

Bezpieczeństwo energetyczne

Wybrane zagadnienia

REDAKCJA NAUKOWA

Alicja **Wiącek**
Mariusz **Ruszel**
Jolanta **Stec-Rusiecka**



OFICyna
WYDAWNICZA
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

Recenzenci

prof. dr hab. Jarosław GRYZ
dr hab. Grzegorz TCHOREK

Redaktor naczelny

Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej
dr hab. inż. Lesław GNIEWEK, prof. PRz

Redaktor

Piotr CYREK

Skład i łamanie

Mariusz TENDERA

Projekt okładki

Joanna MIKUŁA

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej
Rzeszów 2022



Ministerstwo
Edukacji i Nauki

Dofinansowano przez Ministra Edukacji i Nauki ze środków z budżetu państwa
w ramach programu „Studenckie koła naukowe tworzą innowacje”

Projekt „Bezpieczeństwo energetyczne – wybrane zagadnienia” nr SKN/SP/498491/2021 został zrealizowany przez Studenckie Koło Naukowe „Eurointegracja” działające przy Zakładzie Ekonomii Wydziału Zarządzania Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza pod opieką dr. hab. Mariusza Ruszla, prof. PRz

Wszelkie prawa autorskie i wydawnicze zastrzeżone. Każda forma powielania oraz przenoszenia na inne nośniki bez pisemnej zgody Wydawcy jest traktowana jako naruszenie praw autorskich, z konsekwencjami przewidzianymi w *Ustawie o prawie autorskim i prawach pokrewnych* (Dz.U. z 2018 r., poz. 1191 t.j.). Autor i Wydawca dołożyli wszelkich starań, aby rzetelnie podać źródło zamieszczonych ilustracji oraz dotrzeć do właścicieli i dysponentów praw autorskich. Osoby, których nie udało się ustalić, są proszone o kontakt z Wydawnictwem.

p-ISBN 978-83-7934-568-7

e-ISBN 978-83-7934-570-0

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

Ark. wyd. 16,57. Ark. druk. 16,25.

Wydrukowano w maju 2022 r.

Drukarnia Oficyny Wydawniczej, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
Zam. nr 22/22

SPIS TREŚCI

Przedmowa	5
-----------------	---

Część I.

Rola wodoru w procesie kształtowania bezpieczeństwa energetycznego

Rozdział 1. Bezpieczeństwo energetyczne w kontekście współczesnych wyzwań wywołanych wojną w Ukrainie w 2022 roku <i>Mariusz Ruszel</i>	11
Rozdział 2. Znaczenie wodoru w procesie transformacji sektora energii <i>Tomoho Umeda</i>	21
Rozdział 3. Strategiczne znaczenie wodoru w ramach łączenia sektorów <i>Ewa Mataczyńska, Marek Sikora</i>	35
Rozdział 4. Sposoby produkcji i przesyłu wodoru oraz skroplonego wodoru – budowanie przewag konkurencyjnych <i>Paweł Jakubowski</i>	51
Rozdział 5. Technologie magazynowania i konwersji wodoru <i>Sławomir Wolski</i>	87
Rozdział 6. Możliwości i potencjał rozwoju gospodarki wodorowej Polski <i>Jolanta Stec-Rusiecka</i>	105

Część II.

Analiza badawcza wybranych państw

Rozdział 1. Studium przypadku – Szwecja <i>Jagoda Siwiec</i>	121
Rozdział 2. Studium przypadku – Norwegia <i>Alicja Wiącek</i>	135

Rozdział 3.	
Studium przypadku – Finlandia	
<i>Daria Rzemieniak</i>	149
Rozdział 4.	
Studium przypadku – Francja	
<i>Lidia Murias</i>	161
Rozdział 5.	
Studium przypadku – Hiszpania	
<i>Piotr Leszczyński</i>	175
Rozdział 6.	
Studium przypadku – Austria	
<i>Maciej Paszyn</i>	191
Rozdział 7.	
Studium przypadku – Słowacja	
<i>Justyna Trubalska</i>	209
Rozdział 8.	
Studium przypadku – Korea Południowa	
<i>Daria Pajdowska</i>	229
Zakończenie.....	243
Noty o autorach	251

PRZEDMOWA

Zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego jest jednym z najważniejszych wyzwań dla współczesnych państw. Wymaga nie tylko odpowiedniej polityki energetycznej w wymiarze wewnętrznym, której celem jest zapewnienie nieprzerwanych dostaw surowców energetycznych i energii po akceptowalnej cenie, ale także obejmuje aspekty zewnętrzne. Związane jest to z tworzeniem sojuszy i partnerstw energetycznych, a także stanowi podstawę polityki dywersyfikacji źródeł dostaw. Analizując światową strukturę bilansu energetycznego dostrzega się, że kluczową rolę odgrywają paliwa kopalne, a więc ropa naftowa, węgiel oraz gaz ziemny. Możliwości wydobywcze paliw kopalnych, zwłaszcza ropy naftowej, są ograniczone do kilku regionów świata, a ciągłość ich dostaw jest regulowana przez dynamiczne czynniki polityczne, ekonomiczne i ekologiczne. Czynniki te wspólnie wymuszają zmienne, często wysokie ceny paliw, a jednocześnie polityka ochrony środowiska wymaga ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i substancji toksycznych. Stabilizacja łańcucha dostaw surowców energetycznych jest możliwa dzięki dywersyfikacji nośników energii, która w sposób bezpośredni przełoży się na poprawę bezpieczeństwa energetycznego.

