkcji składa się ze standardowych elementów, takich jak elektrolizer, filtr i

osuszacz, sprężarka i magazyn wodoru. W zależności od konfiguracji zasilany może być fotowoltaiką, energią wiatru czy wykorzystywać do produkcji gaz ziemny.

<sup>1</sup> *The Economic Impacts of Desert Power, Socio-economic aspects of an EUMENA renewable energy transition*, Dii GmbH, 2013

<sup>2</sup> R. Wurster, J. Schindler, *Solar and wind energy coupled with electrolysis and fuel cell*, Handbook of Fuel Cells, Volume 3, Wiley 2003

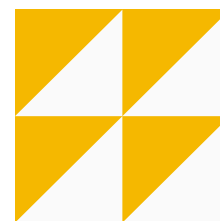
<sup>3</sup> *Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy* Energy Transitions Commission (2021)

<sup>4</sup> J. Jaworski, E. Kukulska-Zajac, P. Kułaga *Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na elementy systemu gazowniczego*. Nafta-Gaz 2019, nr 10, s. 625–632

<sup>5</sup> Zespół ds. Rozwoju Przemysłu OZE i Korzyści dla Polskiej Gospodarki, Raport zespołu nr 4, Gospodarka Wodorowa, Warszawa, maj 2020

<sup>6</sup> European Alternative Fuels Observatory, <https://www.eafo.eu/alternative-fuels/electricity/charging-infra-stats>

# 7 Magazynowanie energii

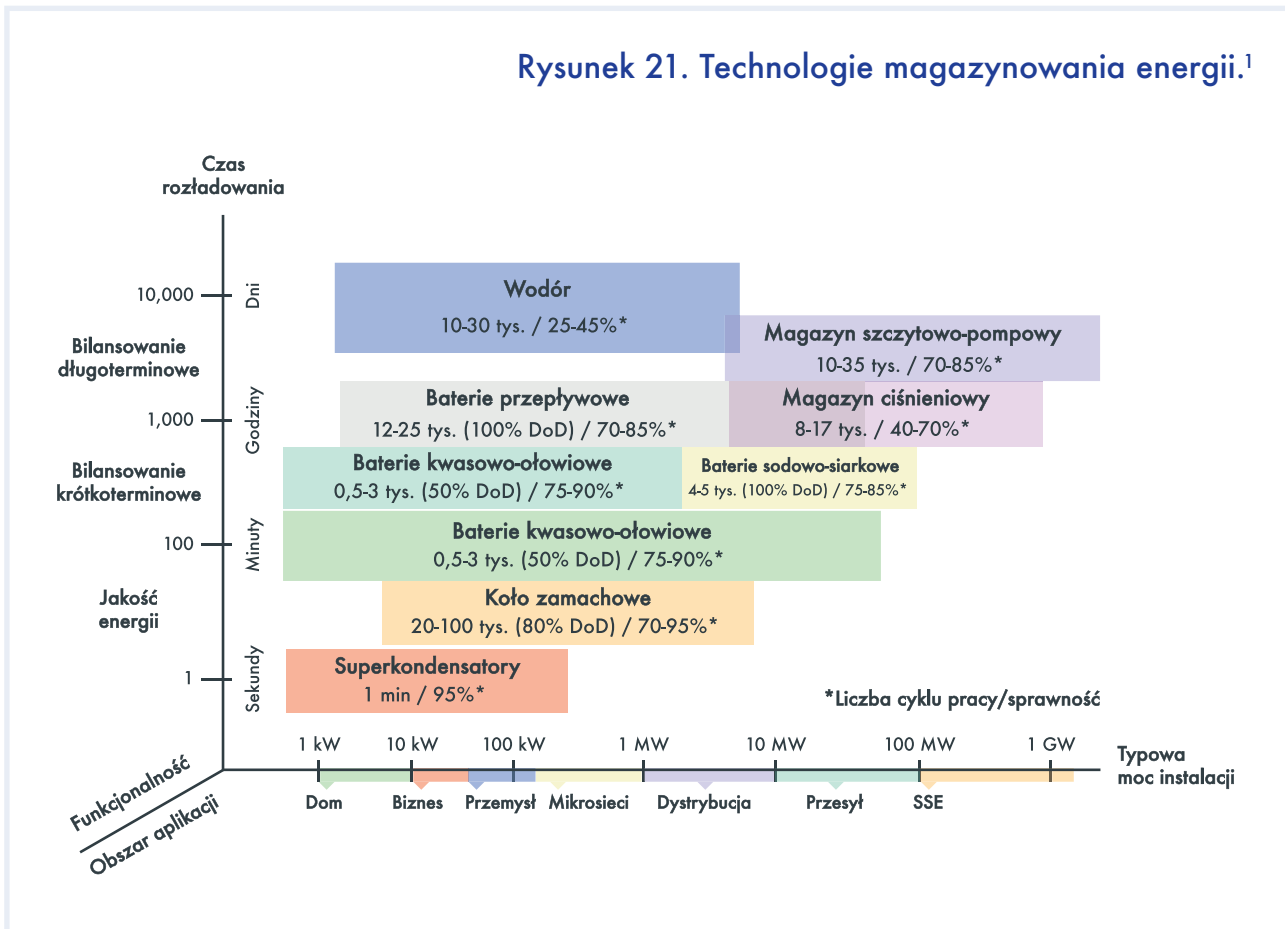


Energię elektryczną możemy wytwarzać w sposób bezemisyjny, a dodatkowo z dużą łatwością przekształcać ją w inne formy energii. Kluczem do osiągnięcia celów klimatycznych jest elektryfikacja wszystkich możliwych odbiorników energii.

Wiąże się to z zastąpieniem silnika spalinowego, kotła gazowego, czy pieca węglowego ich odpowiednikami elektrycznymi. Takie podejście podnosi wymagania stawiane systemowi elektroenergetycznemu, który musi zapewnić odpowiednie parametry poziomu napięcia i częstotliwości. Parametry te wynikają bezpośrednio z bilansu energetycznego, czyli równowagi między produkcją a zużyciem energii. Włączenie do tego systemu mocno rozproszonej energetyki OZE i uwarunkowanie generowanej mocy od kaprysów pogody oraz nierównomierny dzienny pobór mocy sprawiają, że zbilansowanie systemu energetycznego staje się coraz trudniejsze. Z pomocą przychodzą magazyny energii, które sprawiają, że system jest bardziej elastyczny i otwarty także na mobilne zastosowania. Jedną z metod przechowywania energii jest magazynowanie wodoru, który za pomocą ogniwa paliwowego może być przekształcony z powrotem w prąd elektryczny. Na rysunku 21<sup>1</sup> przedstawiono zależność mocy i czasu dla różnych magazynów energii. Zdecydowaną przewagą magazynowania wodoru jest długi okres czasu oraz szeroki zakres zastosowań w zależności od docelowej mocy.

Wodór jest najlżejszym pierwiastkiem, co sprawia, że ma bardzo korzystny stosunek gęstości energii do jej masy, jednocześnie gęstość energii w porównaniu do objętości jest na bardzo niskim poziomie. Parametry te teoretycznie wymuszają stosowanie wyjątkowo

Rysunek 21. Technologie magazynowania energii.<sup>1</sup>

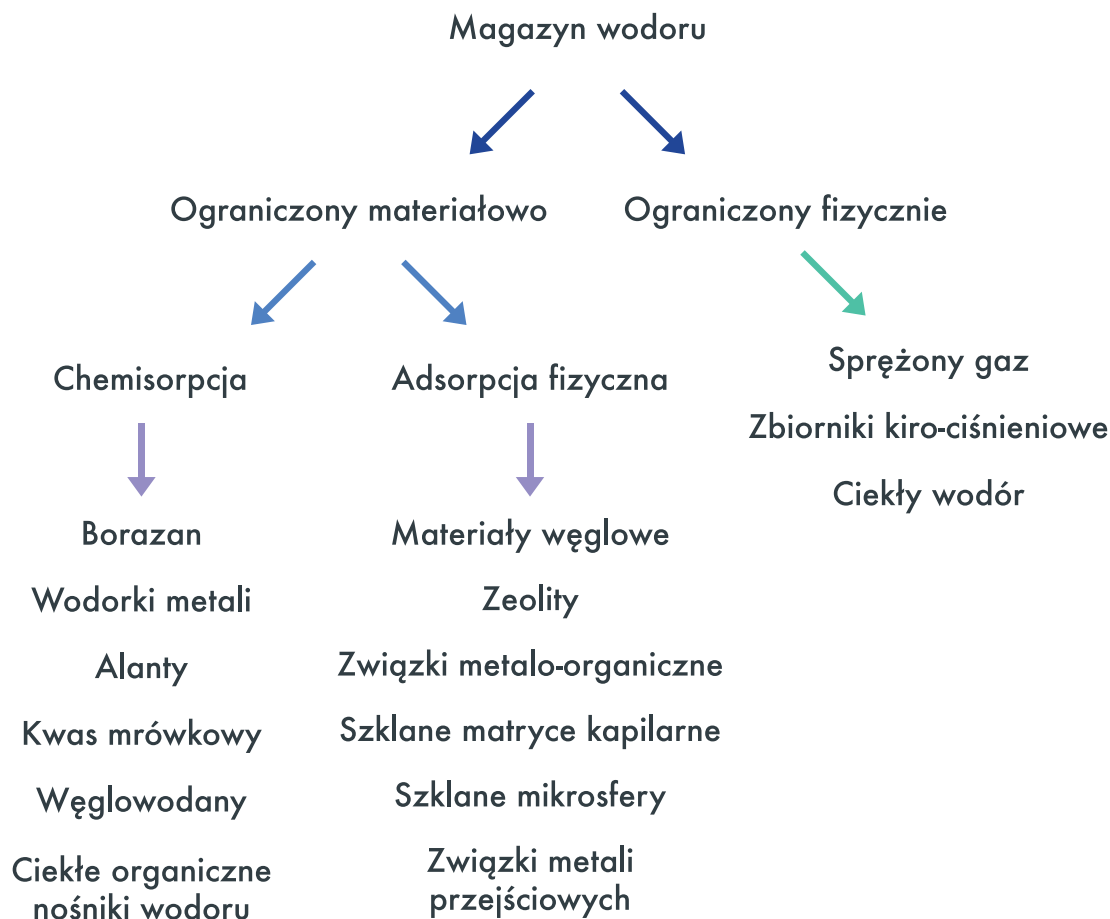


dużych zbiorników do uzyskania tej samej ilości energii, co w przypadku paliw kopalnych. Aby tego uniknąć stosuje się co najmniej jedno z rozwiązań: wysokie ciśnienie, niską temperaturę lub materiały oddziałujące z wodorem (chemicznie lub fizycznie). Osobną kategorią jest wielkoskalowe magazynowanie wodoru, które wykorzystują formacje geologiczne – jaskinie, formacje wodonośne czy przestrzenie pozostałe po wydobyciu ropy naftowej. Zarys systemów wielkoskalowych omówiony będzie w dalszych podrozdziałach. Technologie przechowywania wodoru – stacjonarne i mobilne – można podzielić na dwie główne kategorie. Pierwszą stanowią zbiorniki ciśnieniowe, bazujące na ograniczeniach fizycznych. Wodór może być przechowywany w postaci sprężonego gazu, w postaci ciekłej lub przy wykorzystaniu jednocześnie niskiej temperatury i wysokiego ciśnienia. Druga kategoria bazuje na materiałach, które wykorzystują chemi- lub fizysorpcję. Schematycznie można to przedstawić jako:





Rysunek 22. Sposoby przechowywania wodoru.



## 7.1. Sprężony gaz

Najczęściej wodór przechowuje się w zbiornikach ciśnieniowych w postaci sprężonego gazu. Standardowo przyjęte są dwie wartości ciśnienia - 700 bar (70 MPa) oraz 350 bar (35MPa), natomiast nic nie stoi na przeszkodzie, żeby magazynować wodór przy innych ciśnieniach. Kształt zbiornika jest typowy, jak dla pozostałych butli z gazem, natomiast wymagają one specjalnych materiałów i powłok. Wodór, poza wymaganiami szczelności, powoduje wzrost kruchości stali, co jest istotnym czynnikiem przy budowie magazynów wodoru, ale także rurociągów do przesyłu gazu. Z drugiej strony składowanie wodoru pod wysokim ciśnieniem sprawia, że muszą być spełnione odpowiednie kryteria wytrzymałościowe. Dodatkowo dochodzi do tego optymalizacja zbiorników pod kątem

masy – grubsze powłoki zwiększają wytrzymałość, a co za tym idzie – zwiększają także ciężar. Takie zbalansowanie masy i wytrzymałości jest niezwykle ważne z punktu widzenia zastosowań mobilnych. Stosowanie lekkich materiałów kompozytowych pozwala na redukcję masy, natomiast koszt produkcji jest odpowiednio wyższy. Zbiorniki ciśnieniowe do sprężonego gazu przypisane są 4 typom:

- Typ I - W pełni metalowe zbiorniki ciśnieniowe. Zazwyczaj wykonane są z aluminium lub stali. Technologia ta jest najtańsza i jednocześnie najcięższa. Pozwala przechowywać wodór pod ciśnieniem 50 MPa.
- Typ II - Zbiorniki metalowe pokryte kompozytem włókna szklanego. Zbiorniki są w zasadzie odzwierciedleniem typu 1, natomiast warstwa metalu wzmocniona jest kompozytem odpowiednio: aluminium – włókno szklane oraz stal - aramid, przez co masa całości jest zredukowana o około 30-40%. Dodatkowo zwiększona jest wytrzymałość ciśnieniowa. Koszt produkcji zbiorników jest jednak wyższy o około 50%.
- Typ III - składa się głównie z włókna węglowego, które odpowiada za przemienienie obciążenia. Stosuje się wkładkę metalową, która zapewnia szczelność. Takie rozwiązanie jest około 2 razy lżejsze od typu II, natomiast koszty produkcji są odpowiednio dwukrotnie wyższe.
- Typ IV – zbiorniki w pełni kompozytowe. Wkładka uszczelniająca wykonana jest polimeru – zazwyczaj stosuje się polietylen wysokiej gęstości. Takie rozwiązanie jest najlżejsze i pozwala na przechowywanie wodoru pod ciśnieniem 100 MPa. Rozwiązanie to jest ciągle stosunkowo drogie, natomiast znalazło już zastosowanie w pojazdach produkowanych komercyjnie o napędzie wodorowym.

