UNIWERSYTET KARDYNAŁA STEFANA WYSZYŃSKIEGO

W WARSZAWIE

WYDZIAŁ SPOŁECZNO-EKONOMICZNY

Marta Grzywacz

Numer albumu: 116463

EKONOMIA

Rola zielonego wodoru w zachowaniu bezpieczeństwa ekonomicznego państwa

Praca licencjacka

Promotor: dr Bartosz Stachowiak

WARSZAWA 2023

Spis treści

Wstęp 3

Rozdział 1. Istota i znaczenie zielonego wodoru w gospodarce 6
1.1. Zielony wodór w świetle koncepcji zrównoważonego rozwoju 6
1.2. Pojęcie, zastosowanie i sposoby produkcji zielonego wodoru 12
1.3. Innowacyjność jako czynnik warunkujący rozwój gospodarczy i konkurencyjność państwa 18

Rozdział 2. Zmienna geopolityka transformacji energetycznej – gospodarka wodorowa 22
2.1. Światowi liderzy w produkcji, eksporcie i imporcie zielonego wodoru 22
2.2. Zasoby naturalne jako kluczowy element na globalnym rynku zielonego wodoru 32
2.3. Istotne inicjatywy dla rozwijania doliny wodorowej 41

Rozdział 3. Zastosowanie zielonego wodoru w lotnictwie 50
3.1. Napędy lotnicze nowej generacji 50
3.2. Mobilność powietrzna zasilana wodorowymi ogniwami paliwowymi. Latające taksówki w mieście napędzane wodorem 58
3.3. Wodorowe miasto przyszłości 65

Zakończenie 75
Bibliografia 77
Spis rysunków 83
Spis wykresów 84

Wstęp

Zmiany klimatyczne nadają kierunek transformacji energetycznej w gospodarkach na całym świecie. Konieczność mniejszego zużycia paliw kopalnych sprzyja rozwoju energetyki opartej na odnawialnych źródłach energii. Lata 90. były dekadą energii wiatrowej, lata 2000. dekadą energii słonecznej, a druga dekada XXI wieku dekadą systemów magazynowania energii, np. opartych o tzw. baterie/akumulatory. Natomiast od roku 2020 można zaobserwować kolejny etap transformacji energetycznej i jest nim wodór. W ciągu ostatnich kilku lat wiele krajów opracowało lub zaczęło przygotowywać krajowe strategie wodorowe. Pomimo tego, że wodór jako gaz przemysłowy istnieje już od ponad stu lat i znajdował szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, to jego potencjał nigdy nie został w pełni wykorzystany. Pojawiające się coraz liczniejsze badania, raporty i analizy rynkowe, a także rosnące zainteresowanie ze strony największych światowych firm energetycznych w ciągu ostatniej dekady sprawiły, że wodór stał się nie tylko paliwem przyszłości, ale jest wykorzystywany w naszym codziennym życiu i globalnej gospodarce. Już w 1875 roku Juliusz Verne pisał w swojej książce pt. „Tajemnicza wyspa", że woda jest węglem przyszłości: „Wierzę, że pewnego dnia woda zostanie wykorzystana jako paliwo, że wodór i tlen, które się na nią składają, użyte pojedynczo lub razem, zapewnią niewyczerpane źródło ciepła i światła o intensywności, do której węgiel nie jest zdolny". Wielu naukowców dostrzega ogromny potencjał tego gazu w procesie dekarbonizacji globalnej gospodarki.

Podjęcie tematyki zielonego wodoru jako narzędzia w procesie dekarbonizacji gospodarki oraz środka do utrzymania bezpieczeństwa energetycznego i środowiskowego kraju, jako tematyki pracy licencjackiej określonej tytułem „Rola zielonego wodoru w zachowaniu bezpieczeństwa gospodarczego państwa", znajduje uzasadnienie względami teoretycznymi i praktycznymi. Względy teoretyczne to racje poznawcze. Nowe technologie i innowacje mogą znacząco przyczynić się do ochrony środowiska i ograniczenia zmian klimatycznych. Zastosowanie zielonego wodoru niesie za sobą wiele korzyści, w tym zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, dywersyfikację dostaw energii, a także mniejszą zależność od rynku paliw kopalnych, w szczególności węgla, ropy naftowej i gazu. Natomiast względy praktyczne to aktualność kwestii zmian klimatu i jej negatywnego wpływu na rzeczywistość gospodarczą. Zmiany klimatyczne są obecnie szybsze, niż przewidywano i wywierają coraz większą presję na globalną gospodarkę poprzez ekstremalne zjawiska pogodowe oddziałujące na produktywność rolnictwa, wywołujące straty kapitału i wpływające na zdrowie społeczne. Dlatego technologie pozyskiwania odnawialnego wodoru mają obecnie kluczowe znaczenie dla osiągnięcia neutralności klimatycznej i utrzymania założeń wzrostu temperatury Ziemi do 1,5°C.

Celem niniejszej pracy jest ukazanie zielonego wodoru jako innowacyjnej technologii, która zwiększy poziom bezpieczeństwa ekonomicznego państwa. Za główną hipotezę badawczą przyjęto stwierdzenie „Jeżeli państwa oprą swoją transformację energetyczną o zielony wodór, to świat ma szansę osiągnąć neutralność klimatyczną do 2050 roku i tym samym uniknąć katastrofy klimatycznej". Pomocnym w weryfikacji powyższej hipotezy i osiągnięciu zamierzonego celu będzie udzielenie odpowiedzi na główny problem badawczy: „Jak zielony wodór, pełniąc rolę magazynu energii, może doprowadzić do osiągnięcia neutralności klimatycznej oraz do podniesienia efektywności i bezpieczeństwa energetycznego kraju?". Z kolei problemy szczegółowe zostały ujęte w postaci następujących pytań:

- Czy realne jest znaczne ograniczenie konsumpcji paliw kopalnych na rzecz zielonego wodoru?,
- Jaki będzie potencjał OZE w zakresie produkcji zielonego wodoru, w kontekście przyszłego zapotrzebowania na ten surowiec?,
- Czy zielony wodór jest w stanie zapewnić bezpieczeństwo energetyczne, bezpieczeństwo wodne i bezpieczeństwo dostaw minerałów w kraju?.

Na wszystkie te pytania ma odpowiedzieć niniejsza praca.

Podmiotem rozważań w pracy są podmioty gospodarujące (gospodarstwa domowe, przedsiębiorstwa, gospodarki narodowe, instytucje, gospodarki regionalne, gospodarka światowa, ugrupowania integracyjne, międzynarodowe organizacje gospodarcze). Z kolei przedmiot rozważań stanowi zielony wodór. Zakres przestrzenny wyznacza formuła podziału terytorialnego (krajowego, regionalnego i światowego). Z kolei zakres czasowy to lata od 1960 do 2050 roku.

Dociekania umiejscowione zostały na płaszczyźnie: teoretycznej, na której dokonano identyfikacji i uogólnienia problemu oraz praktyczno-empirycznej, na której dokonano analizy empirycznej, a także opisano i oceniono rzeczywistość. Metodami badawczymi wykorzystanymi w pracy są: studium przypadku, analiza i synteza, stopniowa konkretyzacja i weryfikacja, analogia, obserwacja. Podstawą podjętych dociekań jest liczny zbiór materiałów źródłowych w postaci: publikacji zwartych (książek, monografii, opracowań naukowych, raportów i analiz rynkowych), publikacji periodycznych, dokumentów źródłowych i materiałów statystycznych.

Praca składa się z trzech zasadniczych części: wstępu, treści właściwej oraz zakończenia. Części uzupełniające ten układ pracy stanowią: bibliografia oraz spis tabel i wykresów. Pierwszy rozdział, zatytułowany "Istota i znaczenie zielonego wodoru w gospodarce", identyfikuje koncepcję zielonego wodoru jako nowej technologii, która doprowadzi do dekarbonizacji gospodarki, przyniesie korzyści dla rozwoju gospodarczego, a także zwiększy konkurencyjność kraju i jego

bezpieczeństwo energetyczne. Dodatkowo pokazano, czy zielony wodór spełnia cele koncepcji zrównoważonego rozwoju.

Drugi rozdział pod tytułem „Zmienna geopolityka transformacji energetycznej – gospodarka wodorowa" koncentruje uwagę na analizie praktyk wdrażania technologii produkcji zielonego wodoru w wybranych krajach i wskazuje, które państwa mają realne szanse stać się liderami (producentem, eksporterem lub importerem) na globalnym rynku wodoru. Poruszono także kwestię bezpieczeństwa wodnego i bezpieczeństwa dostaw minerałów, jako istotnego czynnika rozwoju gospodarki wodorowej, a także podjęto próbę stworzenia uniwersalnego modelu doliny wodorowej.

W rozdziale trzecim pt. „Innowacyjne wykorzystanie zielonego wodoru w lotnictwie" zaprezentowano zielony wodór, jako czynnik, który umożliwi wdrożenie najnowszych innowacji w lotnictwie i dekarbonizację tego sektora, a także pozwoli na realizację koncepcji „Urban Air Mobility".

Taka konstrukcja pracy pozwoli zrealizować stawiane cele pracy.

Rozdział 1. Istota i znaczenie zielonego wodoru w gospodarce

1.1. Zielony wodór w świetle koncepcji zrównoważonego rozwoju

Globalny kryzys klimatyczny, nasilony przez skutki pandemii COVID-19, ma niszczący wpływ na gospodarstwa domowe, społeczności i ekosystemy na całym świecie. W krajach Globalnego Południa ekstremalne zjawiska pogodowe doprowadziły do zaostrzenia kryzysów społeczno-gospodarczych oraz naraziły miliony ludzi na brak żywności i inne zagrożenia. Tylko w 2022 roku odnotowano rekordowe fale upałów w Europie, monsunowe powodzie w Pakistanie[1] czy 40-letnią suszę w Rogu Afryki[2].

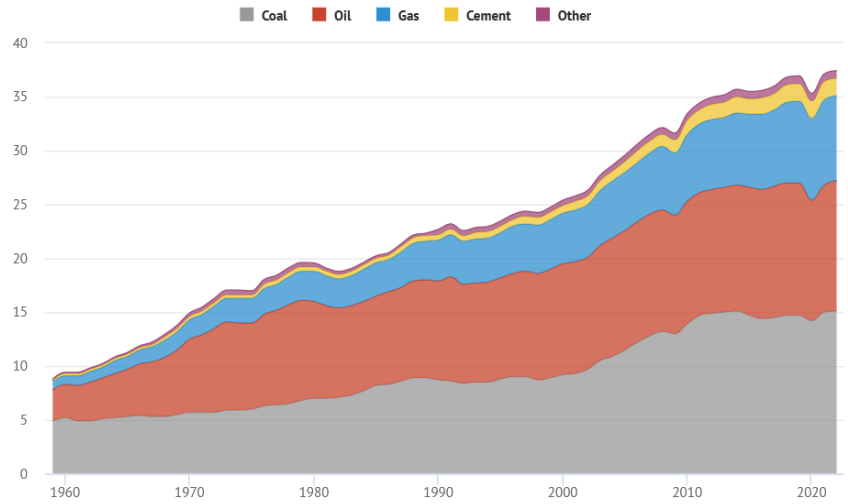
Paliwa kopalne odpowiadają za ponad 3/4 światowych emisji gazów cieplarnianych (GHG)[3]. Globalne emisje z paliw kopalnych wynikają głównie ze spalania węgla, ropy i gazu. Węgiel jest odpowiedzialny za więcej emisji niż jakiekolwiek inne paliwo kopalne, stanowiąc około 40% globalnej emisji CO_2 w 2022 roku. Ropa naftowa jest drugim co do wielkości źródłem emisji CO_2, a gaz i produkcja cementu stanowią odpowiednio 21% i 4% (wykres 1.1.1.). Osiągnięcie celu porozumienia paryskiego, jakim jest utrzymanie średniego wzrostu temperatury na świecie poniżej 2°C, będzie wymagało transformacji światowego miksu energetycznego. Rosyjska inwazja na Ukrainę również wyraźnie pokazuje rolę, jaką paliwa kopalne odgrywają w konfliktach. Dlatego kraje i społeczności na całym świecie szukają alternatywnych źródeł energii, aby wprowadzić ludzkość na bezpieczniejszą ścieżkę ku zrównoważonej przyszłości.

[1] *2022's supercharged summer of climate extremes: How global warming and La Niña fueled disasters on top of disasters* (w:) „the Conversation", https://theconversation.com/2022s-supercharged-summer-of-climate-extremes-how-global-warming-and-la-nina-fueled-disasters-on-top-of-disasters-190546 [dostęp: 15.02.2023].

[2] *Horn of Africa drought puts 3.6m children at risk of dropping out of* school (w:) „the guardian.com", https://www.theguardian.com/global-development/2022/sep/22/horn-of-africa-drought-puts-36m-children-at-risk-of-dropping-out-of-school [dostęp: 15.02.2023].

[3] *Renewable energy – powering a safer future* (w:) „un.org", https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy [dostęp: 15.02.2023].

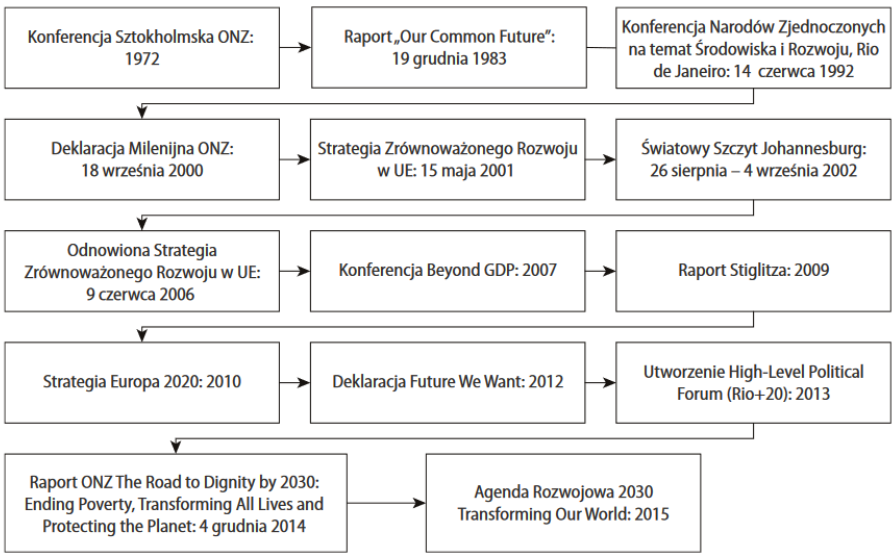
Wykres 1.1.1. Roczne emisje według paliw - lata 1959-2022



Źródło: *Analysis: Global CO2 emissions from fossil fuels hit record high in 2022* (w:) „Carbon Brief" https://www.carbonbrief.org/analysis-global-co2-emissions-from-fossil-fuels-hit-record-high-in-2022/ [dostęp: 15.02.2023].

Na przełomie lat 60. i 70. XX wieku podejście do procesów gospodarowania uległo znaczącej zmianie – zaczęto przykładać coraz większą uwagę do kwestii środowiskowych. Było to związane ze wzrostem stopnia społecznej świadomości ekologicznej oraz pogłębiającym się negatywnym wpływem działalności ludzkiej na środowisko naturalne. Dalszy rozwój koncepcji zrównoważonego rozwoju był związany z koniecznością efektywnego przeciwdziałania zmianom klimatu. Krokami milowymi w realizacji tej idei były: Szczyt Ziemi w 1992 r. (Agenda 21), Deklaracja Milenijna, Szczyt w Johannesburgu w 2002 r., Szczyt w Rio de Janeiro w 2012 r., a także Agenda Rozwojowa 2030 (rys.1.1.1.).

Rysunek 1.1.1. Etapy powstawania koncepcji zrównoważonego rozwoju



Źródło: A. Misztal, *Zrównoważony rozwój przedsiębiorstw a stopień rozwoju społeczno-gospodarczego*. Studia I Prace Kolegium Zarządzania I Finansów 2019, s. 35.

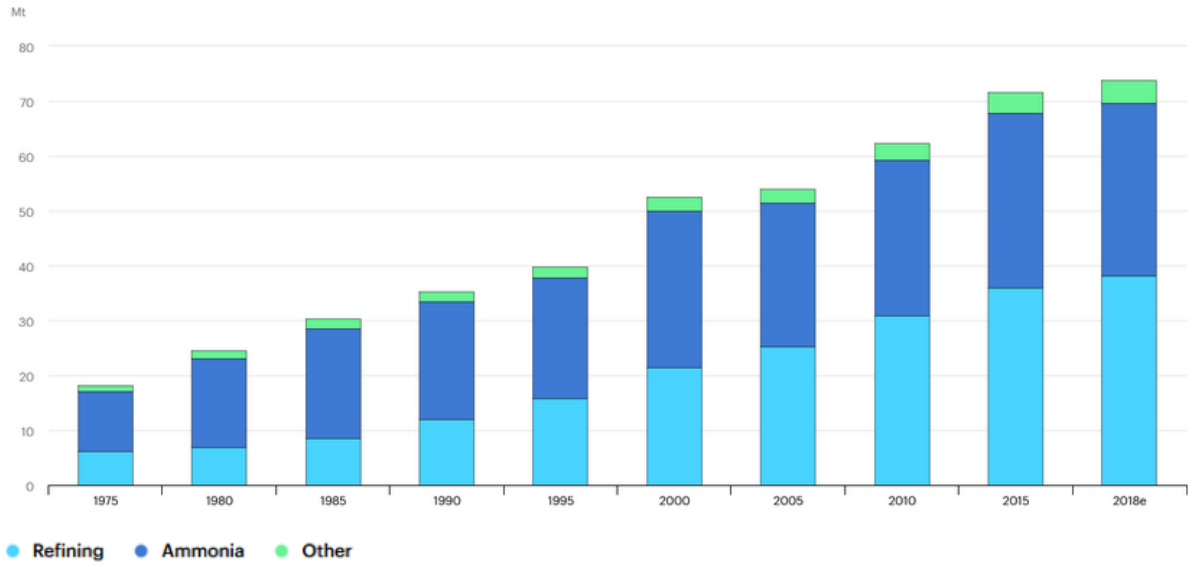
Zrównoważony rozwój jest przedmiotem badań dla wielu dyscyplin naukowych. Złożoność i wieloznaczność tego pojęcia sprawia, że nie ma jednej, powszechnie akceptowalnej definicji oraz zgodności odnośnie do pomiaru czy też determinant na niego wpływających. Termin „zrównoważony rozwój", zgodnie z Raportem Komisji Brundtland z 1987 roku pt. „Nasza wspólna przyszłość", oznacza „rozwój odpowiadający obecnym potrzebom bez uszczerbku dla możliwości spełnienia swoich potrzeb przez przyszłe pokolenia."[4] Główny akcent w tej definicji został położony na międzypokoleniowy wymiar zaspokajania potrzeb i jego trwały charakter (sprawiedliwość międzypokoleniowa). Jednak brak jest w niej wskazania problemów środowiskowych czy społeczno-gospodarczych. Dopiero Szczyt Ziemi w Rio de Janeiro z 1992 r., który odbył się pod hasłem przewodnim „Środowisko i Rozwój", postawił znak równości między czynnikiem środowiskowym i rozwojem społeczno-gospodarczym. Obecnie zrównoważony rozwój wyrażany jest przez trzy kluczowe obszary: ekologiczny (zachowanie środowiska i jego naturalnych zasobów), ekonomiczny (rozwój gospodarczy stymulowany przez postęp technologiczny i wzrost efektywności wykorzystania surowców, materiałów i pracy ludzkiej) oraz społeczny (poprawa warunków życia i bezpieczeństwa wszystkich ludzi). Wobec tego można dojść do następującego wniosku: „zrównoważony rozwój" oznacza rozwój gospodarczy i społeczny, zaspokajający potrzeby społeczeństwa, przy jak najmniejszym stopniu ingerencji w środowisko (przy jednoczesnej ochronie oraz zapewnieniu odtwarzania przydatności i jakości zasobów naturalnych w długim okresie).

W 2015 roku Zgromadzenie Ogólne Narodów Zjednoczonych przyjęło tzw. „Agendę 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju", zawierającą 17 Celów Zrównoważonego Rozwoju (SDGs). Cele SDGs mają na celu wyeliminowanie lub ograniczenie problemów, które zagrażają środowisku, gospodarce i bezpieczeństwu człowieka[5]. Obejmują one m.in. zmniejszenie przynajmniej o połowę odsetka osób żyjących w ubóstwie bez względu na płeć i wiek, wyeliminowanie wszystkich form niedożywienia oraz zapewnienie jednostkom dostępu do edukacji i powszechnej ochrony zdrowia. Ponadto SDGs łączą kraje na całym świecie poprzez efektywną współpracę w sektorach badań, infrastruktury i technologii. Warto zauważyć, że SDGs zwracają szczególną uwagę na kraje rozwijające się poprzez mobilizację środków finansowych, edukacyjnych i technologicznych. Ponadto SDGs podkreślają dotkliwość zmian klimatycznych i wyczerpywania się zasobów naturalnych. Postulują one rozwój zrównoważonych miast, aby zmniejszyć ich wpływ na środowisko, a tym samym spowolnić zmiany klimatu. Zapewniłoby to również ochronę ekosystemów morskich i śródlądowych wód słodkich, zachowując różnorodność biologiczną i siedliska naturalne.

[4] *Zrównoważony rozwój*, EUR-Lex: EU law, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=LEGISSUM:sustainable_development [dostęp: 16.02.2022].
[5] *Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030,* Zgromadzenie Ogólne ONZ 2015, s. 16-17.

Zainteresowanie wodorem jako bezemisyjnym źródłem energii rośnie od dawna. Ze względu na rozwój krajowych strategii wodorowych, a także inwestycje sektora publicznego i prywatnego w ekologiczne projekty wodorowe - od połowy lat 70 XX w. do 2018 roku zapotrzebowanie na wodór wzrosło ponad czterokrotnie (wykres 1.1.2.).

Wykres 1.1.2 Globalne zapotrzebowanie na czysty wodór – lata 1975-2018



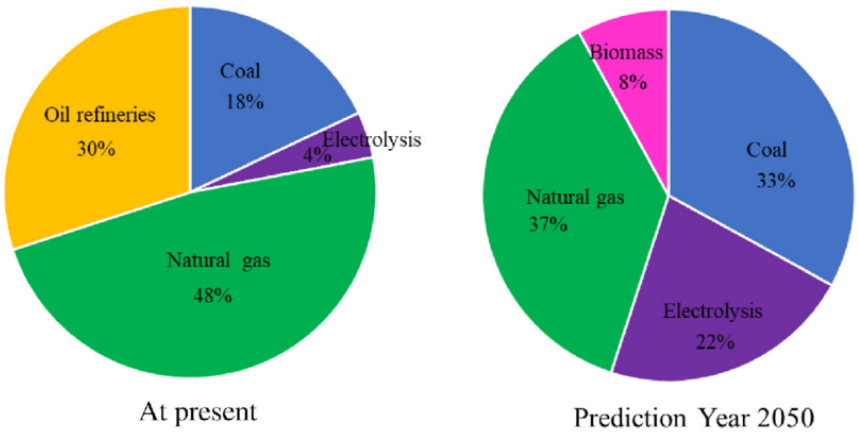
Źródło: *Global demand for pure hydrogen, 1975–2018* (w:) „iea.org", https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018 [dostęp:16.02.2023].

Zgodnie ze ścieżką 1,5°C Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (IRENA), opisaną w dokumencie World Energy Transition Outlook, ekologiczny wodór i jego pochodne będą stanowić 12% końcowego zużycia energii do 2050 roku[6]. Obecnie każdego roku na świecie produkuje się około 70 mln ton wodoru, głównie z gazu ziemnego i węgla (ok. 96%), co przyczynia się do znacznej ilości emisji dwutlenku węgla[7]. Aby to zobrazować; produkcja szarego wodoru powoduje emisję 830 milionów ton dwutlenku węgla rocznie. Jest to roczna emisja CO_2 przez gospodarki Indonezji i Wielkiej Brytanii łącznie. Innymi słowy, wytwarzanie tego rodzaju wodoru jest równoznaczne z zanieczyszczeniem powodowanym przez dwa kraje o łącznej liczbie ponad 300 milionów mieszkańców[8]. Z kolei tylko niecałe 4% światowej produkcji wodoru opiera się na elektrolizie wody zasilanej energią odnawialną (wykres 1.1.3.). W ramach sprawiedliwej transformacji energetycznej zielony wodór i jego pochodne, produkowane z energii odnawialnej, mogłyby odegrać ważną rolę zarówno dla krajów uprzemysłowionych, jak i uprzemysławiających się. Wodór mógłby zastąpić paliwa kopalne ze względu na łatwość magazynowania w długim okresie oraz wypełnić tymczasowe

[6] *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*, International Renewable Energy Agency 2022, s. 235.
[7] *Low-carbon production of hydrogen* (w:) „leonard.vinci.com", https://leonard.vinci.com/en/focus-article-1_low-carbon-production-of-hydrogen/ [dostęp: 17.02.2023].
[8] U.Y. Quazi, *Future of Hydrogen as an Alternative Fuel for Next-Generation Industrial Applications;* Challenges and Expected Opportunities, Energies, 2022, s. 9.

luki w dostawach energii ze źródeł odnawialnych w coraz bardziej zelektryfikowanej gospodarce. Ma on szeroki zakres zastosowań, zwłaszcza w trudnych do dekarbonizacji i elektryfikacji gałęziach przemysłu, takich jak przemysł stalowy, cementowy, szklarski, ceramiczny, chemiczny, nawozowy oraz długodystansowy transport morski i lotniczy. Ponadto wodór jako uniwersalny nośnik energii może pomóc w dywersyfikacji dostaw energii poprzez produkcję krajową lub import.

Wykres 1.1.3. Źródła pozyskiwania wodoru (IEA)



Źródło: *Breakdown of hydrogen production technologies using various sources: today and prediction for the year 2050 (w:)* "Research Gate" https://www.researchgate.net/figure/Breakdown-of-hydrogen-production-technologies-using-various sources-today-and-prediction_fig1_338542462 [dostęp: 17.02.2023].

Zielony wodór realizuje różne Cele Zrównoważonego Rozwoju, począwszy od produkcji zielonego wodoru poprzez elektrolizę, która wykorzystuje energię odnawialną i powoduje zerową emisję dwutlenku węgla. Szerokie zastosowanie zielonego wodoru skutkuje dalszą dekarbonizacją różnych sektorów, takich jak sektor transportowy i energetyczny czy sektor gospodarstw domowych. Dlatego wodór odgrywa kluczową rolę w redukcji zanieczyszczenia powietrza, wspierając wdrażanie energii odnawialnej i spowalniając zmiany klimatyczne. Podkreśla to wkład wodoru w realizację Celu 3 (Dobre zdrowie i jakość życia), Celu 7 (Czysta i dostępna energia) oraz Celu 13 (Działania w dziedzinie klimatu). Zielony wodór, jako alternatywa dla paliw kopalnych w sektorze transportu morskiego, nie tylko zmniejsza emisję gazów cieplarnianych, ale także zapewnia odpowiednią jakość wody poprzez eliminację jej zanieczyszczenia; chroniłoby to organizmy oraz ekosystemy morskie i przybrzeżne, przyczyniając się do realizacji Celu 6 (Czysta woda i warunki sanitarne) oraz Celu 14 (Życie pod wodą).

Rozwój gospodarki wodorowej wymaga budowy nowej infrastruktury. Wskutek tych działań powstaną nowe miejsca pracy, co z kolei zmniejszy bezrobocie. Dzięki temu wzrośnie PKB, co pozytywnie wpłynie na poziom życia obywateli i funkcjonowanie całej gospodarki (mieszkańcy będą mogli zaspokoić swoje podstawowe potrzeby, takie jak żywność, usługi zdrowotne i edukacja). Jednocześnie w krajach zapanowałby dobrobyt gospodarczy, który zlikwidowałby problemy społeczne, takie jak ubóstwo. W ten sposób wodór przyczynia się do realizacji celu 1 (Koniec

z ubóstwem), Celu 2 (Zero głodu), Celu 4 (Dobra jakość edukacji), Celu 8 (Wzrost gospodarczy i godna praca) oraz Celu 9 (Innowacyjność, przemysł, infrastruktura). Ponadto wodór mobilizuje współpracę między krajami, przyczyniając się do realizacji Celu 17 (Partnerstwa na rzecz celów). Powstałyby nowe łańcuchy dostaw, a kraje rozwijające się skorzystałyby ze wsparcia finansowego, technologicznego i społecznego.

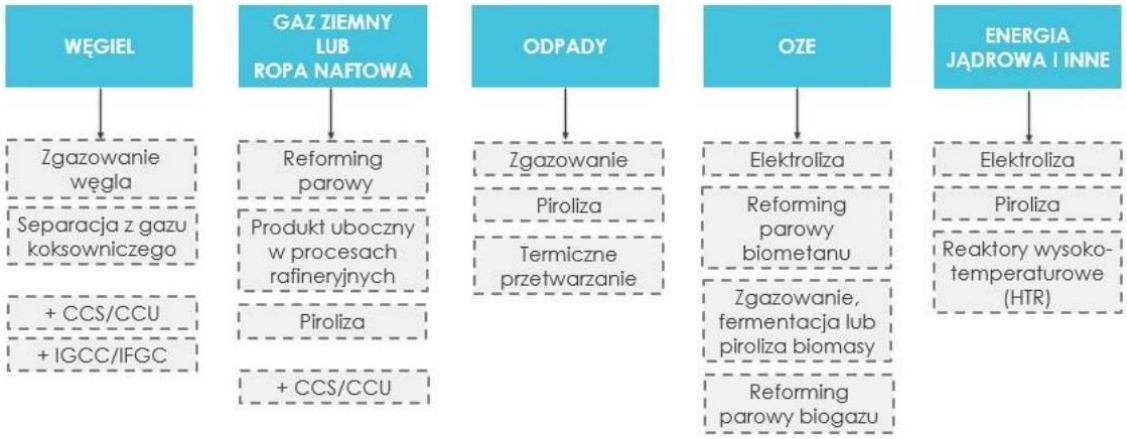
Z kolei Cel 5 (Równość płci), który ma na celu wyeliminowanie wszelkich form dyskryminacji kobiet i dziewcząt na całym świecie, mógłby również zostać osiągnięty dzięki zielonemu wodorowi. Można to osiągnąć poprzez stworzenie „sieci" kobiet odnoszących sukcesy, aby wzmocnić ich pozycję w różnych sektorach energetycznych. Wraz z równością płci, Cel 10 (Mniej nierówności) skupia się na wzmocnieniu pozycji i włączenia wszystkich w życie gospodarcze, bez względu na wiek, płeć, niepełnosprawność, rasę, pochodzenie etniczne, religię lub status ekonomiczny. Taki cel mógłby zostać osiągnięty poprzez zapewnienie możliwości zatrudnienia w branżach związanych z zielonym wodorem, bez względu na płeć pracownika czy jego pochodzenie. Obok korzyści ekonomicznych i społecznych, osiągnięcie dostępu do zielonego wodoru powinno uwzględniać dostępność takiego zasobu także dla przyszłych pokoleń. Jest to znane, jako zachowanie sprawiedliwości między- i wewnątrzpokoleniowej. Stąd też mieści się to w ramach SDGs, odnoszących się do „zrównoważonych miast i społeczności" oraz „odpowiedzialnej konsumpcji i produkcji".

1.2. Pojęcie, zastosowanie i sposoby produkcji zielonego wodoru

Wodór to najobficiej występujący pierwiastek chemiczny we wszechświecie - jest obecny w 75% materii. Jest również najlżejszy ze wszystkich pierwiastków (14-krotnie lżejszy od powietrza), a jednocześnie wyróżnia się najwyższą gęstością masową energii, dzięki czemu pozwala na pozyskanie dużej ilości energii[9]. Termin „gospodarka wodorowa" został wprowadzony przez światowej sławy naukowca Johna Bockrisa w latach 70. XX wieku, ewoluując od koncepcji wprowadzonej przez brytyjskiego naukowca J. B. S. Haldane'a. Gospodarka wodorowa jest rozumiana łącznie, jako scentralizowane i rozproszone systemy wytwarzania, magazynowania oraz transportu wodoru z wykorzystaniem sieci przesyłowej i dystrybucyjnej, a także jego następne wykorzystanie w różnych gałęziach gospodarki[10].

Wodór można wyprodukować przy pomocy różnych nośników energii pierwotnej (energia elektryczna, paliwa kopalne, wychwytywanie gazów, biomasa itd.). Na rysunku 1.2.1. przedstawiono obecnie dostępne metody produkcji wodoru według źródeł energii pierwotnej.

Rysunek 1.2.1. Technologie produkcji wodoru według źródeł energii pierwotnej



Źródło: *Polska Strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040*, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa 2021, s. 11.

[9] *Własności i występowanie* (w:) „Klaster Wodorowy", https://klasterwodorowy.pl/wlasnosci-i-wystepowanie,19,pl [dostęp: 17.02.2023].
[10] *Polska Strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040*, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa 2021, s. 3.