Oczekuje się, że paliwa kopalne będą nadal dominować w światowych dostawach energii w nadchodzącym trzydziestoleciu. Utrzymywanie paliw kopalnych w miksie energetycznym w celu stabilizacji dostaw energii jest niezbędne, ale obniżenie ich udziału staje się realnym wyzwaniem, przed którym stoi globalna gospodarka. Rosnący udział rozproszonych odnawialnych źródeł energii (OZE) w miksie energetycznym poszczególnych gospodarek nadal nie gwarantuje bezpieczeństwa dostaw, ze względu na to, że ich charakter pracy jest okresowy. Wydaje się, że odpowiednio zaprojektowane i zbudowane systemy energii wodorowej mogą zwiększyć bezpieczeństwo energetyczne poprzez dywersyfikację struktury wytwórczej obejmując jej technologiczną sferę i minimalizację zależności od importu paliw energetycznych z zagranicy. Wodorowy system energetyczny ma największy potencjał, by stać się systemem energetycznym przyszłości, stwarzając jednocześnie w pewnym stopniu możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury przesyłowej gazu ziemnego, dlatego niniejsza monografia dotyczy bezpieczeństwa energetycznego, a w szczególności zagadnień tematyki wodorowej z nim związanej. Wynika to z przyjętego założenia, że ten podsystem bezpieczeństwa energetycznego może stać się kluczowy w dłuższym czasie.

Autorzy pracy dokonali przeglądu dostępnej literatury dotyczącej szeroko pojmowanej energetyki wodorowej. Kwerenda ta pokazała, że istnieją liczne bariery technologiczne, finansowe, prawne i instytucjonalne na drodze do stworzenia konkurencyjnej cenowo, standaryzowanej, powszechnie dostępnej, bezpiecznej

i przyjaznej dla środowiska gospodarki wodorowej. Bariery te są spowodowane brakiem aktualnych badań oraz projektów pilotażowych i demonstracyjnych, w zakresie produkcji, konwersji, transportu, przesyłu, magazynowania, tankowania oraz wykorzystania wodoru (w całym cyklu życia energii), ale i brak odpowiednich standardów międzynarodowych jest uważany za barierę we wprowadzaniu wodoru jako nośnika energii.

Zatem, aby przeciwdziałać trudnym problemom, należy upowszechniać wiedzę ekspercką, która w następstwie przyczyni się do podwyższenia świadomości konsumenckiej, początkowo komercyjnych odbiorców, a w niedalekiej przyszłości i indywidualnych. Takie działania pobudzą popyt, który spowoduje rozwój globalnego rynku wodorowego, zapewniając tym samym bezpieczeństwo energetyczne. Ponadto w ramach tego rozwoju należy dostosować międzynarodowe przepisy i regulacje prawne oraz standardy techniczne. Konieczne jest zatem przeprowadzenie kompleksowej analizy obecnego stanu energetyki wodorowej oraz możliwości jej rozwoju zarówno w krajach członkowskich Unii Europejskiej, jak i w krajach uważanych za liderów wodorowej rewolucji. Wydaje się, że taki przegląd pozwoli uzyskać wystarczającą podstawę dla odpowiedniego dostosowania przepisów i regulacji, które będą akceptowane przez poszczególne kraje i pozwolą zbudować stabilne warunki na międzynarodowym rynku energii.

W celu przeprowadzenia kompleksowej analizy niniejszą monografię podzielono na dwie części. W pierwszej części omówiono rolę wodoru w procesie kształtowania bezpieczeństwa energetycznego.

W rozdziale wprowadzającym wyjaśniono definicję bezpieczeństwa energetycznego, a jego zależność przeanalizowano w kontekście współczesnych wyzwań wywołanych wojną w Ukrainie. Autor rozdziału dostrzega, że dywersyfikacja źródeł dostaw i zmian odbiorców jest kwestią fundamentalną do zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego. Zastosowanie wodoru jako surowca, nośnika energii i magazynu stanowi w dzisiejszych czasach nadzieję na stabilizację łańcucha dostaw energii. Celem opracowania jest identyfikacja aktualnych wyzwań dla bezpieczeństwa energetycznego państwa z jednoczesnym odniesieniem do strategii wodorowej w Unii Europejskiej. Przeprowadzona analiza odpowiada na pytania: *W jaki sposób wykorzystanie wodoru wpłynie na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego w czasie trwania wojny w Ukrainie? Czy w związku z dywersyfikacją źródeł dostaw surowców do państw Unii Europejskiej nie będzie windowania cen paliw pierwotnych?*

Rozdział drugi zwraca uwagę na potrzebę zdekarbonizowania gospodarki UE w 2050 r., w której wodór będzie uzupełnieniem końcowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Ocena potencjału produkcyjnego wodoru powinna odnosić się do zapotrzebowania na wodór w przyszłej gospodarce bezemisyjnej. Ponieważ rolą wolnego rynku jest odpowiadanie na zapotrzebowanie rynku, kwestią czasu jest, kiedy najtrudniejsze części łańcucha wartości wodoru zostaną pomyślnie rozwiązane. Autor opracowania wielokrotnie podkreśla, że określenie metodologii

potencjału produkcji wodoru w każdym z państw nie powinno odnosić się jedynie do potencjału mocy OZE.

Rozdział trzeci odnosi się do ścisłej integracji głównych odbiorców energii, np. sektor ciepłowniczy, transportowy i przemysłowy, z sektorem wytwarzania energii. Głównymi czynnikami napędzającymi łączenie sektorów są tania energia elektryczna ze źródeł odnawialnych oraz rozwój nowych technologii, które zwiększają możliwości elektryfikacji. Typowymi przykładami zastosowań końcowych są samochody osobowe, pompy ciepła oraz produkcja wodoru i innych paliw neutralnych pod względem emisji dwutlenku węgla. Celem łączenia sektorów jest dążenie do szybkiego zastąpienia źródeł energii z paliw kopalnych na czystą energię elektryczną oraz dekarbonizacja sektorów odbiorców końcowych energii poprzez elektryfikację. Połączenie sektora energii elektrycznej z wodorem poprzez elektrolizę oraz magazynowanie wodoru umożliwi w przyszłości zwiększenie możliwości przyłączeniowych źródeł OZE w sektorze energetycznym, zmniejszając w ten sposób potrzebę alternatywnych elastycznych zasobów do zarządzania zmiennością produkcji energii z wiatru czy słońca z kolei zmniejszając całkowity koszt systemu.