## 7.2. Wodór w stanie ciekłym

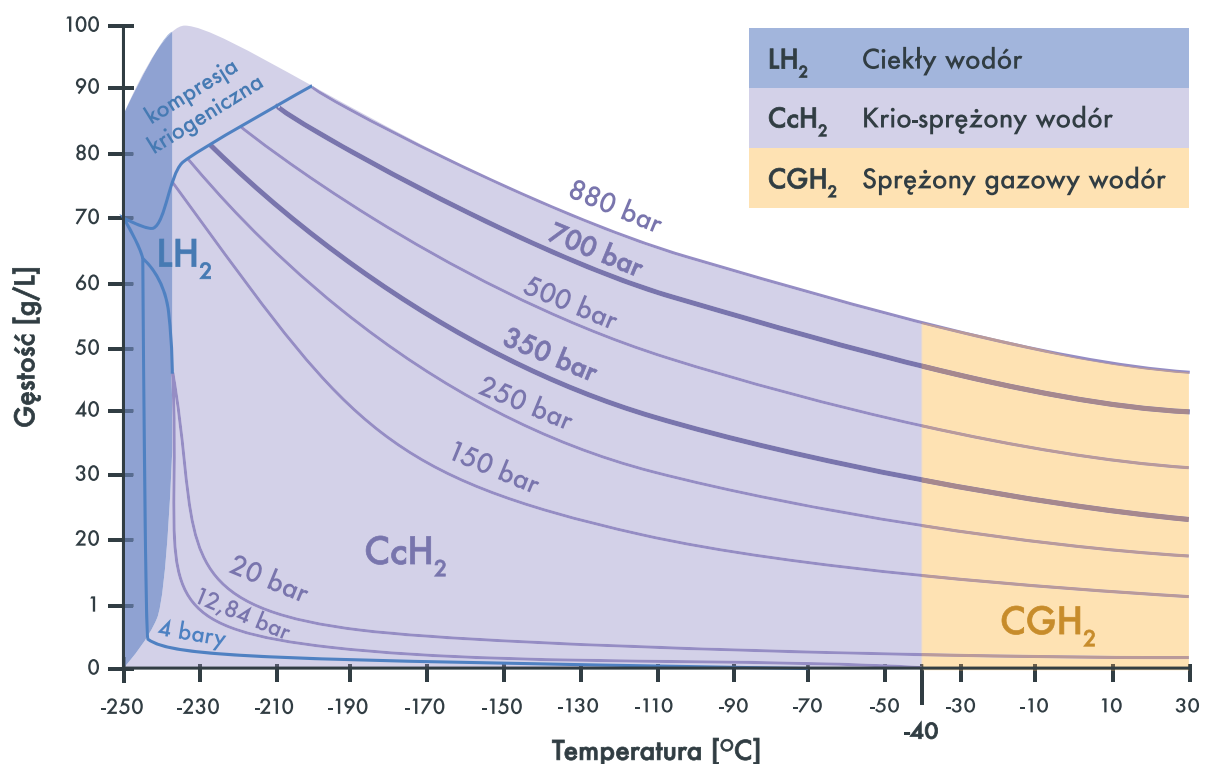
Skroplenie wodoru, jak każdego innego gazu, powoduje znaczne podwyższenie gęstości. Temperatura krytyczna dla wodoru wynosi  $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ , przez co proces skraplania i utrzymywania wodoru w niskiej temperaturze jest bardzo energo- i czasochłonny. Straty energii w tym procesie są na poziomie 40%, gdzie dla porównania koszt energetyczny

przy gazie sprężonym wynosi do 10%. Dodatkowo magazyny wodoru muszą być dobrze izolowane termicznie. Rozwiązania bazujące na skroplonym wodorze stosuje się do transportu na średnie i długie dystanse, takie jak międzynarodowy transport kołowy czy międzykontynentalny transport morski. Metoda ta opiera się tylko na temperaturze i nie ma potrzeby stosowania wysokiego ciśnienia.

### 7.3. Magazyn krio-ciśnieniowy

Rozwijane są też technologie zbiorników łączące wysokie ciśnienie z niską temperaturą. Wodór schładzany jest do temperatury  $-233\text{ oC}$  i utrzymywany w stanie gazowym. Pozwala to osiągnąć gęstość magazynowania na poziomie  $80\text{ g/l}$ , co daje kilkukrotnie większą gęstość energii niż w zbiornikach ciśnieniowych. Jednocześnie utrzymanie wodoru w stanie gazowym zapewnia szybkie kompresowanie. Zbiorniki do magazynowania wodoru w stanie krio-ciśnieniowym są zbiornikami typu III z metalową wyściółką, zapewniającą

Rysunek 23. Gęstość wodoru w zależności od ciśnienia i temperatury.<sup>6</sup>



szczelność, oraz wtórnie izolowanym płaszczem, którego zadaniem jest zapobieganie wymianie ciepła. Taka konstrukcja sprawia, że zbiorniki mogą być napełniane zarówno wodorem ciekłym, jak i gazowym w temperaturze pokojowej. Tego rodzaju elastyczność pozwala na szersze zastosowanie, choć docelowo zbiorniki były projektowane dla pojazdów wodorowych o wysokich wymaganiach energetycznych i dalekiego zasięgu. Rysunek 23 prezentuje diagram gęstości wodoru w zależności od gęstości i temperatury.

## 7.4. Magazynowanie wodoru w materiałach

Alternatywą do przechowywania wodoru w czystej, niezwiązanej postaci omówionej wcześniej, są metody wykorzystujące zdolność do pochłaniania wodoru. Możliwości te badane są już od dłuższego czasu i, pomimo wielu obiecujących wyników, jeszcze nie znalazły komercyjnych zastosowań. W ogólnym ujęciu materiały można podzielić na adsorbujące wodór chemicznie lub fizycznie. Pierwsza grupa bazuje na adhezji wodoru na powierzchni, a następnie dyfuzji w głąb struktury. Najbardziej znaną grupą materiałów są wodorki metali, szczególnie lekkie, z początku układu okresowego. Metale i stopy metaliczne chętnie tworzą wodorki, co daje bardzo szeroką gamę możliwych materiałów. Poza metalami sorpcja chemiczna wykorzystywana jest w materiałach węglowych amoniaku czy kwasu mrówkowego. Sorpcja chemiczna jest procesem egzotermicznym i zarządzanie ciepłem podczas uwodorniania stanowi pewne wyzwanie: powstaje konkurencja między prędkością napełniania wodorem a bezpiecznym odprowadzeniem ciepła. Obiecującym rozwiązaniem jest przechowywanie wodoru w płynnych związkach znanych pod nazwą Ciekłych Organicznych Nośników Wodoru (LOHC, ang. Liquid Organic Hydrogen Carriers). Ten rodzaj materiałów jest ostatnio bardzo mocno rozwijany.

Drugą grupę materiałów stanowią materiały wykorzystujące adsorpcję fizyczną. Ponieważ zjawisko to jest powierzchniowe, to zastosowanie znajdują tutaj materiały o dużej powierzchni i porowatości, takie jak zeolity czy porowate materiały węglowe. Wymiana ciepła w porównaniu z chemisorpcją jest zredukowana o rząd wielkości, co przyspiesza proces ładowania, natomiast często osiągnięcie większej ilości zmagazynowanego materiału wymaga stosowania wyższych ciśnień i niskich temperatur. Jednocześnie nierozwiązany pozostaje problem stosunku masy wodoru do masy absorbentu.

Magazynowanie wodoru w materiałach wykazujących chemisorpcję i fizysorpcję jest

możliwe w umiarkowanych temperaturach i ciśnieniach, co stanowi przewagę w stosunku do zbiorników ciśnieniowych. Przeszkodę w zastosowaniu na skalę przemysłową ciągle stanowi stosunek masy wodoru do całego magazynu. Różne materiały i ich pojemność magazynowa zostały przedstawione w tabeli poniżej.<sup>2</sup>

	<b>Materiałowe magazyny wodoru</b>	<b>Maksymalna pojemność – % wagowy</b>
<b>Chemiczne</b>	Borazan	19,4
	Wodorki metali	12,6
	Alanty	9,3
	Kwas mrówkowy	4,4
	Węglowodany	14,8
	Ciekłe Organiczne Nośniki Wodoru	7,2
<b>Fizyczne</b>	Materiały węglowe	8
	Zeolity	9,2
	Szklane matryce kapilarne	10
	Szklane mikrosfery	14

## 7.5. Podziemne magazyny wodoru

Podziemne magazyny gazów są technologią dobrze znaną i wykorzystywaną do przechowywania gazu ziemnego, ale możliwe jest też składowanie innych gazów. W kontekście wyzwań klimatycznych istotne jest składowanie dwutlenku węgla wychwytywanego w różnego typu procesach przemysłowych. Drugim ważnym gazem jest wodór powstały w procesie elektrolizy z nadwyżek energii, który może być magazynowany i wykorzystany do odzyskania energii elektrycznej w późniejszym okresie. Teoretycznie za podziemne magazyny mogą służyć, podobnie jak do składowania gazu ziemnego – wyeksploatowane złoża gazowe, solankowe warstwy wodonośne i groty solne. Wodór, ze względu na swój mały rozmiar cząsteczkowy, łatwo dyfunduje i wymaga zbiorników o wysokiej szczelności. Najlepiej w tym celu sprawdzają się groty solne, ponieważ sól nie wchodzi w reakcję z wodorem i jest gazoszczelna. Metoda ta pozwala magazynować duże ilości wodoru, natomiast sprawność szacowana jest na poziomie 30%, co stanowi duże wyzwanie ekonomiczne dla przedsięwzięć tego typu. Sytuacja może ulec zmianie wraz z rozwojem gospodarek wodorowych i szerszym, komercyjnym użyciem wodoru. Obecnie

na świecie są tylko 4 lokalizacje magazynujące wodór w grotach solnych. Trzy z nich znajdują się w stanie Texas (USA)– Clemens Dome, Moss Bluff, Spindletop. Czwarta znajduje się w Anglii, w miejscowości Teesside. W porównaniu z rozwiązaniami naziemnymi, podziemne magazyny wodoru zapewniają wyższy poziom bezpieczeństwa ze względu na grubość ścian. Z drugiej strony przecieki wodoru przez ściany mogą reagować z mikroorganizmami i minerałami, powodując szkody ekologiczne i środowiskowe. Ten aspekt wymaga jeszcze dalszych badań. W Europie powstał projekt o nazwie HyUnder, który ma przeprowadzić ogólnoeuropejską ocenę potencjału magazynowania wodoru w podziemnych zbiornikach na potrzeby odnawialnej energii elektrycznej.

<sup>1</sup> *Magazynowanie energii*, Academia, 65 (2021), 34-40

<sup>2</sup> *Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis*, International Journal of Hydrogen Energy 44 (2019) 12254-12269

<sup>3</sup> *Large-scale storage of hydrogen*, International Journal of Hydrogen Energy, 44 (2019)11901-11919

<sup>4</sup> *Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part II: H2 storage, transportation, and distribution*, International Journal of Hydrogen Energy 45, (2020), 20693-20708

<sup>5</sup> *Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification*, Journal of Energy Storage 21 (2019) 241–258

<sup>6</sup> *Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives* . International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017)7254-7262.

# 8 Zastosowania wodoru



Wodór od dziesięcioleci stosowany jest w przemyśle farmaceutycznym, petrochemii czy produkcji amoniaku.

Najbardziej pobudzającymi wyobraźnię zastosowaniami wodoru są jednak technologie kosmiczne, gdzie wodór wraz z tlenem stanowią napęd rakiet kosmicznych. Szerokie spektrum wykorzystania wodoru wynika z powszechności i dostępności tego pierwiastka. Z rozwojem gospodarki wodorowej i konkurencyjnością wodoru jako surowca zakres i liczba jego zastosowań znacząco wzrosną.

Rysunek 24. Zastosowania wodoru.



W części sektorów wodoru jest stałe zadomowiony (produkcja nawozów, petrochemia), w innych prace wdrożeniowe są już na bardzo wysokim poziomie i są pierwsze prototypy czy komercyjne zastosowania (transport lądowy, samochody, autobusy, kolej). Istnieją także obszary, w których wodoru stanowi bardzo obiecujący kierunek rozwoju, natomiast niezbędne okazują się dalsze prace badawczo-rozwojowe. W poniższym rozdziale zebrano zastosowanie technologii wodorowej, jednak należy mieć na uwadze, że jest to bardzo innowacyjny obszar, z dużymi nadziejami i nakładami finansowymi, co otworzy zupełnie nowe możliwości.