W zależności od tego, z jakiego źródła pochodzi nośnik energetyczny, z którego wyprodukowany jest wodór, sklasyfikowany został na kolory. Głównym klasyfikującym wodór do danego koloru jest wskaźnik jego emisyjności CO_2 do atmosfery. Rozróżnia się następujące kolory wodoru:

- **wodór szary** – wyprodukowany przy użyciu paliw kopalnych, takich jak gaz ziemny. Jest najpowszechniej stosowanym rodzajem wodoru, ponieważ koszt jego produkcji jest najniższy. Jego główną wadą jest znaczna emisja dwutlenku węgla do atmosfery,
- **wodór niebieski** – wodór w produkcji którego wykorzystano nieodnawialne źródła energii i paliwa kopalne, a zmniejszenie emisyjności tych procesów osiągnięto poprzez zastosowanie metod wychwytu CO_2,
- **wodór zielony** – powstaje za pośrednictwem elektrolizerów z odnawialnych źródeł energii (OZE). Zielony wodór jest głównym nośnikiem energii planowanym przez UE, która do 2050 roku założyła osiągnięcie całkowitej neutralności klimatycznej,
- **wodór żółty** – wodór wytwarzany z elektrolizy przy pomocy energii z sieci,
- **wodór różowy/czerwony/purpurowy** – powstaje przy użyciu energii atomowej,
- **wodór czarny/szary** – wodór powstający z gazu ziemnego przy pomocy parowego reformingu metanu (CH_4),
- **wodór biały** – wodór jako produkt uboczny procesów przemysłowych,
- **wodór brązowy** – wodór powstający z ekstrakcji paliw kopalnych np. węgla, poprzez zgazowanie,
- **wodór turkusowy** – wodór powstaje poprzez termiczny rozkład metanu (pyroliza metanu), gdzie powstaje węgiel w postaci stałej.

Z kolei w „Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do roku 2040" dokonano podziału wodoru pod kątem metod produkcyjnych. Każda z metod różni się od siebie wielkością emisji gazów cieplarnianych:[11]

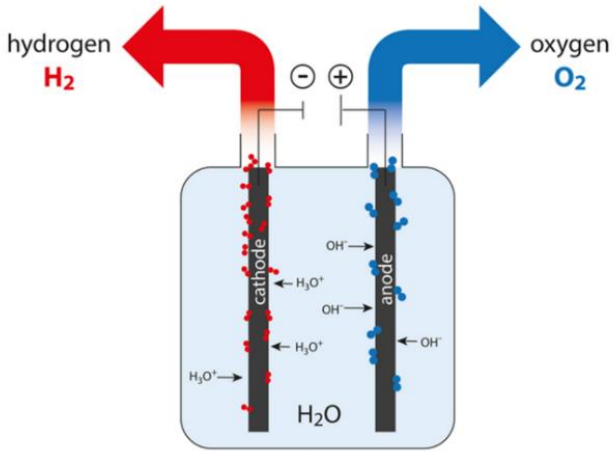
- **wodór konwencjonalny** – wodór do produkcji którego wykorzystywane są paliwa kopalne. Taki sposób produkcji wodoru generuje wysokie emisje CO_2 – powyżej 5,8 kg CO_2eq/kg H2. Obecnie większość wodoru na świecie zalicza się do tej grupy,
- **wodór niskoemisyjny** – wodór wytwarzany z odnawialnych lub nieodnawialnych źródeł energii ze śladem węglowym na poziomie poniżej 5,8 kg CO_2eq/kg H2.
- **wodór odnawialny** – wodór produkowany drogą elektrolizy wody w elektrolizerze zasilanym energią elektryczną pochodząca z odnawialnych źródeł energii lub w procesie reformingu

[11] *Polska Strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040*, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa 2021, s. 9-10.

biogazu, biometanu lub biochemicznego przekształcania się biomasy. W tym przypadku emisja CO_2 utrzymuje się na niskim poziomie - poniżej 1 kg CO_2eq/kg H2.

Produkcja wodoru przy użyciu energii elektrycznej przeprowadzana jest w procesie elektrolizy wody za pomocą specjalnie przeznaczonych do tego elektrolizerów. W procesie elektrolizy prąd elektryczny jest wykorzystywany do dysocjacji cząsteczki wody na dwa składniki: tlen i wodór (rys. 1.2.2.). Otrzymany wodór jest bardzo wysokiej czystości (99,999%) i może być przechowywany w stanie gazowym lub ciekłym.

Rysunek 1.2.2. Proces elektrolizy

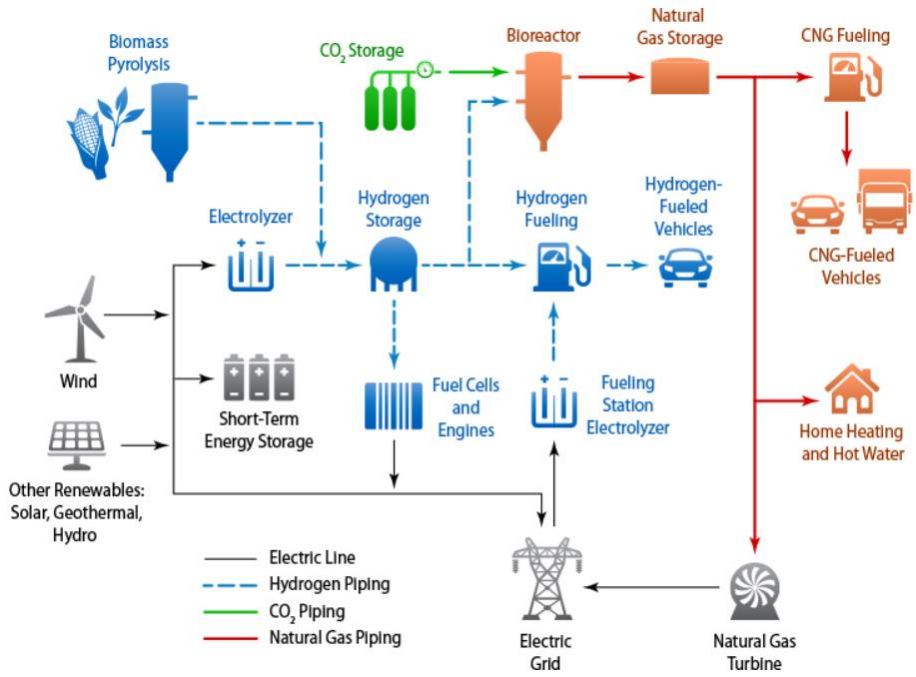


Źródło: *Innowacyjna technologia membrany do produkcji wodoru* (w:) „CORDIS Europa EU", https://cordis.europa.eu/article/id/244884-innovative-hydrogen-membrane-technology/pl [dostęp: 17.02.2023].

Na ten moment proces elektrolizy jest bardzo energochłonny. Obecnie dąży się do tego, aby energia elektryczna dostarczana do elektrolizerów pochodziła z OZE (np. z turbin wiatrowych bądź paneli słonecznych). Z uwagi na to, że produktem ubocznym takiej reakcji jest woda, procesy te uznawane są za zeroemisyjne. Dzięki temu wodór umożliwia dekarbonizację procesów przemysłowych i tych sektorów gospodarki, w których ograniczenie emisji dwutlenku węgla jest tak samo pilne, jak trudne do osiągnięcia.

Na rysunku 1.2.3. przedstawiono schemat przykładowej instalacji do produkcji wodoru z energii elektrycznej pochodzącej z OZE (wodór zielony) oraz energii z sieci (wodór żółty) wraz z przykładami, jak dalej wodór może zostać wykorzystany.

Rysunek 1.2.3. Schemat przykładowej instalacji do produkcji wodoru z OZE i energii z sieci



Źródło: *Renewable Electrolysis* (w:) „National Renewable Energy Laboratory (NREL)", https://www.nrel.gov/hydrogen/renewable-electrolysis.html [dostęp: 17.02.2023].

Wodór może być wykorzystywany jako surowiec, paliwo lub jako nośnik i magazyn energii. Ma on również wiele potencjalnych zastosowań w sektorach energetyki, transportu i budownictwa. Jednak dzisiejsze wykorzystanie wodoru jest zdominowane przez zastosowania przemysłowe. Można wyróżnić cztery najważniejsze zastosowania wodoru (zarówno w formie czystej, jak i mieszanej) na świecie: rafinacja ropy naftowej (33%), produkcja amoniaku (27%), produkcja metanolu (11%) oraz produkcja stali poprzez bezpośrednią redukcję rudy żelaza (3%)[12]. „W przyszłości produkcja chemikaliów, żelaza i stali oferuje znaczny potencjał w zakresie zapotrzebowania na niskoemisyjny wodór na dużą skalę. (…) Ponadto oczekuje się, że popyt na amoniak i metanol wzrośnie w perspektywie krótko- i średnioterminowej, a nowe zdolności produkcyjne będą stanowiły ważną okazję do zwiększenia skali niskoemisyjnych ścieżek produkcji wodoru."[13]

W przypadku transportu wodór posiada potencjał jako paliwo szczególnie w tych sektorach, w których elektryfikacja jest trudna (transport ciężki, kolejowy, morski oraz lotniczy). Szczególnie w żegludze i lotnictwie dostępność rozwiązań dla paliw niskoemisyjnych jest ograniczona, dlatego wodór stanowi tutaj atrakcyjną opcję. Dla uzyskania większej efektywności w ograniczeniu emisji CO_2 należy stworzyć odpowiednio rozbudowaną infrastrukturę w postaci stacji do tankowania wodorem. Według Europejskiego Stowarzyszenia Producentów Samochodów (ACEA)

[12] *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities*, IEA 2019, s. 89.
[13] *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce*, Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Wrocław 2021, s. 133.

w perspektywie do 2025 r. powinno być zbudowanych w Europie blisko 300 stacji do tankowania wodorem, zaś w perspektywie 2030 roku miałoby być już 1000 takich punktów[14]. Jeśli chodzi o konkurencyjność pojazdów z napędem wodorowym to zależy ona przede wszystkim od kosztów wodorowych ogniw paliwowych. Dlatego priorytetem jest obniżenie kosztów ogniw paliwowych, jak i pokładowych zbiorników wodoru. W rezultacie pojazdy na wodór stałyby się konkurencyjne cenowo w stosunku do samochodów elektrycznych i byłyby potencjalnie atrakcyjnym wyborem dla konsumentów, dla których priorytetem jest duży zasięg.

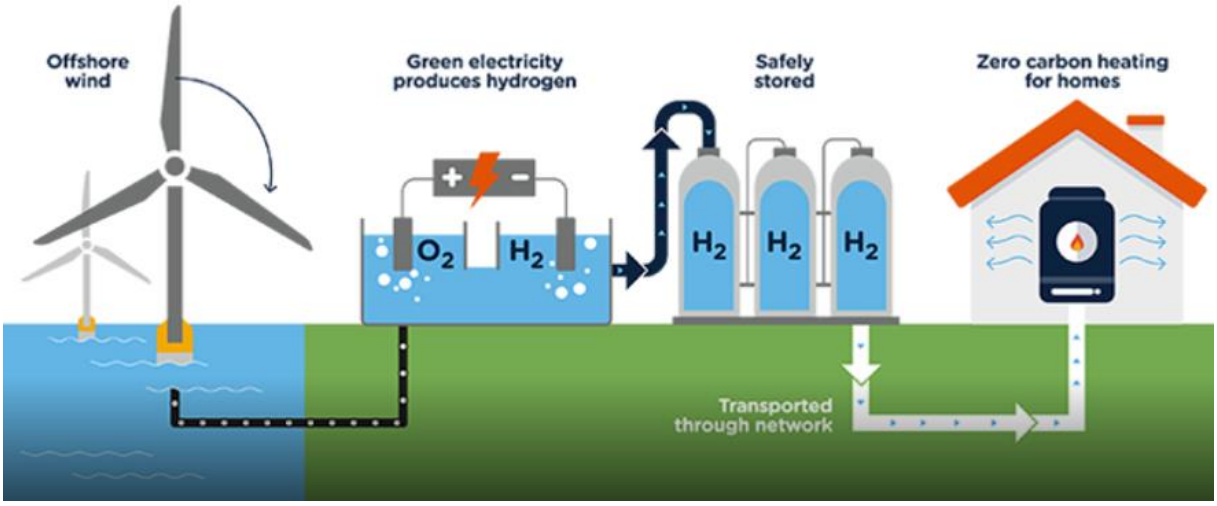
Wodór może także dostarczać energię do ogrzewania i wytwarzania ciepłej wody w budynkach prywatnych i komercyjnych. Szacuje się, że w 2030 r. zużycie wodoru do ogrzewania budynków może wynosić do 4 Mt (134 TWh) w skali globalnej[15]. Długoterminowe perspektywy w obszarze ogrzewania mogłyby obejmować bezpośrednie wykorzystanie wodoru w kotłach wodorowych. Urządzenia te działają w podobny sposób do kotłów gazowych, tyle że zamiast gazu ziemnego spalany jest wodór, co z kolei powoduje powstanie gorących gazów spalinowych. Gdy gorący gaz przemieszcza się przez rury, podgrzewa otaczającą go wodę, która może być następnie wykorzystana w systemie grzewczym lub dostarczona do kranów. Ogromną zaletą kotłów wodorowych jest fakt, że wodór należy do odnawialnych źródeł energii i nawet przy regularnej eksploatacji ludzkość nie wyczerpie jego zasobów. Od 2019 roku w mieście Rozenburg w Niderlandach jest prowadzony pilotażowy program obejmujący praktyczne zastosowanie wysokowydajnych kotłów zasilanych w 100% wodorem[16]. Z kolei w Środzie Śląskiej powstaje pierwsze w Polsce wodorowe osiedle. Na tym terenie stanie około 1,8 tysiąca mieszkań, które będą zasilane oraz ogrzewane tylko i wyłącznie przy użyciu wodoru[17].

Innym istotnym przedsięwzięciem mającym na celu wykazanie opłacalności wykorzystania wodoru do ogrzewania budynków jest projekt „H100 Fife", który stanowi część ogólnokrajowej inicjatywy „Gas Goes Green" w Wielkiej Brytanii. Celem projektu jest pokazanie, w jaki sposób światowej klasy sieć gazowa w Wielkiej Brytanii, obejmująca ponad 280 000 km rur podłączonych do 23 milionów domów i przedsiębiorstw, może zapewnić efektywną i opłacalną ścieżkę dekarbonizacji systemów grzewczych za pomocą wodoru[18]. W pierwszej fazie projektu H100 Fife, sieć będzie ogrzewać około 300 domów czystym gazem wytwarzanym przez specjalną instalację elektrolizy, zasilaną z pobliskiej morskiej turbiny wiatrowej[19] (rys.1.2.4.).

---

[14] *Heavy-duty vehicles: Charging and refuelling infrastructure requirements*, ACEA 2021, s. 9.
[15] *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce,* Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Wrocław 2021, s. 134.
[16] *Czym jest kocioł wodorowy i co należy o nim wiedzieć?* (w:) „Ładny dom", https://ladnydom.pl/kotly-wodorowe-nadchodzi-przelom [dostęp: 17.02.2023].
[17] *Pierwsze Polskie osiedle wodorowe powstanie w Środzie Śląskiej* (w:) „Świat OZE.pl", https://swiatoze.pl/pierwsze-polskie-osiedle-wodorowe-powstanie-w-srodzie-slaskiej/ [dostęp: 17.02.2023].
[18] *SGN preparing to deliver the world's first 100% green hydrogen network* (w:) „Fuel Cells Works", https://fuelcellsworks.com/news/sgn-preparing-to-deliver-the-worlds-first-100-green-hydrogen-network-to-heat-300-homes-with-hydrogen-in-fife/ [dostęp: 17.02.2023].
[19] *A world-first green hydrogen-to-homes heating network on the Fife coast.*(w:) „sgn.co.uk", https://www.sgn.co.uk/H100Fife [dostęp: 17.02.2023].

Rysunek 1.2.4. Green hydrogen network



Źródło: *SGN seeks approval for green hydrogen network in Fife* (w:) „Project Scotland", https://projectscot.com/2020/05/sgn-seeks-approval-for-green-hydrogen-network-in-fife/ [dostęp: 17.02.2023].

H100 Fife obejmie instalację urządzeń przystosowanych do zasilania wodorem, w tym kotłów, kuchenek i kominków. Znajdująca się na miejscu jednostka magazynowa będzie przechowywała wystarczającą ilość wodoru, aby zapewnić, że dostawy nie zostaną przerwane nawet w niesprzyjających warunkach pogodowych np. zimą. Poza fazą wstępną SGN zidentyfikowała możliwości rozszerzenia projektu, w tym zaoferowania rozwiązań wodorowych dla sektorów handlowych, przemysłowych i transportowych w okolicy.

1.3. Innowacyjność jako czynnik warunkujący rozwój gospodarczy i konkurencyjność państwa

W ciągu ostatnich kilku dekad rozwinęła się nowa rzeczywistość gospodarcza, w której kluczową rolę odgrywają już nie surowce, wielkość zasobu siły roboczej czy nawet kapitał finansowy, ale wiedza i innowacje. Z rozwojem gospodarczym związana jest wszelka innowacyjność m.in. innowacje dotyczące zmian w sposobie organizacji i zarządzania przedsiębiorstwem lub gospodarką kraju, a także innowacje technologiczne i ekologiczne. Szczególnie współczesne wyzwania klimatyczne oraz konieczność dekarbonizacji gospodarki stają się szansą dla rozwoju innowacyjnych technologii. Warunkiem koniecznym do budowania zrównoważonej i konkurencyjnej gospodarki efektywnie korzystającej z zasobów jest traktowanie na równi rozwoju społeczno-gospodarczego i ochrony środowiska naturalnego.

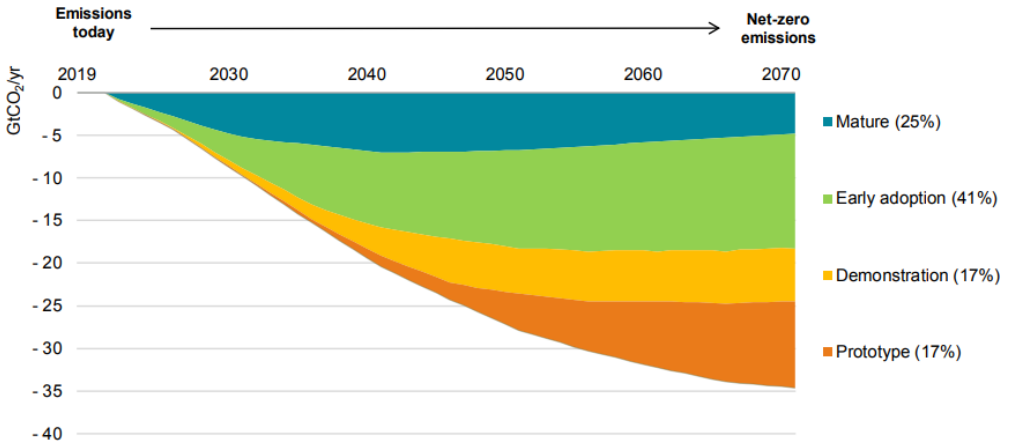
Pojęcie innowacyjności nieustannie się przeobraża i ewoluuje. Według terminologii zaproponowanej przez OECD w *Podręczniku Oslo,* innowacja to „wdrożenie nowego lub znacząco udoskonalonego produktu (wyrobu, usługi) lub procesu, nowej metody marketingowej, czy nowej metody organizacyjnej w praktyce gospodarczej, organizacji miejsca pracy lub stosunkach z otoczeniem".[20] Wobec zanieczyszczenia środowiska i wyczerpywania się zasobów naturalnych szczególnie ekoinnowacje znajdują się w kręgu zainteresowania naukowców i decydentów politycznych. Badania dotyczące innowacji ekologicznych rozpoczęły się w latach 90. XX wieku. Ich rozwój był efektem wzrostu świadomości w zakresie zagrożeń środowiskowych oraz poszukiwania bardziej zrównoważonego modelu rozwoju gospodarczego. Podstawowym celem innowacji ekologicznych jest zatem redukcja negatywnego oddziaływania działalności gospodarczej na środowisko naturalne m.in. poprzez redukcję zużycia zasobów i zmniejszenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery.

Chociaż testowane obecnie technologie mogą zapewnić znaczną część redukcji emisji, do których dąży się w ramach celu ograniczenia wzrostu temperatury na świecie do 1,5 °C, same w sobie są niewystarczające, aby doprowadzić świat do zerowego poziomu emisji netto, przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa systemów energetycznych. Duża część tych emisji pochodzi z sektorów, w których możliwości technologiczne ich zminimalizowania są ograniczone, takich jak żegluga, samochody ciężarowe, lotnictwo i przemysł ciężki, np. stalowy, cementowy i chemiczny. Obniżenie emisyjności tych sektorów będzie w dużej mierze wymagało opracowania nowych technologii, które nie są jeszcze stosowane. Prawie 35% łącznych redukcji emisji CO_2, jakie przewiduje scenariusz zrównoważonego rozwoju do 2070 r., pochodzi z technologii, które są obecnie w fazie prototypu lub demonstracji. Bez dalszych prac badawczo-rozwojowych i ulepszeń

[20] *Podręcznik Oslo. Zasady gromadzenia i interpretacji danych dotyczących innowacji*, OECD – Eurostat, Warszawa 2008, s. 48.

technologicznych nie będą dostępne na skalę przemysłową. Kolejne 40% łącznych redukcji emisji pochodzi z technologii, które nie zostały jeszcze wprowadzone na rynek masowy[21] (wykres 1.3.1.).

Wykres 1.3.1. Redukcje emisji CO2 w globalnym sektorze energetycznym według kategorii gotowości technologicznej



Źródło: *Global energy sector CO2 emissions reductions by current technology readiness category* (w:) „iea.org",https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-sector-co2-emissions-reductions-by-current-technology-readiness-category-in-the-sustainable-development-scenario-relative-to-the-stated-policies-scenario-2019-2070 [dostęp: 18.02.2023].

Kompleksowy charakter istniejących i powstających strategii wodorowych, obejmujących odpowiednie sektory zastosowań, służącym celom środowiskowym i gospodarczym jest przejawem ważnej roli, jaką mają odegrać technologie wodorowe. W „Krajowym Planie na rzecz Energii i Klimatu na lata 2021-2030" (KPEiK) założono, że ze względu na swoje właściwości wodór może stać się nowym, dynamicznie rozwijającym się segmentem gospodarki narodowej[22]. Gospodarka oparta na wodorze zmienia dotychczasowe zasady rozwoju. Gospodarki krajów, które będą wytwarzać i skutecznie wdrażać nowe rozwiązania, zwłaszcza w obszarze gospodarki wodorowej, będą cieszyć się wyższym poziomem rozwoju od tych, które będą je jedynie wykorzystywać na zasadach odtwórczych. Przewagę zdobędą te państwa, które opanują cały łańcuch wartości w gospodarce wodorowej i będą wstanie kreować nowe rozwiązania technologiczne. Polska również ma duży potencjał, by stać się państwem twórców i kreatorów nowych rozwiązań. Niemniej na ten moment „gospodarka Polski nie należy do gospodarek innowacyjnych. O jej stanie nie decydują wynalazki i patenty, a rozwój gospodarczy zależy przede wszystkim od gospodarki opartej na węglu i rolnictwie."[23] Dlatego kreowanie i wdrażanie innowacji wodorowych staje się dużą okazją na kolejny skok rozwojowy i przesunięcie Polski z grupy krajów o średnich dochodach do tych

[21] *Energy Technology Perspectives. Special Report on Clean Energy Innovation*, IEA, 2020, s. 61.

[22] *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce*, Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Wrocław 2021, s. 52.

[23] M. Rutkowska-Podołowska, J. Pakulska, *Innowacje ekologiczne szansą rozwoju gospodarczego w Polsce*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2016, s. 155.

o najwyższych. Szczególnie morska energetyka wiatrowa, fotowoltaika i energetyka jądrowa postrzegane są jako potencjalne pole aktywności gospodarczej polskiego przemysłu i swoiste koło zamachowe jego rozwoju[24]. A zatem, strategicznymi czynnikami budowania potencjału polskiej gospodarki wodorowej powinny być: innowacje, dane, wiedza, umiejętności, finansowanie i infrastruktura.

Pojawienie się rynku wodoru stymuluje gospodarczo regiony, w których produkowany jest wodór i wdrażane są powiązane technologie, prezentując regiony jako prekursorów w dziedzinie ochrony środowiska. Zielony wodór posiada ogromny potencjał w zakresie rozwoju przemysłu i tworzenia nowych miejsc pracy. Kilka krajowych strategii w zakresie wodoru podkreśla, że „miejsca pracy są ważną siłą napędową rozwoju gospodarki wodorowej".[25] W samej Unii Europejskiej sektor przemysłu wodorowego ma stworzyć 1 mln nowych miejsc pracy, zaś łączne inwestycje w UE oszacowano w przedziale 180–470 mld EUR[26]. Ponadto rozwój gospodarki wodorowej spowoduje znaczące zmiany strukturalne w gospodarce. Na znaczeniu stracą branże związane z paliwami tradycyjnymi, takie jak wydobycie węgla kamiennego i brunatnego oraz przemysł petrochemiczny, a w ich miejsce pojawią się nowe branże związane z paliwami alternatywnymi, takie jak produkcja ogniw wodorowych i wodoru.

Można wyróżnić trzy fazy rozwoju rynku wodoru: aktywacja rynku w bieżącej dekadzie, zrównoważony wzrost po 2030 roku oraz duży i ugruntowany rynek do 2050 roku. Podstawowe wyzwania związane z rozwojem rynku dotyczą m.in. konieczności obniżenia kosztów związanych z produkcją, transportem i magazynowaniem zielonego wodoru. Pokonanie tych barier może okazać się ważną osią budowy przewag konkurencyjnych pomiędzy krajami. Należy jednak zaznaczyć, że „o możliwości efektywnej produkcji wodoru można mówić jedynie w kontekście istnienia rynku zbytu na ten produkt. Zatem niezależnie od tego czy produkcja będzie kosztowna, czy też nie, jeżeli nie będzie zapotrzebowania na wytworzony produkt, wówczas produkcja nie będzie miała sensu. Dodatkowo, jeżeli nie będzie rynku zbytu na wytwarzany produkt, a co za tym idzie konkurencji, wówczas tempo rozwoju technologii wodorowych będzie zbyt wolne, aby osiągnąć zakładaną dojrzałość do 2030 roku"[27]. Tempo rozwoju rynku wodoru w dużej mierze uzależnione będzie także od dostosowania regulacji i norm rynkowych, które powinny nie tylko umożliwiać względnie łatwe skalowanie technologii wodorowych, ale również przyczynić się do powstania oczekiwanych bodźców do korzystania z rozwiązań wykorzystujących wodór.

[24] *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce,* Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Wrocław 2021, s. 79.
[25] *Hydrogen on the horizon: Ready, almost set, go?*, World Energy Council, EPRI, PwC, 2021, s. 4.
[26] *Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu*, Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Bruksela 2020, s. 2.
[27] *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce,* Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Wrocław 2021, s. 66-67.

Zielony wodór mógłby przynieść wiele korzyści dla zrównoważonego rozwoju społeczno-gospodarczego krajów. Kluczowym elementem upowszechnienia gospodarki opartej na zielonym wodorze jest rozwój działalności badawczo-rozwojowej w celu uzyskania nowych materiałów i komponentów dla ogniw paliwowych i technologii wodorowych, wraz z zachętami i analizami kluczowych procesów produkcji, konwersji i przechowywania wodoru. „W przeciwieństwie do wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, wodór nie posiada istniejącej infrastruktury dystrybucyjnej, ani podstawowego rynku, który skutecznie łączyłby podaż i popyt ustanawiając ceny konkurencyjne rynkowo. Ponadto łańcuch dostaw (w tym produkcja) jest również na wczesnym etapie rozwoju w porównaniu z chociażby pojazdami zasilanymi energią elektryczną, które już nabierają popularności i znaczenia na rynku. (….) Istotnym elementem w przezwyciężeniu barier jest konieczność wsparcia i bieżącej inwestycji w badania, rozwój i wdrożenie nowych rozwiązań, aby nadal obniżać koszty i zwiększać ogólną wydajność systemów do produkcji, transportu i magazynowania, co z kolei pomoże obniżyć koszty końcowego zużycia wodoru, zwiększając jego przewagę konkurencyjną na rynku.”[28]

W przypadku ugruntowanych i dużych gospodarek technologia wodorowa jest postrzegana jako ważny element utrzymania strategicznej przewagi w globalnej konkurencji, głównie poprzez przywództwo technologiczne. Dlatego w prawie wszystkich krajach wspieranie krajowego rozwoju technologii jest ściśle związane ze wzrostem gospodarczym poprzez możliwość eksportu technologii, wiedzy i doświadczenia do innych krajów. Państwa powinny mieć dostęp do odpowiedniego know-how, budowania potencjału i technologii, a także do możliwości tworzenia wartości poza surowcami. Dla mniejszych i rozwijających się gospodarek produkcja wodoru i rozwój technologii pozwala na wejście na nowe rynki i poprawę sytuacji ekonomicznej. Ponadto rozwój gospodarki wodorowej pociągnie za sobą otwarcie nowych form dochodów z eksportu, które zastąpiłyby eksport paliw kopalnych, na przykład poprzez eksport zielonego wodoru i jego pochodnych. Dzięki temu powstanie nowy, oparty na odnawialnych źródłach energii międzynarodowy system energetyczny. Natomiast sama ekspansja międzynarodowych inwestycji oraz handlu zielonym wodorem i jego pochodnymi powinna iść w zrównoważonym kierunku. Taka stabilność byłaby korzystna dla długoterminowego rozwoju tego sektora. W ten sposób wodór przyczyniłyby się do rozwiązania problemu ubóstwa energetycznego na świecie.

[28] Ibidem, s. 77.

Rozdział 2. Zmienna geopolityka transformacji energetycznej – gospodarka wodorowa

2.1. Światowi liderzy w produkcji, eksporcie i imporcie zielonego wodoru

Na arenie międzynarodowej dyskusje na temat zielonego wodoru, jako przyszłego nośnika energii nabierają coraz większego tempa. Szczególnie w nowo powstałej rzeczywistości politycznej, w której Europa i inne regiony geograficzne starają uniezależnić się od rosyjskich paliw kopalnych, rośnie nacisk na produkcję oraz import i eksport alternatywnych źródeł energii. Obecnie największe gospodarki na świecie omawiają, przygotowują i uzgadniają dedykowane strategie wodorowe i plany inwestycyjne. W 2020 roku dokonano przeglądu strategii wodorowych w 56 krajach na całym świecie, reprezentujących ponad 90% światowego PKB. Z dokonanej analizy wynika, że w 2020 roku 9 krajów miało już istniejącą kompleksową krajową strategię wodorową, a kolejne 11 było w trakcie jej opracowywania. Razem te 20 krajów odpowiada za 44% światowego PKB. Kolejne 14 krajów (38% światowego PKB) wspierało projekty pilotażowe i demonstracyjne, a w 17 krajach trwały pierwsze dyskusje rządowe dotyczące wodoru[29]. Według World Energy Council do 2025 roku strategie wodorowe obejmą kraje reprezentujące ponad 80% światowego PKB[30].

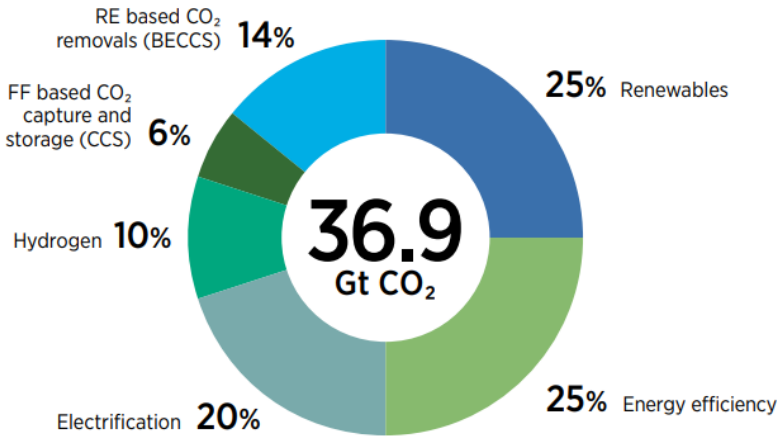
Globalne zapotrzebowanie na energię jest dziś w 80% zaspokajane przez paliwa kopalne[31]. Duże rezerwy zasobowe tych złóż są skoncentrowane w niewielu krajach i regionach. Na koniec 2020 roku tylko 10 państw posiadało 86,4% światowych rezerw ropy naftowej (Wenezuela, Arabia Saudyjska, Kanada, Iran, Irak, Rosja, Kuwejt, Zjednoczone Emiraty Arabskie, USA, Libia)[32]. To wskazuje na zdominowanie rynku przez kilka krajów, co w przeszłości prowadziło do skoków cen w wypadku zakłóceń dostaw. Z kolei w przypadku OZE występuje ograniczona koncentracja dostaw energii. Energia słoneczna, wiatrowa lub geotermalna może być produkowana wszędzie (choć jej opłacalność różni się w zależności od lokalizacji). W scenariuszu ograniczenia ocieplenia do 1,5°C oczekuje się, że w 2050 r. źródła odnawialne będą dostarczać 90% energii elektrycznej, przy czym sam wiatr i słońce będą stanowić niecałe 70% całości[33]. Jednak nie wszystkie kraje są jednakowo obdarzone takimi zasobami. Jakość i koszty produkcji energii ze źródeł odnawialnych różnią się znacznie w poszczególnych regionach. Szansa, jaką stwarza w tym kontekście wodór, polega na tym, że dzięki elektrolizie przekształca on odnawialną energię elektryczną w formę energii bardziej odpowiednią dla transportu na duże odległości, zmniejszając koszt transportu na kilometr.

[29] *International hydrogen strategies. A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council – Germany. Executive summary*, World Energy Council 2020, s. 2.
[30] Ibidem, s. 40.
[31] *Key findings* (w:) „iea.org", https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/key-findings [dostęp: 04.04.2023].
[32] *Oil Reserves by Country 2023* (w:) „world population review.com", https://worldpopulationreview.com/country-rankings/oil-reserves-by-country [dostęp: 04.04.2023].
[33] *Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*, IEA 2021, s. 19.