W rozdziale czwartym autor przeanalizował wszystkie dostępne sposoby produkcji i przesyłu wodoru. Szeroko zostały poruszone zagadnienia dotyczące produkcji wodoru z gazu ziemnego za pomocą reformingu parowego i autotermicznego, produkcji wodoru z biomasy oraz elektrolizy wodoru. Autor tekstu zauważał, że istotną barierą w zakresie rozwoju rynku wodorowego są koszty przesyłu i budowa rurociągów wodorowych.

Wodór jest nośnikiem energii, co oznacza, że można go magazynować. Dlatego wodór jest szczególnie przydatny w systemach energii odnawialnej. Na przykład, nadwyżki energii wiatru lub energii słonecznej wytworzonej w sprzyjających warunkach można wykorzystać do produkcji wodoru za pomocą energii elektrycznej. W rozdziale piątym został przedstawiony zarys najbardziej obiecujących technologii jeśli chodzi o wielkoskalowe przechowywanie wodoru. Przedstawione technologie różnią się sposobem, kosztem i gęstością przechowywanego czynnika i gęstością energii w nim zgromadzoną. Chociaż wysoka gęstość przechowywania wodoru jest korzystna dla przechowywania wodoru, to jej względne znaczenie w porównaniu z innymi czynnikami różni się w zależności od zastosowanej technologii. Gęstość magazynowania wodoru wpływa na koszty inwestycji: wolumetryczna gęstość magazynowania wodoru określa wielkość magazynu, a grawimetryczna gęstość określa ilość materiału na jednostkową masę wodoru.

W rozdziale szóstym przedstawiono główne cele i kierunki rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce na podstawie wybranych pozycji literaturowych, głównie „Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do roku 2040” oraz wniosków z uczestnictwa w przedsiębiorczym procesie odkrywania, w szczególności cyklu warsztatów *Smart Lab* zorganizowanych na zlecenie Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości. Zwrócono również uwagę na konieczność wzrostu

tempa rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz wprowadzenia zmian w obszarze wytwarzania, przesyłania i magazynowania wodoru.

W drugiej części niniejszej monografii przeprowadzono analizę badawczą wybranych państw w zakresie stanowienia Strategii Wodorowej lub pokrewnych aktów prawnych będących jej odpowiednikiem, określono instrumenty i narzędzia gospodarki wodorowej, a także cele gospodarki wodorowej do 2050 roku oraz sposoby ich osiągnięcia. Każde z analizowanych państw zbadano również pod kątem struktury produkcji energii elektrycznej. Przedstawiono charakterystykę infrastruktury energetycznej na potrzeby gospodarki wodorowej. Ostatecznie każdy autor przedstawił wnioski i rekomendacje w zakresie bezpieczeństwa energetycznego danego państwa. Studia przypadków obejmują takie państwa takie jak: Finlandia, Szwecja, Norwegia, Francja, Hiszpania, Austria, Słowacja i Korea Południowa. Państwa te są niewątpliwie ważnym punktem na europejskiej mapie gospodarki wodorowej. W celu wyodrębnienia lidera w zakresie rozwoju gospodarki wodorowej, która bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo energetycznego danego państwa – w zakończeniu redaktorzy przedstawili analizę porównawczą tych państw.

Redaktorzy

Część I

**ROLA WODORU
W PROCESIE KSZTAŁTOWANIA
BEZPIECZEŃSTWA ENERGETYCZNEGO**

Rozdział 1

BEZPIECZEŃSTWO ENERGETYCZNE W KONTEKŚCIE WSPÓŁCZESNYCH WYZWAŃ WYWOŁANYCH WOJNĄ W UKRAINIE W 2022 ROKU

Energy security in the context of contemporary challenges
caused by the war in Ukraine in 2022

Mariusz RUSZEL

***Abstract:** The ensuring of the energy security of the state requires an appropriate energy policy, which the continuity of supplies of energy resources and energy at an acceptable price will be ensured. The war in Ukraine triggered by the Russian Federation in 2022 has shown that it is important to strategically plan and develop energy infrastructure that allows supplies from various sources. The effects of the war related to interruptions in crude oil and natural gas supplies, rising energy commodity prices, and interrupted supply chains for steel and other rare earth products result in high inflation and declines in gross domestic product in many states. This means the need to accelerate the energy transition, the basis of which will be hydrogen due to its versatile use as a fuel, energy carrier, and storage. The war in Ukraine may be a catalyst for accelerating work on hydrogen technologies and building a hydrogen market.*

1.1. Wprowadzenie

Strategicznym celem polityki energetycznej państwa jest zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego, a więc utrzymywanie w zmieniającym się procesie takiego stanu gospodarki, w którym zapewnione są dostawy surowców energetycznych i energii po akceptowalnej cenie. W ujęciu podmiotowym obowiązek zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego spoczywa na państwie, które powinno prowadzić w taki sposób politykę energetyczną, aby nie tylko zapewnić bieżące zapotrzebowanie na energię, ale również potrafić zaspokoić przyszłe potrzeby energetyczne w sposób ciągły, efektywny, zrównoważony środowiskowo¹. Spośród wielu definicji bezpieczeństwa energetycznego najbardziej powszechna jest sformułowana przez Daniela Yergina wskazująca, że jest to dostęp do surowców