## 8.1. Bezpośrednie paliwo i technologia Power-to-gas

Znaczna ilość globalnej emisji CO<sub>2</sub> spowodowana jest bezpośrednim spalaniem paliw kopalnych w celu generacji ciepła. Procesy te zawierają się od produkcji w hutach, poprzez elektrociepłownie ogrzewające mieszkania i wodę, a kończąc na podgrzewaniu żywności w kuchenkach gazowych. Efektem bezpośredniego spalania wodoru jest woda i ciepło. W procesie tym nie są generowane żadne inne związki, przez co wodoru może stanowić substytut gazu ziemnego, natomiast na chwilę obecną jest to ekonomicznie nieopłacalne. Dodatkowo wymagać będzie wymiany całej infrastruktury od gazociągów po odbiorniki końcowe, dlatego należy się spodziewać, że bezpośrednie spalanie wodoru stosowane będzie miejscowo i z czasem powoli się rozwinie. Warto podkreślić, że gęstość energii na jednostkę masy dla wodoru wynosi 143 MJ/kg, gdzie gaz ziemny ma wartość 53.6 MJ/kg, czysty metan 55.6 MJ/kg, a benzyna czy ropa naftowa około 46.3 MJ/kg.

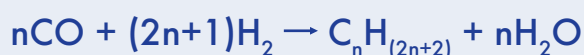
## 8.2. Synteza paliw węglowodorowych

Mieszanka tlenków węgla oraz wodoru może być przekształcona w paliwo w procesie Fischer-Tropscha albo fermentacji gazu syntezowego. W obu przypadkach strategia gas-to-liquid konwertuje proste gazy do bardziej złożonych węglowodorów lub alkoholi.



Strategia ta wydaje się bardzo użyteczna w procesie utylizacji, gdzie przykładowo produkty organiczne rozkładane są za pomocą metod termochemicznych na CO i H<sub>2</sub>, a następnie oczyszczone i zsyntezowane na nowe produkty. W skład tej metody wchodzi kilka różnych reakcji, z których najważniejsze to:

#### Produkcja alkanów:



#### Produkcja alkoholi:



#### Produkcja karbonylków:



Na drodze tych reakcji możliwe jest uzyskanie wielu ważnych substancji, takich jak etanol, metanol, eter dimetylowy (DME) i innych. Wykorzystanie wodoru w sektorze chemicznym i petrochemicznym ma długą historię i jest dobrze opanowane.

## 8.3. Wzbogacenie paliwa

Wodór jest powszechnie stosowany w przemyśle petrochemicznym w różny sposób. Jednym z nich jest oczyszczanie substancji ropopochodnych ze związków siarki czy azotu poprzez uwodornianie odpowiednio do H<sub>2</sub>S oraz NH<sub>3</sub>. Efektem tego jest paliwo, które

nie zatruwa katalizatorów (związki siarki niszczą katalizator, natomiast związki azotu powodują hamowanie i dezaktywację katalizatora ze względu na osadzanie się, przez co zmniejsza się powierzchnia czynną). Podobną rolę wodór spełnia przy oczyszczaniu paliwa z metali ciężkich. Innym ważnym aspektem jest hydrokraking do produkcji lżejszych paliw o wyższym stosunku atomów wodoru do węgla. Przemysł petrochemiczny jest też dostawcą wszelkich tworzyw sztucznych, które w procesach przetwarzania wymagają wodoru.

## | 8.4. Ogniwa paliwowe

Ogniwa paliwowe przetwarzają energię chemiczną wodoru w prąd elektryczny. Możliwe jest skalowanie ogniwa paliwowego tak, by zasilić różne urządzenia. Zaczynając od urządzeń wielkości zegarka czy telefonu, poprzez urządzenia domowe czy samochody osobowe, a kończąc na samochodach ciężarowych, samolotach czy pociągach. Ogniwa paliwowe znajdują swoje zastosowanie wszędzie tam, gdzie nie możemy bezpośrednio korzystać z sieci energii elektrycznej. Z powodzeniem mogą zastąpić silnik spalinowy, ale łączą w sobie też cechy baterii. Głównymi odbiorcami ogniw paliwowych będą sektor transportowy i zastosowania mobilne, ale są także zastosowania stacjonarne, wykorzystywane jako awaryjne źródło. Liczba możliwych zastosowań jest naprawdę ogromna - szczegółowe informacje podane są w kolejnym rozdziale.



## 8.5. Zastosowania w lotnictwie

Sektor lotnictwa dynamicznie się rozwija, do 2030 roku przewidziany jest 5% wzrost. Wraz z rozwojem wiąże się jednak coraz wyraźniejszy ślad węglowy, ponieważ paliwo lotnicze (Jet A oraz Jet A-1) pochodzi z paliw kopalnych. Dodatkowy problem stanowi wysokość, na której emitowane są gazy, ponieważ wychwytywanie substancji szkodliwych staje się niemożliwe. Alternatywą może być ciekły wodór, który posiada wyższą wartość energetyczną niż paliwo lotnicze. Bezpośrednie użycie wodoru w silniku jest problematyczne ze względu na niską energię zapłonu i dużą prędkość płomienia, a dodatkowo ślad niecałkowicie spalonego wodoru może powodować kruchość stali. Innym podejściem jest zastosowanie ogniw paliwowych. Taką możliwość zapowiedział jeden z wiodących producentów samolotów i wskazał, że pierwszego użycia komercyjnego można spodziewać się w 2035 roku. Niezależnie od użycia, ciekły wodór wykazuje obiecujący potencjał jako paliwo lotnicze, przyczyniając się do redukcji emisji gazów cieplarnianych, natomiast wszelkie zastosowania i rozwiązania są jeszcze na wczesnym etapie wdrażania.

## 8.6. Zastosowanie w żegludze

W celu działania na rzecz ochrony środowiska, podobną strategię, jak w sektorze lotniczym, należy przyjąć w transporcie morskim, który jest odpowiedzialny za emisję 3% światowego CO<sub>2</sub>. Tutaj rozważany jest zarówno wodór, jak i amoniak do zastąpienia tradycyjnych paliw na bazie ciężkich olei. W różnych scenariuszach bierze się pod uwagę również stosowanie wodoru jako dodatkowego paliwa (wraz z dieslem), co pozwoli na redukcję gazów cieplarnianych o 40%. Podobnie jak w lotnictwie możliwe jest też stosowanie ogniw paliwowych, jednak na chwilę obecną rozwiązania te wymagają dalszych prac.

## 8.7. Produkcja amoniaku

Amoniak (NH<sub>3</sub>) jest jednym z najważniejszych związków chemicznych, stosowanych jako nawóz. Ponadto jest on używany do produkcji polimerów, farmaceutyków, czujników gazu,

materiałów wybuchowych czy jako czynnik chłodniczy. Sam związek może być produkowany w procesie Habera. W reakcji uczestniczy czysty azot  $N_2$  i wodór  $H_2$  w stosunku 1:3 pod ciśnieniem 20-30 MPa oraz w temperaturze 300-500°C. Efektem jest amoniak – w tym procesie nie są generowane żadne dodatkowe produkty. Tak szerokie zastosowanie amoniaku sprawia, że ośrodki go produkujące są obecnie głównymi odbiorcami wodoru i sektor ten z pewnością pozostanie ważnym graczem na rynku wodorowym.

## | 8.8. Zastosowania w farmaceutyce

Wodór jest też bardzo ważnym substratem w przemyśle farmaceutycznym. Służy on do syntezy prekursorów leków, takich jak nadtlenek wodoru, sacharoza czy kwas solny. Szczególnie ważny jest nadtlenek wodoru - przezroczysta cieczą, często uważaną za kluczową substancję chemiczną i utleniacz w przemyśle farmaceutycznym. Stosuje się ją jako środek przeciwdrobnoustrojowy czy biocydy. Prowadzone są też intensywne badania nad zastosowaniem wodoru jako gazu medycznego w obszarach, takich jak stany zapalne, alergie czy apoptoza.

## | 8.9. Przemysł metalurgiczny

W przemyśle metalurgicznym wodór sprawdza się w dwóch obszarach: przy spawaniu oraz przy produkcji stali. W pierwszym przypadku spala się wodór w atmosferze tlenu, co pozwala na osiągnięcie wyższych temperatur (do 3000°C), niż przy acetylenie, przez co możliwa jest praca z materiałami ogniotrwałymi. Dużo ważniejszym obszarem jest produkcja stali, która jest odpowiedzialna za emisję 7,3% światowego  $CO_2$ . W tradycyjnym wydaniu produkcja stali z rudy żelaza wymaga stosowania pieca tlenowego i węgla jako reduktora, co jest źródłem gazów cieplarnianych. Alternatywną metodą jest użycie elektrycznych pieców łukowych (EAF, ang. Electric Arc Furnace) i wykorzystanie metody bezpośredniej redukcji żelaza (DRI ang. Direct Reduced Iron). W metodzie tej reduktorem jest wodór i przy założeniu, że piec zasilany jest energią elektryczną, to emisyjność całego przemysłu można zmniejszyć do zera. Wielu producentów stali w Europie wdraża lub testuje ten proces technologiczny.

## | 8.10. Napęd raket kosmicznych

Źródłem energii większości obecnych silników raketowych jest reakcja spalania wodoru w tlenie, a strumień gazów służy do uzyskania siły ciągu. Silnik raketowy wykorzystywany jest w raketach, promach kosmicznych oraz pociskach raketowych. Wodór jest więc od samego początku związany z przemysłem kosmicznym, a jego rola znacznie jeszcze wzrastać wraz z nastaniem ery kosmicznego górnictwa. Warto mieć na uwadze, że wydobywany materiał musi być w jakiś sposób transportowany na Ziemię, więc nie można całego paliwa zabrać z powierzchni naszej planety. Z tego powodu pierwszym surowcem, pozyskiwanym w górnictwie kosmicznym, będzie woda, a następnie w procesie elektrolizy uzyskiwany będzie wodór i tlen. Proces ten zapewni paliwo niezbędne do przesyłu wydobywanych surowców.

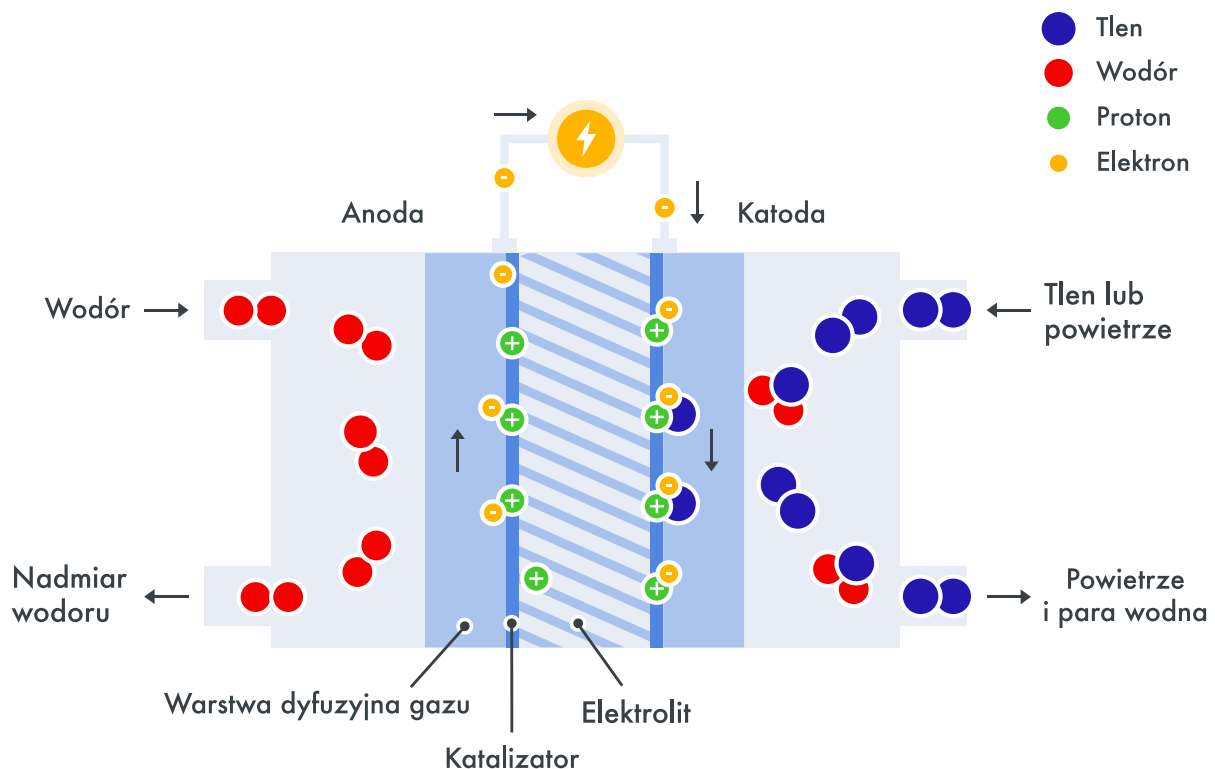
# 9 Ogniwa paliwowe



Ogniwo paliwowe jest urządzeniem elektrochemicznym, które przekształca energię chemiczną bezpośrednio w energię elektryczną.

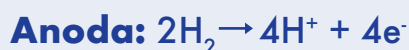
Najczęściej paliwem zasilającym jest wodór, który łączy się z tlenem, w wyniku czego powstaje prąd, woda oraz ciepło. W procesie tym nie powstają żadne inne produkty, dlatego też energia elektryczna uzyskana w ten sposób jest neutralna dla środowiska.

Rysunek 25. Budowa ogniwa paliwowego.