Krytycznym czynnikiem, który zadecyduje o opłacalności handlu wodorem, będzie to, czy skala, technologie i inne usprawnienia mogą zrównoważyć koszty transportu wodoru z obszarów o niskich kosztach produkcji do obszarów o wysokim popycie. Zatem, aby handel był opłacalny, koszt produkcji ekologicznego wodoru musi być wystarczająco niższy w regionie eksportu niż w regionie importu. Ta różnica kosztów będzie się zwiększać wraz ze wzrostem skali projektów i rozwojem technologii umożliwiającej obniżenie kosztów transportu. Wobec powyższego centralnym elementem przejścia na ekologiczny wodór jest zwiększenie i przyspieszenie produkcji energii ze źródeł odnawialnych. „Produkcja energii elektrycznej z OZE musi się co najmniej potroić z obecnych 290 gigawatów (GW) rocznie do ponad 1 terawata (TW) rocznie do połowy lat 2030. Do 2050 r. potrzeba będzie ponad 10 000 GW energii wiatrowej i słonecznej, tylko na potrzeby produkcji i handlu zielonym wodorem."[34]

Dekarbonizacja systemu energetycznego będzie w głównej mierze opierać się na połączeniu odnawialnych źródeł energii w systemie elektroenergetycznym, elektryfikacji sektorów użytkowania końcowego (zwłaszcza transportu drogowego i ogrzewania niskotemperaturowego) oraz efektywności energetycznej. W scenariuszu 1,5°C opracowanym przez IRENA w ramach World Energy Transitions Outlook, przewiduje się, że te trzy strategie pozwolą osiągnąć 70% redukcji emisji dwutlenku węgla do 2050 roku (wykres 2.1.1).

Wykres 2.1.1. Redukcja emisji dwutlenku węgla w ramach scenariusza 1,5°C



Źródło: *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA 2022, s. 16.

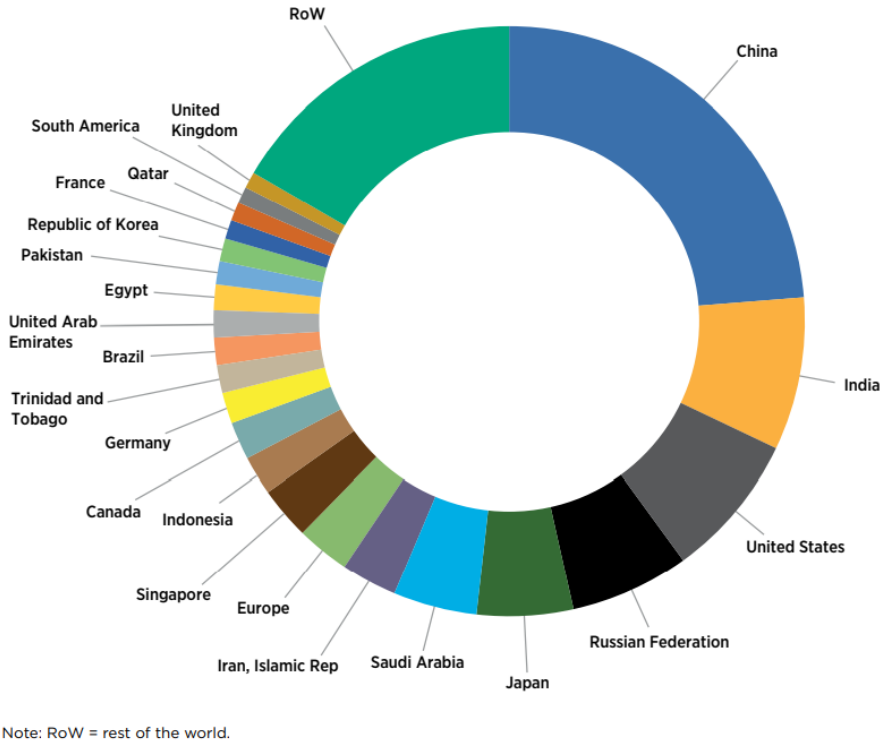
Nie wszystkie sektory gospodarki można w pełni zelektryfikować. Na przykład międzynarodowa żegluga i lotnictwo wymagają znaczenie wyższej gęstości energii. Ponadto gazowe i ciekłe nośniki energii są łatwiejsze do przechowywania w dużych ilościach i transportu na duże

[34] *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA 2022, s. 9-10.

odległości niż energia elektryczna. Biorąc pod uwagę te czynniki, oczekuje się, że wodór zaspokoi 12% końcowego zapotrzebowania na energię i przyczyni się do redukcji 10% całkowitych emisji CO2 w scenariuszu 1,5°C[35]. Z kolei według raportu BP, w perspektywie do 2050 r. zielony oraz niebieski wodór, jako nośnik energii będzie zapewniał blisko 15% całkowitego końcowego zużycia energii[36]. Natomiast według analiz zawartych w „Strategii w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu", czysty wodór mógłby zaspokoić nawet 24% światowego zapotrzebowania na energię w perspektywie 2050 roku[37].

W zależności od globalnych ambicji w zakresie łagodzenia zmian klimatu oraz rozwoju rynku technologii wodorowych szacuje się, że do 2050 r. zapotrzebowanie na wodór może wahać się od 150 do 500 mln ton rocznie[38], a dziesięć największych krajów świata będzie reprezentować około dwóch trzecich globalnego zużycia (rys. 2.1.1).

Rysunek 2.1.1. Zapotrzebowanie na wodór w poszczególnych krajach w 2050 roku w scenariuszu 1,5°C



Źródło: *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA, s. 33.

[35] *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA 2022, s. 17.
[36] *Reinventing gas through hydrogen* (w:) "bp.com", https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/speeches/reinventing-gas-through-hydrogen.html [dostęp: 05.04.2023].
[37] *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu*, Komisja Europejska, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301, Bruksela 2020.
[38] *The green hydrogen economy. Predicting the decarbonisation agenda of tomorrow*, (w:) "pwc.com", https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html [dostęp: 05.04.2023].

Chiny są obecnie największym producentem i konsumentem wodoru na świecie. Produkują około 24 mln ton czystego wodoru rocznie (czyli jednej czwartej światowego zapotrzebowania) i są miejscem około jednej czwartej globalnej produkcji amoniaku oraz ponad połowy globalnej produkcji metanolu i stali[39]. Państwo Środka ma ambicję, by zostać światowym liderem w zakresie produkcji i rozpowszechniania pojazdów FCEV oraz stacjonarnych ogniw paliwowych na dużą skalę. Oczekuje się, że do 2050 r. Chiny pozostaną czołowym krajem przemysłowym i nawet biorąc pod uwagę nowe zastosowania wodoru, mogą zachować około jednej czwartej globalnego zapotrzebowania na wodór, napędzanego przez sektor przemysłowy. W kraju istnieje jednak duże niedopasowanie pomiędzy ośrodkami podaży i popytu.

W Chinach większość ludności mieszka na południowym wschodzie, gdzie większość gruntów nie jest dostępna dla energii odnawialnej z powodu gęstej zabudowy miejskiej, gruntów leśnych, pól uprawnych i użytków zielonych. Na tym obszarze jest również zlokalizowana cała infrastruktura gazu ziemnego. Natomiast praktycznie cały potencjał odnawialny znajduje się w Mongolii Wewnętrznej, Qinghai, Tybecie i Xinjiangu (trzy z tych prowincji są najsłabiej zaludnione i zamieszkuje je zaledwie 3% ludności kraju). Na terenie kraju brakuje przede wszystkim rurociągów biegnących z obszarów o wysokim potencjale odnawialnym, które mogłyby obniżyć koszty transportu. W związku z tym, Chiny albo będą zmuszone zainwestować w budowę nowej infrastruktury, w celu wykorzystania tych miejsc, albo stworzyć odpowiednie warunki do importu wodoru. Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie potencjału odnawialnych źródeł energii na zachodzie kraju - wodór mógłby być przetwarzany na miejscu np. na amoniak, metanol i stal, co zmniejszyłoby potrzeby inwestycyjne i zwiększyło możliwości przewozowe.

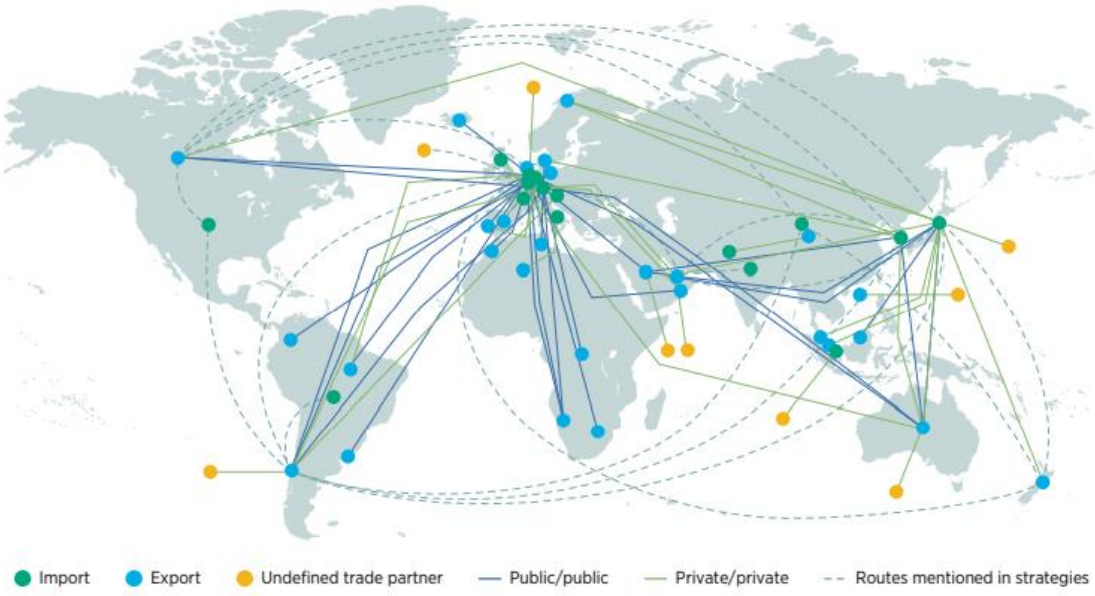
Na drugim miejscu, z prawie jedną trzecią zapotrzebowania Chin, znalazły się Indie. Oczekuje się, że produkcja stali w Indiach wzrośnie czterokrotnie do 2050 roku. W połączeniu z jednymi z największych na świecie złożami rudy żelaza i tanią produkcją energii elektrycznej z OZE, otwiera to możliwości wykorzystania wodoru elektrolitycznego do bezpośredniej redukcji rudy żelaza.

Krajem trzecim co do wielkości zapotrzebowaniu są Stany Zjednoczone. Popyt na wodór w USA zwiększy się z około 10 MtH2/na rok obecnie do ponad 30 MtH2/na rok w 2050 roku, przy czym większość wzrostu napędzana byłaby przez sektor transportu[40].

Prognozy wskazują, że w 2050 roku około jedna czwarta wodoru produkowanego na świecie będzie przedmiotem handlu transgranicznego[41]. Połączenie regionów na świecie o dużym i atrakcyjnym potencjale produkcji wodoru z regionami, w których występuje niedostateczny poziom wytwarzania wodoru, będzie kluczowym wyzwaniem w nadchodzących dekadach (rys. 2.1.2.).

[39] *Global hydrogen trade to meet the 1.5° C climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA, s. 33.
[40] Ibidem.
[41] Ibidem, s. 39.

Rysunek 2.1.2. Zapowiedzi dotyczące globalnego handlu wodorem



Źródło: *Global hydrogen trade to meet the 1.5°climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA, s. 23.

Import wodoru będzie miał znaczenie zwłaszcza dla gęsto zaludnionych krajów uprzemysłowionych, aby uzupełnić niedostateczne krajowe dostawy wodoru. Wynika to z niewystarczających zasobów odnawialnych lub spodziewanych problemów z akceptacją społeczną dla nowej infrastruktury energetycznej w tych krajach. Połączenie ograniczonego potencjału krajowego i ograniczeń w wyborze technologii (np. jądrowej, CCS) prowadzi do obiecujących perspektyw dla importu energii odnawialnej (pomimo dodatkowych kosztów transportu). Niemniej potrzeba zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, niepewność związana z przyszłym rozwojem technologii i prawdopodobieństwo występowania nieprzewidzianych zdarzeń wymaga nawiązania stosunków z wieloma krajami.

Niemcy mają stosunkowo niski potencjał odnawialnych źródeł energii. PV stanowi około 30% całkowitej mocy zainstalowanej w energetyce odnawialnej. Łączny potencjał lądowej energii wiatrowej i słonecznej jest o ponad 67% wyższy niż zapotrzebowanie na 2050 rok. Teoretycznie kraj mógłby zaspokoić całe swoje zapotrzebowanie za pomocą dostaw krajowych, jednak cały potencjał PV jest stosunkowo słabej jakości, ze średnim rocznym współczynnikiem mocy 11-14%, co sprawia, że koszt wytwarzania energii elektrycznej jest tutaj dużo wyższy niż w innych krajach. Z drugiej strony, dzięki temu, że Niemcy (podobnie jak Włochy) dysponują infrastrukturą gazową połączoną z resztą Europy, koszt transportu spada poniżej 0,1 USD za kilogram wodoru (kgH2), co czyni import atrakcyjnym. Podobnie jest w przypadku transportu wodoru z Afryki Północnej do Niemiec - dzięki istniejącym rurociągom gazu zimnego koszt dostawy jest nadal niższy niż krajowa produkcja wodoru. W związku z tym Niemcy przeznaczyły 2 mld EUR z pakietu naprawczego

COVID-19 na partnerstwa międzynarodowe, z czego 900 mln EUR na wsparcie importu wodoru do Niemiec w ramach inicjatywy *H2Global*[42].

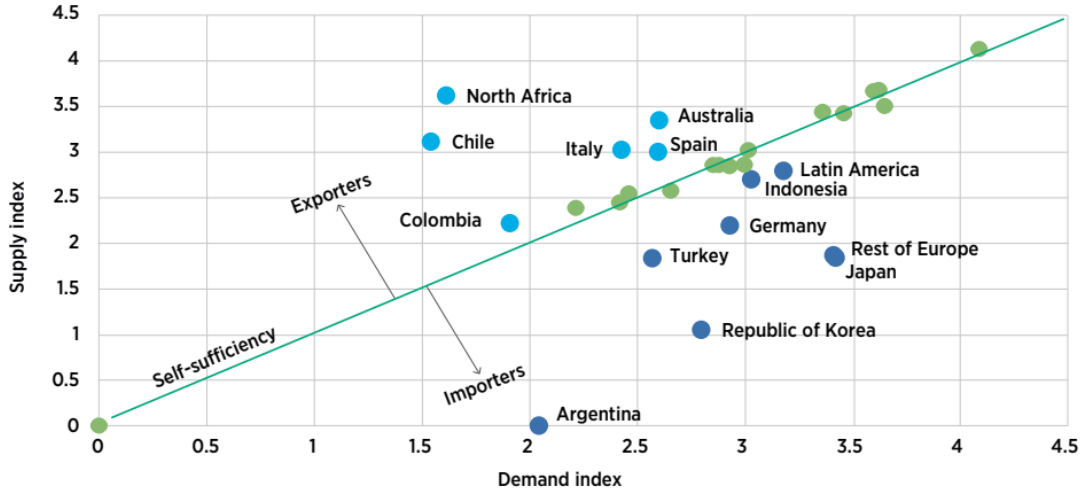
W przypadku Japonii potencjał energetyczny pochodzący z odnawialnych źródeł energii jest stosunkowo niewielki w porównaniu z całkowitym zapotrzebowaniem. Po pierwsze, największy udział potencjału technicznego w zakresie odnawialnych źródeł energii (84%) stanowi morska energetyka wiatrowa, która charakteryzuje się średnio wyższymi cenami energii elektrycznej (ze względu na wyższy CAPEX) w porównaniu z lądową energią wiatrową lub fotowoltaiką. Skutkuje to droższą produkcją wodoru pomimo większej liczby godzin pracy. Po drugie, biorąc pod uwagę tylko potencjał lądowej energetyki wiatrowej i słonecznej, pokryłyby one jedynie 33% całego zapotrzebowania na energię elektryczną. Po trzecie, Japonia nie posiada rurociągów do handlu transgranicznego, pozostawiając żeglugę jako jedyną potencjalną ścieżkę handlu energią[43]. Wszystkie te czynniki prowadzą do stosunkowo wysokiego kosztu produkcji wodoru. W 2020 roku koszt produkcji zielonego wodoru w Japonii wahał się między 6,25 a 6,5 euro za kilogram. Przewiduje się, że do 2050 roku koszty te spadną do około 2,5 - 2,75 euro za kilogram[44]. Jest to nadal o wiele więcej niż koszt produkcji wodoru np. w Australii. Dlatego głównym celem, który chce osiągnąć Japonia za pomocą technologii wodorowych, jest dywersyfikacja importu energii i zmniejszenie zależności od pojedynczych krajów w celu zmniejszenia ryzyka w łańcuchu dostaw energii.

Po stronie eksportu obraz jest znacznie bardziej zróżnicowany. Eksport wodoru jest skierowany głównie do krajów o dużym potencjale odnawialnych źródeł energii. Są to kraje oferujące atrakcyjne warunki dla taniej produkcji wodoru, takie jak wysokie napromieniowanie słoneczne, wysoki potencjał energetyczny wiatru oraz dostępna powierzchnia gruntów. Archetyp eksportu rozciąga się od krajów, które dziś importują energię, ale mają bogate zasoby odnawialne, które mogą pozwolić im stać się eksporterem energii (np. Chile, Maroko, Portugalia, Hiszpania), do eksporterów energii dziś, którzy również mają bogate zasoby odnawialne i dążą do przestawienia się z gospodarek opartych na eksporcie paliw kopalnych na gospodarkę niskoemisyjną (np. Australia, Kanada, kraje Bliskiego Wschodu), do regionów, które mają już wysoki udział odnawialnych źródeł energii w swoim miksie energetycznym i dążą do eksportu odnawialnego wodoru (np. Australia, Nowa Zelandia, Norwegia, Urugwaj i niektóre prowincje w Kanadzie).

Jednym ze sposobów spojrzenia na pozycję handlową krajów jest porównanie ich zapotrzebowania na wodór z produkcją krajową. W ten sposób można wyróżnić trzy obszary (wykres 2.1.2.).

[42] Ibidem, s. 14, 23.
[43] Ibidem, s. 45.
[44] *Estimated production costs of green hydrogen per kilogram in Japan from 2020 to 2050* (w:) „statista.com", https://www.statista.com/statistics/1304507/japan-green-hydrogen-production-cost-per-kilogram/ [dostęp: 06.04.2023].

Wykres 2.1.2. Wielkość popytu i podaży na wodór dla regionów świata w 2050 roku przy optymistycznych założeniach technologicznych

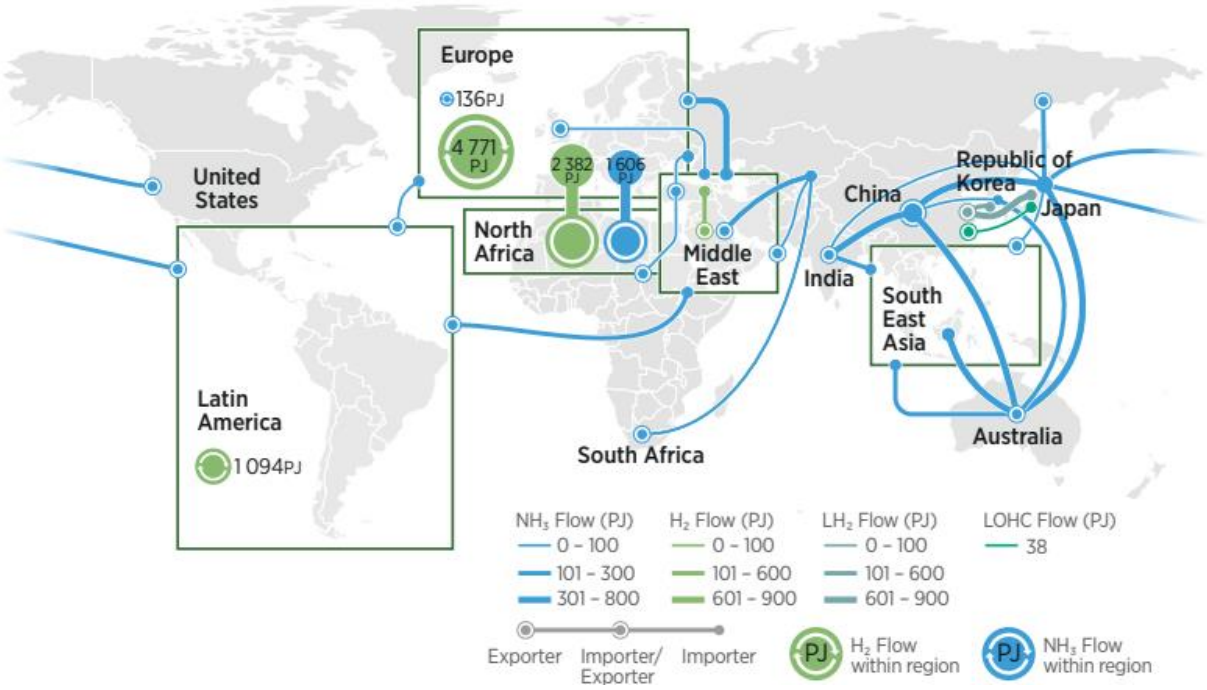


Źródło: *Global hydrogen trade to meet the 1.5°c climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA, s. 60.

Do pierwszego obszaru można zaliczyć kraje leżące blisko linii granicznej. Są to kraje samowystarczalne. Posiadają one wystarczający potencjał do wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, aby zaspokoić swoje zapotrzebowanie na wodór za pomocą produkcji krajowej, po najniższych kosztach, przy ograniczonym zapotrzebowaniu na handel międzynarodowy. W tym obszarze znajdują się dwaj najwięksi konsumenci wodoru do roku 20250 - Chiny i Stany Zjednoczone. Do drugiego obszaru należą kraje leżące powyżej linii granicznej - im dalej od tej linii, tym większa produkcja wodoru w porównaniu z zapotrzebowaniem. Taka pozycja skłania ich do zostania czołowymi eksporterami. Do tej grupy należą przede wszystkim Australia, Chile, Afryka Północna i Hiszpania. Ze względu na duży potencjał energii odnawialnej i niższe koszty produkcji, główną strategią tych krajów powinno być inwestowanie w rozwój rynku zielonego wodoru. Przykładowo Australia, opierając się na swoim ogromnym potencjale w zakresie energii odnawialnej, dąży do tego, aby do 2050 r. stać się głównym eksporterem odnawialnego i niskoemisyjnego wodoru na rynki światowe. Z kolei trzeci obszar zajmują kraje znajdujące się pod linią samowystarczalności i reprezentują potencjalnych importerów. W głównej mierze są to regiony, w których nie ma wystarczającego potencjału odnawialnych źródeł energii, aby zaspokoić krajowe zapotrzebowanie. Im dalej kraje znajdują się od tej linii, tym większa jest różnica między produkcją krajową a zapotrzebowaniem.

Według Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej jedna czwarta globalnego zapotrzebowania na zielony wodór mogłaby zostać zaspokojona dzięki handlowi za pośrednictwem rurociągów i statków. W Europie już teraz istnieje rozległa sieć przesyłowa gazu o długości ponad 200 000 km[45], która potencjalnie mogłaby zostać przeprojektowana na potrzeby wodoru, stanowiąc najtańszą opcję transportową (rys. 2.1.3.).

Rysunek 2.1.3. Globalna mapa handlu wodorem przy optymistycznych założeniach technologicznych w 2050 roku



Źródło: *Global hydrogen trade to meet the 1.5°c climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA, s. 56.

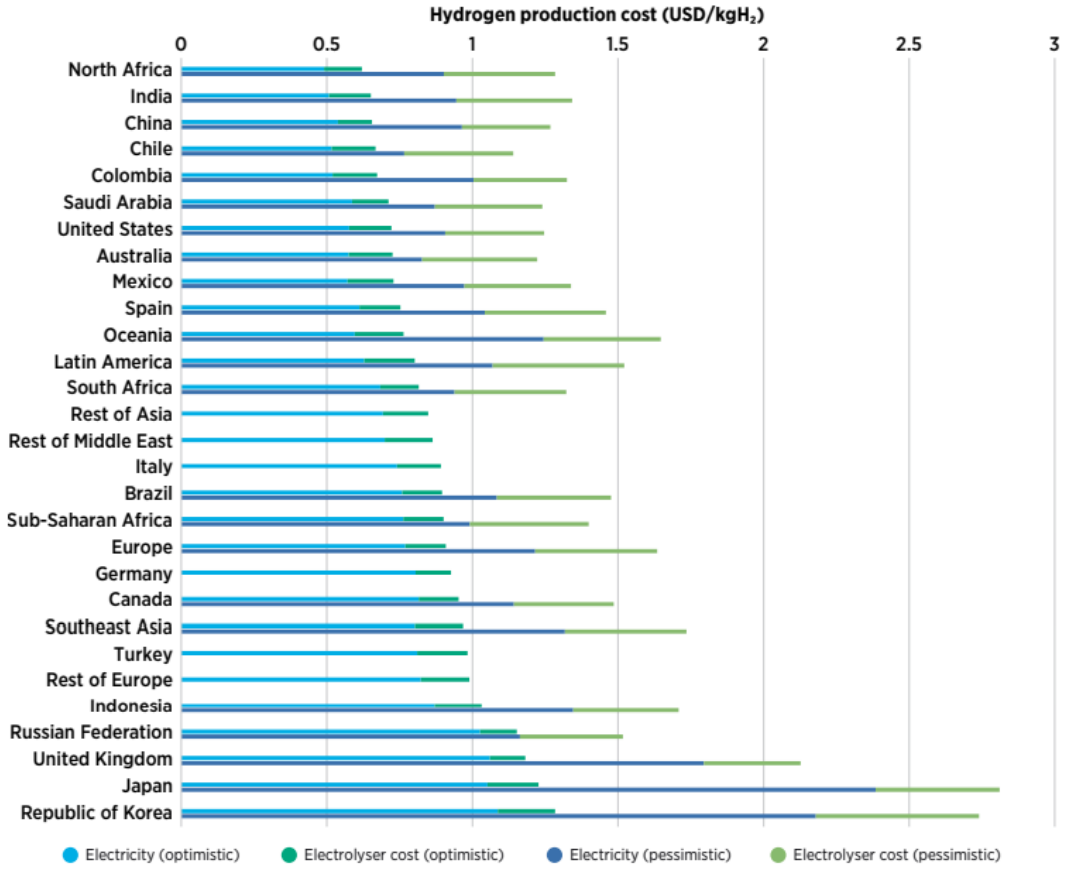
Przepływ wodoru w Europie odbywałby się głównie z południa na północ. Sytuacja wygląda także korzystnie w przypadku transportu wodoru z Afryki Północnej, ponieważ oba kontynenty łączy dziś wiele rurociągów, które są wykorzystywane do transportu gazu ziemnego. Z kolei w Ameryce Łacińskiej nie istnieje ogólnoregionalna sieć gazu ziemnego, a możliwości połączeń międzysystemowych są znacznie ograniczone. Atrakcyjne mogłyby być jedynie rurociągi łączące niektóre kraje, potencjalnie z siecią południową i północną: Chile z Argentyną i Brazylią, Urugwaj z Argentyną, Kolumbię z Wenezuelą. Wynika to z dużych odległości pomiędzy tymi krajami i znacznego popytu wewnętrznego.

W 2020 roku Komisja Europejska oszacowała koszt produkcji zielonego wodoru w przedziale 2,50 - 5,50 EUR/kg. Według Departamentu Energii USA koszt zielonego wodoru waha się między 4,44 - 5,32 EUR/kg. Z kolei według Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA) jest to koszt

[45] *Gas fact sheet* (w:) „europa.eu", https://www.acer.europa.eu/gas-factsheet [dostęp: 05.04.2023].

w przedziale 3,10 - 6,65 EUR/kg. Biorąc średnią z tych trzech, możemy uznać, że zielony wodór kosztuje obecnie około 4,59 EUR/kg ($5,03/kg)[46], a zatem jest on zdecydowanie zbyt drogi do produkcji na dużą skalę. Aby produkcja stała się komercyjnie opłacalna, cena musi spaść do około 1-2 dolarów za kilogram. „Zgodnie z analizą PwC, popyt na zielony wodór będzie rósł w tempie umiarkowanym, ale stałym do 2030 r. W tym okresie koszty produkcji powinny spaść o około 50 procent. (…) W dalszym okresie prognozuje się przyspieszenie wzrostu popytu, zwłaszcza od połowy lat 30. XXI w."[47]. Według IRENA przy optymistycznych założeniach dla większości regionów do 2050 roku koszt produkcji ekologicznego wodoru w konfiguracjach hybrydowych z wykorzystaniem fotowoltaiki i energii wiatrowej ma spaść poniżej 1 USD/ kgH2. Z kolei przy pesymistycznych założeniach dotyczących kosztów ogniw fotowoltaicznych i elektrolizerów koszt produkcji może wzrosnąć do ponad 1,3 USD/kgH2 (wykres 2.1.3.).

Wykres 2.1.3. Koszt wodoru według regionów w 2050 r. dla scenariusza optymistycznego i pesymistycznego



Źródło: *Global hydrogen trade to meet the 1.5°c climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA, s. 9.

[46] *Green Hydrogen current and projected production costs* (w:) „structuresinsider.com", https://www.structuresinsider.com/post/green-hydrogen-current-and-projected-production-costs [dostęp: 07.04.2023].
[47] *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce*, Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Wrocław 2021, s. 38.

Kraje charakteryzujące się dużym potencjałem odnawialnych źródeł energii i niskim WACC (np. Kolumbia, Chile, Chiny, Indie, Arabia Saudyjska) mogą osiągnąć poziom kosztów produkcji poniżej 0,7 USD/kgH2, co ułatwia im pełnienie roli eksporterów. Z kolei Afryka Subsaharyjska i Azja Centralna mają bardzo ograniczoną rolę w handlu ze względu na wysoki WACC, który sprawia, że produkcja zielonego wodoru jest droga. Zatem kraje z wysokim WACC musiałby się skoncentrować na rozwoju krajowej energetyki odnawialnej, aby stać się konkurencyjne na rynku eksportowym.

Politykę w zakresie zielonego wodoru należy kształtować w taki sposób, aby kraje produkujące wodór nie pozostawały jedynie eksporterami wodoru, ale czerpały korzyści w całym łańcuchu wartości. Kraje eksportujące powinny zatem rozważyć, w jaki sposób wykorzystać popyt zewnętrzny oraz związane z nim dochody i inwestycje, aby zwiększyć wykorzystanie energii odnawialnej i produkcję wodoru na potrzeby krajowe. W tym miejscu należy uwzględnić podstawową różnicę między krajami: każdy kraj jest na innym etapie rozwoju społeczno-gospodarczego oraz ze względu na pewne ograniczenia geograficzno-klimatyczne, posiada inny dostęp do zasobów naturalnych i odmienne cele w zakresie dekarbonizacji. Tym samym, w jednym kraju mogą już istnieć pewne konkretne zachęty dla rozwoju gospodarki wodorowej, podczas gdy w innym dopiero bada się potencjalne korzyści, jakie wodór może mieć dla jego gospodarki i systemu. Przykładowo budowa nowoczesnej infrastruktury na potrzeby gospodarki wodorowej wymaga dużych nakładów kapitału. W tym kontekście należy uwzględnić następujące kwestie: czy istniejąca sieć gazowa mogłaby być ponownie wykorzystana do transportu wodoru, czy kraj posiada odpowiednie doświadczenie w zakresie skraplania gazu, a także czy istnieją odpowiednie obiekty do magazynowania wodoru. W związku z tym kraje, które posiadają instytucje finansowe z doświadczeniem w zakresie projektów związanych z energią odnawialną, jak również przejrzysty system informacji kredytowej, silny system prawny, niskie stopy procentowe i wysoki rating kredytowy obligacji rządowych będą bardziej atrakcyjne dla realizacji projektów wodorowych. Istotna jest również łatwość prowadzenia działalności gospodarczej w kraju eksportu, a w szczególności: wsparcie prawne w zakresie egzekwowania umów i ochrony praw, zachęty podatkowe oraz otoczenie regulacyjne umożliwiające założenie i prowadzenie przedsiębiorstwa. Ponadto każdy kraj powinien unikać polegania na niewielkiej liczbie krajów jako partnerów handlowych (jako nabywców dla krajów eksportujących i dostawców dla krajów importujących) ze względu na bezpieczeństwo energetyczne. W związku z tym negocjacje dotyczące wodoru staną się podstawowym elementem dyplomacji gospodarczej.

2.2. Zasoby naturalne jako kluczowy element na globalnym rynku zielonego wodoru

W procesie przechodzenia na czystą energię kwestie niedoborów wody i minerałów krytycznych stanowią nowe wyzwania dla bezpieczeństwa energetycznego. Jeśli zostaną one pozostawione bez rozwiązania, mogą spowolnić lub zwiększyć koszty transformacji energetycznej, a tym samym utrudnić międzynarodowe wysiłki na rzecz walki ze zmianami klimatu.

W ciągu ostatnich 100 lat w większości regionów świata poziom bezpieczeństwa wodnego ulegał stopniowemu obniżaniu, a zużycie wody wzrastało ponad dwukrotnie szybciej niż wzrost liczby ludności. Obecnie większość wody zużywa się w ramach łańcuchów dostaw obsługujących poszczególne sektory gospodarki, przy czym około 70% światowych zasobów wody zużywa rolnictwo[48]. Przykładowo w Europie średnio 44% całkowitego poboru wody jest wykorzystywane na potrzeby rolnictwa, 40% na potrzeby przemysłu i produkcji energii, a 15% na potrzeby zaopatrzenia ludności w wodę[49]. Sektor przemysłowy ma tak duży ślad wodny ze względu na swoją zależność od paliw węglowodorowych. Z racji tego należy rozpatrzeć, jaki wpływ na zużycie wody będzie miało przechodzenie na gospodarkę wodorową.