¹ M. Ruszel, *Paradygmat bezpieczeństwa energetycznego* [w:] *Zarys teorii bezpieczeństwa państwa*, red. J. Gryz, AON, Warszawa 2016.

energetycznych po przystępnej cenie². Jakże aktualna jest dzisiaj kwestia bezpieczeństwa energetycznego państwa w kontekście dostępności cenowej surowców energetycznych oraz energii dla przemysłu oraz obywateli. Wpływ wojny w Ukrainie rozpoczętej w lutym 2022 r. przez Federację Rosyjską będzie przez dłuższy czas oddziaływał na poszczególne państwa. Z perspektywy pierwszych kilku tygodni wojny dostrzega się, że nową aktualność zyskują podejścia teoretyczne wskazujące na konieczność zarządzania ryzykiem geopolitycznym, regulacyjnym, technicznym, cybernetycznym, finansowym i środowiskowym³. Nie wszystkie państwa w sposób należyty zdefiniowały zagrożenia, które wynikają z braków infrastruktury energetycznej bądź też jednokierunkowych połączeń międzysystemowych gazu ziemnego. Architektura systemu gazowego zakładała budowę tłoczni gazu w określonych miejscach, co obecnie przy konieczności dywersyfikacji źródeł dostaw i zmian odbiorców jest kwestią fundamentalną.

Wojna w Ukrainie przyczyniła się do przyśpieszenia procesów politycznych mających na celu zmniejszenie zależności od importowanych paliw kopalnych z Rosji. W perspektywie krótkoterminowej stopniowe ograniczanie ilości rosyjskich surowców energetycznych na rzecz surowców i paliw z innych źródeł doprowadzi do wypychania rosyjskich z rynku. Stworzy to możliwości modernizacji i rozbudowy infrastruktury energetycznej służącej dywersyfikacji źródeł oraz zawieraniu nowych kontraktów z nowymi dostawcami. Jednakże pokazuje to również, jak ważne w bezpieczeństwie energetycznym jest strategiczne planowanie⁴. Niektóre państwa posiadają tak rozbudowaną infrastrukturę, że mogą zmienić dostawcę, inne zaś będą mogłyby dopiero po przeprowadzeniu wieloletnich procesów inwestycyjnych. Strategiczne podejście do infrastruktury energetycznej wymaga też analizy w zakresie projekcji rozwoju rynku energetycznego. Już dzisiaj dostrzega się, że spośród wszystkich istniejących form zwiększenia samowystarczalności energetycznej państwa największe nadzieje pokłada się w wodorze. Wynika to z faktu, że jego wszechstronne zastosowanie jako surowca, paliwa, nośnika energii i magazynu stanowi odpowiedź na dzisiejsze aktualne wyzwania dla bezpieczeństwa energetycznego. Projekcja podziału środków finansowych na badania i rozwój jednoznacznie wskazuje, że na jego rozwój przewidziane są największe kwoty w perspektywie nadchodzących lat. Oceniając rozwój dotychczasowych technologii w sektorze energii dostrzega się, że instrumenty wsparcia finansowego są zawsze najskuteczniejszym mechanizmem przyśpieszania upowszechnienia danych rozwiązań na rynku.

W niniejszym opracowaniu przyjęta została perspektywa postrzegania bezpieczeństwa energetycznego przez pryzmat państwa jako podmiotu odpowiedzial-

² D. Yergin, *Ensuring Energy Security*, "Foreign Affairs" 2006, t. 85, nr 2, s. 70–71.

³ L. Hughes, *The Four R's of Energy Security*, Department of Electrical and Computer Engineering Dalhousie University, Working Paper, 2009.

⁴ A. Monaghan, *Russian Oil and EU Energy Security*, "Russian Series" 05/65, Conflict Studies Research Centre, 2005, s. 2.

nego za jego gwarancję. Z kolei w ujęciu przedmiotowym analizie poddano bezpieczeństwo energetyczne będące podsystemem bezpieczeństwa ekonomicznego państwa. Celem rozdziału jest identyfikacja aktualnych wyzwań dla bezpieczeństwa energetycznego państwa z jednoczesnym odniesieniem do strategii wodorowej w Unii Europejskiej. Postawione zostało pytanie badawcze: *W jaki sposób wykorzystanie wodoru wpłynie na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego w kontekście aktualnych wyzwań?*

1.2. Obecne wyzwania dla bezpieczeństwa energetycznego

Globalne zapotrzebowanie na energię finalną z każdym rokiem systematycznie rośnie i w perspektywie 2050 r. zwiększy się o blisko 50%⁵. Szacuje się, że największy wpływ na dynamikę tego procesu będą miały państwa azjatyckie, wśród których główną rolę odegra Chińska Republika Ludowa. Z jednej strony obecnie w strukturze bilansu energetycznego w skali światowej kluczową rolę odgrywają surowce energetyczne, a więc ropa naftowa, węgiel kamienny i brunatny oraz gaz ziemny. Z drugiej strony rośnie presja społeczna po stronie konsumentów w zakresie zwiększania udziału energetyki odnawialnej. W perspektywie 2050 r. nadal dominującą pozycję zachowają surowce kopalne, lecz skala wzrostu zapotrzebowania stworzy możliwości większego rozwoju energetyki odnawialnej. Mając powyższe aspekty na uwadze dostrzega się, że obecna sytuacja geopolityczna wynikająca z wojny w Ukrainie stwarza szereg implikacji dla bezpieczeństwa energetycznego w skali globalnej, które mogą nadać dynamiki określonym procesom.