Budowa ogniwa paliwowego jest niezwykle prosta. Z jednej strony dostarczany jest wodór, który na anodzie rozbijany jest na proton i elektron, a pomiędzy elektrodami znajduje się membrana (elektrolit), która przewodzi tylko protony, wobec czego elektrony kierowane są zewnętrzną ścieżką. Z drugiej strony do katody dostarczany jest tlen, (zazwyczaj jest to nieoczyszczony tlen prosto z powietrza) i w reakcji łączenia tlenu z wodorem powstaje woda i ciepło. Połączenie anoda-elektrolit-katoda stanowi serce ogniwa paliwowego w angielskiej nomenklaturze nazywane jest skrótem MEA (ang. Membrane Electrode Assemblies), co można przetłumaczyć jako podzespół elektrodowo membranowy. Przepływ ładunku w obiegu zewnętrznym generuje prąd elektryczny, który wykorzystany może być w dowolnym odbiorniku. Teoretyczne napięcie możliwe do uzyskania w tej reakcji wynosi 1.23V i jest zależne od temperatury pracy i strat wewnętrznych. Realnie uzyskiwane napięcie w ogniwie wynosi poniżej 1 V.

Reakcje chemiczne na poszczególnych elementach opisać można wzorami:



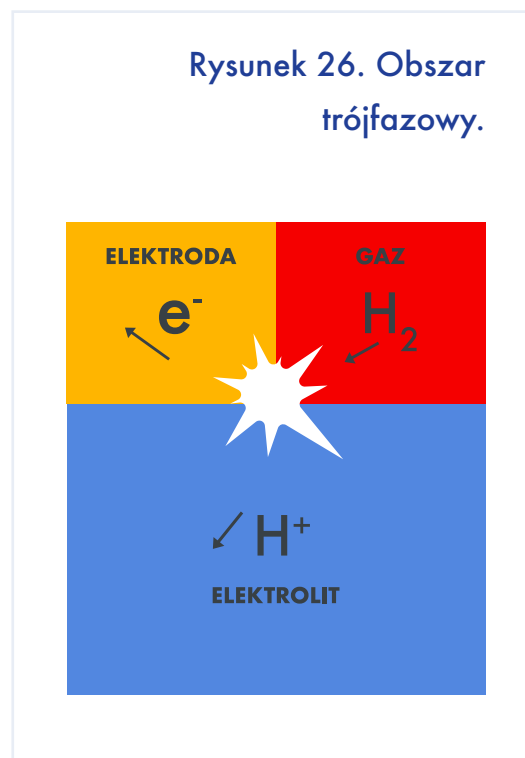
Powyższa reakcja opisuje najczęściej stosowane ogniwa paliwowe typu PEM (ang. Polymer Electrolyte Membrane). Składowe reakcje chemiczne, zachodzących na elektrodach, mogą się różnić w zależności od typu ogniwa, ale sumaryczna reakcja powinna zachodzić według tego samego schematu. Z punktu widzenia użytkownika istotny jest uzyskiwany prąd elektryczny, a powstała woda oraz ciepło muszą na bieżąco być usuwane z układu. Zarówno substraty, jak i produkty reakcji, występują w postaci gazowej (woda jest w postaci pary wodnej) i odprowadzane są za pomocą warstwy przepuszczającej gazy, w skrócie GDL (ang. Gas Diffusion Layer). Oprócz funkcji przepuszczania gazu, warstwa ta musi doprowadzić elektrony z zewnętrznego obiegu, odprowadzić ciepło oraz wodę i bardzo często spełnia jeszcze funkcję usztywniającą MEA.

Całość reakcji chemicznych przebiega na elektrodach, które albo nanosi się bezpośrednio

na elektrolit, a następnie składa się z warstwą dyfuzyjną, albo elektrody naparowywane są na warstwę GDL. Niezależnie która metoda jest stosowana, obszar, w którym zachodzą reakcje, jest najbardziej skomplikowanym elementem całego ogniwa i fizycznie jest granicą elektrody, elektrolitu oraz przestrzeni gazu. Taki obszar trójfazowy jest jednym z kluczowych rozwiązań dla wysokiej sprawności ogniw paliwowych.

Obszar trójfazowy jest praktycznie punktowy, więc w procesie produkcji, należy zadbać o jak największą liczbę obszarów jednocześnie, o jak najmniejszych możliwych rozmiarach. Katalizator formowany jest w postaci drobnych cząstek, nanoszonych na powierzchnię proszku grafitowego, a następnie całość spajana jest albo z warstwą dyfuzyjną, albo z elektrolitem. Katalizatorem jest zazwyczaj platyna z domieszką innych metali szlachetnych (ruten, iryd) – są to materiały o bardzo wysokich cenach, występujące w niewielkiej ilości na Ziemi. Dodatkowo platyna łatwo ulega zatruciu w obecności aktywnego tlenku węgla, tj. do temperatury 120°C.

Rysunek 26. Obszar trójfazowy.

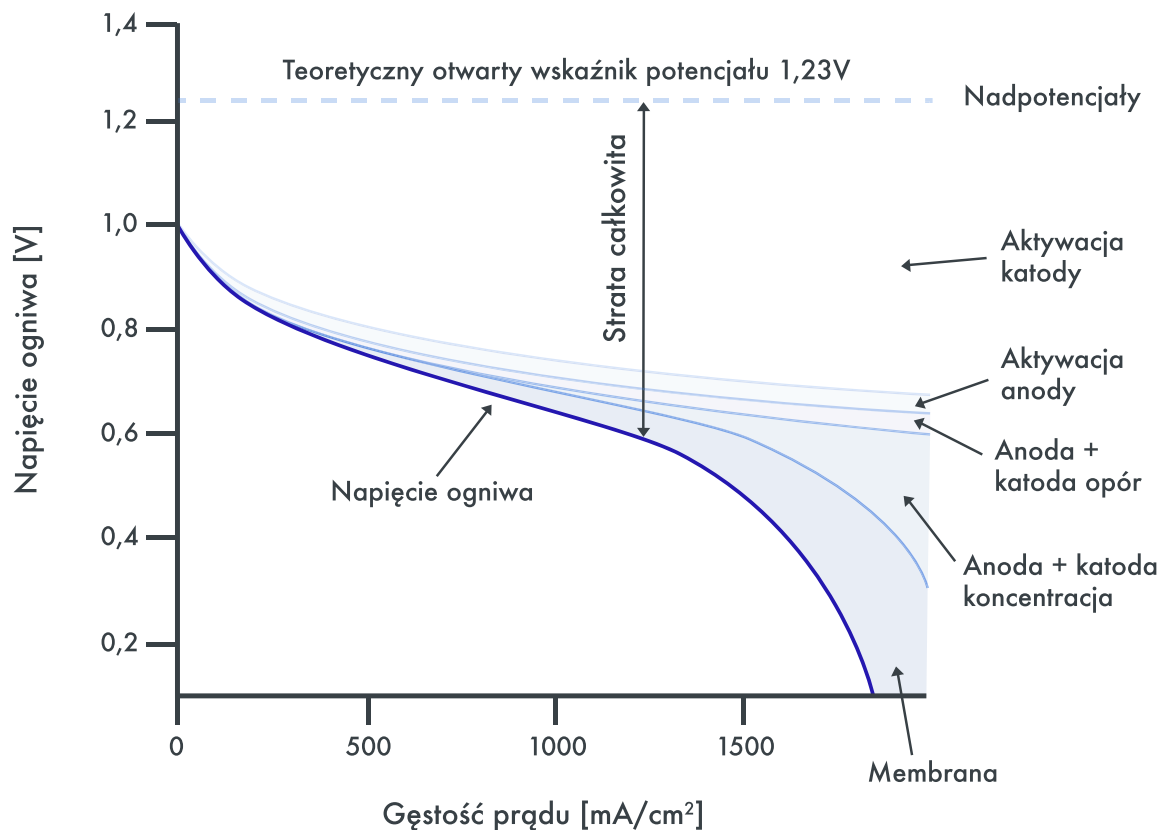


Wszystkie powyższe czynniki, a także warunki, w których pracuje ogniwo (temperatura, wilgotność czy szybkość przepływu wodoru/tlenu), składają się na rzeczywistą sprawność układu. Najlepiej charakteryzuje ją krzywa polaryzacji, która przedstawia zależność potencjału ogniwa od gęstości prądu. Na wykresie zaznaczone są także straty występujące na poszczególnych elementach MEA.





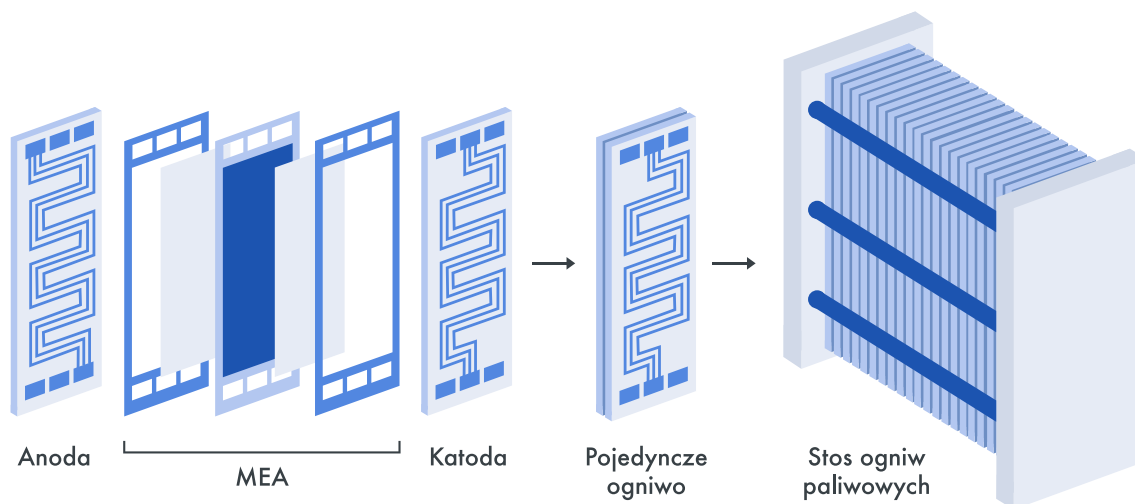
Rysunek 27. Krzywa polaryzacji i rejony strat napięcia.



Z powyższego wykresu wynika, że pojedyncze ogniwo paliwowe generuje napięcie poniżej 1 V, a natężenie prądu wynika bezpośrednio z powierzchni czynnej elektrolitu. Większe napięcie można uzyskać łącząc szeregowo kolejne ogniwa, tworząc tzw. stosy. Analogicznie, natężenie prądu można skalować poprzez powiększenie powierzchni MEA. Oczywiście do każdej membrany należy doprowadzić paliwo oraz tlen, a także zapewnić odprowadzenie wody i ciepła. Wykorzystuje się do tego płytki dwubiegunowe (płyty bipolarne), które mają dwa niezależne kanały przepuszczające gazy i charakteryzują się dobrą przewodnością elektryczną i cieplną oraz odpowiednią wytrzymałością. Równie ważnymi parametrami płyt jest ich masa oraz odpowiedni kształt kanalików, tak, by doprowadzane gazy wykorzystywały całą powierzchnię podzespołu elektroda-elektrolit. Najczęściej płyty wykonane są z grafitu lub metalu, a całe stosy liczą od kilkudziesięciu do kilkuset pojedynczych ogniw. Do większych układów, w celu zapewnienia odpowiedniego napowietrzenia, stosuje się dodatkowo sprężarki tłoczące powietrze, co z jednej strony znacznie zwiększa szybkość

reakcji, a tym samym zwiększa sprawność ogniwa. Jednakże z drugiej strony sprężarki do zasilania potrzebują dużej mocy, która jest stratą bierną układu.

Rys. 4 Pojedyncze ogniwo i stos ogniw paliwowych



Za pomocą modyfikacji wymiarów i wielkości stosu możliwe jest skalowanie ogniwa paliwowego tak, by zasilić różne urządzenia. Zaczynając od tych wielkości zegarka czy telefonu, poprzez zasilanie urządzeń domowych czy samochodów osobowych, a kończąc na samochodach ciężarowych, samolotach czy pociągach.