W przyszłości przemysł wodny będzie w większym stopniu powiązany z globalnymi rynkami energii, a tym samym będzie podlegał intensywnej konkurencji rynkowej i wyzwaniom związanym m.in. z zachowaniem suwerenności narodowej. Aby rozwinąć „zieloną gospodarkę wodorową", w której bezemisyjny wodór jest powszechnie stosowany w życiu codziennym, innowatorzy wykorzystują elektrochemiczną elektrolizę wody do wytwarzania wodoru z dwóch prostych składników: energii elektrycznej i wody. Chociaż istnieją różne rodzaje elektrolizerów do produkcji ekologicznego wodoru, wszystkie wymagają ultraczystej wody. Sposób uzdatniania wody zależy od jakości wody zasilającej, ale ogólnie rzecz biorąc, obejmuje on oczyszczanie wstępne, odwróconą osmozę i elektrodejonizację. Szacunki dotyczące ilości wody potrzebnej do produkcji ekologicznego wodoru są bardzo zróżnicowane. W pełni dojrzałej gospodarce wodorowej zapotrzebowanie na wodór wyniesie około 2,3 Gt rocznie. Na każdy kilogram wyprodukowanego wodoru musi zostać zużyte 9 litrów wody. Wobec tego 2,3 Gt wodoru wymaga 20,5 Gt, czyli 20,5 mld m3 wody słodkiej rocznie. Stanowi to około 1,5 ppm wody słodkiej dostępnej na Ziemi[50]. W porównaniu z innymi prognozami dotyczącymi zapotrzebowania na wodę przy produkcji wodoru, powyższe zapotrzebowanie na wodę słodką jest dość niskie. Wynika to z założenia, że wodór w przyszłości będzie produkowany głównie

[48] *Water for Sustainable Food and Agriculture. A report produced for the G20 Presidency of Germany*, FAO, Rome 2017, s. 1.
[49] *Water use by sectors* (w:) „europa.eu", https://www.eea.europa.eu/archived/archived-content-water-topic/water-resources/water-use-by-sectors [dostęp: 09.04.2023].
[50] R.R. Beswick, A. M. Oliveira, Y. Yan, *Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem?*, ACS Energy Letters 2021, s. 3167.

przy użyciu odnawialnych źródeł energii, takich jak energia wiatru i słońca, które mają zerowy lub minimalny ślad wody. Dlatego, przy rozpatrywaniu wpływu produkcji wodoru na globalne rezerwy wody, kluczowe jest uwzględnienie tylko wody, która jest bezpośrednio wykorzystywana do procesu elektrolizy.

W 2014 roku łącznie na świecie pobrano 251 mld m3 słodkiej wody do produkcji energii z paliw kopalnych, takich jak węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny, a 31 mld m3 wody zostało zużyte do chłodzenia, wydobycia, szczelinowania hydraulicznego i rafinacji[51]. Gdyby całe zużycie paliw kopalnych zastąpić zielonym wodorem, roczne zużycie wody do elektrolizy (zakładając 0,51t/MWh) wyniosłoby 8,3 x 1013 kg, czyli około 28 kg na osobę dziennie. Odpowiada to zużyciu 0,000006% zasobów wody morskiej lub 0,09% dostępnych zasobów wody słodkiej. Innymi słowy, gdyby całe obecne zużycie paliw kopalnych zostało zamienione na ekologiczny wodór, zapotrzebowanie na wodę do elektrolizy wyniosłoby 1,8% obecnego światowego zużycia wody[52]. Dla porównania, nawet jeśli do produkcji wodoru metodą elektrolizy trzeba zużyć 20,5 mld m3 wody, to i tak jest to o 33% mniej niż obecne zużycie wody do produkcji energii z paliw kopalnych[53].

Należy jednak zwrócić uwagę, że regiony o największym potencjale energii odnawialnej i przestrzeni do instalowania zakładów produkujących zielony wodór są również obszarami, w których coraz większym problemem jest „water stress". Duża część planowanych mocy w zakresie zielonego wodoru ma być zlokalizowana w Australii, Europie Zachodniej, Azji Środkowej, Afryce Zachodniej i na Bliskim Wschodzie. Wszystkie te regiony, z wyjątkiem Europy Zachodniej, mają średni lub wysoki poziom niedoborów wody (rys. 2.2.1.).

[51] *Reducing water consumption with green hydrogen* (w:) „itm-power.com", https://itm-power.com/blogs/reducing-water-consumption-with-green-hydrogen [dostęp: 09.04.2023].
[52] M. Newborough, G. Cooley, *Green hydrogen: water use implications and opportunities*, ITM Power PLC, 2021 s. 13
[53] *Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem?* ACS Energy Letters 2021, s. 3168.

Rysunek 2.2.1. Techniczny potencjał energii odnawialnej na rok 2050 w EJ/rok

Źródło: P. Woods, H. Bustamante, F. Aguey, *The hydrogen economy - Where is the water?*, Energy Nexus, Sydney 2022, s. 2.

W 2021 roku 14 projektów dotyczących elektrolizerów do produkcji zielonego wodoru planowanych było w krajach o ekstremalnie wysokim poziomie stresu wodnego. Natomiast 53 projekty znajdowały się w krajach o wysokim stresie wodnym, a 162 projekty zlokalizowane były w regionach o średnim lub wysokim stresie wodnym[54]. Według firmy konsultingowej Bluefield Research około 85% planowanych obiektów znajduje się w regionach o średnim lub wysokim stopniu niedoboru wody[55]. Problemy z niedoborami wody w tych częściach świata spowodowane są skutkami zmian klimatu i zmiennością opadów. Na przykład w całej południowo-zachodniej Australii przewiduje się, że do 2030 r. zimowe i wiosenne opady deszczu zmniejszą się o dodatkowe 15 procent[56]. Jeśli polityki dotyczące energii i wody nie zostaną lepiej zintegrowane, to jest prawdopodobne, że zapotrzebowanie na wodór będzie bezpośrednio konkurować z sektorem gospodarki wodnej. W celu zapewnienia trwałego bezpieczeństwa ekonomicznego państwa, decydenci polityczni będą musieli zrozumieć, opracować i propagować znaczenie bezpieczeństwa energetycznego i wodnego w regionach, w których będzie produkowany wodór. Ma to kluczowe znaczenie dla zrównoważenia rozwoju gospodarczego i uzyskania akceptacji społecznej.

[54] *Is green hydrogen less sustainable than we thought?*(w:) „euronews.com", https://www.euronews.com/green/2021/11/04/is-green-hydrogen-less-sustainable-than-dirtier-blue-hydrogen [dostęp: 10.04.2023].
[55] *Green hydrogen revolution risks dying of thirst* (w:) „reuters.com", https://www.reuters.com/breakingviews/green-hydrogen-revolution-risks-dying-thirst-2022-10-05/ [dostęp:10.04.2023].
[56] *Climate change and drought*, Climate Council, 2018, s. 9.

Kolejnym wyzwaniem przy tworzeniu gospodarki wodorowej jest kwestia wydobycia i wykorzystania metali ziem rzadkich, takich jak miedź, lit, nikiel i kobalt. System energetyczny oparty na czystych technologiach znacznie różni się od systemu zasilanego naturalnymi źródłami węglowodorów. Budowa elektrowni fotowoltaicznych (PV), farm wiatrowych i pojazdów elektrycznych (EV) wymaga większej ilości minerałów niż ich odpowiedniki oparte na paliwach kopalnych. Typowy samochód elektryczny potrzebuje sześć razy więcej minerałów niż konwencjonalny samochód, a lądowa elektrownia wiatrowa wymaga dziewięć razy więcej zasobów mineralnych niż elektrownia gazowa[57]. Z kolei energia wodna, biomasa i energia jądrowa wnoszą jedynie niewielki wkład ze względu na ich stosunkowo niskie zapotrzebowanie na minerały. Zatem rodzaj i ilość wykorzystywanych zasobów mineralnych różnią się w zależności od dostępnej i dominującej technologii (rys. 2.2.2.).

Rysunek 2.2.2. Zapotrzebowanie na minerały dla technologii czystej energii

	Copper	Cobalt	Nickel	Lithium	REEs	Chromium	Zinc	PGMs	Aluminium*
Solar PV	●	○	○	○	○	○	○	○	●
Wind	●	○	◍	○	●	◍	●	○	◍
Hydro	◍	○	○	○	○	◍	◍	○	◍
CSP	◍	○	◍	○	○	●	◍	○	●
Bioenergy	●	○	○	○	○	○	◍	○	◍
Geothermal	○	○	●	○	○	●	○	○	○
Nuclear	◍	○	◍	○	○	◍	○	○	○
Electricity networks	●	○	○	○	○	○	○	○	●
EVs and battery storage	●	●	●	●	●	○	○	○	●
Hydrogen	○	○	●	○	◍	○	○	●	◍

Notes: Shading indicates the relative importance of minerals for a particular clean energy technology (● = high; ◍ = moderate; ○ = low), which are discussed in their respective sections in this chapter. CSP = concentrating solar power; PGM = platinum group metals.

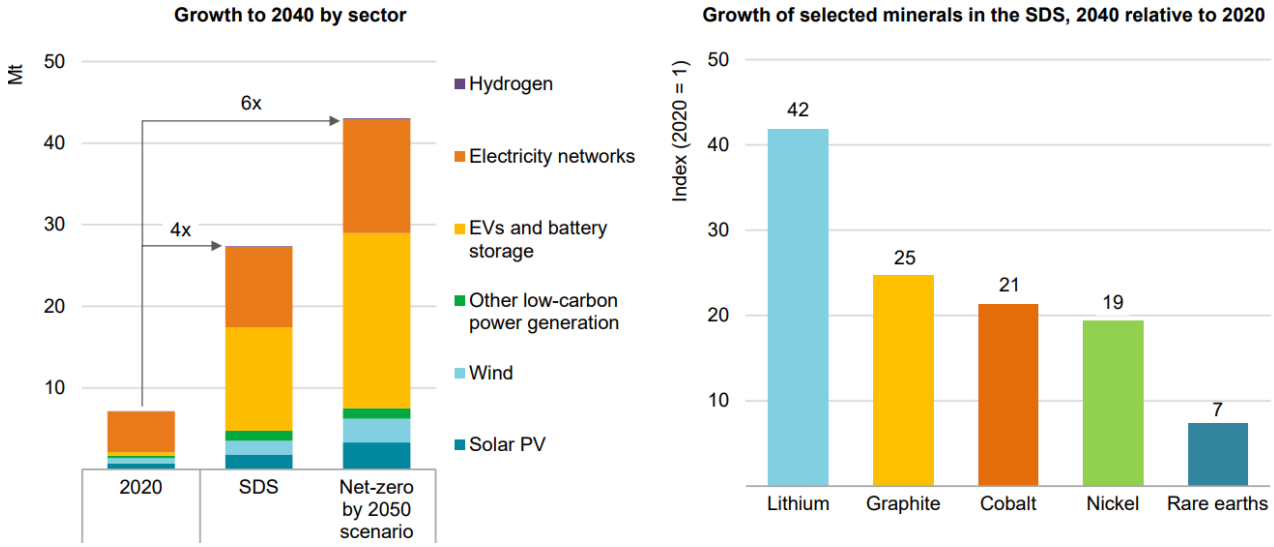
Źródło: *The role of critical minerals in clean energy transitions,* World Energy Outlook Special Report, IEA 2021, s. 45.

Szybki rozwój wodoru jako nośnika energii wiąże się ze znacznym wzrostem popytu na nikiel i cyrkon do użytku w elektrolizerach oraz na metale z grupy platynowców do użytku w pojazdach elektrycznych napędzanych ogniwami paliwowymi (FCEV). Z kolei pierwiastki takie jak lit, kobalt i nikiel odgrywają główną rolę w zapewnieniu większej wydajności, trwałości i gęstości energii w akumulatorach. Podobnie sieci energetyczne wymagają ogromnych ilości miedzi i aluminium. To właśnie miedź jest niezbędnym elementem dla prawie wszystkich technologii związanych z energią elektryczną.

[57] *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, World Energy Outlook Special Report, IEA 2021, s. 5.

Transformacja energetyczna oznacza zmianę systemu z paliwochłonnego na materiałochłonny. Od 2010 roku średnia ilość minerałów potrzebnych do budowy nowej jednostki mocy wytwórczej energii elektrycznej wzrosła o 50% wraz ze wzrostem udziału OZE w nowych inwestycjach[58]. W ciągu najbliższym dwóch dekad sektor energetyczny stanie się główną siłą napędzającą wzrost popytu na rynku minerałów. Przewiduje się, że do 2040 r. całkowite zapotrzebowanie na minerały podwoi się w STEPS i wzrośnie czterokrotnie w SDS (wykres 2.2.1).

Wykres 2.2.1. Zapotrzebowanie na minerały na technologie czystej energii według scenariusza



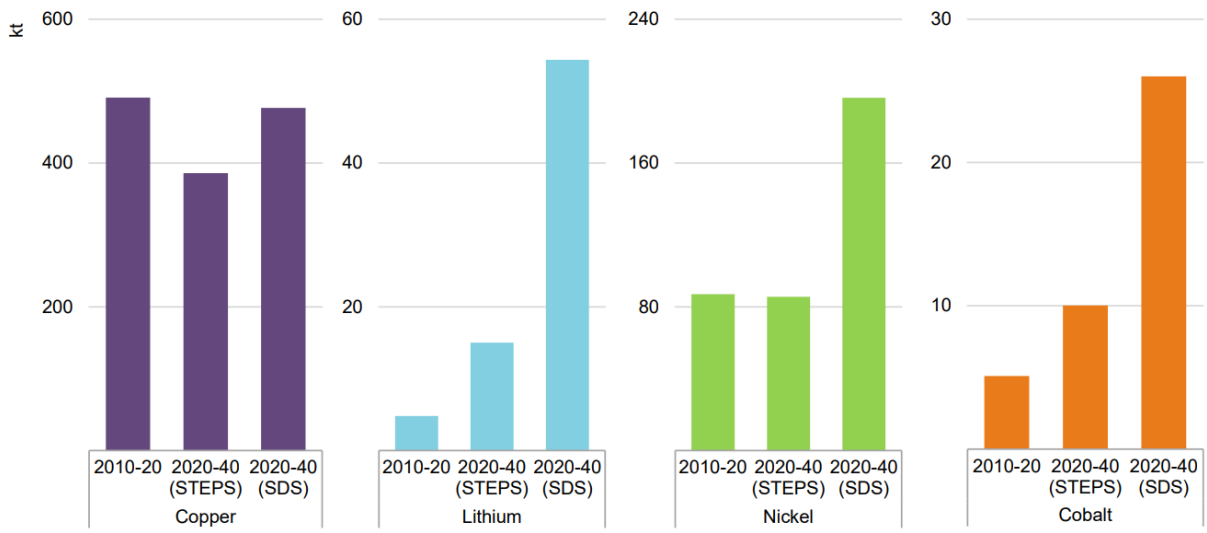
Źródło: *The role of critical minerals in clean energy transitions,* World Energy Outlook Special Report, IEA 2021 s. 9.

Do 2050 roku w scenariuszu zgodnym z celami porozumienia paryskiego udział technologii czystej energii w całkowitym popycie wzrośnie do ponad 40% w przypadku miedzi i pierwiastków ziem rzadkich, 60-70% w przypadku niklu i kobaltu oraz prawie 90% w przypadku litu.

W SDS skala wzrostu popytu znacznie przekracza poziomy obserwowane w ostatnich dziesięcioleciach. Szczególnie wysoki wzrost dotyczy minerałów związanych z pojazdami elektrycznymi. Popyt na minerały do użytku w pojazdach elektrycznych i do przechowywania akumulatorów wzrośnie prawie dziesięciokrotnie w STEPS i około trzydziestokrotnie w SDS w okresie do 2040 roku. Warto zwrócić uwagę, że w okresie do 2040 roku średnioroczny wzrost popytu na nikiel i kobalt jest odpowiednio dwu i pięciokrotnie wyższy niż w latach 2010-2020. W przypadku miedzi przewiduje się kontynuację silnego wzrostu popytu przez kolejne dziesięciolecia (wykres 2.2.2.).

[58] Źródło: Ibidem, s. 5.

Wykres 2.2.2. Średnioroczny wzrost całkowitego zapotrzebowania na wybrane minerały według scenariusza



Źródło: *The role of critical minerals in clean energy transitions,* World Energy Outlook Special Report, IEA 2021, s. 118.

Warto zwrócić uwagę, że trajektorie popytu podlegają dużym wahaniom. Popyt na pierwiastki ziem rzadkich może być od trzech do siedmiu razy większy w 2040 r. niż obecnie, w zależności od wyboru technologii i polityki klimatycznej. Na przykład zapotrzebowanie na kobalt może być od 6 do 30 razy wyższe niż obecnie[59]. Szczególnie dotyczy to urządzeń do elektrolizy.

Różnorodność rozwiązań w zakresie elektrolizy sprawia, że krytyczne minerały prawdopodobnie nie będą stanowiły dużego problemu w miarę zwiększania skali produkcji zielonego wodoru. Wyróżniamy trzy rodzaje elektrolizerów: alkaiczne, PEM i SOEC. Każdy z nich wymaga innej ilości i rodzaju minerałów. Pierwszą i najbardziej dojrzałą technologią jest *elektroliza alkaliczna*. Obecne projekty inwestycyjne wymagają zastosowania niklu w ilości przekraczającej jedną tonę na MW, czyli 1 000 ton w przypadku zakładu produkującego elektrolizery o mocy 1 GW. W przyszłości oczekuje się zmniejszenia zapotrzebowania na nikiel w elektrolizerach alkalicznych. Oprócz niklu, elektrolizer alkaliczny wymaga ok. 100 kg cyrkonu, pół tony aluminium i ponad 10 ton stali, wraz z mniejszymi ilościami kobaltu i katalizatorów miedzianych. Z kolei gdyby *elektrolizery z membraną do wymiany protonów* (PEM) zdominowały rynek wodoru, zwiększyłoby to zapotrzebowanie sektora energetycznego na platynę i iryd. Natomiast podstawowe zapotrzebowanie mineralne *elektrolizy tlenków stałych* (SOEC) to nikiel, cyrkon, lantan i itr. Ogniwa SOEC są obecnie testowane w mniejszej skali i charakteryzują się wyższą wydajnością oraz niskimi kosztami

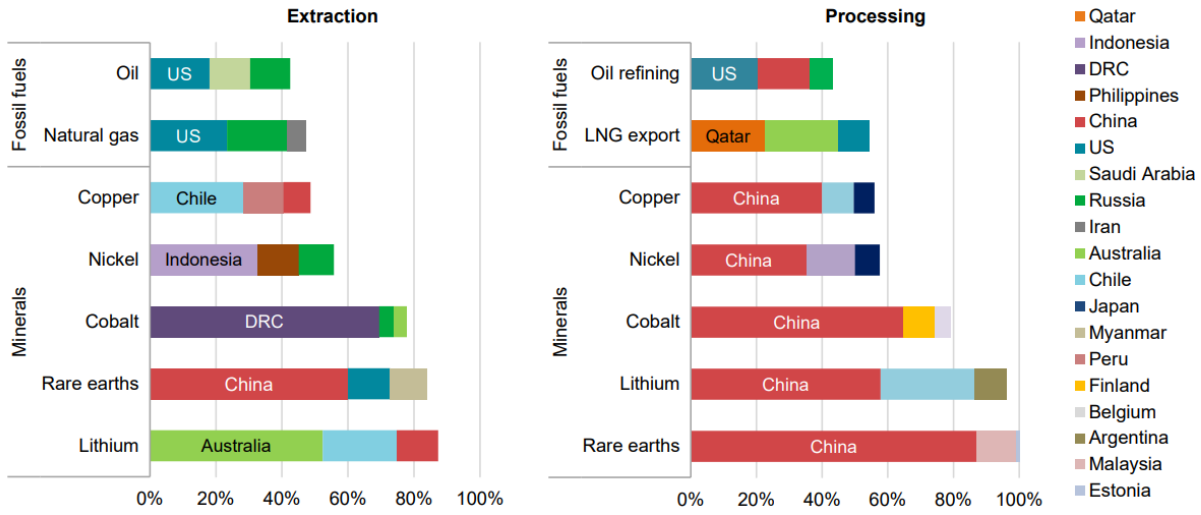
[59] Ibidem, s. 8.

materiałowymi. Oczekuje się, że każda z tych wartości może zostać zmniejszona o połowę dzięki ciągłemu doskonaleniu i usprawnianiu technologii elektrolizerów w ciągu następnej dekady[60].

Obawy o zmienność cen i bezpieczeństwo dostaw nie znikają w zelektryfikowanym i bogatym w odnawialne źródła energii systemie energetycznym. Szybko rozwijające się rynki kluczowych minerałów mogą podlegać zakłóceniom fizycznym (np. powiedzie, trzęsienia ziemi, tsunami), wpływom geopolitycznym, a także zakłóceniom w dostawach. Wszystkie te perturbacje mają wpływ na dostępność minerałów, a co za tym idzie, na ceny. Można zidentyfikować 4 czynniki ryzyka, które mogą zwiększyć prawdopodobieństwo zacieśnienia rynku i występowania cyklicznych wahań cenowych, spowalniając przemiany energetyczne. Należą do nich: większa koncentracja geograficzna produkcji, wysoka ekspozycja na ryzyko klimatyczne, skutki obniżenia jakości zasobów oraz niedopasowanie tempa zmian popytu do harmonogramu realizacji projektów.

Pierwsze ryzyko dotyczy wysokiej koncentracji geograficznej produkcji. Dzisiejsza produkcja i przetwarzanie wielu minerałów są silnie skoncentrowane w niewielkiej liczbie krajów, co sprawia, że nowy, zeroemisyjny system energetyczny jest podatny na niestabilność polityczną, ryzyko geopolityczne i możliwe ograniczenia eksportowe. Przykładowo w przypadku litu i kobaltu trzy kraje będące największymi producentami kontrolują znacznie ponad trzy czwarte światowej produkcji (wykres 2.2.3.).

Wykres 2.2.3. Udział krajów w całkowitej produkcji dla wybranych minerałów i paliw kopalnych w 2019 roku



Źródło: *The role of critical minerals in clean energy transitions,* World Energy Outlook Special Report, IEA 2021, s. 13.

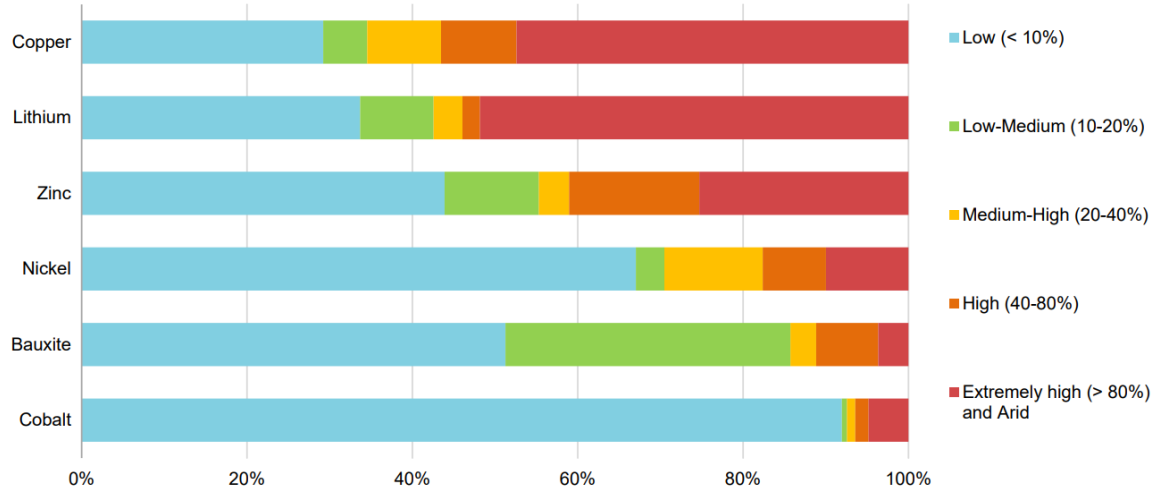
W 2019 roku Demokratyczna Republika Konga (DRC) i Chiny były odpowiedzialne za około 70% światowej produkcji kobaltu. W przypadku miedzi i niklu obraz jest nieco bardziej zróżnicowany, ale nadal niemal połowa globalnej podaży jest skoncentrowana w trzech krajach. Poziom koncentracji

[60] Ibidem, s. 113.

jest jeszcze wyższy w przypadku operacji przetwarzania i rafinacji. Udział Chin w rafinacji wynosi około 35% dla niklu, 50-70% dla litu i kobaltu oraz prawie 90% w przypadku przetwarzania metali ziem rzadkich. Z kolei Australia jest największym na świecie producentem litu i cyrkonu oraz czwartym co do wielkości producentem pierwiastków ziem rzadkich.

Kolejnym ryzykiem, które może zakłócić bezpieczeństwo dostaw minerałów, jest ekspozycja na ryzyka klimatyczne. Niedobór wody jest główną barierą dla procesów wydobycia i przetwarzania minerałów. Wśród minerałów miedź i lit są szczególnie narażone na niedobór wody (wykres 2.2.4.).

Wykres 2.2.4. Udział wielkości produkcji według poziomu stresu wodnego dla wybranych minerałów, 2020 rok



Źródło: *The role of critical minerals in clean energy transitions,* World Energy Outlook Special Report, IEA 2021, s. 128.

Ponad 50% dzisiejszej produkcji litu koncentruje się na obszarach o dużym niedoborze wody. Z kolei około 80% produkcji miedzi w Chile pochodzi z kopalń położonych na obszarach o dużym stresie wodnym. Kilka głównych regionów produkcyjnych, takich jak Australia, Chiny i Afryka, jest również narażonych na ekstremalne upały lub powodzie, co sprawia, że zapewnienie niezawodnych i zrównoważonych dostaw podstawowych minerałów stanowi duże wyzwanie.

Trzecie ryzyko wiąże się ze spadkiem jakości surowców mineralnych. W ostatnich latach jakość rudy nadal się pogarsza. Jest to spowodowane tym, że złoża wysokiej jakości są eksploatowane wcześniej. Pewną rolę odegrał również postęp technologiczny, który umożliwia eksploatację złóż o niższych parametrach. Analizując tylko kopalnie miedzi, średnia klasa rudy spadła o około 25% w ciągu zaledwie dziesięciu lat[61]. Wiąże się to z wieloma wyzwaniami - wydobycie metalu z rud o niższej klasie wymaga więcej energii, co powoduje wzrost kosztów wydobycia i przetwarzania oraz emisji dwutlenku węgla.

[61] G. Calvo, G. Mudd , A. Valero, A. Valero, *Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?*, MDPI 2016.

Czwarte ryzyko jest związane z niedopasowaniem tempa zmian w strukturze popytu do tempa rozwoju nowych projektów. Skutkiem tego jest duża zmienność cen na rynku minerałów. Największe źródło zróżnicowania popytu pochodzi z niepewności ogłaszanych i zakładanych ambicji klimatycznych. Ta duża niepewność**,** co do możliwych scenariuszy przyszłości może działać jako czynnik utrudniający podejmowanie przez przedsiębiorstwa decyzji inwestycyjnych, co z kolei może powodować nierównowagę między podażą a popytem w nadchodzących latach. Przykładowo oczekuje się, że w najbliższym czasie niektóre minerały, takie jak lit i kobalt, będą miały nadwyżkę, natomiast wodorotlenek litu i nikiel oraz niektóre pierwiastki ziem rzadkich (np. neodym i dysproz) mogą napotkać na problemy z podażą w nadchodzących latach w związku ze wzrostem popytu[62]. W tym wypadku rządy krajów powinny podjąć zdecydowana działania w celu zachęcenia do realizacji nowych projektów dostaw. Najważniejszym z nich jest dostarczenie jasnych i silnych sygnałów dotyczących przemian energetycznych. Jeśli przedsiębiorstwa nie mają zaufania do polityki energetycznej i klimatycznej poszczególnych krajów, będą podejmować decyzje inwestycyjne w oparciu o znacznie bardziej zachowawcze prognozy.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można zidentyfikować sześć filarów podejścia do bezpieczeństwa mineralnego. Są to: (i) zapewnienie odpowiednich inwestycji w zdywersyfikowane źródła nowych dostaw; (ii) promowanie innowacji technologicznych na wszystkich etapach łańcucha wartości; (iii) zwiększenie skali recyklingu; (iv) zwiększanie odporności łańcucha dostaw i przejrzystości rynku; (v) uwzględnianie wyższych standardów środowiskowych i społecznych; oraz (vi) wzmocnienie współpracy międzynarodowej między producentami a konsumentami. Szczególnie szereg powstających technologii może potencjalnie ograniczyć wykorzystanie minerałów krytycznych. Przykładowo bezpośrednie wydobycie litu oraz odzyskiwanie metali ze strumieni odpadów lub rud niskiej jakości mogą doprowadzić do skokowej zmiany przyszłych wielkości dostaw. Zmniejszenie materiałochłonności i zachęcanie do zastępowania materiałów poprzez innowacje technologiczne może również odegrać ważną rolę w łagodzeniu napięć w dostawach, przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów. Na przykład 40-50- procentowa redukcja zużycia srebra i krzemu w ogniwach słonecznych w ciągu ostatniej dekady umożliwiła spektakularny wzrost wykorzystania ogniw fotowoltaicznych[63].

[62] *The role of critical minerals in clean energy transitions*, World Energy Outlook Special Report, IEA 2021, s. 120.
[63] Ibidem, s. 14.

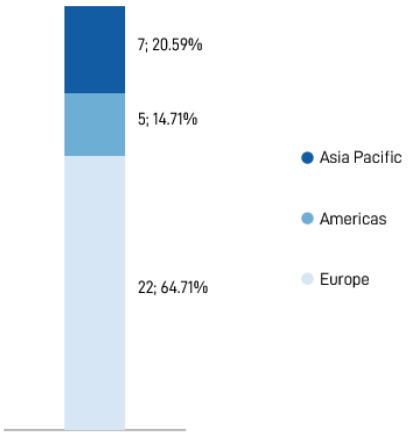
2.3. Istotne inicjatywy dla rozwijania doliny wodorowej

Na całym świecie powstało wiele projektów mających na celu utworzenie zintegrowanych regionalnie „ekosystemów wodorowych". Większość z nich jest wdrażana na tradycyjnych „głównych rynkach" wodoru (Europa, Azja, Ameryka Północna). W zależności od regionu świata powstały ich różne terminy i definicje: ***huby wodorowe*** (USA, Australia), ***klastry wodorowe*** (Chiny, Australia, część Europy) oraz ***doliny wodorowe*** (części Europy). Dzięki zintegrowanemu podejściu doliny wodorowe torują drogę do utworzenia regionalnych „mini gospodarek wodorowych". „Doliny wodorowe to przedsięwzięcia polityczno-społeczno-gospodarcze mające na celu rozwój regionalnych rynków wodorowych z pełnym łańcuchem wartości technologii wodorowych: produkcją, przesyłem i magazynowaniem, a także zastosowaniem technologii wodorowych w wielu sektorach gospodarki"[64]. Celem istnienia doliny wodorowej jest poprawa lokalnego bezpieczeństwa energetycznego i wspieranie zrównoważonego rozwoju sektora energetyki, w tym innowacyjnych technologii związanych z odnawialnymi źródłami energii i zielonym wodorem. Takie działania pozwolą na zwiększenie skali, maksymalizację wykorzystania zasobów, obniżenie kosztów i zmniejszenie ryzyka inwestycyjnego w regionie, a w konsekwencji do zwiększenia konkurencyjności gospodarczej kraju na międzynarodowym rynku.

Globalna platforma wymiany informacji „Mission Innovation Hydrogen Valley Platform", która została zlecona przez Unię Europejską i opracowana przez *The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking,* obejmuje ponad 37 dolin wodorowych w 20 krajach, o łącznym wolumenie inwestycji przekraczającym 33 miliardów euro[65]. Platforma zapewnia wgląd w globalny krajobraz projektów dolin wodorowych, ich czynniki sukcesu i występujące bariery. Chociaż koncepcja doliny wodorowej niewątpliwie „staje się globalna", na razie pod wieloma względami pozostaje „eurocentryczna". Spośród 34 Dolin Wodorowych, 65% to Doliny Wodorowe w Europie, 15% w obu Amerykach, a 21% to Doliny Wodorowe w regionie Azji i Pacyfiku (rys.2.3.1.).

[64] *Hydrogen valleys* (w:) „arp.pl", https://arp.pl/en/what-we-do/hydrogen-valleys/ [dostęp: 29.04.2023].
[65] *Mission Innovation Hydrogen Valley Platform* (w:) „h2v.eu", https://h2v.eu/ [dostęp: 01.05.2023].

Rysunek 2.3.1. Lokalizacja projektu (udział dolin)



Źródło: *Project locations* (w:) „h2v.eu/" https://h2v.eu/analysis/statistics/fundamentals/project-locations [dostęp: 29.04.2023].

W Europie regiony przodujące w tworzeniu dolin wodorowych to: Aragon (Hiszpania), Auvergne Rhone-Alpes (Francja), Normandia (Francja) i Holandia Północna[66]. W Polsce działa dzisiaj osiem projektów dolin wodorowych, a swoim zasięgiem pokrywają niemal cały obszar kraju. Należą do nich: Śląska, Dolnośląska, Wielkopolska, Pomorska, Zachodniopomorska, Mazowiecka, Podkarpacka oraz Śląsko-Małopolska Dolina Wodorowa.