Po pierwsze, wojna w Ukrainie spowodowała zaostrzenie dyskusji politycznych w zakresie dywersyfikacji źródeł dostaw surowców energetycznych do państw Unii Europejskiej, a także presję na modyfikację struktury bilansu energetycznego. Państwa Europy Zachodniej dostrzegły ryzyko przerw w dostawach, a także odczuły ekonomiczne skutki rosnących cen surowców energetycznych oraz energii elektrycznej. Niektóre państwa, jak chociażby Polska wielokrotnie wskazywały, że Federacja Rosyjska poprzez spółki energetyczne, tj. Gazprom, realizuje swoją politykę zagraniczną, która ułatwia im osiągnięcie celów strategicznych⁶. Niemniej jednak nie wszystkie europejskie stolice z pełnym zrozumieniem odnosiły się do tych argumentów i wiele państw jak chociażby Francja, czy też Włochy do dzisiaj nie zdecydowały się na połączenie swoich systemów gazowych poprzez interkonektor, pomimo że obydwie państwa posiadają terminale LNG. Potężne braki w zakresie rozbudowy połączeń międzysystemowych, a także niewystarczająca liczba tłoczni gazu lub podpisane długoterminowe kontrakty na surowce energetyczne powodują, że nie jest możliwe zdywersyfikowanie źródeł dostaw

⁵ *International Energy Outlook 2021*, U.S. Energy Information Administration 2021.

⁶ M. Ruszel, *Wpływ rosyjsko-ukraińskich kryzysów gazowych na politykę energetyczną UE – ujęcie teoretyczne*, „Przegląd Politologiczny” 2015, nr 2, s. 49–58.

surowców energetycznych do wielu gospodarek europejskich z dnia na dzień⁷. Bez decyzji politycznej Unii Europejskiej dotyczącej embarga na surowce energetyczne nie można wypowiadać kontraktów długoterminowych w trybie natychmiastowym, lecz można z perspektywy poszczególnych państw nie przedłużać kontaktów krótkoterminowych i spotowych. Spowoduje to systematyczne zmniejszanie ilości dostaw rosyjskiego węgla, ropy i gazu. Jednakże wyzwaniem dla państw unijnych jest sprowadzanie tych surowców z innych źródeł bez dostosowanej do tego infrastruktury energetycznej. Jej rozbudowa jest niezbędnym elementem skutecznej polityki odchodzenia od rosyjskich surowców, aczkolwiek proces ten będzie realizowany w dłuższej perspektywie czasu.

Po drugie, wojna w Ukrainie doprowadziła do zwiększenia cen surowców energetycznych na światowych rynkach. Wysokie notowania ropy naftowej, sięgające 130 dolarów za ropę Brent, a także rekordowe ceny gazu ziemnego⁸ oraz węgla⁹ spowodowały dyskusje w wielu państwach europejskich nad przyspieszeniem rozwoju alternatywnych form produkcji energii. Federacja Rosyjska prowadząc wojnę na Ukrainę wraz z odpowiednimi działaniami spekulacyjnymi przyczyniła się do zwiększenia presji cenowej, której skutki w postaci wysokiej inflacji wiele państw będzie jeszcze długo odczuwać. Sytuacja ta również pokazuje, że wpływ czynników geopolitycznych na ceny jest nadal bardzo duży. Zmniejszenie ilości dostaw danego surowca na rynku światowym powoduje podniesienie jego ceny. Europa nie posiada skutecznych instrumentów interwencyjnych, zaś w skali globalnej światowe rezerwy ropy naftowej nie są aż tak duże, aby w dłuższej perspektywie czasu zmniejszać presję rynkową na obniżenie ceny. Paradoksalnie chcąc odchodzić od rosyjskich surowców energetycznych większość państw Unii Europejskiej zacznie pomiędzy sobą rywalizować o dostęp do innych surowców po możliwie najniższej cenie, aby próbować odbudować własną gospodarkę i zachować miejsca pracy. Oznacza to, że wielu rządzących może mieć dylemat polegający na tym, czy ratować gospodarkę, czy chronić klimat. Analiza dotychczasowych zdarzeń pokazuje, że w takiej sytuacji kwestie gospodarcze stają się priorytetem, a więc można szacować wzrost emisji dwutlenku węgla w perspektywie krótkoterminowej. Z perspektywy 2022 r. już potwierdzają się te przesłanki, gdyż Republika Federalna Niemiec ogłosiła zwiększenie emisji dwutlenku węgla w 2021 r. o ponad 33 mln względem 2020 r., na co istotny wpływ miały skutki nie tylko pandemii koronawirusa, ale również spekulacje na światowych rynkach w drugiej połowie 2021 r. Rosnące ceny surowców energetycznych oraz niskie ceny uprawnień do emisji dwutlenku węgla sprzyjać będą wykorzystaniu węgla

⁷ M. Ruszel, *Types of Barriers to the Integration of the EU Gas Market*, "European Integration Studies" 2015, No. 9, s. 155–160.

⁸ W dniu 7 marca 2022 r. cena gazu wyniosła 217 euro/MWh na giełdzie TTF. Porównując ją do ceny z 1 kwietnia 2022 r. zauważa się wzrost ceny o ponad 450%.

⁹ W marcu 2022 r. cena węgla w porcie ARA wyniosła 350 dolarów w kontraktach krótkoterminowych, osiągając niespotykaną od ponad 6 lat rekordową wartość.

w energetyce w okresie krótkoterminowym, a więc jak prognozuje Międzynarodowa Agencja Energii – do 2024 r.