Ponieważ każde zastosowanie wymaga innych warunków – temperatury, niskiej masy układu, pracy ciągłej bądź nagłych skoków mocy, niskiego natężenia hałasu, dużej odporności mechanicznej itd. - to powstało wiele koncepcji budowy ogniwa paliwowego. Ogólna budowa i zasada działania pozostaje niezmienna, ale sposób, w jaki transportowany jest wodór bądź tlen, oraz miejsce, w którym dochodzi do reakcji łączenia, wynika z budowy elektrolitu. Rodzaj elektrolitu prowadzi do rozróżnienia kilku grup ogniw paliwowych:

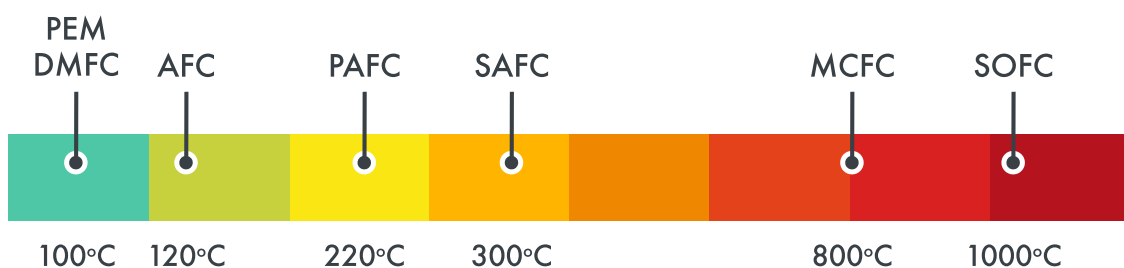
- Ogniwo z elektrolitem polimerowym (PEM FC, ang. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- Ogniwo z kwasem fosforowym (PAFC, ang. Phosphoric Acid Fuel Cell)

- Ogniwo alkaiczne (AFC, ang. Alkaline Fuel Cell)
- Ogniwo zasilane metanolem (DMFC, ang. Direct Methanol Fuel Cell)
- Ogniwo ze stałym elektrolitem tlenkowym (SOFC, ang. Solid Oxide Fuel Cell)
- Ogniwo węglanowe (MCFC, ang. Molten Carbonate Fuel Cell)
- Ogniwo z elektrolitem kwasów stałych (SAFC, ang. Solid Acid Fuel Cell)

Ilość rodzajów ogniw paliwowych nie świadczy zatem o skomplikowaniu zachodzących procesów czy zawiełej konstrukcji urządzeń, ale raczej o obecnym stanie zaawansowania technologii i liczbie potencjalnych zastosowań. Zmiana elektrolitu ma poważne konsekwencje w budowie i warunkach pracy poszczególnego ogniwa paliwowego. Jedną z korzyści ogniw paliwowych jest ich uniwersalność i możliwość pracy w różnych warunkach zewnętrznych. Wiele ogniw może pracować w temperaturze pokojowej, a ich sprawność rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Są też rozwiązania technologiczne, które aktywują się dopiero w wyższych temperaturach rzędu 600-1000°C. Schematycznie optymalne warunki temperatury pracy pokazano na rysunku 29.



Rysunek 29. Temperatura pracy ogniw paliwowych różnego typu.

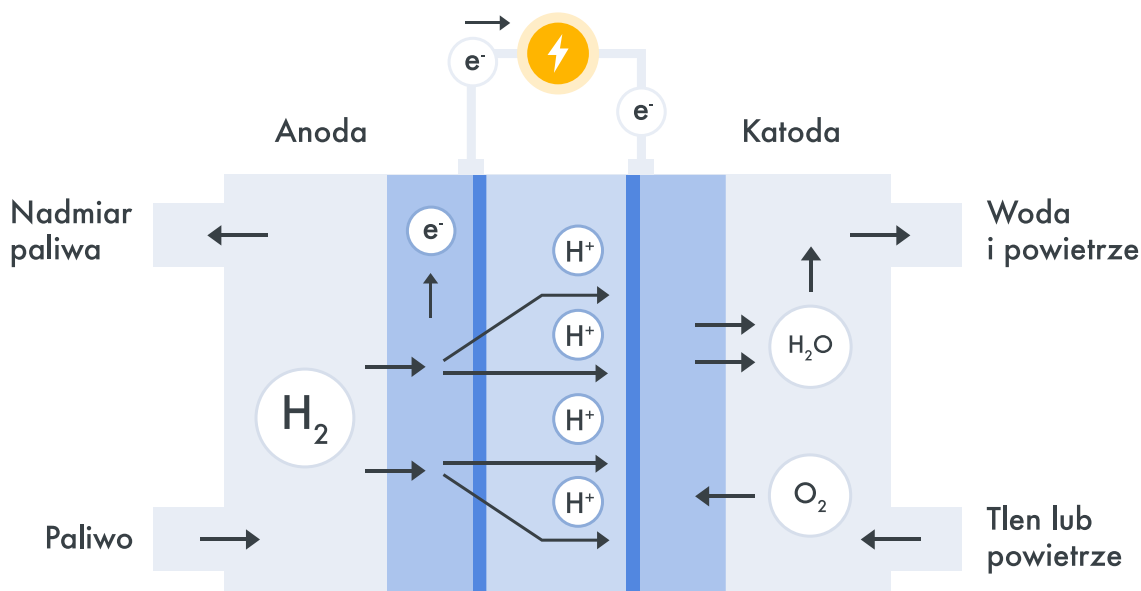


Sprawność ogniwa paliwowego jest sprawą bardziej skomplikowaną. Zależna jest nie tylko od temperatury pracy, ale też innych czynników, takich jak ciśnienie, wilgotność powietrza, jakość wykonania, wielkość stosu czy zastosowanie innych elementów konstrukcyjnych, generujących pasywne straty. Ważnym elementem w projektowaniu urządzeń opartych na ogniwach paliwowych jest zarządzanie ciepłem oraz wodą, które są produktami reakcji



Elektrolit składa się z głównego łańcucha polimerowego, najczęściej bazującego na politetrafluoroetylenie (znanego pod nazwą teflon®) z łańcuchem bocznym o mocno kwasowym zakończeniu (najczęściej wykorzystującym resztę kwasu siarkowego HSO<sub>3</sub>). Różne konfiguracje elektrolitu polimerowego znane są pod komercyjnymi nazwami Nafion, Anodisc, Sterlitech. Same polimery są lekkie i bardzo elastyczne, można z nich formować cienkie warstwy, więc ogniwa paliwowe typu PEM najczęściej wykorzystywane są tam, gdzie wymiar i masa mają duże znaczenie – w transporcie i urządzeniach mobilnych. Mechanizm przewodzenia bazuje na cząsteczce wody, dlatego zarządzanie nawilżeniem membrany jest niezwykle ważne, co ma szerokie znaczenie dla budowy układu. Z jednej strony temperatura pracy ogniwa jest ograniczona do temperatury wrzenia wody 100°C (w praktyce zakres pracy ogranicza się do 80°C), z drugiej strony doprowadzenie powietrza od strony katody nie może wysuszyć membrany. Schemat ogniwa przedstawiono na rysunku 31, a reakcje opisane są na początku rozdziału 6.

Rysunek 31. Ogniwo paliwowe z elektrolitem polimerowym (PEM).

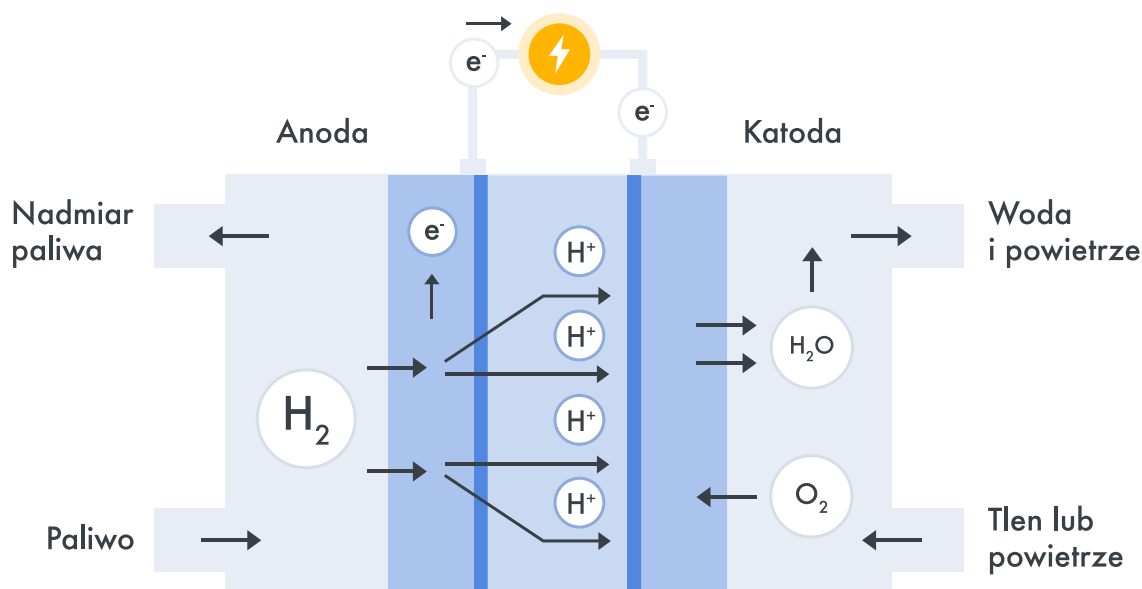


Istnieje grupa ogniw typu PEM o podwyższonej temperaturze pracy HT PEM (ang. High Temperature Polymer Electrolyte Membrane) lub IT PEM (ang. Intermediate Temperature

Polymer Electrolyte Membrane), gdzie zamiast wody stosuje się ciecz jonowe. Pozwala to na podniesienie temperatury od ok. 120°C do ok. 150°C, co w dużej mierze pozwala uniknąć zatrucia elektrod, natomiast technologie te są jeszcze w fazie badań i rozwoju.

## 9.2. PAFC

Rysunek 32. Ogniwko paliwowe z kwasem fosforowym (PAFC).



Ogniwa paliwowe z elektrolitem z kwasu fosforowego ( $H_3PO_4$ ) działają na tej samej zasadzie, jak ogniwa typu PEM. Substraty, reakcje i miejsca, w których dochodzi do poszczególnych operacji, są takie same, natomiast różnica wynika w zastosowaniu kwasu fosforowego jako elektrolitu zamiast wody. Kwas fosforowy jest słabszym przewodnikiem jonowym, dlatego przewodność jest na odpowiednim poziomie w temperaturze rzędu 150-200°C. Taki zakres temperatury pracy pozwala uniknąć problemów, związanych z zatruciem elektrod przez tlenek węgla CO, co umożliwia stosowanie mniej oczyszczonego wodoru.

Sprawność ogniw typu PAFC jest stosunkowo niska - rzędu 40%, jeżeli wykorzystywana jest

tylko energia elektryczna, natomiast wartość ta wynosi powyżej 85%, jeżeli wykorzystywane jest także ciepło (CHP – ang. Combined Heat and Power). Niska sprawność elektryczna oznacza, że do osiągnięcia tych samych parametrów potrzebne jest większe, i tym samym cięższe, ogniwo. Z tego powodu ogniwa typu PAFC częściej wykorzystuje się jako zasilanie stacjonarne, ale są też rozwiązania typu PAFC stosowane w cięższych pojazdach (autobusy, samochody ciężarowe). Schemat budowy ogniwa i zachodzących reakcji jest analogiczny do układu typu PEM.

## 9.3. AFC

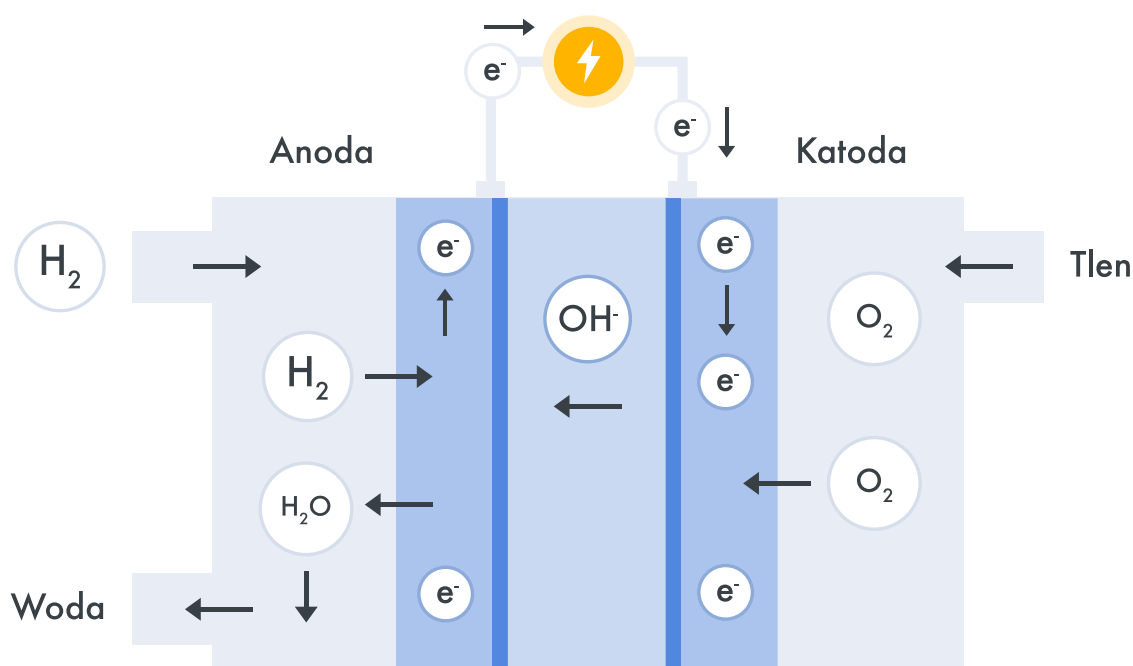
Alkaliczne ogniwo paliwowe jest jednym z pierwszych konceptów, rozwijanych wśród ogniw paliwowych. Najśłynniejszym zastosowaniem było użycie tego ogniwa w programach NASA w misji Apollo w latach 60., gdzie ogniwo zaopatrywało pojazdy kosmiczne w prąd elektryczny, wodę oraz ciepło. Wykorzystanie wszystkich tych komponentów pozwoliło na osiągnięcie sprawności rzędu 70%. Tradycyjnie w ogniwach AFC rolę elektrolitu spełniają wodne roztwory wodorotlenku potasu (KOH) lub wodorotlenku sodu (NaOH). Zastosowanie ciekłego elektrolitu pozwala na niższą temperaturę pracy, niż ogniwa typu PEM, jednocześnie ograniczenie ze względu na wysokie temperatury jest na poziomie 220°C. Szeroki zakres temperatury pracy sprawia, że izolacja termiczna nie stanowi szczególnego wyzwania. Z drugiej strony zastosowanie ciekłego elektrolitu wiąże się z tendencją do przeciekania lub wysuszenia. Zmienia się także sam mechanizm przewodzenia oraz miejsce, gdzie zachodzą reakcje. W elektrolicie transportowana jest ujemnie naładowana cząsteczka OH<sup>-</sup>, a sama reakcja zachodzi na anodzie, z której należy odprowadzić powstałą wodę. Sumaryczna reakcja jest jednak taka sama, jak dla ogniwa typu PEM, natomiast poszczególne składowe można zapisać:



Zmiana nośnika ma też kilka innych konsekwencji. Zasadowe środowisko przyspiesza reakcje na katodzie, więc nie ma konieczności stosowania platynowych elektrod, co znacząco obniża koszt całego ogniwa. Najczęściej stosuje się elektrody niklowe lub nikiel połączony ze srebrem. Zmiana materiału na elektrody nie rozwiązuje jednak problemu z zatrutowaniem tlenkiem węgla (CO) czy związkami siarki (S). Do tego dochodzi jeszcze zatrucie samego elektrolitu, który wchodzi w reakcję z dwutlenkiem węgla - nawet niewielkie stężenie CO<sub>2</sub> powoduje drastyczne zmniejszenie sprawności i długości życia ogniwa. Wymusza to nie tylko stosowanie oczyszczonego wodoru od strony anody, ale także czystego tlenu od strony katody, co powoduje, że ogniwa alkalicznie nie mogą być stosowane przy zasilaniu powietrzem.