Komisja Europejska współprzewodniczy strategii w zakresie zielonego wodoru, której celem jest obniżenie kosztów wodoru na świecie oraz zaprojektowanie i rozmieszczenie co najmniej 100 dolin wodorowych na całym świecie do 2030 roku[67]. Poza Europą coraz więcej projektów zacznie powstawać w Ameryce Północnej oraz w regionach APAC i MENA (rys. 2.3.2.).

Rysunek 2.3.2. Przykładowe projekty dolin wodorowych na świecie

Źródło: *Hydrogen Valleys go global: An update* (w:) „rolandberger.com", https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Hydrogen-Valleys-go-global-An-update.htm [dostęp: 30.04.2023].

[66] *Hydrogen Valley* (w:) „europaeu", https://s3platform.jrc.ec.europa.eu/hydrogen-valleys [29.04.2023].
[67] *REPowering the EU with Hydrogen Valley*, European Commission 2022.

Prawie wszystkie doliny wodorowe zajmują się produkcją wodoru. Około 20% dolin wodorowych produkuje poniżej jednej tony wodoru dziennie, podczas gdy 40% produkuje od jednej do dziesięciu ton dziennie. Pozostałe 40% produkuje ponad dziesięć ton dziennie, przy maksymalnej produkcji przekraczającej dwa tysiące ton dziennie. Skumulowany wolumen produkcji wszystkich dolin wodorowych wynosi prawie cztery tysiące ton dziennie – prawie jeden i pół miliona ton rocznie. Z kolei 85% dolin wodorowych zajmuje się również magazynowaniem lub przetwarzaniem wodoru, a także późniejszą dystrybucją.

Na ten moment magazynowanie wodoru w postaci sprężonego gazu w butlach jest jedną z najbardziej dojrzałych technologii stosowanych do dystrybucji na małą skalę. Natomiast w przypadku długoterminowych i wielkoskalowych projektach, 30% dolin wodorowych magazynuje wyprodukowany wodór w kawernach solnych. Planowane jest również zastosowanie skroplonego wodoru (LH2), płynnych nośników wodoru organicznego (LOHC) oraz amoniaku. Najpopularniejszą formą transportu wodoru jest transport ciężarowy (80% dolin wodorowych), a następnie rurociągowy (58%) i morski (20%)[68]. Na najdłuższych, międzykontynentalnych trasach najlepiej sprawdza się transport wodoru statkami w postaci amoniaku, ciekłego wodoru (LH2) i ciekłego wodoru organicznego (LOHC). Natomiast na krótsze dystanse optymalny jest transport ciężarówkami i rurociągami, gdzie wodór występuje w postaci gazowej.

Doliny wodorowe powinny działać w sposób przyjazny dla środowiska i być dostosowane do regionalnych warunków, zasobów i potrzeb. W związku z tym nie ma jednego uniwersalnego modelu doliny wodorowej. Natomiast do jej powstania powinny być spełnione 4 kluczowe warunki: duża skala projektu, jasno określony zasięg geograficzny, silnie rozbudowany łańcuch wartości oraz zaopatrywanie więcej niż jednego sektora gospodarki[69].

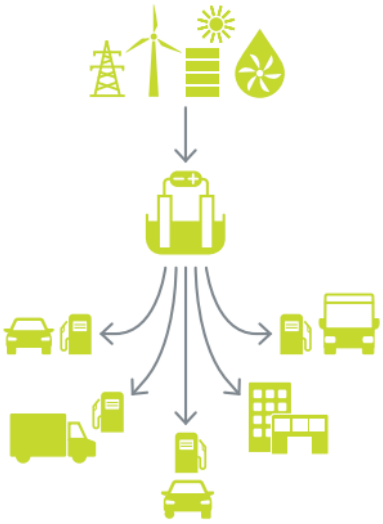
Po pierwsze dolina wodorowa składa się z wielu mniejszych projektów, które powinny wykraczać poza podstawowe działania pilotażowe i demonstracyjne. Projekty muszą być w fazie faktycznego rozwoju i przynajmniej pracować nad studium wykonalności. Mówiąc o projekcie na dużą skalę, dolina wodorowa wiąże się z wielomilionową inwestycją. Przyjmuje się, że dolina wodorowa powinna obejmować minimum 20 mln EUR inwestycji. Średnia dla Europy wynosi 100 mln EUR[70]. Po drugie doliny wodorowe muszą mieć jasno zdefiniowany wymiar geograficzny. Ich zasięg może obejmować działania na poziomie lokalnym i regionalnym lub działania na poziomie krajowym i międzynarodowym. Niektóre doliny wodorowe planują nawet poszerzyć skalę swoich działań i zasięg geograficzny poprzez połączenie się z sąsiednimi dolinami. Doprowadzi to do nawiązania transnarodowej i międzynarodowej współpracy. Doliny wodorowe powinny obejmować także szeroki zasięg łańcucha wartości - począwszy od produkcji wodoru po jego

[68] *Hydrogen Valleys. Insights into the emerging hydrogen economies around the world*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking - European Union 2021, s. 20.
[69] *Lower Silesian Hydrogen Valley has been established* (w:) „arp.pl", https://arp.pl/en/who-we-are/media/news/lower-silesian-hydrogen-valley-has-been-established/ [dostęp: 30.04.2023].
[70] *Hydrogen Valleys* (w:) „arp.pl", https://arp.pl/en/what-we-do/hydrogen-valleys/ [dostęp: 29.04.2023].

późniejsze magazynowanie i dystrybucję do odbiorców za pośrednictwem różnych środków transportu. W związku z tym cała infrastruktura związana z wodorem powinna znajdować się na jednym obszarze. Ostatnią cechą, którą wyróżnia się każda dolina wodorowa, jest zaopatrywanie więcej niż jednego sektora gospodarki. Obejmuje to na przykład transport, energetykę, przemysł chemiczny i stalowy.

Globalny krajobraz dolin wodorowych jest tak samo zróżnicowany, jak rozwijający się rynek wodoru. Biorąc pod uwagę wspólne wyzwania, przed którymi stoją twórcy projektów, konsumenci i sponsorzy, doliny wodorowe można podzielić na trzy archetypy. Pierwszy archetyp obejmuje projekty o mniejszej skali, skoncentrowane na mobilności lokalnej (1–10+ MW mocy lokalnych elektrolizerów). Zwykle angażują one kilkudziesięciu lokalnych interesariuszy i prowadzone są przez partnerstwa publiczno-prywatne lub regionalne władze publiczne (rys. 2.3.3.).

Rysunek 2.3.3. Projekty lokalne, na małą skalę i skupiające się na mobilności (archetyp 1)



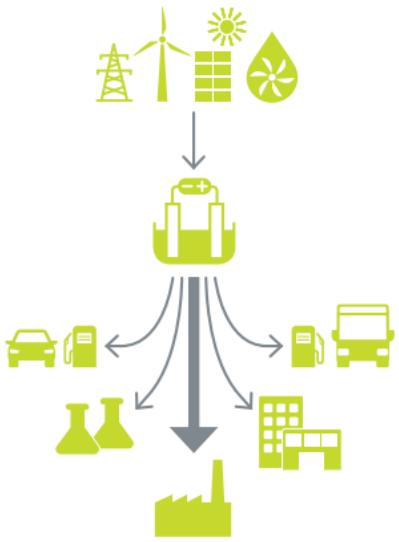
Źródło: *Hydrogen Valleys. Insights into the emerging hydrogen economies around the world*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking - European Union 2021, s. 27.

Głównym celem projektu jest zmniejszenie lokalnych emisji gazów cieplarnianych. Osiąga się to poprzez dekarbonizację całego systemu mobilności regionalnej. Lokalna produkcja i konsumpcja zielonego wodoru pozwoli na powstanie nowych miejsc pracy w regionie, co z kolei zwiększy jego ogólną atrakcyjność. Ten typ doliny wodorowej ma najdłuższy okres funkcjonowania ze wszystkich archetypów (zwłaszcza w Europie). Do przykładowych projektów należą: *Hyways for Future* (Niemcy), *Zero Emission Valley Auvergne-Rhône Alpes* (Francja), *Hydrogen Valley South Tyrol* (Włochy).

Drugi archetyp to doliny wodorowe o średniej skali, koncentrujące się na dekarbonizacji sektora przemysłowego (10–300+ MW mocy lokalnych elektrolizerów). Doliny należące do tego archetypu również produkują i konsumują zielony wodór lokalnie, ale skupiają się na jednym

lub kilku większych odbiorcach, zwykle z sektora przemysłowego lub energetycznego np. rafinerie (rys. 2.3.4).

Rysunek 2.3.4. Projekty lokalne, o średniej skali i ukierunkowane na przemysł (archetyp 2)



Źródło: *Hydrogen Valleys. Insights into the emerging hydrogen economies around the world*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking - European Union 2021, s. 27.

Rozwój projektów należących do drugiego archetypu jest determinowany tworzeniem nowych obostrzeń w przepisach prawnych dotyczących emitentów CO_2. W tym przypadku projekty są najczęściej wdrażane i realizowane przez podmioty prywatne. Ten rodzaj Doliny Wodorowej stale rośnie pod względem liczby i wielkości produkcji, a pierwsze projekty o mocy do 20 MW już działają w UE i USA np. *Basque H2 Corridor* (Hiszpania), *Advanced Clean Energy Storage* (USA), *HyNet North West England* (Wielka Brytania).

Trzeci archetyp doliny wodorowej koncentruje się na produkcji i magazynowaniu zielonego wodoru na dużą skalę, po niskich kosztach (250–1 000+ MW mocy lokalnych elektrolizerów). Poza produkcją wodoru na potrzeby lokalne, istotne znaczenie ma również eksport (regionalny i międzynarodowy) w celu połączenia podaży i popytu w skali globalnej (rys. 2.3.5).

Rysunek 2.3.5. Projekty na większą skalę, międzynarodowe i nastawione na eksport (archetyp 3)

Źródło: *Hydrogen Valleys. Insights into the emerging hydrogen economies around the world*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking - European Union 2021, s. 27.

Głównym celem powstania tych projektów jest wypełnienie luki geograficznej między regionami o sprzyjających warunkach do produkcji ekologicznego wodoru a globalnymi centrami popytu na wodór (patrz podrozdział 2.1.) Zwykle skupiają się na dużych odbiorcach z sektora przemysłu i energetyki. Takie projekty są w większości prowadzone przez koncerny energetyczne lub niezależnych deweloperów, którzy chcą stać się konkurencyjnymi i międzynarodowymi dostawcami wodoru. Kluczowe projekty obejmują: *Eyre Peninsula Gateway* (Australia), *Blue Danube* (IPCEI), *Green Crane* (IPCEI).

Trzy zidentyfikowane archetypy mają komplementarne skutki dla rozwoju „nowej gospodarki wodorowej". Podczas gdy pierwszy archetyp tworzy lokalną infrastrukturę wodorową, buduje akceptację społeczną i jest napędzany lokalnymi potrzebami w zakresie dekarbonizacji, drugi archetyp umożliwia lokalne zwiększanie skali rynku i czerpanie korzyści z wodoru na większą skalę poprzez dekarbonizację przemysłu i sektora energetycznego. Rozwój dolin wodorowych należących do drugiego archetypu jest dodatkowo wzmacniany rosnącą presją regulacyjną, która dotyczy odchodzenia od paliw kopalnych na rzecz źródeł niskoemisyjnych w regionie. Ponadto możliwość tworzenia nowych łańcuchów wartości i dostaw w regionach, a tym samym tworzenia miejsc pracy, które w przeciwnym razie zostałyby utracone w wyniku zmian strukturalnych w gospodarce, jest dodatkowym czynnikiem rozwoju dla obu archetypów. Z kolei Archetyp typu 3 jest napędzany przez obfitość odnawialnych źródeł energii w regionie. Doliny wodorowe należące do tego archetypu będą pełnić przede wszystkim rolę eksportera wodoru po niskich kosztach do innych regionów o wysokim zapotrzebowaniu. Tym samym zwiększy się ogólny zasięg geograficzny produktów i usług wodorowych.

Wobec powyższego, dopasowanie warunków potencjalnego regionu doliny wodorowej do cech archetypu może być pierwszym krokiem w kierunku ukształtowania atrakcyjnej koncepcji doliny wodorowej. W perspektywie krótko- i średnioterminowej oczekuje się, że ze względu na ograniczony lokalny potencjał produkcji zielonego wodoru w niektórych dolinach wodoru

archetypy będą się ze sobą łączyć. Będzie to bardziej widoczne w regionach z tradycyjnie silnymi powiązaniami infrastrukturalnymi np. w Unii Europejskiej. Zapewni to dodatkowy impuls dla rozwoju rynku zielonego wodoru.

Doliny wodorowe znacznie dojrzeją w ciągu najbliższej dekady. Stanie się to za sprawą rosnącej liczby projektów ogółem oraz fakt, że stają się one coraz bardziej złożone, np. pod względem wielkości produkcji wodoru, planowanych inwestycji, zaangażowanych stron i zasięgu regionalnego. Wielkość produkcji wodoru zwiększyła się z poniżej 5 ton produkcji wodoru dziennie w 2017 r., do prawie 1450 ton dziennie w projektach, które rozpoczęły realizację w 2019 roku[71]. Konkurencyjność dolin wodorowych będzie się dalej poprawiać w skali globalnej, ponieważ koszty produkcji zielonego wodoru spadną, a konwencjonalne technologie produkcji paliw kopalnych staną się droższe z powodu zaostrzenia przepisów. Ponadto dzięki podnoszeniu świadomości na temat zielonego wodoru i prezentacji potencjału zielonej gospodarki wodorowej, doliny wodorowe przyczynią się także do zwiększenia poziomu akceptacji społecznej. Spowoduje to, że cała gospodarka wodorowa wejdzie na ścieżkę wykładniczego wzrostu

Do tej pory projekty wodorowe były inicjowane i prowadzone głównie przez władze publiczne i interesariuszy ze środowisk naukowych i akademickich (szczególnie w Europie). W ciągu ostatnich kilku lat krajobraz zmienił się w kierunku przedsiębiorstw prywatnych, jako podmiotów wiodących. Ponad 50% dolin wodoru przebadanych na potrzeby raportu pt. „Hydrogen Valleys. Insights into the emerging hydrogen economies around the world" z 2021 roku, jest zarządzanych przez firmy prywatne. Wśród projektów na dużą skalę, udział firm prywatnych jest jeszcze większy (70%)[72].

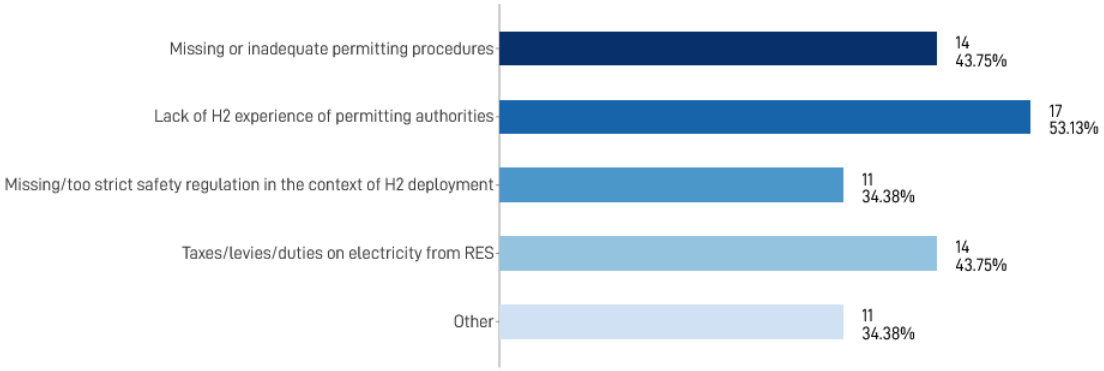
Istnieje wiele czynników, które decydują o sukcesie powstawania doliny wodorowej. Pierwszym krokiem jest stworzenie przekonującej koncepcji projektu. Doliny wodorowe zaspokajają specyficzne potrzeby regionu, dlatego należy dokładnie przeanalizować lokalne uwarunkowania i dopasować do nich koncepcję projektu. Taka analiza może dotyczyć lokalnych celów redukcji emisji, oraz obfitych źródeł energii odnawialnej i roli przemysłu w danym regionie. Państwa muszą jasno określić swoją pozycję na globalnie zmieniającym się rynku wodoru. Decydenci polityczni muszą odpowiedzieć sobie na pytanie czy kraj chce stać się centrum produkcyjnym, bramą importową lub hubem transportowo-magazynowym. Pozwoli to na stworzenie przekonującej koncepcji projektu, która będzie zgodna z możliwościami i potrzebami kraju. Po ustaleniu długoterminowych możliwości i potrzeb kraje będą mogły wyznaczyć sobie cele w zakresie wdrażania technologii wodorowych. Dobrze sformułowane cele powinny być konkretne, określone w czasie i mierzalne (np. planowane moce elektrolizerów do 2025/2030 roku, liczba stacji tankowania wodoru do 2025/2030 roku).

[71] *Hydrogen Valleys. Insights into the emerging hydrogen economies around the world*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking - European Union 2021, s. 22.
[72] Ibidem, s. 26.

Przy tworzeniu projektu doliny wodorowej decydenci polityczni powinni skoncentrować się na realizacji czterech priorytetów: „(i) stworzeniu jasnej wizji przyszłej gospodarki wodorowej w kraju w ramach krajowej strategii wodorowej, która wyznacza ramy rozwoju dolin wodorowych, (ii) stworzeniu otoczenia regulacyjnego sprzyjającego ich rozwojowi, (iii) zlikwidowaniu luk w procedurach wydawania pozwoleń oraz (iv) działaniu w charakterze lokalnych pośredników umożliwiających tworzenie dolin wodorowych”[73]. Podczas opracowywania projektu doliny wodorowej niezbędne jest skuteczne partnerstwo i współpraca zainteresowanych stron: przedsiębiorstw krajowych i międzynarodowych, uniwersytetów, instytutów badawczych, agencji samorządowych i lokalnych czy innych dolin wodorowych. Szczególne znaczenie ma uzyskanie wsparcia publicznego, które zamknie wszelkie pozostałe luki w finansowaniu. Na przykład na finansowanie dolin wodorowych w Polsce składają się fundusze unijne, krajowe i regionalne. Mają one za zadanie zmobilizować prywatne środki polskich przedsiębiorców[74]. Przy tym dużym wyzwaniem jest stworzenie odpowiedniego otoczenia regulacyjnego i politycznego, tj. harmonizacja przepisów, kodeksów i standardów na wszystkich etapach łańcucha wartości.

Doliny wodorowe, które wzięły udział w badaniu dla „Mission Innovation” wymieniły następujące czynniki o charakterze regulacyjnym, które są największą przeszkodą do rozwoju projektu: brak doświadczenia organów wydających zezwolenia w zakresie wodoru, brak lub niewłaściwe procedury wydawania zezwoleń, podatki/opłaty/należności od energii elektrycznej z OZE, brak lub zbyt rygorystyczne przepisy dotyczące bezpieczeństwa w kontekście wdrażania wodoru (rys. 2.3.6.).

Rysunek 2.3.6. Główne przeszkody o charakterze regulacyjnym (udział dolin)



Źródło: *Regulation* (w:) „h2v.eu”, https://h2v.eu/analysis/barriers/regulation [dostęp: 30.04.2023].

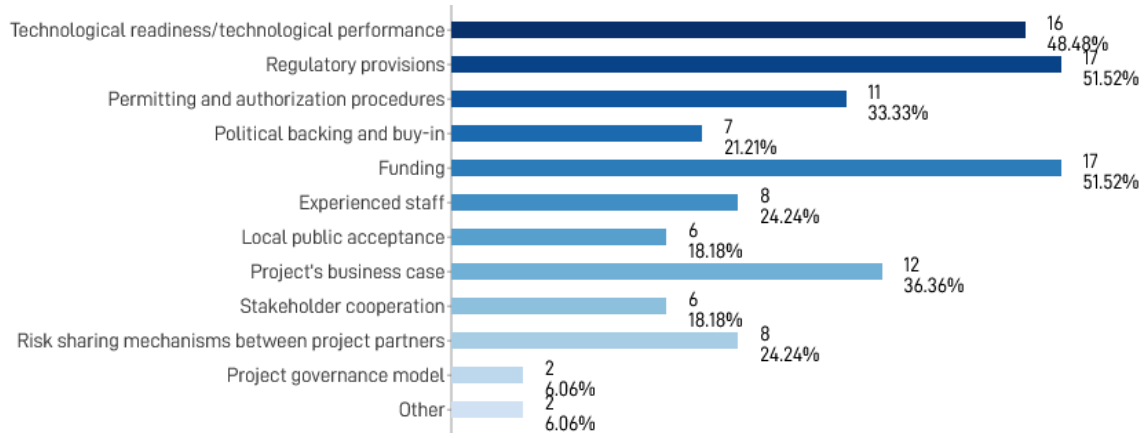
Ustanowienie zharmonizowanych kodeksów i norm związanych z zielonym wodorem (produkcją, dystrybucją i wykorzystaniem) na poziomie międzynarodowym jest szczególnie ważne dla Dolin Wodorowych zamierzających eksportować wodór (archetyp 3). Szczególnie kompleksowy rozwój

[73] *Hydrogen Valleys. Insights into the emerging hydrogen economies around the world*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking - European Union 2021, s. 7.
[74] *Hydrogen Valleys* (w:) „arp.pl”, https://arp.pl/en/what-we-do/hydrogen-valleys/ [dostęp: 29.04.2023].

infrastruktury (np. rurociągi wodoru) wymaga finansowania publicznego, centralnej koordynacji planowania oraz odpowiedniego otoczenia regulacyjnego. Podobnie ustandaryzowane, skuteczne i szybkie procedury wydawania zezwoleń są kluczem do utrzymania szybkiego, niezawodnego oraz bezpiecznego rozwoju rynku.

Z kolei biorąc pod uwagę fazę przygotowawczą projektu, doliny wodorowe wymieniły kolejno następujące bariery: przepisy regulacyjne, finansowanie, uzasadnienie biznesowe projektu, procedury wydawania zezwoleń, doświadczony personel, mechanizmy podziału ryzyka między partnerami projektu, akceptacja społeczności lokalnej, współpraca interesariuszy, gotowość technologiczna/wydajność technologiczna, wsparcie polityczne, model zarządzania projektem (rys. 2.3.7).

Rysunek 2.3.7. Główne przeszkody i bariery w fazie przygotowywania projektu (udział dolin)



Źródło: *Preparation* (w:) "h2v.eu", https://h2v.eu/analysis/barriers/project_development/preparation [dostęp: 30.04.2023].

Dolina wodorowa jest najlepszym miejscem do rozwoju, testowania oraz wdrażania nowych technologii wodorowych. Uznanie postępów i sukcesów utworzonych dolin wodorowych, w tym dzielenie się najlepszymi praktykami na rzecz udanego rozwoju projektów może dostarczyć wiele cennych wskazówek dla innych dolin wodorowych, jak również dla przyszłych projektów. Tym samym pokonanie kluczowych barier technologicznych i pozatechnologicznych może okazać się ważnym elementem budowy przewag konkurencyjnych pomiędzy krajami. Aby złagodzić bariery w zakresie gotowości i wydajności technologicznej zasadnicze znaczenie dla Dolin Wodorowych ma zachowanie elastyczności w odniesieniu do ogólnego kierunku projektu. Wobec tego działania badawczo-rozwojowe muszą być stale kontynuowane.

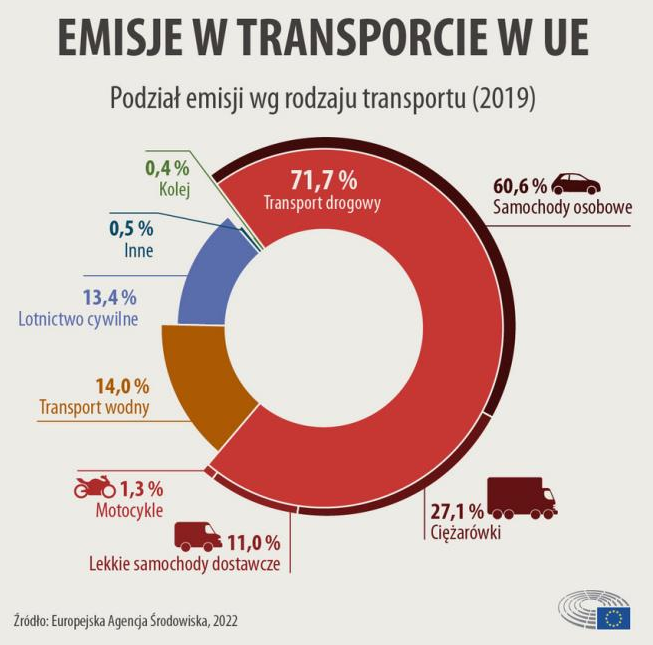
Rozdział 3. Zastosowanie zielonego wodoru w lotnictwie

3.1. Napędy lotnicze nowej generacji

Transport lotniczy to jeden z najważniejszych wynalazków XX wieku. Samoloty pozwalają nam dotrzeć w praktycznie każde miejsce na świecie w znacznie krótszym czasie, niż odbywało się to wcześniej, wykorzystując inne środki transportu (kolej, statki, samoloty). Silniki lotnicze zużywają jednak duże ilości paliwa, a co za tym idzie, emitują również znaczące dla środowiska naturalnego ilości zanieczyszczeń. Jak wynika z opublikowanego w 2019 roku raportu unijnej Agencji ds. Bezpieczeństwa Lotniczego na temat oddziaływania lotnictwa na środowisko, sektor ten odpowiada za ok. 3,6 proc. całkowitej emisji gazów cieplarnianych w 28 krajach UE (z Wielką Brytanią) i 13,4 proc. emisji w europejskim transporcie[75] (wykres 3.3.1.). Łącznie w 2019 r. komercyjne linie lotnicze wyemitowały ponad 900 milionów ton dwutlenku węgla. Traktowane jako kraj, globalne lotnictwo byłoby szóstym największym emitentem CO_2, mniej więcej równym emisji gospodarek Niemiec i Holandii łącznie[76]. Zakładając wzrost branży na poziomie 3 do 5 procent rocznie i poprawę efektywności na poziomie 2 procent rocznie, emisje wzrosłyby ponad dwukrotnie do 2050 roku[77]. Do ochrony klimatu przed niepożądanymi zmianami, oprócz dwutlenku węgla, trzeba ograniczyć także emisję innych zanieczyszczeń, takich jak: tlenki azotu, tlenki siarki, węglowodory, para wodna i sadza. Z tego powodu całkowity wpływ lotnictwa na klimat może być trzykrotnie większy niż samego CO_2[78].

[75] *Climate change* (w:) „easa.europa.eu", https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/adapting-changing-climate/climate-change [dostęp: 27.12.2022].
[76] J. Mukhopadhaya, D. Rutherford, *Performance analysis* of *evolutionary hydrogen-powered aircraft*, ICCT, 2022, s. 1.
[77] Clean Hydrogen Joint Undertaking, *Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*, Luksemburg 2020, s. 15.
[78] J. Mukhopadhaya, D. Rutherford, *Performance analysis* of *evolutionary hydrogen-powered aircraft*, ICCT, 2022, s. 1.

Wykres 3.1.1. Emisje w Transporcie w UE



Źródło: *Emisje CO_2 z samochodów: fakty i liczby (infografiki)* (w:) „europa.eu", https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20190313STO31218/emisje-co2-z-samochodow-fakty-i-liczby-infografiki [dostęp: 28.12.2022].

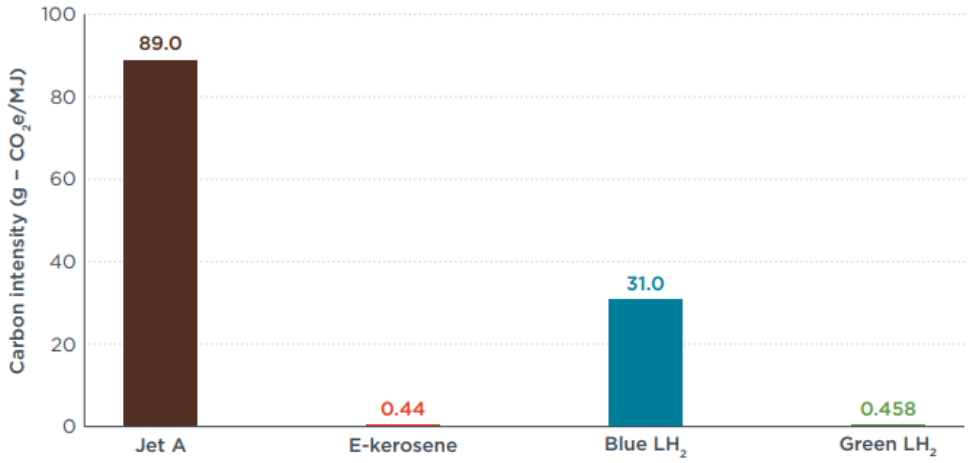
Lotnictwo jest jedną z najtrudniejszych branż do dekarbonizacji. Ze względu na dużą wymaganą gęstość energii, transport lotniczy wyklucza zastosowanie technologii akumulatorów w większości tras, z wyjątkiem tych najkrótszych. Z kolei wodór jest paliwem bardzo wysokoenergetycznym, którego masowa gęstość energii wynosi 33 kWh/kg i ma prawie 126 razy większą gęstość energetyczną na 1 kg niż akumulatory elektrochemiczne stosowane w pojazdach elektrycznych. Szczególnie wysoka gęstość energii ciekłego wodoru czyni go idealnym źródłem napędu dla dużych samolotów, zastępując tradycyjną naftę[79]. Z tego powodu, wodór stanowi jedno z potencjalnych rozwiązań ku pełnemu obniżeniu emisyjności lotów na średnie i długie odległości.

Najważniejszymi kryteriami przy wyborze paliwa są: wysoka gęstość energii, niewyczerpalność, czystość i wygoda. Wodór jest najobficiej występującym pierwiastkiem we wszechświecie i w swojej płynnej postaci zawiera około 2,8 razy więcej energii na kilogram niż nafta. W odniesieniu do lokalnej jakości powietrza, spalanie wodoru wytwarza do 90% mniej tlenków azotu niż paliwo naftowe, a także eliminuje powstawanie cząstek stałych[80]. Pełny potencjał dekarbonizacji transportu lotniczego jest możliwy do osiągnięcia tylko wtedy, kiedy samoloty będą zasilane zielonym wodorem produkowanym przy użyciu energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych.

[79] *Basic information on hydrogen* (w:) „ien.com", https://www.ien.com.pl/tl_files/pliki/CPE/FAQ_final_EN.pdf, s. 1-2.[dostęp: 28.12.2022].
[80] Y. Najjar, *Hydrogen safety: The road toward green technology*, Journal of Hydrogen Energy, 2013, tom 38, s. 10716-10728.

Podczas gdy zielony wodór może mieć niemal zerową emisję w cyklu życia, nawet przy optymistycznych założeniach dotyczących wychwytywania dwutlenku węgla (99,9%), błękitny wodór może zapewnić co najwyżej redukcję emisji o dwie trzecie w porównaniu z Jetem A[81]. Z kolei emisje w cyklu życia e-kerozyny i zielonego wodoru są porównywalne (wykres 3.1.2.).

Wykres 3.1.2. Emisyjność badanych paliw



Źródło: J. Mukhopadhaya, D. Rutherford, *Performance analysis* of *evolutionary hydrogen-powered aircraft*, ICCT, 2022, s. 9.

Istnieją dwa sposoby wykorzystania wodoru jako źródła energii do napędu samolotów. Po pierwsze, poprzez spalanie wodoru w turbinie gazowej, po drugie, poprzez wykorzystanie ogniw paliwowych do zamiany wodoru na energię elektryczną w celu napędzania silnika śmigłowego. Szacuje się, że spalanie H2 mogłoby zmniejszyć wpływ na klimat podczas lotu o 50-75%, a napęd na ogniwa paliwowe nawet o 75-90%. Dla porównania, w przypadku paliwa syntetycznego jest to około 30-60%[82].

Pomimo 2,8 trzykrotnie wyższej grawimetrycznej gęstości energii w porównaniu z naftą, wodór ma stosunkowo większą objętość, co wymaga większych zbiorników na pokładzie samolotu. Rozmiar i masa zbiorników na wodór stanowią poważne ograniczenia w przypadku wysokiego zapotrzebowania na energię w lotach długodystansowych[83].

Wodór może być przechowywany jako gaz pod ciśnieniem lub w postaci ciekłej. Przechowywanie wodoru w postaci gazowej może być odpowiednie dla krótszych lotów i dostępne komercyjnie. Natomiast zbiorniki na ciekły wodór (LH2) wymagają mniej więcej o połowę mniejszej objętości i w konsekwencji są znacznie lżejsze niż zbiorniki na wodór gazowy. Jest to szczególnie ważne dla segmentów średniego i długiego zasięgu, gdzie samoloty będą przewozić kilka ton wodoru na jeden lot. Niemniej szacuje się, że przestrzeń, którą zajmowałyby zbiorniki LH byłaby około 4 razy

[81] J. Mukhopadhaya, D. Rutherford, *Performance analysis* of *evolutionary hydrogen-powered aircraft*, ICCT, 2022, s. 9.
[82] *Clean Hydrogen Joint Undertaking, Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*, Luksemburg 2020, s. 15.
[83] Ibidem.

większa niż w przypadku nafty[84]. Stanowi to wyzwanie dla projektantów samolotów i wymagałoby znacznego przeprojektowania konwencjonalnych płatowców. Aby wystarczająca ilość wodoru mogła być przewożona w samolocie, należy zwiększyć jego gęstość. Osiąga się to poprzez jego skroplenie i przechowywanie ciekłego wodoru (LH2) w bardzo niskich temperaturach. Ponieważ LH2 musi pozostać zimny, a wymiana ciepła musi być zminimalizowana, aby uniknąć parowania wodoru, wymagane są zbiorniki kuliste lub cylindryczne[85]. W celu efektywnego zintegrowania zbiorników z kadłubem samolotu, konieczne będzie wydłużenie płatowca, co zwiększy jego roboczą masę własną.