Po trzecie, państwa Unii Europejskiej funkcjonują w ramach określonych zobowiązań prawnych wynikających chociażby z podjętych decyzji w zakresie polityki energetyczno-klimatycznej. Zgodnie z jej założeniami powinna ona rozwijać sektor energetyki odnawialnej, który do produkcji swoich elementów potrzebuje wielu surowców ziem rzadkich, a także stali, która jest kluczowym składnikiem produkcji. Warto przypomnieć, że wschodnia część Ukrainy jest zasobna w surowce o znaczeniu strategicznym takie jak: węgiel koksowy, antracytowy, rtęć, rudy żelaza, niklu, a także potężne złoża konwencjonalne i niekonwencjonalne ropy naftowej i gazu ziemnego. Ze względu na wojnę w Ukrainie przerwane zostały łańcuchy dostaw tych surowców, co z jednej strony podnosi na światowych rynkach ich cenę, a z drugiej strony wzmacnia rywalizację pomiędzy państwami o te produkty. Trzeba pamiętać, że Ukraina ma największe na świecie zasoby rudy żelaza, a ich brak na rynkach światowych wpłynie nie tylko na wzrost ich ceny, lecz opóźni dostępność wielu produktów potrzebnych również do wytwarzania elementów instalacji energetyki odnawialnej. Paradoksalnie może to prowadzić do sytuacji, że nie chcąc osłabiać tempa transformacji energetycznej niezbędne będzie w krótkim przedziale czasu zwiększenie wydobycia węgla koksowego w innych państwach, aby móc sprostać zapotrzebowaniu rynkowemu na stal. Niemniej jednak, jeżeli państwa unijne sprostają tym wyzwaniom, to niewykluczone, że w dłuższej perspektywie obecna sytuacja kryzysowa przyczyni się do jeszcze większego tempa rozwoju energetyki odnawialnej.

Po czwarte, istotnym wyzwaniem dla wielu państw europejskich będzie utrzymanie rentowności infrastruktury energetycznej, w tym przede wszystkim gazowej. Jeżeli podejmowane będą decyzje polityczne kolejnych państw w zakresie dywersyfikacji nie tylko źródeł dostaw gazu ziemnego, ale także jego struktury wytwórczej, to niezbędne będą działania umożliwiające podtrzymanie jej rentowności. Spółki energetyczne będące właścicielami gazociągów przesyłowych będą dążyły do zachowania ich wykorzystania, więc poszukiwać będą rozwiązań umożliwiających alternatywne formy produkcji gazu (np. biogaz) lub mieszania go z wodorem. Niewykluczone, że w dłuższym czasie gaz posiadający określone proporcje będzie w odpowiedni sposób nazywany i definiowany lub nawet wspierany finansowo, aby tym bardziej wypierać surowiec rosyjski.

1.3. Znaczenie wodoru dla bezpieczeństwa energetycznego państwa

Ze względu na swoją wszechstronność zastosowania wodór może być wykorzystywany jako surowiec, paliwo, nośnik energii lub magazyn. W 2020 r. została przyjęta „Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu”, która zakłada produkcję wodoru niskoemisyjnego z elektrolizerów, które zasilane będą energią elektryczną produkowaną z energetyki odnawialnej. O ile wodór

obecnie jest produkowany głównie z paliw kopalnych w skali światowej, a więc węgla oraz gazu ziemnego, o tyle w dłuższej perspektywie szacuje się, że jego niskoemisyjna forma, a więc produkcja z OZE będzie odgrywała kluczową rolę. UE sformułowała cel w perspektywie 2024 r. w zakresie rozwoju mocy elektrolizerów na poziomie 6 GW, zaś do 2030 r. 40 GW. Jednocześnie podkreśla się równoległe rozwijanie mocy wytwórczych czystego wodoru w państwach partnerskich jako cel 2 x 40 GW. Oznacza to produkcję dodatkowych 40 GW czystego wodoru w państwach sąsiadujących. UE zakładała, że jednym z państw mających największy potencjał produkcyjny jest Ukraina, lecz wojna powoduje, że plany produkcyjne w odniesieniu do tego państwa, a także cele w tym zakresie ulegają redefinicji. Stwarza to kolejne wyzwanie polityczne dla UE, która chcąc zrezygnować z rosyjskich dostaw surowców energetycznych i energii, a także nie mając możliwości sprowadzania czystego wodoru z Ukrainy powinna rozważyć wsparcie finansowe w zakresie rozwoju infrastruktury energetycznej do transportu wodoru drogą morską. Dotychczasowe doświadczenia z rynku ropy naftowej oraz gazu ziemnego pokazują, że handel drogą morską przyczynia się do dynamicznego rozwoju oraz zwiększa bezpieczeństwo dostaw do odbiorców końcowych, redukując ryzyko dla firm chcących zainwestować w rynek wodorowy.

Po drugie, rozwój gospodarki wodorowej przyczyni się do zwiększenia zapotrzebowania na wodór, a tym samym do rozbudowy rynku wodorowego. Kluczową rolę mogą odegrać w nim gazociągi, których wykorzystanie do celów transportowych zwiększy możliwości budowy partnerstw wodorowych. Jest to szczególnie istotne dla spółek energetycznych, które zainwestowały w aktywa infrastruktury energetycznej o dłuższej stopie zwrotu inwestycyjnego. Jeżeli infrastruktura ta będzie mogła być wykorzystywana w pierwszej kolejności jedynie w zaledwie kilku procentach, zaś w dłuższej perspektywie w kilkunastu, to w konsekwencji wypierać to będzie tradycyjny gaz ziemny z gazociągu. Pozwoli zachować funkcjonalność infrastruktury energetycznej, lecz wymusi również budowę nowych połączeń, a także budowę terminali do odbioru skroplonej wersji wodoru.