Rozwijane są rozwiązania, które mają zastąpić płynny elektrolit za pomocą elektrolitu stałego (AEM FC, anion-exchange membrane fuel cells (AEMFCs), alkaline membrane fuel cells (AMFCs)). Takie podejście pozwoli usunąć niedogodności związane z obiegiem cieczy, przeciekaniem, dodatkowo przyspieszone będą reakcje elektrochemiczne, a także możliwe będzie zastosowanie innego rodzaju paliwa, takiego jak metanol, etanol czy ciekły

Rysunek 33. Alkaliczne ogniwa paliwowe (AFC).





amoniak. Oczywiście jon  $\text{OH}^-$  jako nośnik elektryczny jest zdecydowanie większy i cięższy niż  $\text{H}^+$ , więc przewodność takiego elektrolitu jest znacząco mniejsza, niż w elektrolicie typu PEM. Zastosowanie stałego elektrolitu ma kilka zalet, jednak zatrucie tlenkiem węgla i konieczność stosowania czystego tlenu wciąż jest wyzwaniem.

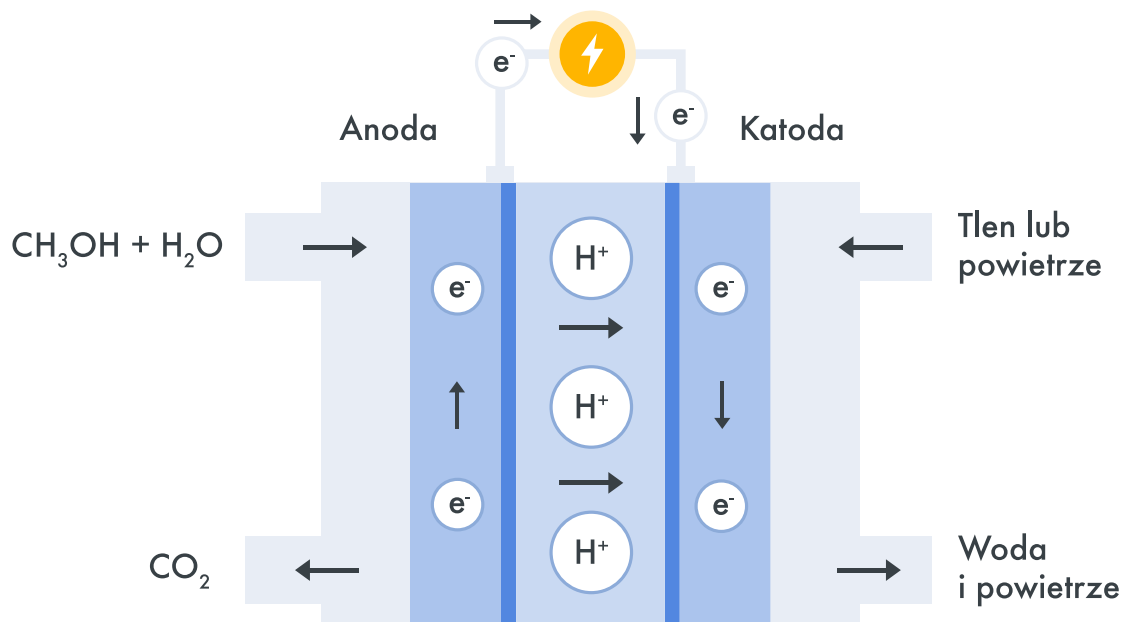
## 9.4 DMFC

Ogniwo zasilane bezpośrednio metanolem jest w zasadzie ogniwem typu PEM: zarówno elektrolit, jak i mechanizm przewodzenia, są takie same. Różnica polega na rodzaju paliwa oraz reakcji zachodzącej na anodzie. Zamiast wodoru paliwem jest czysty metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), który mieszany z wodą dostarczany jest do układu. Na anodzie zachodzi rekombinacja, w której powstaje dwutlenek węgla, wodór w postaci jonów  $\text{H}^+$  i elektrony. Aby ta reakcja miała miejsce to elektroda, oprócz platyny, zbudowana jest także z rutenu. Reakcje mogą być zapisane w postaci:



Warunki pracy ogniwa pokrywają się z ogniwami typu PEM. Uzyskiwane moce są jednak stosunkowo niskie, co oznacza, że uzyskujemy niewielkie ilości energii elektrycznej w długim czasie. W połączeniu ze stosunkowo łatwym przechowywaniem metanolu (szczególnie w porównaniu z wodorem), niewielkimi wymiarami oraz małą wielkością, ogniwa typu DMFC z powodzeniem mogą być używane do zasilania urządzeń mobilnych elektronicznych (laptopy, telefony, kamery i inne). Rozkład metanolu generuje dwutlenek węgla, więc uzyskiwana energia elektryczna nie jest całkowicie neutralna dla środowiska. Ponadto, praca ciągła ogniwa DMFC w zamkniętych i słabo wentylowanych pomieszczeniach nie jest bezpieczna ze względu na wzrost stężenia  $\text{CO}_2$ .

Rysunek 34. Ogniwo paliwowe zasilane metanolem (DMFC).



## 9.5 SOFC

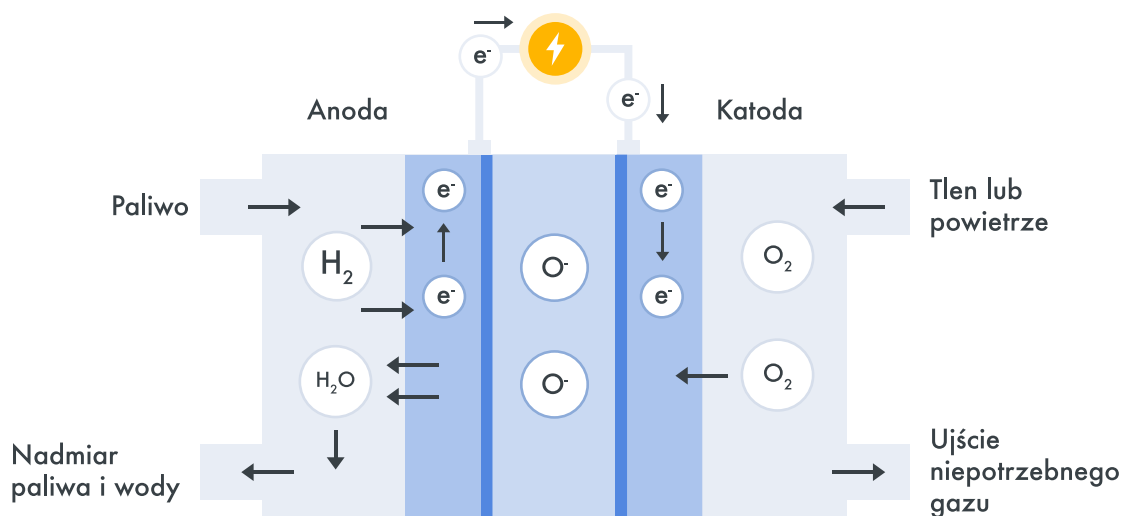
Elektrolitem w ogniwach stałotlenkowych jest ceramika, najczęściej tlenek cyrkonu ( $ZrO_2$ ) z domieszką tlenku itru ( $Y_2O_3$ ). Mechanizm przewodzenia bazuje na transporcie jonu tlenu ( $O_2^-$ ), a reakcja łączenia wodoru z tlenem zachodzi na anodzie. Ponieważ tlen wiąże się silnymi wiązaniami kowalencyjnymi w strukturze elektrolitu to dostarczona energia na zerwanie wiązania musi być odpowiednio duża. Oznacza to, że efektywny transport ładunku występować będzie dopiero w wysokich temperaturach i temperatura robocza dla ogniw typu SOFC sięga nawet  $1000^\circ C$ .

Tak wysokie temperatury zapewniają odpowiednią szybkość katalizy i pozwalają używać elektrod z materiałów niebędących metalami szlachetnymi, co znacząco redukuje koszty produkcji. Nie występuje problem zatruwania elektrod, a sam reforming paliwa można przeprowadzić wewnątrz samego ogniwa. Cecha ta pozwala również używać innych paliw, takich jak gaz ziemny, biogaz oraz gazy węglowodorkowe. Całość układu jest znacznie

uproszczona, przez co ogniwa typu SOFC są trwałe i mogą pracować zdecydowanie dłużej. Wysoka temperatura pracy powoduje jednak zdecydowanie dłuższy czas rozruchu do osiągnięcia odpowiednich parametrów pracy, ale także duże naprężenia mechaniczne, które mogą doprowadzić do pęknięcia kruchej ceramiki, co z kolei sprowadza się do zmniejszenia sprawności. Jeżeli dodamy do tego masę samego elektrolitu oraz konieczność zapewnienia odpowiedniej izolacji termicznej, to zastosowania ogniwa typu SOFC należy szukać pośród rozwiązań stacjonarnych. Zastosowanie ogniwa wysokotemperaturowych ma jedynie sens przy wykorzystaniu energii elektrycznej oraz ciepła (CPH) i w takiej konfiguracji osiągana jest sprawność rzędu 85%. Poniżej opisano reakcje zachodzące na elektrodach i schematyczny układ ogniwa.

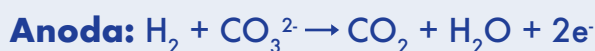


Rysunek 35. Ogniwa paliwowe ze stałym elektrolitem tlenkowym (SOFC).



## 9.6. MCFC

Ogniwa paliwowe z elektrolitem ze stopionych węglanów są najbardziej zbliżone do ogniw typu SOFC, ale posiadają także cechy ogniwa typu PAFC. Zaliczane są do ogniw wysokotemperaturowych, natomiast temperatura pracy jest zredukowana z 1000°C do 600°C. Pozwala to wykorzystać zalety, takie jak wysoka kinetyka zachodzących reakcji (co przekłada się na elektrody z metali nieszlachetnych), duża odporność na zatrucia elektrod oraz możliwość stosowania różnych rodzajów paliwa, w tym gazu ziemnego, metanu, propanu czy oleju napędowego, choć najczęściej stosuje się połączenie wodoru z dwutlenkiem węgla. Obniżenie temperatury pracy jest możliwe dzięki zastosowaniu elektrolitu z mieszanin stopionych węglanów litu ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), potasu ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) i sodu ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), umieszczonych w matrycy ceramicznej. Mechanizm przewodzenia opiera się łączeniu tlenu z dwutlenkiem węgla na katodzie, a następnie na transporcie jonu węglanowego  $\text{CO}_3^{2-}$  do anody, gdzie dochodzi do syntezy nadmiarowego tlenu z wodorem. Dwutlenek węgla przekierowany jest w obwodzie zewnętrznym ponownie do katody. Poszczególne reakcje można opisać jako:

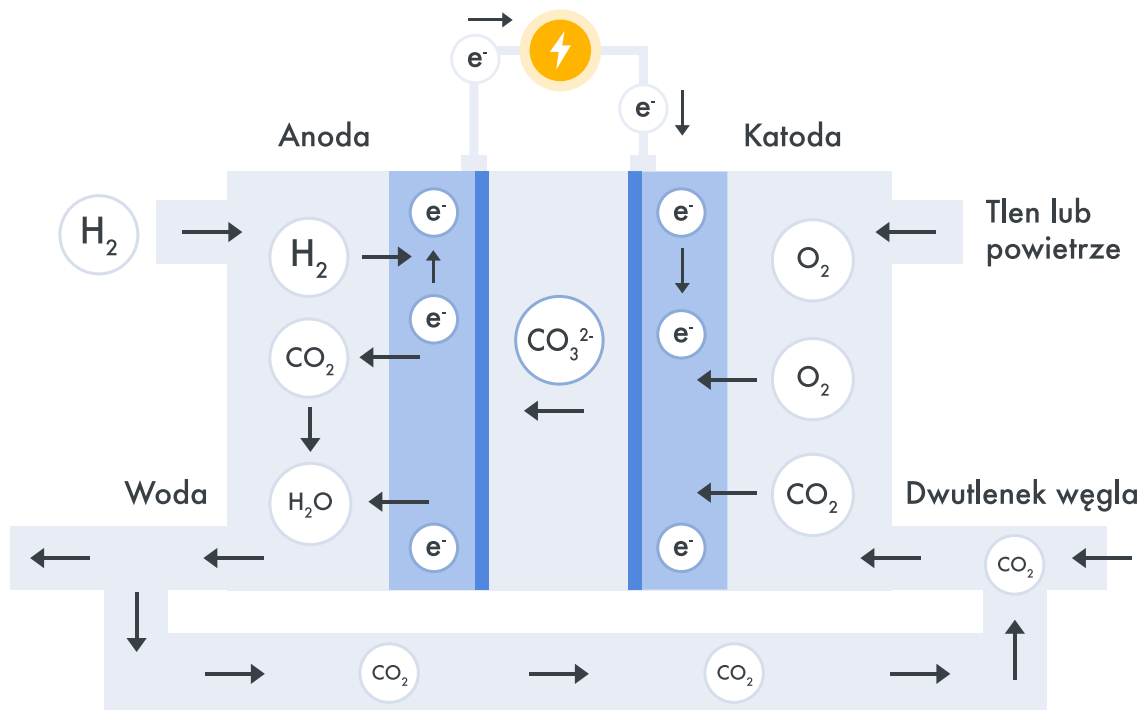


Jeżeli jako paliwo będzie doprowadzony metan zamiast wodoru, to na anodzie zajdzie dodatkowo reakcja wewnętrznego reformingu:



Podobnie jak ogniwa typu SOFC preferowane są zastosowania stacjonarne oraz praca przy wykorzystaniu zarówno ciepła, jak i energii elektrycznej. Sprawność w takiej konfiguracji jest rzędu 85% - należy jednak podkreślić, że wykorzystując tylko energię elektryczną oraz dzięki zastosowaniu turbiny do konwersji ciepła w energię elektryczną możliwe jest uzyskanie sprawności 65%. Jest to zdecydowana poprawa w stosunku do ogniw typu PAFC (maks. 220°C, sprawność 40%). Wysokie temperatury pracy wymagają stosowania odpowiednio wytrzymałych materiałów, a jednocześnie występuje korozyjność elektrolitu, która z kolei prowadzi do degradacji elektrod i spadku czasu życia całego ogniwa.