W porównaniu z samolotami na paliwa kopalne, samoloty napędzane LH2 będą cięższe, o zwiększonej maksymalnej masie startowej (MTOM) i mniej wydajne, z wyższym zapotrzebowaniem na energię na pasażerokilometr (MJ/RPK). Będą też miały krótszy zasięg niż samoloty na paliwa kopalne. Niemniej jednak, szacuje się, że ewolucyjny samolot wąskokadłubowy z napędem LH2 mógłby przewieźć 165 pasażerów na odległość do 3400 km, a samolot turbośmigłowy z napędem LH2 mógłby przewieźć 70 pasażerów na odległość do 1400 km. Razem mogłyby one obsłużyć około jednej trzeciej (31 do 38%) całego pasażerskiego ruchu lotniczego, mierzonego liczbą pasażerokilometrów przychodu (RPK)[86].

Można wyróżnić dwa potencjalne scenariusze rozwoju lotnictwa napędzanego na wodór: efektywnej dekarbonizacji i maksymalnej dekarbonizacji[87]. W scenariuszu *efektywnej dekarbonizacji* wodór odgrywa rolę tam, gdzie jest najbardziej opłacalnym środkiem dekarbonizacji. W tym scenariuszu samoloty pasażerskie średniego zasięgu zaczną być zastępowane samolotami na wodór do 2030 - 2040 r. Po zwiększeniu zdolności produkcyjnych w ciągu trzech do czterech lat wszystkie nowe samoloty w przewozie pasażerskim i krótkiego zasięgu oraz 50% samolotów średniego zasięgu będą napędzane wodorem. W tym scenariuszu do 2050 roku 40% wszystkich samolotów zostanie przestawionych na LH2, natomiast pozostałe będą zasilane innymi zrównoważonymi paliwami lotniczymi. Z kolei w scenariuszu *maksymalnej dekarbonizacji* samoloty na wodór zaczęłyby zastępować wszystkie samoloty o zasięgu do 10 000 km po roku 2028 - 2038. Po zwiększeniu zdolności produkcyjnych w ciągu trzech do czterech lat wszystkie nowe samoloty o zasięgu do 10 000 km byłyby napędzane wodorem. W tym scenariuszu do 2050 r. 60% wszystkich samolotów zostanie przestawionych na LH2.

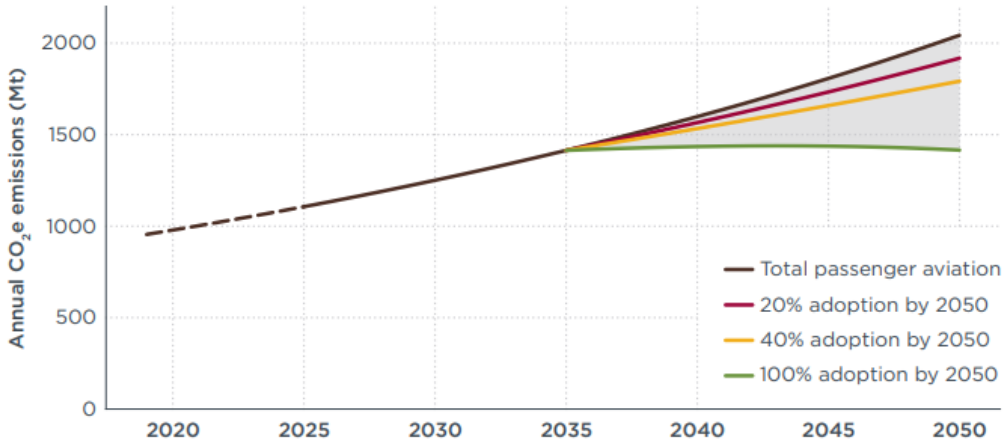
W obu scenariuszach globalne zapotrzebowanie na wodór osiągnęłoby około 10 lub 40 mln ton LH2 rocznie do roku 2040 oraz około 40 lub 130 mln ton do roku 2050. Jak przewiduje Rada Koordynacyjna ds. Gospodarki Wodorowej ilość ta stanowi 5 lub 20 procent całkowitego światowego

[84] D. Verstraete, *The Potential of liquid hydrogen for long range aircraft propulsion,* PhD Thesis, Cranfield Univeristy 2009.
[85] Clean Hydrogen Joint Undertaking, *Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050,* Luksemburg 2020, s. 25.
[86] J. Mukhopadhaya, D. Rutherford, *Performance analysis* of *evolutionary hydrogen-powered aircraft*, ICCT, 2022, s. II.
[87] Clean Hydrogen Joint Undertaking, *Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050,* Luksemburg 2020, s. 37.

zapotrzebowania na wodór do roku 2040 oraz 10 lub 25 procent światowego zapotrzebowania do 2050 roku[88].

Na rysunku 3.1.1. przedstawiono wpływ lotnictwa pasażerskiego na klimat w latach 2035-2050 przy różnych wskaźnikach adopcji.

Rysunek 3.1.1. Emisje CO_2 z lotnictwa pasażerskiego w różnych scenariuszach wdrożenia samolotów z napędem LH2 w latach 2020-2050



Źródło: J. Mukhopadhaya, D. Rutherford, *Performance analysis* of *evolutionary hydrogen-powered aircraft*, ICCT, 2022, s. 23.

Wskaźniki przyjęcia 20% i 40% są realistyczne, a linia przyjęcia 100% reprezentuje radykalny przypadek, w którym wszystkie możliwe do zastąpienia trasy są obsługiwane przez samoloty napędzane LH2 i korzystające w 100% z ekologicznego wodoru w 2050 roku. Jest to istotne dla zrozumienia maksymalnego wpływu, jaki mogłyby mieć ewolucyjne samoloty napędzane wodorem. Przy wskaźniku przyjęcia wynoszącym od 20% do 40%, konstrukcje napędzane wodorem mogłyby ograniczyć emisję 126 do 251 Mt CO_2 w 2050 roku, co stanowi 6-12% emisji CO_2 w lotnictwie pasażerskim. W przypadku 100- procentowego przyjęcia można by ograniczyć emisję 628 Mt CO_2, co stanowi 31% emisji CO_2 w lotnictwie pasażerskim i ogranicza emisje z lotnictwa pasażerskiego do poziomu z 2035 r. Zatem ewolucja LH2 mogłaby ograniczyć, ale nie całkowicie zredukować, emisje CO_2 w lotnictwie pasażerskim po 2035 roku.

Airbus i ZeroAvia należą do szybko rozwijającej się grupy proaktywnych graczy z branży lotniczej, którzy wspólnie napędzają główną zmianę w branży – od zwykłego postrzegania wodoru jako potencjalnej szansy na dekarbonizację transportu, po namacalne zaprezentowanie, w jaki sposób paliwo może odegrać integralną rolę w zmniejszaniu wpływu na środowisko.

We wrześniu 2020 roku Airbus ogłosił projekt ZEROe**,** którego celem ma być opracowanie pierwszego na świecie komercyjnego samolotu napędzanego wodorem. Samolot mógłby wejść do służby w 2035 roku, a więc Airbus ma pięć lat na zaprojektowanie i przetestowanie wymaganych technologii, dwa lata na sfinansowanie i zorganizowanie łańcuchów dostaw oraz osiem lat

[88] Ibidem.

na wyprodukowanie i wprowadzenie samolotu na rynek[89]. Airbus i jego partnerzy pracują nad czterema koncepcyjnymi samolotami napędzanymi wodorem. Trzy z koncepcyjnych samolotów miałyby wykorzystywać wodorowe silniki spalinowe w połączeniu z komponentem hybrydowo-elektrycznym w skali MW. Ten ostatni pochodzi z ogniw paliwowych, a nie z akumulatorów ze względu na ogólne korzyści w zakresie wydajności. Czwarta innowacja to silnik napędzany wodorowymi ogniwami paliwowymi. Większość koncepcji to konwencjonalna konfiguracja rurowo-skrzydłowa, która stanowi ewolucyjny postęp w projektowaniu samolotów, a jedna to konfiguracja z korpusem mieszanym (BWB), która stanowi rewolucyjną zmianę w projektowaniu samolotów.

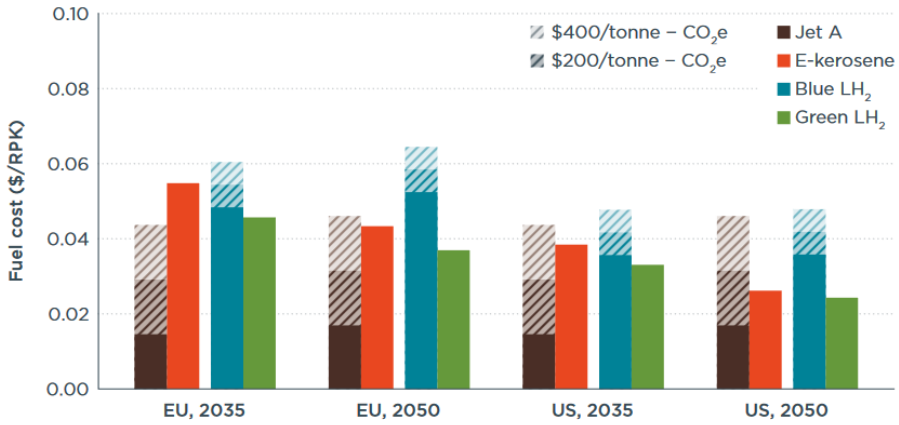
Z kolei ZeroAvia od samego początku dążyła do zapewnienia elektryfikacji rynku lotniczego w celu usunięcia wszystkich emisji (zarówno CO_2, jak i innych niż CO_2), ale bardzo wcześnie zdała sobie sprawę, że energia elektryczna z akumulatorów nie jest opłacalna ze względu na zbyt wiele ograniczeń. Dlatego obecnie firma stawia na wodorowo-elektryczne układy napędowe, wykorzystujące systemy wodorowych ogniw paliwowych do wytwarzania energii elektrycznej z paliwa wodorowego w celu zasilania silników elektrycznych[90]. Według Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych ogniwo paliwowe połączone z silnikiem elektrycznym jest dwa do trzech razy bardziej wydajne energetycznie niż silnik spalinowy zasilany benzyną. W układzie napędowym napędzanym ogniwami paliwowymi jedyną emisją jest para wodna, a ze względu na stosunkowo niską temperaturę i wolniejsze odprowadzanie wody możliwe jest również łagodzenie skutków tworzenia smug kondensacyjnych.

ZeroAvia równolegle pracuje nad projektowaniem, certyfikacją i produkcją modułowego układu napędowego z wodorowymi ogniwami paliwowymi o mocy 2-5 megawatów (MW). Ten układ napędowy byłby w stanie napędzać samoloty z 40-80 miejscami na odległości do 1000 mil morskich (odpowiednik Waszyngtonu do Dallas lub Londynu do Reykjaviku). Loty na dystansie poniżej 1500 mil morskich pokrywają ponad 50 procent wszystkich emisji gazów cieplarnianych w lotnictwie i 80 procent wszystkich podróży – co pokazuje, że postęp technologiczny może mieć znaczący wpływ w tej dekadzie. Ta nowa technologia ma zapewnić również niższe koszty operacyjne, co oznacza bardziej opłacalne trasy regionalne, lepszą łączność (pobudzanie lokalnych gospodarek) i niższe koszty dla pasażerów[91]. Jest to ważny powód, dla którego główne linie lotnicze, takie jak Alaska Airlines, United Airlines i British Airways, wspierają technologię tych firm.

Analizując ceny paliw, należy wziąć pod uwagę przewidywane koszty w latach 2035 i 2050 w Stanach Zjednoczonych i Unii Europejskiej (UE), czyli na dwóch prawdopodobnych wczesnych rynkach samolotów na wodór (wykres. 3.1.3).

[89] *Towards the world's first zero-emission commercial aircraft* (w:) „airbus.com", https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe [dostęp: 27.12.2022].
[90] G. Llewellyn, V. Miftakhov, *Hydrogen power- boldly going to the heart of climate-neutral aviation,* ICAO Environmental Report 2022.
[91] Ibidem.

Wykres 3.1.3. Koszt paliwa w poszczególnych regionach, 2035 i 2050 r., z uwzględnieniem i bez uwzględnienia cen uprawnień do emisji dwutlenku węgla



Źródło: J. Mukhopadhaya, D. Rutherford, *Performance analysis* of *evolutionary hydrogen-powered aircraft*, ICCT, 2022, s. 16.

Samolot napędzany LH2 wszedłby do eksploatacji w 2035 r., natomiast 2050 r. jest rokiem docelowym dla osiągnięcia celu „zerowej emisji netto". Cena paliwa Jet A pochodzi z prognoz referencyjnych United States Energy Information Administration. Natomiast koszty e-kerozenu, niebieskiego LH2 i zielonego LH2 pochodzą z opracowań Zhou & Searl. Koszty paliwa uwzględniają ceny uprawnień do emisji CO_2 dla Stanów Zjednoczonych i Unii Europejskiej w latach 2035 i 2050. Solidne słupki reprezentują cenę bazową, natomiast słupki zakreskowane przedstawiają efekt ceny 200 i 400 USD za tonę wyemitowanego CO_2. Z wykresu można wyciągnąć kilka wniosków. Po pierwsze, w perspektywie długoterminowej (2050 r.) oczekuje się, że najdroższym paliwem będzie błękitny LH2, następnie e-kerozyna, potem zielony LH2 i Jet A. Po drugie, we wszystkich przypadkach do zniwelowania różnicy cenowej między zielonym LH2, a paliwem kopalnym do silników odrzutowych potrzebne będą ceny uprawnień do emisji dwutlenku węgla. W 2035 r. Stanach Zjednoczonych ekologiczny LH2 będzie tańszy od Jet A przy podatku w wysokości 256 USD/t CO2e, ale w 2050 r. będzie wymagać podatku jedynie w wysokości 102 USD/t CO2e, aby być konkurencyjnym cenowo. W Unii Europejskiej wyższe oczekiwane koszty produkcji wodoru oznaczają, że aby ekologiczne samoloty napędzane LH2 były konkurencyjne pod względem kosztów, w 2050 r. konieczna będzie wyższa cena emisji dwutlenku węgla (podatek w wysokości 277 USD/tona-CO). Jako punkt odniesienia, cena węgla dla paliw transportowych w ramach kalifornijskiego standardu paliw niskoemisyjnych wynosi obecnie około 200 USD za tonę[92].

Podsumowując, przy obecnych założeniach dotyczących kosztów oczekuje się, że w 2050 roku zielony LH2 będzie tańszym paliwem niż e-kerozyna (szczególnie na trasach do 3400 km). Z drugiej strony, przewiduje się, że samo tankowanie konstrukcji LH2 zielonym wodorem będzie

[92] *Mobile Source Emissions Research Program* (w:) „California Air Resources Board", https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/mobile-source-emissions-research-program [dostęp: 28.12.2022].

kosztować więcej niż konwencjonalne paliwo do silników odrzutowych, ale mniej niż stosowanie niebieskiego wodoru lub e-kerozyny. Ponadto oczekuje się, że nakłady inwestycyjne na budowę samolotów napędzanych wodorem będą wyższe niż w przypadku tradycyjnych samolotów (zwłaszcza we wczesnych latach wprowadzania samolotów na LH2). Wynika to głównie z kosztów konstrukcji zbiornika LH2, który jest zintegrowany z kadłubem, większej złożoności dystrybucji paliwa, wyższych kosztów napędu oraz większych rozmiarów statku powietrznego. W dłuższej perspektywie koszty obsługi technicznej układu napędowego mogą się obniżyć.

Istnieje pilna potrzeba podjęcia działań już teraz. W zależności od wielkości samolotu, wprowadzenie nowych statków powietrznych zajmuje zazwyczaj około 15-20 lat, a wdrożenie w całej flocie kolejne 10 lat. Kolejnej nowej generacji w tym segmencie należałoby się spodziewać dopiero między 2045 a 2050 r., co byłoby zbyt późno, aby osiągnąć cele w zakresie dekarbonizacji tego segmentu określone przez UE i ATAG. Aby przejść na nową technologię z napędem wodorowym, konieczne będzie zintensyfikowanie działalności i finansowania w zakresie badań i innowacji (B+R). Firmy przede wszystkim powinny skoncentrować się na opracowaniu kluczowych elementów napędu na wodór i opracowaniu nowych konstrukcji (prototypów) samolotów, a także usunięciu barier infrastrukturalnych. Aby zwiększyć skalę samolotów napędzanych wodorem, konieczne jest wprowadzenie kilku rozwiązań technologicznych: zwiększenie ogólnej wydajności dzięki lżejszym zbiornikom i systemom ogniw paliwowych wewnątrz samolotu oraz opracowanie wydajnych technologii tankowania umożliwiających przepływ paliwa porównywalny z kerozyną[93]. Zakładając ten rozwój techniczny, napęd H2 jest najbardziej odpowiedni dla samolotów pasażerskich, regionalnych, krótkiego zasięgu i średniego zasięgu. Nieodzowne jest również opracowanie długoterminowych ram politycznych. UE mogłaby w pierwszej kolejności zająć się lotami podmiejskimi, regionalnymi i krótkiego zasięgu, ponieważ są one objęte jej jurysdykcją, a następnie rozszerzyć zakres tych działań na samoloty średniego i dalekiego zasięgu wraz ze swoimi partnerami międzynarodowymi.

[93] *Clean Hydrogen Joint Undertaking, Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050,* Luksemburg 2020, s. 20.

3.2. Mobilność powietrzna zasilana wodorowymi ogniwami paliwowymi. Latające taksówki w mieście napędzane wodorem

Zatory drogowe, korki i zatłoczona infrastruktura naziemna stały się wszechobecnym problemem na obszarach miejskich. Wynika to m.in. z wysokiej gęstości zaludnienia, wzrostu liczby pojazdów będących własnością prywatną oraz wzrostu liczby osób dojeżdżających do pracy z obszarów o niskiej gęstości zaludnienia. Obecnie około 56% światowej populacji (4,4 miliarda ludzi) żyje w miastach. Jak wynika z szacunków Banku Światowego, do 2030 roku mieszkańcy miast stanowić będą prawie 60% populacji Ziemi[94]. Oczekuje się, że trend ten będzie się utrzymywał, a populacja miejska zwiększy się ponad dwukrotnie do 2050 r., kiedy to prawie 7 na 10 osób będzie mieszkać w miastach[95]. Ten znaczny wzrost liczby ludności stwarza zapotrzebowanie na innowacyjne opcje mobilności. Rozwiązaniem może być wykorzystanie przestrzeni powietrznej nad miastami. „Miejska mobilność powietrzna" (Urban Air Mobility) dąży do zrewolucjonizowania status quo transportu naziemnego, projektowania samolotów i zasad multimodalności.

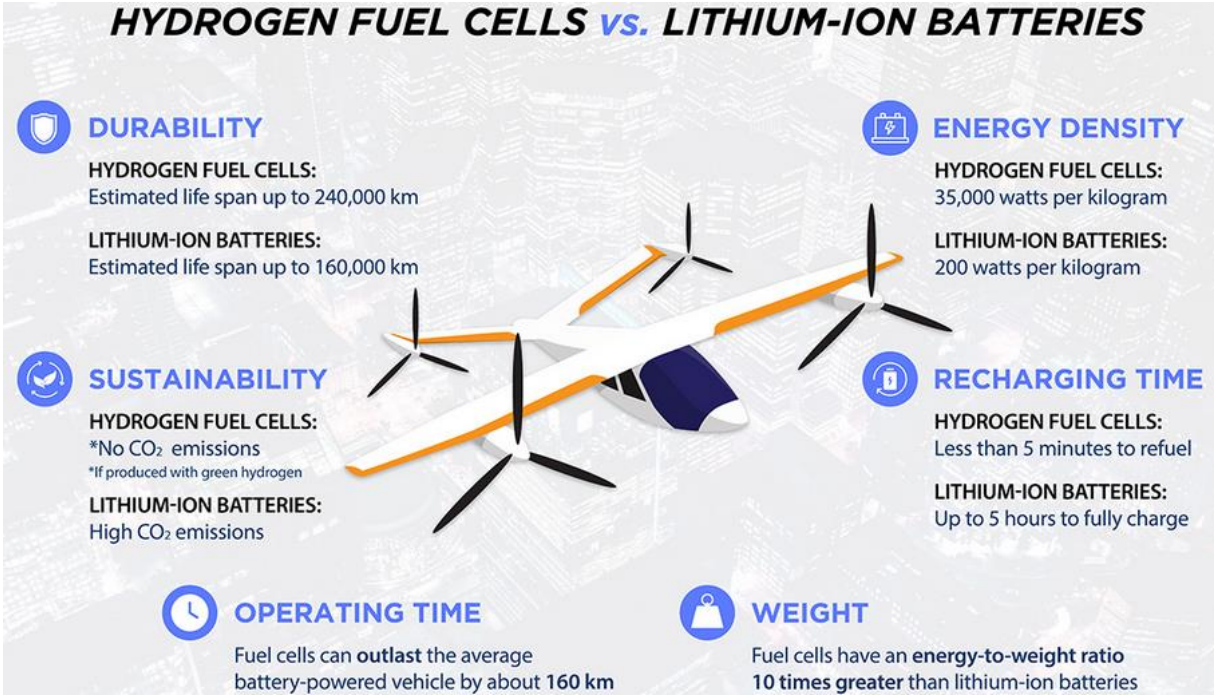
„Urban Air Mobility" to wykorzystanie małych, wysoce zautomatyzowanych statków powietrznych do przewozu pasażerów lub ładunków na niższych wysokościach w obszarach miejskich i podmiejskich. UAM zwykle odnosi się do istniejących i powstających technologii, takich jak tradycyjne helikoptery, samoloty pionowego startu i lądowania z napędem elektrycznym (eVTOL) oraz bezzałogowe statki powietrzne (UAV). Ze względu na różnorodne zastosowania, taki statek powietrzny może przybierać różne nazwy, typu: „latająca taksówka", „karetka powietrzna", „latający pojazd".

Latające taksówki napędzane wodorem mają szansę stać się jednym z najbezpieczniejszych, najczystszych i najbardziej wszechstronnych rozwiązań mobilności na świecie - od odciążania ruchu ulicznego po dostarczanie zaopatrzenia podczas klęsk żywiołowych. Pojazdy powietrzne wykorzystujące wodorowe ogniwa paliwowe nie wytwarzają szkodliwych emisji - emitują jedynie parę wodną i ciepłe powietrze. Jest to wyraźna alternatywa dla tradycyjnych eVTOl-ów zasilanych bateriami. Większość eVTOL-ów posiada duże wirniki i skrzydła, a także ograniczoną ładowność, prędkość i zasięg. Pod wieloma względami są mniej wydajne niż helikoptery. Kluczowe znaczenie ma również uwzględnienie procesu pozyskiwania zasobów niezbędnych do produkcji elektrycznych układów napędowych. Duże zestawy akumulatorów potrzebne w pojazdach eVTOL wymagają ogromnych ilości litu, który jest zasobem nieodnawialnym i ograniczonym. Natomiast wodorowe

[94] R. Harrington , *10 miast, które w 2030 roku będą najbardziej zaludnione na świecie. Żadne nie leży w Europie ani USA* (w:) „businessinsider.com", listopad 2019, https://businessinsider.com.pl/lifestyle/podroze/onz-najbardziej-zaludnione-miasta-w-2030-roku/dxxqw4q [dostęp: 16.05.2022].
[95] *Urban Development* (w:) „worldbank.org", https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview [20.05.2023].

ogniwa paliwowe są znacznie lżejsze w porównaniu z istniejącymi bateriami litowo-jonowymi[96] i dzięki temu pozwalają na pokonywanie znacznie dłuższych dystansów (tj. loty regionalne i międzymiastowe) oraz transport większych ładunków. Według Argonne National Laboratory wodorowe ogniwa paliwowe (z małymi bateriami lub bez) są jedyną realną opcją zasilania wielowirnikowych eVTOL-ów w scenariuszu miejskim wymagającym 60-milowego zasięgu[97]. Co więcej, w przeciwieństwie do baterii, ogniwa paliwowe mają dłuższą żywotność i szybszy czas tankowania. Na przykład ogniwa paliwowe chłodzone turbo powietrzem zwiększają żywotność napędów wodorowych z 5 000 do 20 000 godzin, a tankowanie trwa zaledwie kilka minut[98]. Małe ogniwa paliwowe mogą zasilać lekkie drony nawet trzy razy dłużej niż równoważne im akumulatory[99]. Na rysunku 3.2.1. przedstawiono porównanie wodorowych ogniw paliwowych i akumulatorów litowo-jonowych.

Rysunek 3.2.1. Wodorowe ogniwa paliwowych na tle akumulatorów litowo-jonowych

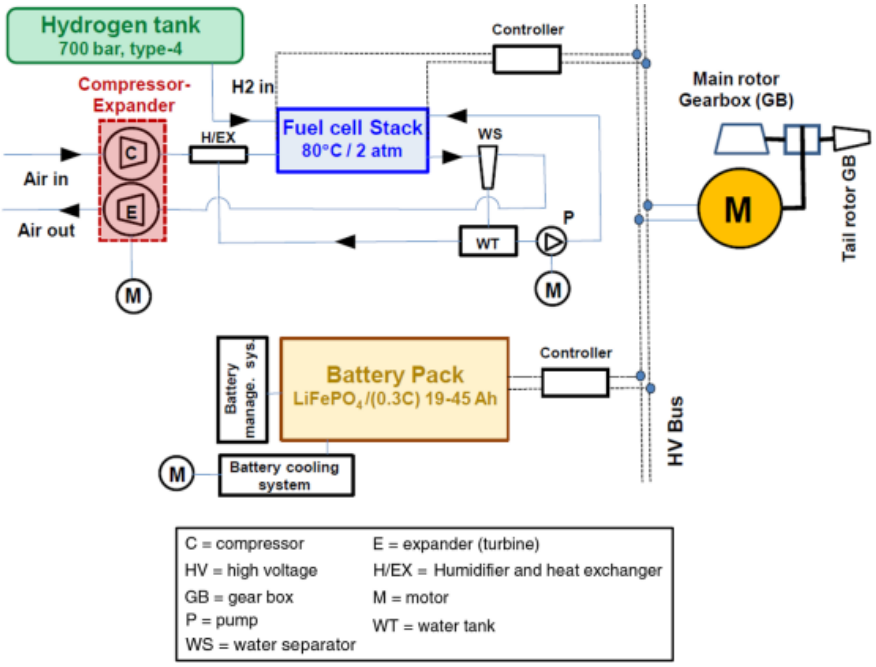


Źródło*: How harnessing hydrogen could take Hanwha's Urban Air Mobility to new frontiers* (w:) "hanwha.com", kwiecień 2022, https://www.hanwha.com/en/news_and_media/stories/innovations/how-harnessing-hydrogen-could-take-hanwhas-urban-air-mobility-to-new-frontiers.html [dostęp: 16.05.2023].

[96] *Hanwha Aerospace to develop hydrogen fuel cells for urban air mobility* (w:) „compositesworld.com", https://www.compositesworld.com/news/hanwha-aerospace-to-develop-hydrogen-fuel-cells-for-urban-air-mobility [dostęp: 16.05.2023].
[97] R. K. Ahluwalia, J-K Peng, X. Wang, D. Papadias, J. Kopasz, *Performance and Cost of Fuel Cells for Urban Air Mobility*, Argonne National Laboratory 2021, s. 1.
[98] C. Hammerschmidt, *R&D partnership brings hydrogen power to urban air mobility* (w:) „eenewseurope.com", czerwiec 2020, https://www.eenewseurope.com/en/rd-partnership-brings-hydrogen-power-to-urban-air-mobility/ [dostęp: 16.05.2023].
[99] *Hydrogen-powered drone lasts three times longer* (w:) „linde-stories.com", https://linde-stories.com/hydrogen-powered-drone-lasts-three-times-longer/ [dostęp: 16.05.2023].

Według R. Locksa i D. McLeana w pracy zatytułowanej „Captive-Use Hydrogen for Advanced Air Mobility" idealną konfiguracją dla samolotów eVTOL jest hybrydowa kombinacja baterii i ogniw paliwowych, która wykorzystuje baterie do startu i lądowania oraz ogniwa paliwowe do lotu. Oferuje to większy zasięg, mniejsze zapotrzebowanie na lit i wodór oraz ogólnie lepsze osiągi niż każdy z tych zespołów napędowych z osobna[100] (rys. 3.2.2.).

Rysunek 3.2.2. Konfiguracja hybrydowego ogniwa paliwowego z akumulatorem



Źródło: R. Locks, D. McLean, *Captive-use hydrogen for advanced air mobility*, HTO 2020, s. 8.

Hybrydowe ogniwa paliwowe przewyższają osiągi akumulatorów w przypadku wiropłatów eVTOL w pełnym zakresie parametrów FCS. Argonne National Laboratory zaleca następujące wskaźniki dla wodorowych ogniw paliwowych, aby konkurować z akumulatorami o energii właściwej 200 Wh/kg, koszcie 200 USD/kWh i żywotności 300 cykli:

a) żywotność FCS wynosząca 3000 godzin w cyklu pracy taksówek powietrznych,

b) moc właściwa FCS wynosząca 1000 W/kg,

c) koszt FCS wynoszący 250 USD/kW dla wielowirnikowców typu „multi-rotor" oraz koszt FCS wynoszący 500 USD/kW dla wielowirnikowców typu „tilt-rotor",

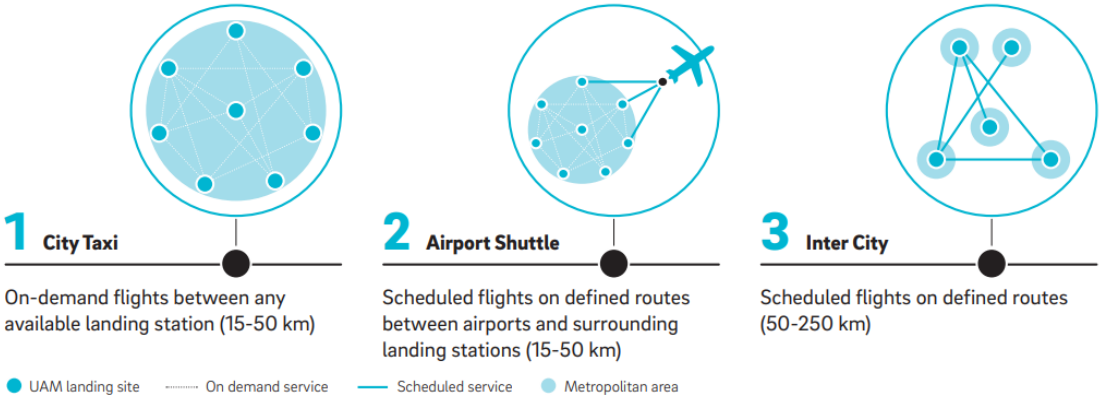
d) 18-wt% grawimetryczna pojemność systemu magazynowania paliwa,

e) koszt H2 wynoszący 8 USD/kg[101].

[100] R. Locks, D. McLean, *Captive-use hydrogen for advanced air mobility*, HTO 2020, s. 7, 8.
[101] R. K. Ahluwalia, J-K Peng, X. Wang, D. Papadias, J. Kopasz, *Performance and Cost of Fuel Cells for Urban Air Mobility*, Argonne National Laboratory 2021, s. 18, 19.

Głównym przeznaczeniem latającej taksówki jest transport pasażerów pomiędzy kluczowymi węzłami komunikacyjnymi. Operacje mobilności lotniczej można rozróżnić pomiędzy **miejską** mobilnością powietrzną w granicach miasta, **podmiejską** mobilnością powietrzną łączącą miasto z otaczającymi je obszarami metropolitalnymi i **regionalną** mobilnością powietrzną zapewniającą transport z miasta do miasta. Te trzy główne przypadki zastosowań można określić jako: *City Taxi*, *Airport Shuttle*, *Inter City* (rys. 3.2.3.). City Taxis będą latać w obrębie gęsto zaludnionych obszarów miejskich, pokonując odległości od 15 do 50 km. Airport Shuttles będą przewozić pasażerów z vertiportów na lotniska oddalone od 15 do 50 km. Z kolei loty Inter City będą przemierzać trasy o długości do 250 km pomiędzy głównymi miastami.

Rysunek 3.2.3. Komercyjne przypadki zastosowań UAM



Źródło: M. Hader, S Baur, S. Kopera, T. Schönberg, J.P. Hasenberg., *Urban Air Mobility, USD 90 billion of potential: How to capture a share of the passengerdrone market,* The Roland Berger Center for Smart Mobility 2020, s. 7.

Oczekuje się, że największą liczbę zastosowań odnotują City Taxis (36%), następnie Airport Shuttles (35%), a na końcu usługi Inter City (29%)[102]. Jeśli chodzi o kwestie finansowe to do 2050 roku, 90% przychodów zapewnią usługi Airport Shuttle i Inter City, a resztę City Taxis. Usługi Inter City będą charakteryzować się mniejszą liczbą lotów, ale będą obejmować dłuższe dystanse, generując większe przychody z jednego lotu i przy wyższym wykorzystaniu. Usługi Airport Shuttle na średnich dystansach będą atrakcyjne dla rynku biznesowego, co umożliwi im pobieranie opłat wyższych niż w przypadku taksówek miejskich. Międzynarodowa firma Roland Berger szacuje, że w 2050 roku branża UAM będzie generować przychody w wysokości prawie 90 bln USD rocznie (z 1 bln USD w 2030 roku), a 160 000 komercyjnych pojazdów powietrznych będzie poruszać się w przestrzeni powietrznej[103].