Po trzecie, upowszechnienie technologii wodorowych wraz ze zwiększeniem sprawności magazynowania będzie kluczowym elementem budowy bezpieczeństwa elektroenergetycznego w Unii Europejskiej. Od dynamiki tego procesu zależy, w jak dużym stopniu proces transformacji energetycznej będzie zmierzał w stronę wodoru. Konsekwencją tak budowanego rynku może być zwiększenie elektryfikacji i połączeń międzysieciowych energii elektrycznej pomiędzy państwami. Wraz z tym procesem należy się spodziewać rozwoju rynku prosumentów, który zmieni model scentralizowany na zdecentralizowany oparty na generacji rozproszonej. Im bardziej wodór upowszechni się jako paliwo dla transportu, który nie będzie elektryfikowany, tym bardziej wodór stanie się powszechny w skali miasta i gminy. Oczywiście im większa powszechność i dostępność, a także zapo-

trzebowanie rynkowe, tym bardziej będą obniżały się koszty produkcji wodoru¹⁰. Obecnie koszty produkcji czystego wodoru są bardzo wysokie (2,5 do 5,5 euro za kg) w odniesieniu do kosztu jego produkcji z paliw kopalnych z wykorzystaniem rozwiązania związanego z wychwytywaniem dwutlenku węgla (2 euro za kg) bądź też paliw kopalnych.

Po czwarte, kluczową rolę w procesie transformacji energetycznej odgrywają konsumenci. Im więcej w skali globalnej wojen, których podłożem są surowce kopalne przekładające się na cierpienie ludzi, tym bardziej opinia społeczna będzie zainteresowana wypchnięciem ich ze struktury bilansu energetycznego. Spowoduje to nie tylko zmniejszenie zależności importowej, ale też przyczyni się do upodmiotowienia obywatela, który w skali lokalnej będzie odpowiedzialny za współtworzenie swojego bezpieczeństwa energetycznego. Jeżeli nadwyżki energii elektrycznej produkowane przez poszczególne gospodarstwa domowe lub też tworzenie klastrów energii odnawialnych, które w modelu „poza siecią” (ang. *off-grid*) przyczynią się do zwiększenia produkcji wodoru, który będzie mógł być magazynowany, to wówczas osiągnięciem się dodatkową korzyść w postaci czystszej i zdrowszego środowiska naturalnego. Obecna sytuacja wymuszająca w sposób bezpośredni poszukiwanie substytutów dla rosyjskich surowców stwarza okoliczność do wielu projektów energetycznych, które mogą zyskać przychylną reakcję banków. Alternatywna forma produkcji wodoru będzie musiała uzyskać silne wsparcie finansowe w dłuższej perspektywie, aby rozwój tych technologii był coraz bardziej opłacalny.

1.4. Podsumowanie

Unia Europejska jest instytucją międzynarodową, która w dotychczasowej historii swojego istnienia osiągała największą dynamikę swojego rozwoju jako reakcję na kolejne kryzysy, których doświadczała. Obecna sytuacja kryzysowa spowodowana wojną w Ukrainie może paradoksalnie przyczynić się do przyspieszenia w zakresie rozwoju gospodarki wodorowej. Rosnąca presja społeczna w skali światowej przyczyni się do zwiększania sankcji amerykańskich oraz unijnych na przemysł, który dotychczas współpracował z Federacją Rosyjską. Spowoduje to zmianę decyzji biznesowych wielu spółek, które dążąc do redukcji ryzyka biznesowego mogą przenosić swoje inwestycje na inne rynki. Dotychczasowy model sektora energetycznego oparty o paliwa kopalne powodował, że kluczową rolę odgrywają w nim państwa je dostarczające. Proces transformacji energetycznej zwiększając rolę wodoru oraz ograniczając rolę paliw kopalnych może doprowadzić do reorientacji polityki zagranicznej wielu państw europejskich, a także wpłynie na zachowania inwestorów. Stopniowe odchodzenie od paliw kopalnych z Federacji Rosyjskiej może spowodować trend w skali globalnej, w którym prym

¹⁰ Zielony wódór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Energetyczno-Klimatycznej UE w Polsce, DISE, PSEW, Wrocław 2021, s. 59.

będą wiodły państwa unijne. W pierwszej kolejności ograniczenie obejmie węgiel i ropę, zaś w dłuższej perspektywie gazu ziemnego. Zredukuje to ryzyko związane z gwałtownymi wzrostami cen surowców energetycznych oraz energii wywołanych poprzez jednego z eksporterów. Jeżeli analizowane procesy będą miały miejsce to inwestorzy poszukując bezpiecznych i długoterminowych stop zwrotu swoich środków finansowych będą alokować je w technologii wodorowe oraz magazynowanie. Wydaje się, że właśnie połączenie tych dwóch komponentów jest odpowiedzią na aktualne wyzwania dla bezpieczeństwa energetycznego, które pojawiły się w związku z wojną w Ukrainie. Przyspieszenie rozwoju niskoemisyjnej gospodarki wodorowej w dłuższej perspektywie może oznaczać konieczność zwiększenia emisji dwutlenku węgla i wykorzystania węgla koksowego w perspektywie krótkoterminowej. Wpłyne na to przerwanie łańcuchów dostaw surowców ziem rzadkich i stali z rynku ukraińskiego z jednoczesnym rosnącym zapotrzebowaniem na te produkty rynku europejskiego.

Kluczową rolę w nadaniu dynamiki opisywanym procesom nada zwiększenie zapotrzebowania na wodór przez odbiorców końcowych. Rosnąca liczba konsumentów po stronie przemysłu, transportu i najbardziej energochłonnych branż, w których wodór będzie miał zastosowanie przyspieszy masową jego produkcję. Równoległe implementowanie technologii magazynowania rozwiąże problemy ze stabilizacją sieci elektroenergetycznych, pozwalając na większą produkcję niestabilnych form energii w postaci energetyki odnawialnej. Oznacza to, że fundamentalną rolę w tym procesie odgrywać będą państwa posiadające największy potencjał nadprodukcji energii elektrycznej z energetyki odnawialnej z jednoczesnym jej magazynowaniem. Im bardziej rozwijać się będą magazyny, tym bardziej system elektroenergetyczny będzie mógł być bezpieczny. Rosnące wykorzystanie stabilnych form energii elektrycznej pozwoli na zmniejszenie wykorzystania paliw kopalnych, z których w pierwszej kolejności wypychane będą te pochodzące z Rosji. Pozytywnym efektem będzie rosnąca samowystarczalność energetyczna oraz ograniczenia ryzyka presji cenowej na światowych rynkach, które podlegają ogromnemu wpływowi czynników geopolitycznych. W konsekwencji w dłuższym czasie ten proces doprowadziłby do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla oraz pomoże w realizacji polityki zrównoważonego rozwoju zgodnie z założeniami polityki klimatycznej, zaś inwestorom pozwoli odnaleźć nowe aktywa po wyjściu z niestabilnych rynków zagrożonych ryzykiem inwestycyjnym.