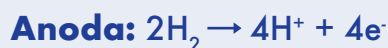
Rysunek 36. Ogniwa paliwowe ze stopionym węglanem (MCFC).



## 9.7. SAFC

Elektrolitem w ogniwach typu SAFC jest stały kwas (sól kwaśna, wodorosól), który chemicznie jest pomiędzy normalną solą a normalnym kwasem. W swojej strukturze posiada

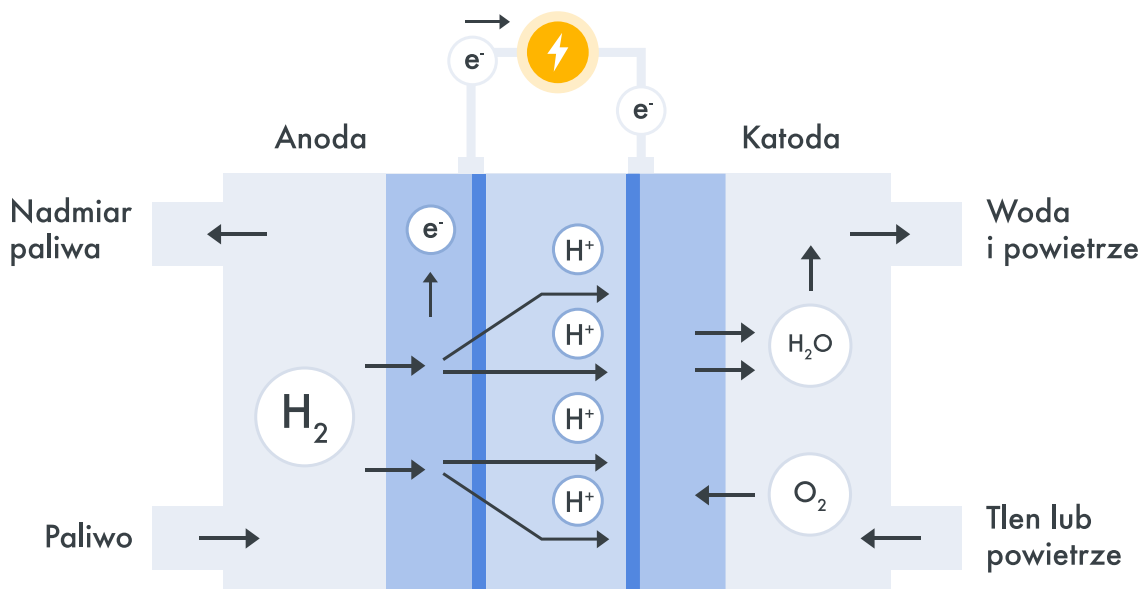
atomy wodoru, które nie uległy dysocjacji. Wodór ten stanowi podstawę mechanizmu przewodzenia protonowego. Powyżej pewnej krytycznej temperatury charakterystycznej dla danego kwasu stałego w strukturze elektrolitu następuje przejście fazowe i pojawia się kilka chemicznie dostępnych miejsc dla każdego protonu. Jon wodoru  $H^+$  przeskakuje chętnie między tymi położeniami, umożliwiając efektywny przepływ ładunku między elektrodami. Temperatura przejścia zazwyczaj jest w okolicach  $150-200^{\circ}C$ , co sprawia, że ogniwa typu SAFC pracują w pośrednich temperaturach tj. w zakresie od ok.  $150^{\circ}C$  do ok.  $300^{\circ}C$ , uzupełniając lukę między ogniwami typu PAFC oraz MCFC. Reakcje zachodzące na elektrodach są takie same z ogniwami typu PEM i SOFC.



Praca w temperaturach pośrednich zabezpiecza elektrody, pozwala używać elektrod z metali nieszlachetnych, ale nie pozwala jeszcze na używanie innych rodzajów paliwa niż wodór (szczególnie biorąc pod uwagę mechanizm przewodnictwa). Zastosowanie elektrolitu, będącego ciałem stałym, pozwala na uniknięcie przeciekania, natomiast w przeciwieństwie do materiałów polimerowych, kwasy stałe nie są odporne na uszkodzenia mechaniczne i łatwo pękają. Ogniwa typu SAFC osiągają sprawność rzędu 50% i mogą być używane zarówno stacjonarnie, jak i do zastosowań mobilnych.



Rysunek 37. Ogniwo paliwowe z elektrolitem kwasów stałych (SAFC).



## 9.8. Zastosowanie ogniw paliwowych

Ogniwa paliwowe przetwarzają energię chemiczną wodoru w prąd elektryczny, ciepło i wodę. Wodór z kolei w najczystszy sposób produkowany jest w procesie elektrolizy z wody i prądu elektrycznego. Wynika z tego, że z energii elektrycznej generowany jest wodór, który służy do produkcji energii elektrycznej. Każdy z tych procesów generuje straty, więc zastosowanie ogniw paliwowych ma sens jedynie tam, gdzie nie możemy bezpośrednio korzystać z sieci energii elektrycznej. Drugim równie ważnym zastosowaniem jest zasilanie awaryjne w obiektach, które muszą mieć zapewniony stały dostęp do energii elektrycznej. Reasumując, ogniwa paliwowe doskonale uzupełniają istniejące już źródła zasilania i są urządzeniami łączącymi cechy tradycyjnych silników spalinowych oraz baterii. Podobny będzie zatem zakres potencjalnych zastosowań.

## 9.8.1. Zastosowania stacjonarne

Zastosowania stacjonarne stosowane są głównie w obszarach bez dostępu do infrastruktury energetycznej, często w miejscach oddalonych czy rozmieszczonych w trudnych warunkach terenowych. Takimi miejscami na pewno są niektóre placówki badawcze, schroniska górskie, ale także maszty telekomunikacyjne czy nawet gospodarstwa domowe. Wraz z panelami słonecznymi czy energetyką wiatrową zapewniają całoroczny dostęp do energii elektrycznej i ciepła bez konieczności doprowadzenia infrastruktury, jednocześnie nie generując hałasu i zanieczyszczeń.

Ogniwa paliwowe można stosować także jako zasilanie awaryjne w obiektach o znaczeniu krytycznym, takich jak szpitale czy serwerownie. Z powodzeniem zastępują generatory zasilane olejem napędowym.

## 9.8.2. Urządzenia mobilne

Przenośne źródła energii bazujące na ogniwach paliwowych są wykorzystywane w takich branżach jak budowlana, rozrywkowa czy oświetleniowa - wszędzie tam, gdzie jest potrzebne tymczasowe zasilanie elektryczne. Oczywiście cała przenośna elektronika także może być zasilana bezpośrednio ogniwami paliwowymi albo baterie mogą być ładowane z przenośnych ładowarek na bazie ogniw. Szczególnie duże zapotrzebowanie na przenośną elektronikę o dużym poborze energii ma sektor militarny. Żołnierz może nosić przy sobie nawet kilkanaście urządzeń – radia, odbiorniki GPS, gogle noktowizyjne, urządzenia zagłuszające, wykrywające miny, a nawet urządzenia zapewniające ciepło. Zastosowanie ogniw paliwowych w porównaniu z bateriami może okazać się lepsze, zapewnić zasilanie elektryczne na dłużej i pozwalać na szybsze uzupełnienie paliwa. W przeciwieństwie do akumulatorów, ogniwa paliwowe nie są ograniczone swoją wewnętrzną pojemnością, ponieważ wytwarzają energię elektryczną dzięki ciągłemu dostarczaniu i uzupełnianiu reagentów. Brak hałasu, widocznych zanieczyszczeń oraz brak ruchomych elementów, mogących ulec awarii, to bardzo istotne zalety.



## 9.8.3. Transport

Obecnie największym zainteresowaniem cieszą się ogniwa paliwowe w sektorze transportowym. Jest to obszar bardzo trudny do zdekarbonizowania, a jednocześnie mający duży udział w produkcji gazów cieplarnianych – około 20% całości. Ogniwa paliwowe mogą być użyte do zasilenia skuterów, wózków widłowych, samochodów, pociągów, łodzi, a nawet samolotów. Trudno sobie wyobrazić ograniczenie emisji zanieczyszczeń w transporcie bez użycia ogniw paliwowych. O ile rozwiązania bateryjne mogą być konkurencyjne w obszarze mniejszych jednostek, to większe pojazdy zdecydowanie będą napędzane wodorem. Przynajmniej dziewięciu z głównych producentów samochodowych opracowuje i doskonali obecnie swoje własne pojazdy napędzane ogniwami paliwowymi. Działania te będą jeszcze przyspieszały wraz z wprowadzaniem coraz bardziej rygorystycznych ograniczeń emisji spalin, obowiązujących w kolejnych krajach, poszerzaniem się zielonych stref w centrach miast czy wzrostem akcyzy na paliwa kopalne.

Ogniwa paliwowe mają tę przewagę, że są uniwersalne: mogą samodzielnie zasilić silnik elektryczny lub też być stosowane jako uzupełniające źródło energii. Ciepło uwalniane w ogniwie paliwowym może być wykorzystane przy ogrzewaniu pojazdu, ponadto mają dwukrotnie wyższą sprawność niż silniki spalinowe, a do tego wodór może pochodzić z różnych źródeł. Brak zanieczyszczeń jest szczególnie ważny dla pojazdów pracujących w pomieszczeniach zamkniętych, takich jak hale magazynowe czy kopalnie.



## 9.9. Podsumowanie

Ogniwa paliwowe niewątpliwie będą powszechnie używane w najbliższej przyszłości. Ich różnorodność sprawia, że znajdują zastosowanie w tak odmiennych obszarach gospodarki, jak elektronika, transport czy energetyka. Poza różnorodnością można znaleźć wiele cech wspólnych, które można uporządkować jako zalety oraz wyzwania.

Do pierwszej grupy z pewnością można zaliczyć cechy:

- nie generują zanieczyszczeń,
- wykazują wysoką sprawność energetyczną,
- charakteryzują się prostą konstrukcją bez części ruchomych, co znacznie ułatwia serwisowanie,
- uniwersalność i łatwa integracja z obecnie stosowanymi systemami zasilania,
- możliwość skalowania w zależności od potrzeb,
- cicha praca.

Wyzwania, przed którymi stoją ogniwa paliwowe:

- wysoki koszt wytworzenia, głównie spowodowany drogimi elementami konstrukcyjnymi,
- technologia wytwarzania i przechowywania wodoru, jako podstawowego paliwa jest skomplikowana,
- brak istniejącej infrastruktury wodorowej,
- degradacja elektrolitu i zatrucie elektrod przekłada się na spadek sprawności i skrócenie czasu życia ogniwa paliwowego.