Latająca taksówka może być wykorzystywana nie tylko w transporcie publicznym, a także w ratownictwie medycznym i akcjach humanitarnych. W tej chwili śmigłowce Lotniczego Pogotowia Ratunkowego mają często trudności z zbliżeniem się wystarczająco blisko osoby, którą mają ratować.

[102] M. Hader, S Baur, S. Kopera, T. Schönberg, J. P. Hasenberg., *Urban Air Mobility, USD 90 billion of potential: How to capture a share of the passengerdrone market,* The Roland Berger Center for Smart Mobility 2020, s. 10.
[103] Ibidem, s. 9.

Istnieje duże zapotrzebowanie na lotnicze karetki pogotowia, które mogą lądować w dowolnym miejscu - na przykład na chodniku obok osoby, która właśnie miała zawał serca - zamiast lądować kilkaset metrów dalej, a ratownicy medyczni musieliby biec przez resztę z drogi. Inne ciekawe zastosowania latających taksówek mogą obejmować operacje przemieszczania towarów pomiędzy magazynami i sklepami, monitorowanie pogody i ocenę natężenia ruchu naziemnego.

Pionierem w na rynku mobilności powietrznej i samolotów napędzanych wodorem jest „Alaka'i Technologies". Amerykańska firma opracowuje latający pojazd napędzany ogniwami wodorowymi „Skai" (rys. 3.2.4). Latająca taksówka „Skai" ma umożliwiać lot trwający 4 godziny i pokonanie około 640 km bez konieczności ładowania. Średnia prędkość przewozu pasażerów to od 136 km/h do 185 km/h. Natomiast codzienny "sweet spot" będzie się mieścił w przedziale od 16 do 241 kilometrów. Maksymalna waga ładunku jaką może przewieźć pojazd to 453 kg. W środku znajdzie się miejsce dla pięciu osób. Ciekły wodór (LH2) znajduje się w zbiorniku podkładowym, a tankowanie do pełna będzie trwać mniej niż 10 minut. Wodorowe ogniwa paliwowe generują energię elektryczną i zasilają 6 cichych silników elektrycznych typu „outrunner". Wirniki są zaprojektowane z myślą o niskim poziomie hałasu. W razie gdyby jeden z sześciu silników uległ awarii, firma wyposażyła samolot w spadochron, który otworzy się z dachu i delikatnie opuści cały pojazd na ziemię. Sześciosilnikowa maszyna została zaprojektowana we współpracy z BMW Designworks i producent póki co, nie stawia na system lotu autonomicznego, lecz chce opierać się na ludzkim pilocie[104].

Rysunek 3.2.4. Latająca taksówka „Skai"

Źródło: *Flying Car Startup Alaka'i Bets Hydrogen Can Outdo Batteries* (w:) "wired.com", maj 2019, https://www.wired.com/story/alakai-flying-car-air-taxi-evtol-hydrogen/ [dostęp: 17.05.2023].

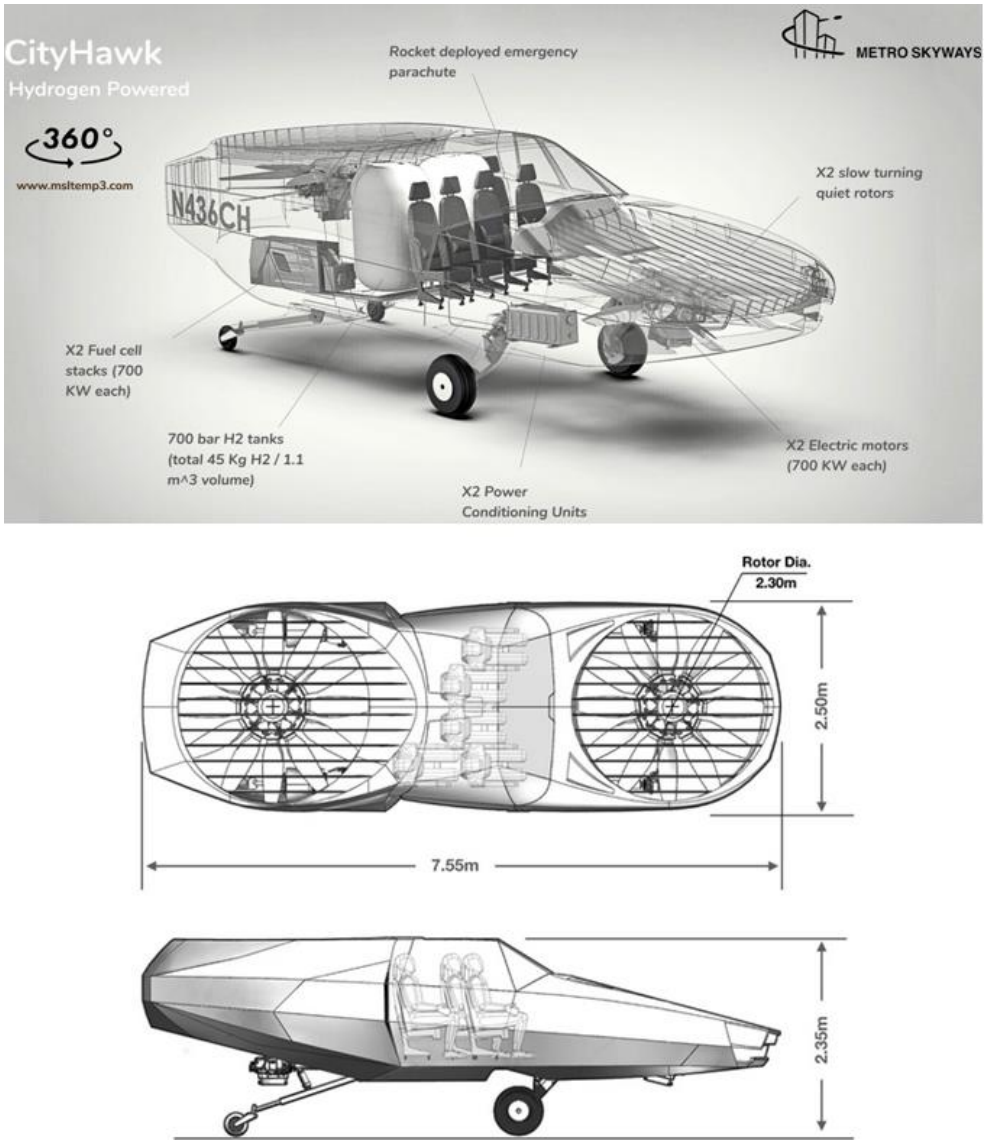
[104] *Skai* (w:) „alkai.com", https://www.alakai.com/skai [dostęp 17.05.2023].

Drugim znaczącym graczem na rynku UAM jest izraelska firma „Urban Aeronautics". W ramach współpracy z HyPoint firma opracowuje nową wersję swojego elektrycznego pojazdu powietrznego. Tym razem przy wykorzystaniu wodorowych ogniw paliwowych. CityHawk to w pełni elektryczny samolot wyposażony w podwójne zbiorniki wodorowych ogniw paliwowych (700 Kw), silnik elektryczny i system fly-by-wire. Konstrukcja ogniw paliwowych chłodzonych powietrzem radykalnie wydłuża zasięg i znacznie zwiększa moc pojazdu. CityHawk zawiera układ napędowy oparty na dwóch oddzielnych jednostkach FCS. W przypadku awarii jednego z zespołów FCS samolot będzie w stanie bezpiecznie wylądować korzystając z zasilania z pozostałego zespołu FCS, a dodatkowe zasilanie będzie dostępne dzięki akumulatorom pokładowym umieszczonym w dwóch jednostkach kondycjonowania mocy (PCU). Jedynie w bardzo rzadkich przypadkach wymagany będzie spadochron zainstalowany w pojeździe. CityHawk jest wyjątkową koncepcją, ponieważ łączy w sobie kompaktową konstrukcję wielkości samochodu – latający pojazd nie ma odsłoniętych wirników czy skrzydeł. Dzięki temu pojazd jest zoptymalizowany pod kątem transportu miejskiego i reagowania w sytuacjach kryzysowych. Twórcy projektu mają nadzieję zaoferować nieograniczoną mobilność z unikalną możliwością transportu od drzwi do drzwi: "fly anywhere, land anywhere"[105] (rys. 3.2.5.). Maksymalna prędkość CityHawk to 234 km/h a maksymalny to 150 km. W środku znajduje się miejsce dla jednego pilota i czterech pasażerów, a także dedykowane miejsce na bagaż[106]. Choć CityHawk będzie początkowo pilotowany przez człowieka, to w miarę dojrzewania technologii będzie docelowo przewozić pasażerów za pomocą systemu autonomicznego.

[105] C. Hammerschmidt, *R&D partnership brings hydrogen power to urban air mobility* (w:) „eenewseurope.com", czerwiec 2020, https://www.eenewseurope.com/en/rd-partnership-brings-hydrogen-power-to-urban-air-mobility/ [dostęp: 16.05.2023].

[106] *The CityHawk* (w:) „urbanaero.comz", https://www.urbanaero.com/_files/ugd/e271cb_919dc202ea144abc881da8ee1ffa25b5.pdf, Urban Aeronautics CityHawk [dostęp: 17.05.2023].

Rysunek 3.2.5. Pojazd latający „CityHawk" zasilany wodorem



Źródło: *Urban Aeronautics CityHawk* (w:) "evtol.news", https://evtol.news/urban-aeronautics-cityhawk/ [dostęp: 15.05.2023].

Bezwirnikowa i bezskrzydłowa konstrukcja oferuje większe bezpieczeństwo w porównaniu z większością konwencjonalnych samolotów opartych na wirnikach. Aby jeszcze bardziej zwiększyć poziom zabezpieczenia, „CityHawk" został wyposażony w następujące systemy bezpieczeństwa:, Enhanced Flight Vision System (EVS), Ground Proximity Warning System (GPWS), Traffic Collision and Avoidance System (TCAS)[107].

Warto jedno zaznaczyć, że koncepcja Urban Air Mobility" nie rozwiąże problemów komunikacyjnych w miastach. Będzie to tylko jeden z elementów układanki mobilnościowej, który pozwoli na zniwelowanie konkretnych bolączek i wąskich gardeł w ruchu miejskim.

[107] *The CityHawk*, https://www.urbanaero.com/_files/ugd/e271cb_919dc202ea144abc881da8ee1ffa25b5.pdf, Urban Aeronautics CityHawk, s. 4.

3.3. Wodorowe miasto przyszłości

Poza skutkami dla konstrukcji samolotów, przejście na LH2 miałoby poważne konsekwencje dla łańcucha dostaw paliwa, działalności portów lotniczych oraz całego systemu transportu lotniczego. Wodór wymaga zmian w infrastrukturze portów lotniczych, w tym dodania technologii tankowania, upłynniania i magazynowania ciekłego wodoru. W przypadku lotnictwa wodorowego istnieje wiele ścieżek wdrożeniowych, które można sobie wyobrazić. W ramach jednej z nich, w pierwszych latach innowacje w zakresie lotów napędzanych wodorem byłyby wprowadzone przez regionalne porty lotnicze. Początkowa infrastruktura mogłaby zostać stworzona do obsługi niektórych lotów od punktu do punktu (jako trasy próbne). Szczególne korzyści odniosłyby porty lotnicze mające konkurencyjny dostęp do taniej energii odnawialnej potrzebnej do produkcji ekologicznego wodoru. Mogą to być na przykład porty lotnicze obsługujące grupy wyspiarskie z dostępem do energii wodnej, porty lotnicze wzdłuż wybrzeża Morza Północnego z dostępem do energii wiatrowej oraz porty lotnicze w Europie Południowej z dostępem do energii słonecznej i wiatrowej. Natomiast prawdziwe zwiększenie skali oraz eksploatacja samolotów średniego i dalekiego zasięgu będzie wiązała się z koniecznością budowy infrastruktury tankowania wodoru na wszystkich kontynentach.

Do 2040 r. globalne zapotrzebowanie lotnictwa na LH2 wyniesie 10 mln ton rocznie - 5% przewidywanego całkowitego zapotrzebowania na wodór[108]. Ze względu na to, że zapotrzebowanie na budowę nowych portów lotniczych będzie prawdopodobnie nadal niewielkie, a przebudowie podlegałyby jedynie samoloty krótkiego zasięgu, ciężarówki na paliwo ciekłe mogłyby obsługiwać większość portów lotniczych uczestniczących w projekcie. Natomiast do 2050 r. zapotrzebowanie lotnictwa na LH2 wzrośnie do 40 mln ton rocznie i wprowadzone zostaną samoloty średniego zasięgu z napędem H2[109]. Będzie to wymagało wynalezienia bardziej skalowalnej technologii tankowania niż ciężarówki. O ile w niektórych sytuacjach dostawa koleją lub barką może być rozwiązaniem, o tyle rozwiązanie na prawdziwą skalę wymagałoby prawdopodobnie wprowadzenia dostaw gazociągami. Taka opcja może być atrakcyjna pod względem kosztów i techniki, jeżeli w przyszłości, w obliczu dekarbonizacji, gazociągi będą niewykorzystane. Istniejące rurociągi gazu ziemnego należałoby zatem zmodernizować lub zbudować nowe, dedykowane rurociągi wodoru[110]. Sposób tankowania paliwa również będzie wymagać udoskonaleń. W przeciwieństwie do samolotu krótkiego zasięgu czas tankowania samolotu dalekiego zasięgu może wykraczać poza obecny standard. Na przykład, jeśli samolot dalekiego zasięgu ma zbiornik pusty w 75%, tankowanie zbiornika kerozyną/paliwem przy użyciu dwóch węży może zająć do 65 minut, przy założeniu przepływu 900 litrów na minutę na wąż. Zakładając takie samo natężenie przepływu

[108] *Hydrogen for Net-Zero. A critical cost-competitive energy vector*, Hydrogen Council, Mckinsey Company, 2021.
[109] Clean Hydrogen Joint Undertaking, *Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*, Luksemburg 2020, s. 6.
[110] Clean Hydrogen Joint Undertaking, *Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050*, Luksemburg 2020, s. 43.

dla LH2, nawet przy dwukrotnie większej liczbie węży, tankowanie zajęłoby 140 minut[111]. Dlatego dalsze prace badawczo-rozwojowe będą ważne dla opracowania ekonomicznych rozwiązań umożliwiających przekroczenie prędkości przepływu paliwa powyżej 1000 litrów na minutę na wąż.

Lotnictwo mogłoby korzystać z lokalnych łańcuchów dostaw H2, które służą również innym gałęziom przemysłu. Infrastruktura zaopatrzenia w wodór mogłaby potencjalnie zaspokajać potrzeby portów lotniczych w zakresie ogrzewania i energii elektrycznej za pomocą kotłów i ogniw paliwowych. Firmy paliwowe, porty lotnicze, producenci samolotów i linie lotnicze musiałyby współpracować w celu zapewnienia jednoczesnego rozwoju infrastruktury i wprowadzania samolotów na rynek.

Z kolei proces urzeczywistnia koncepcji Urban Air Mobility można podzielić na dwie fazy („urzeczywistnienie" i „nadanie znaczenia")[112]. Faza „urzeczywistnienia" obejmuje wprowadzenie pierwszych komercyjnych pojazdów powietrznych do użytku. Będą one mogły zostać wykorzystane na pierwszych atrakcyjnych trasach w kilku wybranych miastach. Pierwsze trasy dla latających taksówek będą miały miejsce tam, gdzie akceptacja społeczna nie ma kluczowego znaczenia. W związku z tym będą służyć tylko niewielkiej liczbie osób w określonych sytuacjach, takich jak podróże między lotniskiem a centrum miasta. Będą to przypadki testowe, które pozwolą ocenić zainteresowanie i akceptację konsumentów oraz pomogą zbudować pierwszą bazę klientów. Niestety te pokazowe usługi będą miały stosunkowo wysoką cenę ze względu na niewielką liczbę miast oferujących takie usługi i małą liczbę lotów. Po drugie, usługi te będą opierać się na istniejącej infrastrukturze, takiej jak lądowiska dla helikopterów, które w większości miejsc nie są wystarczająco liczne, aby zapewnić odpowiednie usługi. Jednym z kluczowych aspektów, na którym należy się skupić, jest wydajność operacyjna określona przez czas obsługi. Chodzi o zapewnienie szybszego czasu ładowania, konserwacji i naprawy. Dodatkowo, gdy tylko koszty i poziom hałasu spadną, rynek ten będzie gotowy do zwiększenia skali. Wszystkie te zmiany stanowią warunek wstępny dla następnej fazy „nadawania znaczenia".

W fazie drugiej dążenie do stworzenia znaczącego rynku będzie napędzane przez kilka czynników. Zostaną zaoferowane usługi intermodalne, które będą zintegrowane z mobilnością naziemną w ponad 30 miastach na całym świecie. Zakładając bardziej ograniczoną budowę infrastruktury, mniejsze usługi taksówek powietrznych mogą rozprzestrzenić się na ponad 200 miast. Pasażerowie będą mogli korzystać z 1 000 do 2 500 stacji mobilności lotniczej, przy czym całkowita liczba wymaganych vertiportów zależy od ich wielkości. Większe vertiporty będą oferowały wystarczającą liczbę punktów startu i lądowania, co z kolei przyczyni się do zwiększenia liczby startów i lądowań. Złożona interakcja wszystkich filarów ekosystemu musi mieć miejsce nie tylko

[111] Ibidem.
[112] *The Economics of Vertical Mobility. A guide for investors, players, and lawmakers to succeed in urban air mobility,* Porsche Consulting, 2021, s. 20.

w jednym mieście, ale w wielu miastach na całym świecie mniej więcej jednocześnie, aby stworzyć skalowalny i ostatecznie istotny rynek.

Przyszłość Urban Air Mobility będzie zależeć od posiadania dedykowanej infrastruktury: **fizycznej** i **cyfrowej**[113]. Można wyróżnić trzy główne elementy infrastruktury cyfrowej: *nadzór* (technologie ADS-B, Wide Area Multilateration i system Detect-and-Avoid), *komunikacja* (sieć 5G, łączność satelitarna, Inmarsat L-band, Aspire 400) oraz *nawigacja* (GPS, VOR, Wide Area Augmentation)[114].

Z kolei infrastruktura fizyczna obejmuje *infrastrukturę lotniczą* (miejsca startu/lądowania), *infrastrukturę MRO, infrastrukturę połączoną* (np. hangary) oraz *infrastrukturę powiązaną* (węzły transportowe, które dowożą pasażerów do miejsc UAM). Ponadto infrastruktura fizyczna powinna zapewniać właściwą obsługę naziemną (wsiadanie, wysiadanie), serwisowanie (stacje ładowania/ tankowania) i utrzymanie. Możliwości przewozu pasażerów w ramach usługi air taxi są ograniczone liczbą vertiportów, ale także ich rodzajem i wielkością. Vertiporty są większymi obiektami, składającymi się z urządzeń do konserwacji, ładowania oraz wielokrotnego startu i lądowania. Urbaniści oczekują, że vertiporty będą miały wiele cech charakterystycznych dla dzisiejszych heliportów - wyznaczone miejsca do startu i lądowania, parkingi i różne urządzenia pomocnicze. Rozróżniamy trzy różne typy vertiportów: *vertistop, mały vertiport* i *duży vertiport*[115].

- **Vertistop** - jest on porównywalny do lądowiska dla helikopterów i najlepiej nadaje się do szybkich zrzutów, z bardzo ograniczonymi opcjami parkowania, ładowania lub wykonywania konserwacji. Byłoby to dobre rozwiązanie dla lokalizacji w pobliżu centrum miasta, na przykład na dachu biurowca.
- **Mały vertiport** - oferuje przestrzeń do parkowania i ładowania taksówki oraz przeprowadzania konserwacji. Ma niską emisje hałasu, a więc może być zlokalizowany na parkingach.
- **Duży vertiport** - można go uznać za ulepszoną wersję małego vertiportu, z jeszcze większą przestrzenią na parkowanie, ładowanie i konserwację. Ze względu na zwiększoną emisję hałasu spowodowaną większą liczbą startów i lądowań, duży vertiport najlepiej byłoby zlokalizować poza centrum miasta lub w pobliżu dróg o dużym natężeniu ruchu, które już emitują wysoki poziom hałasu.

[113] M. Hader, S. Baur, S. Kopera S., T. Schönberg, J. Hasenberg, *Urban AirMobility, USD 90 billion of potential: How to capture a share of the passengerdrone market*, The Roland Berger Center for Smart Mobility 2020, s. 12, 13.
[114] D.P. Thipphavong, R.D. Apaza, B. E. Barmore, V. Battiste , B.K. Burian , Q. V. Dao, ... &S.A. Verma, *Urban Air Mobility air space integration concepts and considerations*, NASA 2018, s. 6, 12.
[115] *The Economics of Vertical Mobility. A guide for investors, players, and lawmakers to succeed in urban air mobility*, Porsche Consulting, 2021, s. 41

Ze względu na wielkość, vertiporty możemy podzielić także na **vertipady**, **vertibazy** i **vertihuby**. Przewiduje się, że łączna liczba lądowisk dla średniego miasta wyniesie około 20-45, a dla dużego miasta - 40-60[116]. Rysunek 3.3.1 pokazuje potencjalną liczbę vertiportów dla różnych archetypów miast w dojrzałym stanie sieci UAM.

Rysunek 3.3.1. Przewidywana liczba vertiportów w poszczególnych miastach

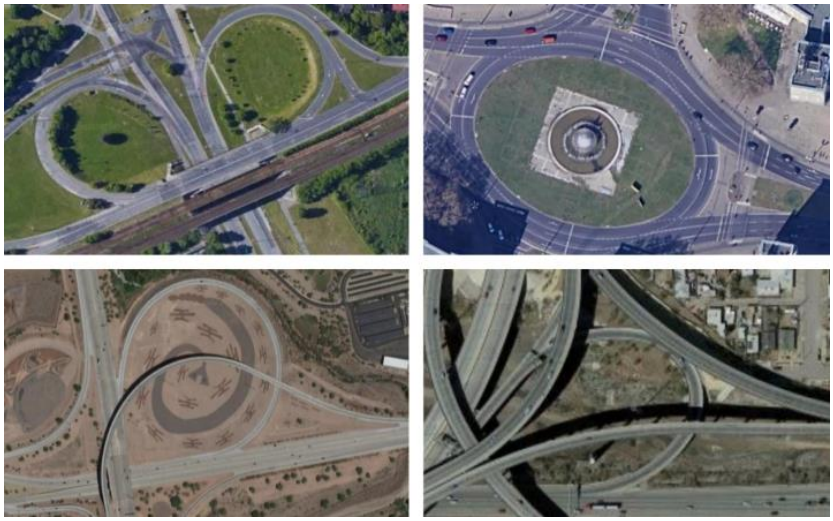
Large cities Large, dense, high-income urban city, e.g., Paris, Berlin, Madrid, Hamburg, Vienna, Barcelona			**Medium cities** Medium, less dense, medium income, urban/suburban city, Sevilla, Lisbon, Dusseldorf, Riga, Athens	
Outposts, areas of interest or private use	3-5	**Vertipads**	3-5	Major suburban commuting stations, private use for high net worth individuals, or in wealthy suburbs
Near concentrations of high origin and destination points	5-10	**Vertibases**	3-7	Major corporate headquarters, major retail districts, and major commuting stations
Major airports, city centres, and major commute corridors	2-3	**Vertihubs**	1-2	Main airport, downtown, and major work district
	40-60	Total landing pads	20-45	

Źródło: *Study on the societal acceptance of Urban AirMobility in Europe,* EASA 2021, s. 24.

Jako miejsce do budowy vertiportów należy wykorzystać przede wszystkim niezagospodarowaną infrastrukturę w mieście, tj. dachy wieżowców, puste place, pływające barki, istniejące lądowiska dla helikopterów, grunty przylegające do autostrad, parking i ronda. Mogą to być także rozjazdy na autostradach o kolistym kształcie. Każdy rozjazd nie zawiera zwykle żadnych budowli w obrębie swojej dużej średnicy, oferując ogromną ilość miejsca na budowę kilku vertiportów (rys. 3.3.2).

[116] *Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe*, EASA 2021, s. 24.

Rysunek 3.3.2. Przykłady rozjazdów, które mogą służyć jako vertiporty



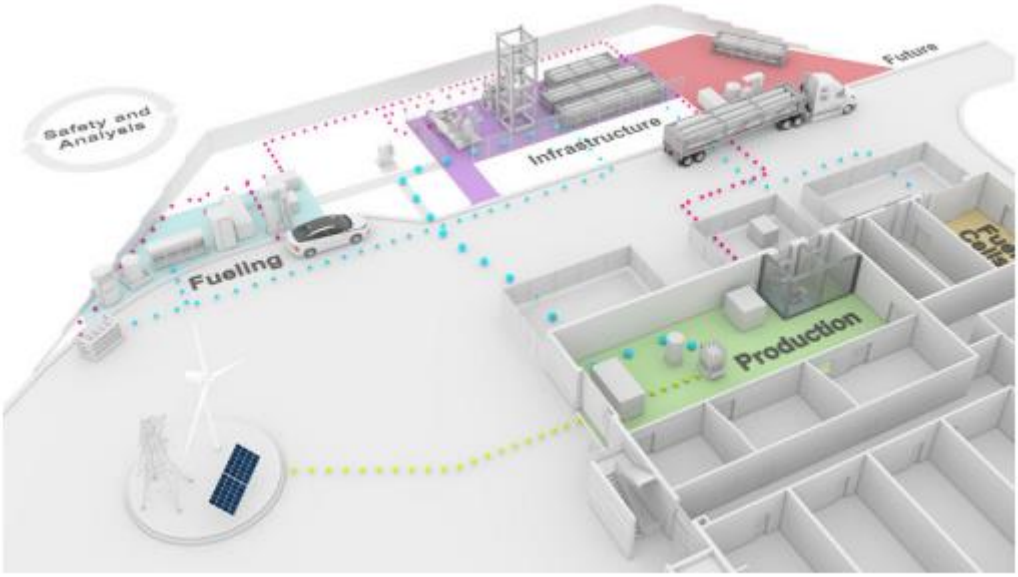
Źródło: S. Rajendran, S. Srinivas , *Air Taxi Service for Urban Mobility: A Critical Review of Recent Developments, Future Challenges, and Opportunities*, 2021, s. 9.

Jednak należy zaznaczyć, iż obszary wskazane na rys. 3.2.2. są jedynie propozycją, która nie uwzględnia lokalnych uwarunkowań oraz krajowych i regionalnych regulacji związanych z szeroko pojętym bezpieczeństwem (p.poż, transportowym, energetycznym, itd.), ochroną środowiska (emisja hałasu, światła, itd.) oraz przepisami ruchu powietrznego i jego kontroli.

Infrastruktura dla pojazdów latających z bateriami i ogniwami paliwowymi będzie wymagać zarówno ładowania baterii, jak i tankowania wodoru. Na obszarach miejskich trudno będzie przechowywać duże ilości wodoru na miejscu, co będzie prowadzić do regularnych dostaw wodoru (pod ciśnieniem lub w postaci ciekłej). Najprostszym podejściem byłoby tankowanie wodoru w miejscach, w których już wykorzystuje się łatwopalne gazy i paliwa. Szczególnie dobrze nadają się do tego porty lotnicze, które obsługują duże ilości paliwa lotniczego. Podobnie jak w przypadku gazu ziemnego, należałoby zbudować sieć rurociągów do obsługi krótkodystansowego transportu wodoru gazowego, podczas gdy wodór ciekły byłby przewożony ciężarówkami. Na przykład *Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnej* (NREL) opracowuje technologię produkcji wodoru na miejscu, aby obsługiwać ciężkie ciężarówki. Zapotrzebowanie na wodór dla tych samochodów ciężarowych jest porównywalne z zapotrzebowaniem dla pojazdów eVTOL. Zakłada się, że jeśli infrastruktura do produkcji wodoru na miejscu jest wykonalna dla samochodów ciężarowych, to również dla pojazdów eVTOL[117] (rys. 3.3.3).

[117] R. Locks, D. McLean, *Captive-use hydrogen for advanced air mobility*, HTO 2020, s. 27.

Rysunek 3.3.3. Produkcja wodoru na miejscu w NREL



Źródło: R. Locks, D. McLean, *Captive-use hydrogen for advanced air mobility*, HTO 2020, s. 28.

Chiny są obecnie światowym liderem w zakresie infrastruktury wodorowej - posiadają 250 stacji tankowania wodoru. Japonia zajmuje drugie miejsce z 161 stacjami tankowania, a Korea Południowa trzecie z 141 stacjami. W Europie większość stacji znajduje się w Niemczech (93) i we Francji (21). Stany Zjednoczone na ten moment posiadają zaledwie 54 stacji tankowania wodoru[118] (rys. 3.3.4.). Natomiast do 2030 roku Stany Zjednoczone planują mieć 1000 stacji, co jest porównywalne z celami Chin i Japonii. Europa planuje zdominować branżę, stawiając sobie za cel posiadanie 3700 stacji do 2030 roku[119].

[118] *Number of hydrogen fueling stations for road vehicles worldwide as of 2022, by country* (w:) „statista.com", https://www.statista.com/statistics/1026719/number-of-hydrogen-fuel-stations-by-country/ [dostęp: 17.05.2023].
[119] R. Locks, D. McLean, *Captive-use hydrogen for advanced air mobility*, HTO 2020, s. 6.

Rysunek 3.3.4. Infrastruktura wodorowa na świecie i w Europie

Źródło: *Another record addition of European hydrogen refuelling stations in 2022* (w:) "h2stations.org", luty 2023, https://www.h2stations.org/press-release-2023-another-record-addition-of-european-hydrogen-refuelling-stations-in-2022/ [dostęp: 17.05.2023].

Zarządzanie zakłóceniami stanowi ważny element zarządzania operacjami UAM. Aby skutecznie zintegrować operacje UAM z systemem przestrzeni powietrznej i istniejącą infrastrukturą naziemną, należy pokonać szereg barier. W odniesieniu do zapewnienia bezpieczeństwa całego systemu UAM, można zidentyfikować 7 potencjalnych zagrożeń: lot poza zatwierdzoną przestrzenią powietrzną, niebezpieczna bliskość ludzi i budynków, awaria systemu (np. utrata połączenia C2, pogorszenie działania GPS, awaria silnika), awaria systemu kontroli lotu, zagrożenia związane z bezpieczeństwem cybernetycznym, wysoka cena usługi, oraz akceptacja społeczna[120]. Innym bardzo kluczowym zagrożeniem są panujące warunki pogodowe. Niesprzyjający klimat w danym regionie pogarsza początkowe operacje UAM. Dotyczy to m.in. ograniczonej widoczności, silnego wiatru czy oblodzenia. Wobec tego pogoda będzie czynnikiem ograniczającym godziny pracy

[120] D.P. Thipphavong, R.D. Apaza, B. E. Barmore, V. Battiste , B.K. Burian , Q. V. Dao, ... &S.A. Verma, *Urban Air Mobility air space integration concepts and considerations,* NASA 2018, s. 13.

UAM i vertiportów, co w konsekwencji wpłynie na przepustowość, cenę biletów i segment klientów. Dlatego zaleca się początkową konfigurację taksówek w stałych warunkach pogodowych i łagodnym klimacie do czasu zdobycia większego doświadczenia operacyjnego. Konieczne będą znaczne wysiłki w celu zrozumienia zachowań i zjawisk pogodowych w mieście, aby zapewnić bezpieczne, ale również wydajne działanie UAM.

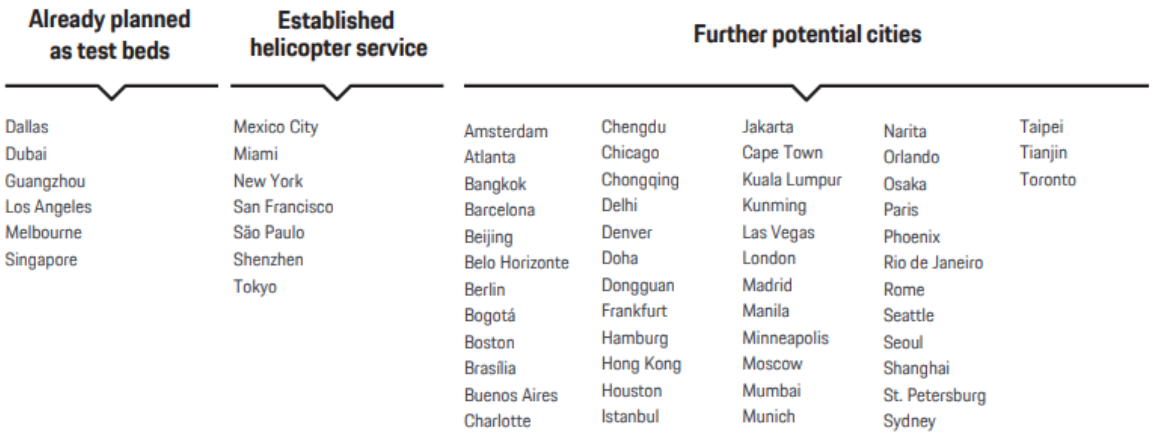
Rozwój mobilności powietrznej zależy przede wszystkim od gotowości miast i ich władz do wdrażania takich inwestycji. Można zidentyfikować różne poziomy gotowości miast w regionach obu Ameryk (Północnej i Południowej) oraz Azji i Pacyfiku[121]. Na przykład w Europie działa już wielu dostawców usług eVTOL, a wiele miast jest otwartych na ich testowanie. Niemniej w porównaniu z innymi regionami, Europa może stawiać więcej wymagań pod względem uzyskania akceptacji społecznej[122]. Z kolei Bliski Wschód, pomimo dużej otwartości na tego rodzaju innowacje, może zmagać się z poważnymi przeszkodami w postaci trudnych warunków pogodowych i klimatycznych.