Poniżej w tabeli zebrano najważniejsze informacje dla różnych typów ogniw:

Typ	Temperatura pracy [°C]	Elektrolit	Moc	Sprawność elektryczna [%]	Sprawność CPH [%]	Zastosowanie <sup>1, 7</sup>
<b>PEM</b>	50-100	Matryca polimerowa (Nafion)	<1kW-100kW <sup>7</sup>	25-40 <sup>2, 3, 5, 6</sup>	85-90 <sup>2</sup>	Zasilanie awaryjne, Transport, Zastosowania militarne, Lotnictwo
<b>PAFC</b>	150-220	Kwas fosforowy (100%)	5-400 kW <sup>7</sup>	35-45 <sup>2, 3, 5, 6</sup>	70-90 <sup>2, 6</sup>	Energetyka rozproszona
<b>AFC</b>	60-120	wodne roztwory KOH/NaOH	1-100 kW <sup>7</sup>	60 <sup>4, 5, 7</sup>		Technologie kosmiczne Zastosowania militarne, Zasilanie awaryjne
<b>DMFC</b>	70-100	Matryca polimerowa (Nafion)	<5kW <sup>9</sup>	10-40 <sup>8, 9</sup>		Transport, Urządzenia przenośne
<b>SOFC</b>	800-1000	Ceramika na bazie ZrO <sub>2</sub>	1kW-2MW <sup>7</sup>	45-60 <sup>2, 5, 6, 7</sup>	70-90 <sup>2, 6</sup>	Elektryka użytkowa, Magazynowanie energii
<b>MCFC</b>	600-800	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> stabilizowane w matrycy	300kW-3MW <sup>7</sup>	43-57 <sup>2, 3, 5, 6</sup>	70-90 <sup>2, 6</sup>	Energetyka rozproszona, Elektryka użytkowa
<b>SAFC</b>	150-300	wodorosole	<1kW	35-40 <sup>10</sup>		Urządzenia przenośne, Zastosowania militarne

<sup>1</sup> *Regenerative fuel cells: Recent progress, challenges, perspectives and their applications for space energy system*, Applied Energy 283 (2021) 116376

<sup>2</sup> *Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector*, Journal of Power Sources 293 (2015) 312-328

<sup>3</sup> *J. Hydrogen and Fuel Cell: Technologies and Market Perspectives*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016

<sup>4</sup> *Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 146 (2021) 111180

<sup>5</sup> *The role of fuel cells in port microgrids to support sustainable goods movement*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 147 (2021) 111226

<sup>6</sup> *Hydrogen technologies in the energy supply system of the housing and communal sector*, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 751 (2021) 012113

<sup>7</sup> *U.S. Department of Energy*, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office>

<sup>8</sup> *A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies*, Energies 8 (2015) 172-216

<sup>9</sup> *Fuel Cells: Technologies and Applications*, The Open Fuel Cells Journal, 6 (2013) 1-20

<sup>10</sup> *Solid Acid Fuel Cell Stack for APU Applications*, U.S. Department of Energy, 2009

# 10 Wpływ gospodarki wodorowej na środowisko naturalne

Osiągnięcie celów klimatycznych i gospodarki bezemisyjnej jest przedmiotem działań wielu krajów, regionów czy sojuszy międzynarodowych.

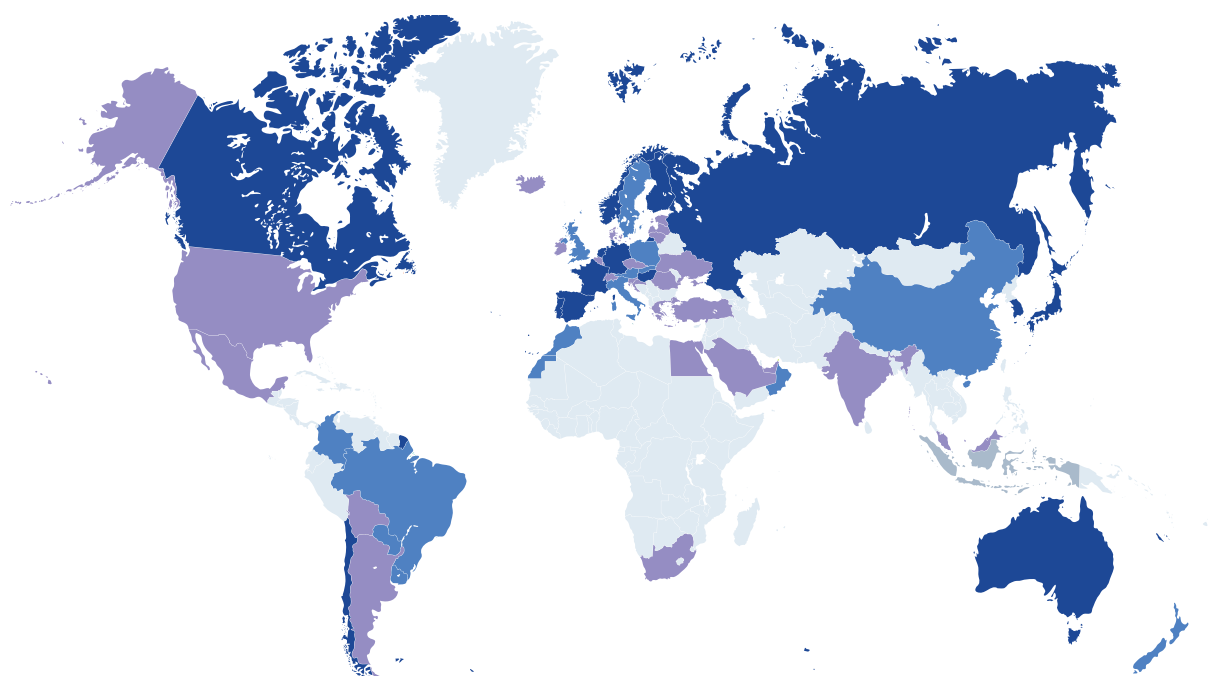
Sercem wszystkich strategii musi być czysta elektryfikacja, gdzie energia elektryczna stosowana jest w znacznie szerszym zakresie, niż jest to obecnie, a cała energia elektryczna jest wytwarzana w sposób bezemisyjny. Transformacja ta sprawi, że w okolicach roku 2050 bezpośrednie zużycie energii elektrycznej wzrośnie w stosunku do całej używanej energii z obecnych 20% do poziomu blisko 70%, przy czym produkcja energii elektrycznej wzrośnie z poziomu 27 000 TWh do około 90 000 TWh użytku bezpośredniego.<sup>1</sup>

Technologie wodorowe będą odgrywały kluczową rolę w niektórych sektorach trudnych do zdekarbonizowania, szczególnie w transporcie dalekobieżnym (kołowym, morskim oraz powietrznym). Dla wielu innych sektorów wodór będzie jedną z wiodących ścieżek dekarbonizacji, przykładowo w przemyśle stalowym, a w innych pozostanie nadal niezbędny – np. w produkcji nawozów. Szacuje się, że światowe zużycie wodoru wzrośnie 5-7 krotnie ze 115 Mt do poziomu 500-800 Mt w roku 2050, a jego udział w miksie energetycznym będzie stanowić 15-20%. Cały ten wodór musi być produkowany w sposób bezemisyjny, jako wodór zielony, lub przy wychwytywaniu dwutlenku węgla – wodór niebieski. Inne kolory wodoru stanowić będą etap przejściowy, przy tworzeniu gospodarki wodorowej, lecz w dłuższej perspektywie dominować będą rozwiązania neutralne dla środowiska. Produkcja zielonego wodoru wymagać będzie dodatkowej energii elektrycznej, więc do szacowanych 90 000 TWh, potrzebnych do bezpośredniej elektryfikacji, należy doliczyć dodatkowe 30 000 TWh.<sup>2</sup>

Założenia klimatyczne można zrealizować jedynie w przypadku, kiedy transformacja energetyczna dążyć będzie w kierunku odnawialnych źródeł energii. Źródła te są mocno

zależne od warunków pogodowych, a sama sieć produkcji energii eklektycznej jest mocno rozproszona. W tym aspekcie wodór także odegra bardzo ważną rolę jako magazyn energii i w znacznej części pomoże zbilansować system elektroenergetyczny. Ponadto, pozwoli przenieść produkcję energii w miejsca oddalone od miejsca jej użycia. Nieużytki rolne, obszary słabo zurbanizowane czy olbrzymie połacie pustyni kamienistych mogą stanowić zaplecze do produkcji zielonego wodoru. Separacja miejsca produkcji oraz użycia energii eklektycznej sprawia, że fotowoltaika i rolnictwo nie będą konkurowały o przestrzeń i lokalizację. W kontekście energetyki wiatrowej wsparcie technologii wodorowych pozwoli także zoptymalizować procesy produkcji prądu. Należy wziąć pod uwagę, że turbina wiatrowa o mocy 10 MW nie generuje cały czas maksymalnej mocy, a wartość średnia wynosi kilka megawatów. Z tego powodu sieć przesyłowa nie jest projektowana na teoretyczne maksymalne obciążenie. Prowadzi to do sytuacji, kiedy w warunkach silnego wiatru turbiny muszą być wyłączane z powodu zagrożenia przeciążeniem sieci.

Rysunek 37. Strategie wodorowe na świecie – czerwiec 2021.<sup>4</sup>



- Krajowa strategia wodorowa dostępna
- Krajowa strategia wodorowa w przygotowaniu
- Wstępne dyskusje na temat polityki i/lub wsparcie projektu
- Brak znaczących działań H2



Elektrolizer z powodzeniem może wspomagać ten system i przejąć nadwyżki energii, a następnie zmagazynować je w postaci wodoru.

Poza bezpośrednim zmniejszeniem emisyjności CO<sub>2</sub> w sektorach trudnych do zdekarbonizowania, wodór sprzyja także rozwijaniu się bezemisyjnych źródeł energii. To sprawia, że poszczególne kraje poza długoterminowymi strategiami środowiskowymi tworzą również strategie wodorowe. Mogą one być bezpośrednio związane ze strategiami klimatycznymi,<sup>3</sup> lub stanowić osobne dokumenty, natomiast warto mieć w świadomości, że są one bardzo powszechne. Na rysunku powyżej przedstawiono stan strategii wodorowych w maju 2021.<sup>4</sup>

Bezpośrednie wykorzystanie wodoru w dużej mierze pozwoli także na zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub>. Jednym z sektorów, mających duży wkład w globalną emisję dwutlenku węgla, jest produkcja stali. Przemysł ten odpowiada za aż 7% całkowitej emisji. Produkcja stali z rudy żelaza wymaga stosowania pieca tlenowego i węgla jako reduktora. Alternatywną metodą jest użycie elektrycznych pieców łukowych (EAF, ang. electric arc furnace) i użycie metody bezpośredniej redukcji żelaza (DRI ang. Direct Reduced Iron). W metodzie tej reduktorem jest wodór i przy założeniu, że piec zasilany jest energią elektryczną wytwarzaną w sposób neutralny dla środowiska, to emisyjność całego przemysłu można zmniejszyć do zera.<sup>5</sup> Wszyscy europejscy producenci stali wdrażają lub testują ten proces technologiczny. Trzeba mieć jednak na uwadze, że koszt produkcji stali przy wykorzystaniu tej metody wzrośnie o około 50%.

Kolejnym ważnym obszarem, gdzie wodór może w znaczącym stopniu zredukować emisję CO<sub>2</sub>, jest transport dalekozasięgowy. Ciężki transport kołowy odpowiedzialny jest za 7.3%, natomiast transport morski to kolejne 3% globalnej emisji. W obu przypadkach wodór może być rozwiązaniem, które wyeliminuje całkowicie ślad węglowy. Warto podkreślić, że gotowość technologiczna w tym zakresie jest na wysokim poziomie i wdrażanie rozwiązań na szeroką skalę może rozpocząć się już dziś. Z odmienną sytuacją mamy do czynienia w transporcie powietrznym. Stan technologii wymaga jeszcze dopracowania, natomiast są zapowiedzi wiodącego producenta samolotów, że pierwsze komercyjne modele zasilane wodorem będą dostępne w roku 2035. Daty i scenariusz pokrywają się z raportami dotyczącymi gospodarki wodorowej. Dekarbonizacja transportu powietrznego jest niezwykle ważnym sektorem z punktu widzenia ochrony klimatu, ponieważ podobnie,

jak transport morski, generuje 3% (1 gigatonę) dwutlenku węgla, ale w tym przypadku gazy cieplarniane emitowane są bezpośrednio do stratosfery. To sprawia, że wychwycenie CO<sub>2</sub> staje się trudniejsze. Ponadto, poza dwutlenkiem węgla emitowane są też inne gazy cieplarniane, które na tej wysokości są trudne do wychwycenia. Zastosowanie ogniw paliwowych sprawi, że sektor lotnictwa w znacznym stopniu zredukuje negatywny wpływ na środowisko.

Zmiana w kierunku czystego transportu odczuwalna będzie najbardziej w centrach miast, gdzie problem smogu występuje często. Poprawa jakości powietrza będzie miała korzystny wpływ na zdrowie i samopoczucie mieszkańców. Takie lokalne zmiany nie przeniosą się bezpośrednio na skalę globalną, ale wpłyną na świadomość skali zanieczyszczenia wśród mieszkańców wielkich aglomeracji. Gospodarka wodorowa z pewnością będzie ważnym elementem w budowaniu świadomości ekologicznej, a może być wręcz sztandarem międzynarodowych działań na rzecz redukcji emisji gazów cieplarnianych. To z kolei daje legitymację do wprowadzania coraz bardziej restrykcyjnych norm środowiskowych, czy usprawiedliwi koszty poniesione z tytułu wprowadzania rozwiązań proekologicznych.

Niezależnie od tego, czy szacujemy bezpośredni wpływ technologii wodorowej na środowisko naturalne, czy uwzględniamy aspekty niemierzalne liczbowo, to zawsze gospodarka wodorowa jest integralną częścią strategii klimatycznych.

<sup>1</sup> *Making Clean Electrification Possible: 30 years to electrify the global economy*, Energy Transitions Commission (2021),

<sup>2</sup> *Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy* Energy Transitions Commission (2021),

<sup>3</sup> *The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system*, Energy Environmental Science, 12 (2019) 463

<sup>4</sup> <https://www.weltenergieat.de/publikationen/studien/international-hydrogen-strategies/>

<sup>5</sup> *Decarbonization challenge for steel*, McKinsey & Company, 2020

<sup>6</sup> *Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors*, Energy Transitions Commission (2018)