Natomiast w oparciu o dzisiejsze organy regulacyjne w dziedzinie lotnictwa, poszczególne regiony można sklasyfikować do 4 kategorii: *liderzy, innowatorzy, konkurenci i naśladowcy*[123]. Europa i USA są dziś „liderami". Stosują oni stopniowe podejście do certyfikacji sprzętu, usług i infrastruktury. Ich organy regulacyjne będą zawsze ważyć innowacje z bezpieczeństwem, z wyraźnym naciskiem na to drugie. Z kolei Chiny można uznać za „konkurenta". Dzięki wysokiemu tempu innowacji i gotowości do podejmowania ryzyka, kraj ten jest dobrze przygotowany do wykorzystania mobilności pionowej. Kolejną kategorią organów regulacyjnych są „innowatorzy" - duże miasta i kraje z dużymi obszarami wiejskimi, które zgłaszają się do roli testerów dla pierwszych komercyjnych tras i usług. Należą do nich Dubaj i Singapur, Australia, Nowa Zelandia, Brazylia, Japonia i Korea. Ostatnia kategoria zwolenników najpierw obserwuje innych i wchodzi na rynek dopiero wtedy, gdy mobilność pionowa okaże się bezpieczna i skuteczna, są to tzw. „naśladowcy".

Firma Porsche zidentyfikowała ponad 60 miast jako odpowiednie rynki dla swoich usług eVTOL (rys. 3.3.5.).

[121] *The Future of Vertical Mobility. Sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035*, Porsche Consulting 2018.
[122] *Bundesamt für Statistik., Verkehrsverhalten der Bevölkerung, Synthesetabellen: Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015* (w:) „bfs.admin.ch", https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/verkehrsverhalten.assetdetail.1840477.htm [dostęp:28.12.2022].
[123] *The Economics of Vertical Mobility. A guide for investors, players, and lawmakers to succeed in urban air mobility*, Porsche Consulting 2021, s. 17.

Rysunek 3.3.5. Lista potencjalnych 64 miast, które mogą wdrożyć latające taksówki do 2035 roku



Źródło: *The Economics of Vertical Mobility. A guide for investors, players, and lawmakers to succeed in urban air mobility*, Porsche Consulting 2021, s. 23.

Aby rynek usług taksówek powietrznych stał się rzeczywistością, muszą one zostać uruchomione w ponad 30 miastach, czyli mniej więcej w połowie wymienionych miast, z wystarczająco rozwiniętą infrastrukturą dla lotów wewnątrzmiejskich. Kilka innowacyjnych miast, które już potwierdziły swój zamiar oferowania usług eVTOL to Dallas, Dubaj, Guangzhou, Los Angeles, Melbourne i Singapur. Można je uznać za silnych kandydatów na udane usługi taksówek powietrznych. Ponadto miasta, takie jak Meksyk, Miami, Nowy Jork, San Francisco, São Paulo, Shenzhen i Tokio wyglądają bardzo obiecująco dla taksówek powietrznych, ponieważ oferują już usługi helikopterów na żądanie i tym samym wykazały swoją otwartość na loty wewnątrz miasta. Można z tego wysunąć następujący wniosek: innowacyjne miasta, które już posiadają silną infrastrukturę helikopterową lub oferują usługi helikopterowe na żądanie, są potencjalnymi lokalizacjami dla usług taksówek powietrznych. Niemniej jednak, nawet jeśli miasta posiadają już infrastrukturę dla lotów helikopterów, często brakuje w nich urządzeń do ładowania. Jest to wąskie gardło podobne do tego, które utrudnia dziś szerokie rozpowszechnienie pojazdów elektrycznych.

Aby mobilność pionowa stała się istotna, musi zostać spełnionych kolejnych kilka warunków. Technologia jest jednym z nich, ale kluczem do sukcesu jest akceptacja społeczna. Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego Unii Europejskiej (EASA) rozpoczęła w listopadzie 2020 r. kompleksowe badanie dotyczące społecznej akceptacji UAM w całej Europie. Badanie obejmowało prace badawcze, przegląd literatury, a także ankietę z udziałem około 4000 mieszkańców 5 miast europejskich: Barcelony, Budapesztu, Hamburgu, Mediolanu, Paryża i regionu transgranicznego Öresund. Tych 6 miast zostało określonych jako potencjalne rynki docelowe dla przyszłego wdrożenia UAM. Badania wskazują, że społeczeństwo reaguje w większości pozytywnie na koncepcję Urban Air Mobility. Z drugiej strony istnieje także wiele obaw ze strony społeczeństwa i dotyczą one głównie

kwestii bezpieczeństwa, prywatności, utraty pracy, lokalnego wpływu na środowisko, hałasu, przystępności cenowej i wpływu na środowisko[124].

Jeśli istnieje jeden podstawowy warunek dla rozwoju rynku mobilności pionowej, to jest nim dopuszczenie taksówki powietrznej do użytku komercyjnego. W porównaniu z helikopterami, które są obecnie luksusową ofertą dla wąskiego grona zamożnych klientów, latające taksówki będą działać w segmencie premium poniżej niego i mogą sprawić, że miejskie podróże lotnicze będą dostępne dla całego społeczeństwa. Na akceptację klientów duży wpływ mają także dostawcy sprzętu, usług i infrastruktury. Ich obowiązkiem jest zapewnienie całemu społeczeństwu, że ich usługi są dostępne i niezawodne oraz oferują wyraźne korzyści w zakresie czasu, dostępności i kosztów. W podobny sposób akceptacja społeczna jest związana ze standardami ustalonymi przez podmioty tworzące prawo. Ich obowiązkiem jest rozwianie obaw dotyczących bezpieczeństwa i ochrony, zmniejszenie emisji hałasu oraz stworzenie dodatkowych korzyści społecznych, na przykład poprzez wprowadzenie latających taksówek do służb ratowniczych. Politycy ze swojej strony muszą przygotować szybkie procesy wydawania zezwoleń na niezbędną infrastrukturę oraz zatwierdzania dodatkowych tras w miarę rozwoju działalności. Ogólnie rzecz biorąc, wzajemne oddziaływanie akceptacji społecznej i polityki stworzy ramy regulacyjne i prawne dla mobilności pionowej. Z powyższych rozważań można wysunąć następujący wniosek: *technologia sprawia, że mobilność pionowa istnieje, ale akceptacja społeczna sprawia, że jest ona istotna*[125].

Podsumowując, zastosowanie wodoru do napędu miejskich pojazdów powietrznych przyniesie wiele korzyści ekonomicznych i środowiskowych, a także przyczyni się do podniesienia poziomu bezpieczeństwa energetycznego kraju. Po pierwsze, latające taksówki, zmniejszając natężenie ruchu, przyczynią się do zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska, a tym samym emisji, które mają szkodliwy wpływ na zdrowie ludzi. Dzięki temu staną się istotnym elementem w procesie dekarbonizacji transportu. Po drugie, jako alternatywny środek transportu, przyczynią się one do zwiększenia wydajności całego systemu transportowego i poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego. Co więcej, dojrzała sieć vertiportów będzie służyć łączeniu obszarów o niekorzystnym położeniu w miastach bez potrzeby budowania kosztownej infrastruktury. W przeciwieństwie do innych środków transportu sieć UAM nie wymaga budowy torów, tuneli, wiaduktów, mostów czy pasów drogowych. Same vertiporty mają też stosunkową małą powierzchnię. Pozwala to zaoszczędzić energię, zasoby naturalne i ziemię. Z drugiej strony, najwyższe nakłady inwestycyjne zostaną poniesione na budowę instalacji do tankowania pojazdów oraz systemów transportu i magazynowania wodoru.

[124] *Study on the societal acceptance of Urban AirMobility in Europe*, EASA 2021, s. 7, 71.
[125] Ibidem.

Zakończenie

Wodór jest najprostszym i najobficiej występującym pierwiastkiem we wszechświecie. Jego uniwersalność pozwala na wykorzystanie go w sektorach transportu, ciepłownictwa, przemysłu i energetyce, które łącznie odpowiadają za około dwie trzecie globalnej emisji dwutlenku węgla. Wodór może stanowić łącznik między rosnącą i zrównoważoną produkcją energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych a sektorami trudnymi do elektryfikacji. Dodatkowo potencjał zielonego wodoru jest coraz bardziej wspierany przez innowacje technologiczne, spadające koszty energii odnawialnej i globalne wysiłki na rzecz ograniczenia emisji. W ocenie wielu ekspertów i naukowców zielony wodór odegra kluczową rolę w transformacji energetycznej i przyczyni się do realizacji idei „zielonej rewolucji przemysłowej". Zielony wodór umożliwi zrównoważony rozwój społeczno-gospodarczy kraju, przy jak najmniejszym stopniu ingerencji w środowisko, a także przy jednoczesnej ochronie i zapewnieniu odtwarzania przydatności i jakości zasobów naturalnych w długim okresie.

Zielony wodór może być wykorzystywany jako surowiec i paliwo, a także jako nośnik i magazyn energii. Ze względu na swoją wysoką gęstość energetyczną (szczególnie ciekłego wodoru) jest dobrą alternatywą dla konwencjonalnych paliw kopalnych. W przypadku transportu wodór posiada potencjał jako paliwo szczególnie w tych sektorach, w których elektryfikacja jest trudna (transport ciężki, kolejowy, morski i lotniczy). Jednym z najczystszych i najbardziej obiecujących zastosowań wodoru są ogniwa paliwowe. Wodorowe ogniwa paliwowe mogą zasilać pojazdy komercyjne i transportu publicznego, a w przyszłości miejskie pojazdy latające. Ponadto wodór może przyczynić się do budowania zrównoważonego i inteligentnego miasta "smart city" poprzez wykorzystanie wodorowych ogniw paliwowych do napędu miejskich pojazdów powietrznych. Dzięki temu życie w mieście stanie się o wiele wygodniejsze i bezpieczniejsze.

Rozwój gospodarki wodorowej pociągnie za sobą otwarcie nowych form dochodów z eksportu, dzięki czemu powstanie nowy, oparty na odnawialnych źródłach energii międzynarodowy system energetyczny. Umożliwi to uniezależnienie się od importu paliw kopalnych, a tym samym zapewni wyższy poziom bezpieczeństwa energetycznego kraju. Państwa z największym dostępem do energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych mają szansę stać się czołowym producentem i eksporterem zielonego wodoru. Wynika to z najniższych kosztów produkcji wodoru w tych krajach. Do tych krajów należą np. Australia, Indie, Chile, Afryka Północna i Hiszpania. Jest to szczególnie szansa dla mniejszych i rozwijających się gospodarek z ograniczonym dostępem do złóż paliw kopalnych. Produkcja zielonego wodoru i rozwój technologii pozwoli im na wejście na nowe rynki i poprawę swojej sytuacji ekonomicznej. Z kolei kraje z niewystarczającym dostępem do OZE będą zmuszone do importu wodoru np. Niemcy, Japonia, Korea Południowa. Krytycznym czynnikiem, który zadecyduje o opłacalności handlu wodorem, będzie to, czy skala, technologie i inne usprawnienia mogą zrównoważyć koszty transportu wodoru z obszarów o niskich kosztach produkcji do obszarów o wysokim popycie.

Należy zwrócić uwagę na bardzo istotny element: regiony o największym potencjale energii odnawialnej są jednocześnie obszarami, w których występuje wysoki poziom niedoborów wody. Jeśli polityka danych państw dotycząca zarządzania zasobami wodnymi nie zostanie lepiej zintegrowana, to jest prawdopodobne, że zapotrzebowanie na wodór będzie bezpośrednio konkurować z sektorem gospodarki wodnej. Podobnie obawy o zmienność cen i bezpieczeństwo dostaw kluczowych minerałów (np. lit i kobalt) nie znikają w zelektryfikowanym i bogatym w odnawialne źródła energii systemie energetycznym. Wobec tego w niniejszej pracy zidentyfikowano sześć filarów podejścia do bezpieczeństwa mineralnego. Przede wszystkim kluczową rolę odegra zmniejszenie materiałochłonności i zachęcanie do zastępowania materiałów poprzez innowacje technologiczne. Niemniej nadal brakuje szczegółowych badań dotyczących wpływu zielonego wodoru na gospodarkę wodną i kwestię wykorzystania minerałów krytycznych do jego produkcji.

W odniesieniu do sektora lotniczego, latające pojazdy zasilane wodorowymi ogniwami paliwowymi stanowią ważny element procesu dekarbonizacji gospodarki. Wykorzystanie nowych technologii, takich jak UAM, może przyczynić się do rozwoju gospodarczego i zwiększenia poziomu bezpieczeństwa energetycznego kraju. Dobrym miejscem do rozwoju, testowania oraz wdrażania najnowszych technologii wodorowych są doliny wodorowe.

Główny wniosek z pracy jest następujący: zielony wodór może odegrać istotną rolę w osiągnięciu celu neutralności klimatycznej do 2050 roku, ale będzie on stanowić jedynie jeden z elementów całego miksu energetycznego. Stawianie na jedno źródło energii nie jest dobrym rozwiązaniem, ponieważ tak jak w przypadku każdego innego paliwa, może się to wiązać z wieloma problemami. W przypadku zielonego wodoru są to wysokie koszty produkcji, problemy z dostępem do czystej wody, bezpieczeństwo dostaw minerałów, infrastruktura itd. Dlatego podstawą udanej transformacji energetycznej jest dywersyfikacja miksu energetycznego danego kraju, którego główną częścią będzie stanowić zielony wodór przy wsparciu OZE, energii atomowej i elektryfikacji.

Bibliografia

Druki zwarte

- Ahluwalia R. K., Peng J-K., Wang X., Papadias D., Kopasz J., *Performance and Cost of Fuel Cells for Urban Air Mobility,* Argonne National Laboratory 2021.
- Baroutaji A., Wilberforce T., Ramadan M., Ghani Olabi A., *Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019.
- Beswick *R. R.,* Oliveira A. M., Yan Y., *Does the Green Hydrogen Economy Have a Water Problem?,* ACS Energy Letters 2021.
- Clean Hydrogen Joint Undertaking, *Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050,* Luksemburg 2020.
- G. Calvo, G. Mudd , A. Valero, A. Valero, *Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?,* MDPI 2016.
- Locks R., McLean D., *Captive-use hydrogen for advanced air mobility*, HTO 2020.
- Misztal A., *Zrównoważony rozwój przedsiębiorstw a stopień rozwoju społeczno-gospodarczego*. Studia I Prace Kolegium Zarządzania I Finansów, Warszawa 2019.
- Mukhopadhaya J., Rutherford D., *Performance analysis* of *evolutionary hydrogen-powered aircraft*, ICCT, 2022.
- Newborough M., Cooley G., *Green hydrogen: water use implications and opportunities*, ITM Power PLC, 2021 s. 13.
- *Podręcznik Oslo. Zasady gromadzenia i interpretacji danych dotyczących innowacji*, OECD – Eurostat, Warszawa 2008.
- Qazi, U.Y., *Future of Hydrogen as an Alternative Fuel for Next-Generation Industrial Applications. Challenges and Expected Opportunities*, Energies, 2022.
- Rajendran S., Srinivas S., *Air Taxi Service for Urban Mobility: A Critical Review of Recent Developments, Future Challenges, and Opportunities*, 2021.
- Rutkowska-Podołowska M., Pakulska J., *Innowacje ekologiczne szansą rozwoju gospodarczego w Polsce*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2016.
- Thipphavong D. P., Apaza R. D., Barmore B. E., Battiste V., Burian B. K., Dao Q.V., ... &Verma S. A., *Urban Air Mobility air space integration concepts and considerations,* NASA 2018.
- Verstraete D., *The Potential of liquid hydrogen for long range aircraft propulsion*, PhD Thesis, Cranfield Univeristy, 2009.
- Woods P., Bustamante H., Aguey F., *The hydrogen economy - Where is the water?*, Energy Nexus, Sydney 2022.

- *World Urbanization Prospects. The 2018 Revision,* DESA - the United Nations, New York, 2019.

- Najjar Y., *Hydrogen safety: The road toward green technology*, Journal of Hydrogen Energy, 2013.

Raporty i analizy rynkowe

- *Climate change and drought*, Climate Council, 2018.

- *Energy Technology Perspectives. Special Report on Clean Energy Innovation*, IEA, 2020.

- *Flying Car Startup Alaka'i Bets Hydrogen Can Outdo Batteries* (w:) "wired.com", maj 2019, https://www.wired.com/story/alakai-flying-car-air-taxi-evtol-hydrogen/ [dostęp: 17.05.2023].

- *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal. Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, IRENA 2022.

- Hader M., Baur S., Kopera S., Schönberg T., Hasenberg J.P., *Urban Air Mobility, USD 90 billion of potential: How to capture a share of the passenger drone market*, The Roland Berger Center for Smart Mobility 2020.

- *Heavy-duty vehicles: Charging and refuelling infrastructure requirements,* ACEA 2021.

- *Hydrogen for Net-Zero. A critical cost-competitive energy vector*, Hydrogen Council, Mckinsey Company, 2021.

- *Hydrogen on the horizon: Ready, almost set, go?*, World Energy Council, EPRI, PwC, 2021.

- *Hydrogen Valleys. Insights into the emerging hydrogen economies around the world*, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking - European Union 2021

- *International hydrogen strategies. A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council – Germany. Executive summary*, World Energy Council 2020.

- Llewellyn G, Miftakhov V., *Hydrogen power- boldly going to the heart of climate-neutral aviation,* ICAO Environmental Report 2022.

- *Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*, IEA 2021.

- *REPowering the EU with Hydrogen Valley*, European Commission 2022.

- *Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe*, EASA 2021.

- *The Economics of Vertical Mobility. A guide for investors, players, and lawmakers to succeed in urban air mobility, Porsche Consulting 2021.*

- *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities*, IEA, Japan, 2019.

- *The Future of Vertical Mobility. Sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035*, Porsche Consulting 2018.

- *The role of critical minerals in clean energy transitions,* World Energy Outlook Special Report, IEA 2021.

- *Water for Sustainable Food and Agriculture. A report produced for the G20 Presidency of Germany,* FAO, Rome 2017.

- *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway,* International Renewable Energy Agency 2022.

- *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce*, Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Wrocław 2021.

Akty prawne i dokumenty

- *A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe*, Komisja Europejska, Bruksela 2020.

- Hydrogen decarbonization pathways A life-cycle assessment, Hydrogen Council, 2021.

- *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040 r*., Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa, 2021.

- *Przekształcamy nasz świat: Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030*, Zgromadzenie Ogólne ONZ 2015.

- *Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu,* Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Bruksela 2020.

- *Zrównoważony rozwój*, EUR-Lex: EU law, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=LEGISSUM:sustainable_development [dostęp: 16.02.2022].

Strony internetowe

- *Analysis: Global CO2 emissions from fossil fuels hit record high in 2022* (w:) „Carbon Brief" https://www.carbonbrief.org/analysis-global-co2-emissions-from-fossil-fuels-hit-record-high-in-2022/ [dostęp: 15.02.2023].

- *Another record addition of European hydrogen refuelling stations in 2022* (w:) „h2stations.org", luty 2023, https://www.h2stations.org/press-release-2023-another-record-addition-of-european-hydrogen-refuelling-stations-in-2022/ [dostęp: 17.05.2023].

- *A world-first green hydrogen-to-homes heating network on the Fife coas*t (w:) „sgn.co.uk", https://www.sgn.co.uk/H100Fife [dostęp: 17.02.2023].

- *Basic information on hydrogen* (w:) „ien.com", https://www.ien.com.pl/tl_files/pliki/CPE/FAQ_final_EN.pdf, s. 1,2. [dostęp: 28.12.2022].

- *Breakdown of hydrogen production technologies using various sources: today and prediction for the year 2050* , IEA (w:) „Research Gate”, https://www.researchgate.net/figure/Breakdown-of-hydrogen-production-technologies-using-various-sources-today-and-prediction_fig1_338542462 [dostęp: 17.02.2023].

- *Bundesamt für Statistik., Verkehrsverhalten der Bevölkerung, Synthesetabellen: Ergebnisse des MikrozensusMobilität und Verkehr 2015* (w:) „bfs.admin.ch”, https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/verkehrsverhalten.assetdetail.1840477.htm [dostęp:28.12.2022].

- *Climate change* (w:) „easa.europa.eu”, https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/adapting-changing-climate/climate-change [dostęp: 27.12.2022].

- *Czym jest kocioł wodorowy i co należy o nim wiedzieć?* (w:) „Ładny dom”, https://ladnydom.pl/kotly-wodorowe-nadchodzi-przelom [dostęp: 17.02.2023].

- *Emisje CO_2 z samochodów: fakty i liczby (infografiki*) (w:) „europa.eu”, https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20190313STO31218/emisje-co2-z-samochodow-fakty-i-liczby-infografiki [dostęp: 28.12.2022].

- *Estimated production costs of green hydrogen per kilogram in Japan from 2020 to 2050* (w:) „statista.com”, https://www.statista.com/statistics/1304507/japan-green-hydrogen-production-cost-per-kilogram/ [dostęp: 06.04.2023].

- *Fuel Cell Electric Vehicles: Genesis of a New Era or a Myth-Busting in NewEnergy Vehicle Technology?* (w:) „frost.com”, https://ww2.frost.com/frost-perspectives/fuel-cell-electric-vehicles-genesis-new-era-or-myth-busting-new-energy-vehicle-technology/ [dostęp: 27.12.2022].

- *Gas factsheet* (w:) „europa.eu”, https://www.acer.europa.eu/gas-factsheet [dostęp: 05.04.2023].

- *Global demand for pure hydrogen, 1975–2018* (w:) „iea.org”, https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018 [dostęp:16.02.2023].

- *Global energy sector CO2 emissions reductions by current technology readiness category* (w:) „iea.org”, https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-sector-co2-emissions-reductions-by-current-technology-readiness-category-in-the-sustainable-development-scenario-relative-to-the-stated-policies-scenario-2019-2070 [dostęp: 18.02.2023].

- *Green hydrogen current and projected production costs* (w:) „structuresinsider.com”, https://www.structuresinsider.com/post/green-hydrogen-current-and-projected-production-costs [dostęp: 07.04.2023].

- *Green hydrogen revolution risks dying of thirst* (w:) „reuters.com”, https://www.reuters.com/breakingviews/green-hydrogen-revolution-risks-dying-thirst-2022-10-05/ [dostęp:10.04.2023].

- Hammerschmidt C., *R&D partnership brings hydrogen power to urban air mobility* (w:) „eenewseurope.com”, czerwiec 2020, https://www.eenewseurope.com/en/rd-partnership-brings-hydrogen-power-to-urban-air-mobility/ [dostęp: 16.05.2023].

- *Hanwha Aerospace to develop hydrogen fuel cells for urban air mobility* (w:) „compositesworld.com", https://www.compositesworld.com/news/hanwha-aerospace-to-develop-hydrogen-fuel-cells-for-urban-air-mobility [dostęp: 16.05.2023].

- Harrington R., *10 miast, które w 2030 roku będą najbardziej zaludnione na świecie. Żadne nie leży w Europie ani USA* (w:) „businessinsider.com", listopad 2019, https://businessinsider.com.pl/lifestyle/podroze/onz-najbardziej-zaludnione-miasta-w-2030-roku/dxxqw4q [dostęp: 16.05.2022].

- *Horn of Africa drought puts 3.6m children at risk of dropping out of school* (w:) "the guardian.com", https://www.theguardian.com/global-development/2022/sep/22/horn-of-africa-drought-puts-36m-children-at-risk-of-dropping-out-of-school [dostęp: 15.02.2023].

- *How harnessing hydrogen could take Hanwha's Urban Air Mobility to new frontiers* (w:) "hanwha.com", kwiecień 2022, https://www.hanwha.com/en/news_and_media/stories/innovations/how-harnessing-hydrogen-could-take-hanwhas-urban-air-mobility-to-new-frontiers.html [dostęp: 16.05.2023].

- *Hydrogen-powered drone lasts three times longer* (w:) „linde-stories.com", https://linde-stories.com/hydrogen-powered-drone-lasts-three-times-longer/ [dostęp: 16.05.2023].

- *Hydrogen Valleys go global: An update* (w:) „.rolandberger.com", https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Hydrogen-Valleys-go-global-An-update.htm [dostęp: 30.04.2023].

- *Hydrogen valleys* (w:) „arp.pl", https://arp.pl/en/what-we-do/hydrogen-valleys/ [dostęp: 29.04.2023].

- *Hydrogen Valley* (w:) „europaeu", https://s3platform.jrc.ec.europa.eu/hydrogen-valleys [29.04.2023].

- *Innowacyjna technologia membrany do produkcji wodoru* (w:) „CORDIS Europa EU", https://cordis.europa.eu/article/id/244884-innovative-hydrogen-membrane-technology/pl [dostęp: 17.02.2023].

- *Is green hydrogen less sustainable than we thought?*(w:) „euronews.com", https://www.euronews.com/green/2021/11/04/is-green-hydrogen-less-sustainable-than-dirtier-blue-hydrogen [dostęp: 10.04.2023].

- *Key findings* (w:) „iea.org", https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/key-findings [dostęp: 04.04.2023].

- *Low-carbon production of hydrogen* (w:) „leonard.vinci.com", https://leonard.vinci.com/en/focus-article-1_low-carbon-production-of-hydrogen/ [dostęp: 17.02.2023].

- *Lower Silesian Hydrogen Valley has been established* (w:) „arp.pl", https://arp.pl/en/who-we-are/media/news/lower-silesian-hydrogen-valley-has-been-established/ [dostęp: 30.04.2023].

- *Mission Innovation Hydrogen Valley Platform* (w:) „h2v.eu", https://h2v.eu/ [dostęp: 01.05.2023].

- *Mobile Source Emissions Research Program* (w:) „California Air Resources Board", https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/mobile-source-emissions-research-program [dostęp: 28.12.2022].

- *Number of hydrogen fueling stations for road vehicles worldwide as of 2022, by country* (w:) „statista.com", https://www.statista.com/statistics/1026719/number-of-hydrogen-fuel-stations-by-country/ [dostęp: 17.05.2023].

- *Oil Reserves by Country 2023* (w:) „world population review.com", https://worldpopulationreview.com/country-rankings/oil-reserves-by-country [dostęp: 04.04.2023].

- *Urban Development* (w:) "worldbank.org", https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview [20.05.2023].

- *Pierwsze Polskie osiedle wodorowe powstanie w Środzie Śląskiej* (w:) „Świat OZE.pl", https://swiatoze.pl/pierwsze-polskie-osiedle-wodorowe-powstanie-w-srodzie-slaskiej/ [dostęp: 17.02.2023].

- *Preparation* (w:) „h2v.eu", https://h2v.eu/analysis/barriers/project_development/preparation [dostęp: 30.04.2023].

- *Project locations* (w:) „h2v.eu/", https://h2v.eu/analysis/statistics/fundamentals/project-locations [dostęp: 29.04.2023].

- *Reducing water consumption with green hydrogen* (w:) „itm-power.com", https://itm-power.com/blogs/reducing-water-consumption-with-green-hydrogen [dostęp: 09.04.2023].

- *Regulation* (w:) „h2v.eu", https://h2v.eu/analysis/barriers/regulation [dostęp: 30.04.2023].

- *Reinventing gas through hydrogen* (w:) "bp.com", https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/speeches/reinventing-gas-through-hydrogen.html [dostęp: 05.04.2023].

- *Renewable energy – powering a safer future* (w:) „un.org", https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy [dostęp: 15.02.2023].

- *SGN seeks approval for green hydrogen network in Fife* (w:) „Project Scotland", https://projectscot.com/2020/05/sgn-seeks-approval-for-green-hydrogen-network-in-fife/ [dostęp: 17.02.2023].

- *SGN preparing to deliver the world's first 100% green hydrogen network to heat 300 homes with hydrogen in fife* (w:) „Fuel Cells Works", https://fuelcellsworks.com/news/sgn-preparing-to-deliver-the-worlds-first-100-green-hydrogen-network-to-heat-300-homes-with-hydrogen-in-fife/ [dostęp: 17.02.2023].

- *Skai revises targets for its liquid-hydrogen, long-range eVTOL*(w:) „newatlas.com", https://newatlas.com/aircraft/alakai-skai-liquid-hydrogen-evtol-update/#gallery:1 [dostęp: 27.12.2022].

- *Skai* (w:) „alkai.com", https://www.alakai.com/skai [dostęp 17.05.2023].

- *The CityHawk* (w:) „urbanaero.comz", https://www.urbanaero.com/_files/ugd/e271cb_919dc202ea144abc881da8ee1ffa25b5.pdf, Urban Aeronautics CityHawk [dostęp: 17.05.2023].

- *The green hydrogen economy. Predicting the decarbonisation agenda of tomorrow* (w:) "pwc.com", https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html [dostęp: 05.04.2023].

- *Towards the world's first zero-emission commercial aircraft* (w:) „airbus.com", https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe [dostęp: 27.12.2022].

- *Urban Aeronautics CityHawk* (w:) „evtol.news", https://evtol.news/urban-aeronautics-cityhawk/ [dostęp: 15.05.2023].

- *Water use by sectors* (w:) „europa.eu", https://www.eea.europa.eu/archived/archived-content-water-topic/water-resources/water-use-by-sectors [dostęp: 09.04.2023].

- *Własności i występowanie* (w:) "Klaster Wodorowy", https://klasterwodorowy.pl/wlasnosci-i-wystepowanie,19,pl [dostęp: 17.02.2023].

- *2022's supercharged summer of climate extremes: How global warming and La Niña fueled disasters on top of disasters* (w:) „the Conversation", https://theconversation.com/2022s-supercharged-summer-of-climate-extremes-how-global-warming-and-la-nina-fueled-disasters-on-top-of-disasters-190546 [dostęp: 15.02.2023].

Spis rysunków

Rysunek 1.1.1. Etapy powstawania koncepcji zrównoważonego rozwoju

Rysunek 1.2.1. Technologie produkcji wodoru według źródeł energii pierwotnej

Rysunek 1.2.2. Proces elektrolizy

Rysunek 1.2.3. Schemat przykładowej instalacji do produkcji wodoru z OZE i energii z sieci

Rysunek 2.1.1. Zapotrzebowanie na wodór w poszczególnych krajach w 2050 roku w scenariuszu 1,5°C

Rysunek 2.1.2. Zapowiedzi dotyczące globalnego handlu wodorem

Rysunek 2.1.3. Globalna mapa handlu wodorem przy optymistycznych założeniach technologicznych w 2050 roku

Rysunek 2.2.1. Techniczny potencjał energii odnawialnej na rok 2050 w EJ/rok

Rysunek 2.2.2. Zapotrzebowanie na minerały dla technologii czystej energii

Rysunek 2.3.1. Lokalizacja projektu (udział dolin)

Rysunek 2.3.2. Przykładowe projekty dolin wodorowych na świecie

Rysunek 2.3.3. Projekty lokalne, na małą skalę i skupiające się na mobilności (archetyp 1)

Rysunek 2.3.4. Projekty lokalne, o średniej skali i ukierunkowane na przemysł (archetyp 2)

Rysunek 2.3.5. Projekty na większą skalę, międzynarodowe i nastawione na eksport (archetyp 3)

Rysunek 2.3.6. Główne przeszkody o charakterze regulacyjnym (udział dolin)

Rysunek 2.3.7. Główne przeszkody i bariery w fazie przygotowywania projektu (udział dolin)

Rysunek 3.1.1. Emisje CO_2 z lotnictwa pasażerskiego w różnych scenariuszach wdrożenia samolotów z napędem LH2 w latach 2020-2050

Rysunek 3.2.1. Wodorowe ogniwa paliwowych na tle akumulatorów litowo-jonowych

Rysunek 3.2.2. Konfiguracja hybrydowego ogniwa paliwowego z akumulatorem

Rysunek 3.2.3. Komercyjne przypadki zastosowań UAM

Rysunek 3.2.4. Latająca taksówka „Skai”

Rysunek 3.2.5. Pojazd latający „CityHawk” zasilany wodorem

Rysunek 3.3.1. Przewidywana liczba vertiportów w poszczególnych miastach

Rysunek 3.3.2. Przykłady rozjazdów, które mogą służyć jako vertiporty

Rysunek 3.3.3. Produkcja wodoru na miejscu w NREL

Rysunek 3.3.4. Infrastruktura wodorowa na świecie i w Europie

Rysunek 3.3.5. Lista potencjalnych 64 miast, które mogą wdrożyć latające taksówki do 2035 roku

Spis wykresów

Wykres 1.1.1. Roczne emisje według paliw – lata 1959-2022

Wykres 1.1.2 Globalne zapotrzebowanie na czysty wodór – lata 1975-2018

Wykres 1.1.3. Źródła pozyskiwania wodoru (IEA)

Wykres 1.3.1. Redukcje emisji CO2 w globalnym sektorze energetycznym według kategorii gotowości technologicznej

Wykres 2.1.1. Redukcja emisji dwutlenku węgla w ramach scenariusza 1,5°C

Wykres 2.1.2. Wielkość popytu i podaży na wodór dla regionów świata w 2050 roku przy optymistycznych założeniach technologicznych

Wykres 2.1.3. Koszt wodoru według regionów w 2050 r. dla scenariusza optymistycznego i pesymistycznego

Wykres 2.2.1. Zapotrzebowanie na minerały na technologie czystej energii według scenariusza

Wykres 2.2.2. Średnioroczny wzrost całkowitego zapotrzebowania na wybrane minerały według scenariusza

Wykres 2.2.3. Udział krajów w całkowitej produkcji dla wybranych minerałów i paliw kopalnych w 2019 roku

Wykres 2.2.4. Udział wielkości produkcji według poziomu stresu wodnego dla wybranych minerałów, 2020 rok

Wykres 3.1.1. Emisje w Transporcie w UE

Wykres 3.1.2. Emisyjność badanych paliw

Wykres 3.1.3. Koszt paliwa w poszczególnych regionach, 2035 i 2050 r., z uwzględnieniem i bez uwzględnienia cen uprawnień do emisji dwutlenku węgla