Bibliografia

1. Hughes L., *The Four R's of Energy Security*, Department of Electrical and Computer Engineering Dalhousie University, Working Paper, 2009.
2. *International Energy Outlook 2021*, U.S. Energy Information Administration 2021.
3. Monaghan A., *Russian Oil and EU Energy Security*, "Russian Series" 05/65, Conflict Studies Research Centre, 2005, s. 2.
4. Ruszel M., *Paradygmat bezpieczeństwa energetycznego [w:] Zarys teorii bezpieczeństwa państwa*, red. J. Gryz, AON, Warszawa 2016.

5. Ruszel M., *Types of Barriers to the Integration of the EU Gas Market*, "European Integration Studies" 2015, No. 9.
6. Ruszel M., *Wpływ rosyjsko-ukraińskich kryzysów gazowych na politykę energetyczną UE – ujęcie teoretyczne*, „Przegląd Politologiczny” 2015, nr 2.
7. Yergin D., *Ensuring Energy Security*, "Foreign Affairs" 2006, No. 2, t. 85.
8. *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Energetyczno-Klimatycznej UE w Polsce*, DISE, PSEW, Wrocław 2021.

Rozdział 2

ZNACZENIE WODORU W PROCESIE TRANSFORMACJI SEKTORA ENERGII

The importance of hydrogen in the transformation of the energy sector

Tomoho UMEDA

Abstract: *Role of hydrogen in provision of energy security is profound for several reasons. Hydrogen presents high energy storage potential and for the same reason is an efficient energy carrier capable of decarbonizing all sectors that won't be prone for direct electrification. Another key hydrogen function is its complementary role for Renewable Energy Sources. It can not only address the intermittency character of RES, but be also considered as the actual enabler of RES development when transmission grid will get saturated with too many intermittent PV, onshore and offshore farms. All of that contributes to hydrogen as a energy security and sovereignty supporter. Its role as the obligatory pillar in net zero EU economy is guaranteed on subnational level in the context of energy transition, which after dramatic reshuffle in Europe security situation only gains more attention (i.e. RePOWER EU). Hydrogen production potential assessment should refer to hydrogen demand in future zero emission economy. Applying analysis to the transforming economy, from fossil fuels and energy carriers reliance towards renewability, can lead to miss conclusions reflecting technology bottlenecks that are present today. As free market role is to answer the market demand, it is a matter of time when most challenging hydrogen value chain parts will be addressed successfully. As only no-emission, renewable hydrogen can be used in netZero realm of 2050, measures and assets involved supporting its deployment as RES potential and water availability will foster cost effectiveness of clean hydrogen production. Geographical location has another important aspect, as countries located on logistical crossroads can be obliged to develop extensive clean hydrogen infrastructure.*

2.1. Wprowadzenie

Rola wodoru w procesie kształtowania bezpieczeństwa energetycznego jest pochodną trzech głównych czynników: Polityki Klimatycznej Unii Europejskiej, bezpieczeństwa energetycznego rozumianego jako niezależność i suwerenność energetyczna państwa oraz uniwersalności zastosowań wodoru jako wydajnego nośnika energii.

2.2. Polityka Klimatyczna UE – transformacja sektora energii

O wodorowej rewolucji możemy mówić od momentu wydania przez Komisję Europejską w grudniu 2019 r. komunikatu o Nowym Zielonym Ładzie, który wyraża ambicję Europy do stania się pierwszym neutralnym klimatycznie kontynentem na świecie. Wyznaczony przez Prawo Klimatyczne UE cel redukcji emisji gazów cieplarnianych do zera netto w 2050 r. czy przyjęty przez Radę Europejską, zaostrożony pośredni cel redukcji z -40 do -55% dają potężny impuls do ograniczania emisji, co nazywane jest procesem dekarbonizacji. Do tej pory gospodarki państw UE (i nie tylko) były napędzane przez energię pochodzącą ze spalania węglowodorów, takich jak ropa, gaz ziemny i węgiel. W zdekarbonizowanej gospodarce zastąpi je energia elektryczna pochodząca w głównej mierze z Odnawialnych Źródeł Energii, wsparta w podstawie energią nuklearną, a we wszystkich procesach i aplikacjach, które nie poddają się elektryfikacji, wykorzystany zostanie wodór, ponieważ jego spalaniu nie towarzyszą emisje gazów cieplarnianych. Na obecnym etapie nie sposób jest określić, jakie będą proporcje pomiędzy wodorem a energią elektryczną w docelowym modelu gospodarczym, również ze względu na fakt, że wiele technologii, które umożliwią osiągnięcie tego stanu rzeczy, znajduje się obecnie we wczesnej fazie rozwoju. Niemniej jednak, szeroko rozumiany przemysł ciężki, wszystkie te branże, w których procesy produkcyjne wymagają generacji wysokotemperaturowego ciepła (stalowy, żelazny, szklany, papierniczy, cementowy, chemiczny itp.), będą zmuszone do wykorzystania wodoru jako paliwa w wysokotemperaturowych procesach produkcyjnych.

Kluczowe czynniki, które zadecydowały o wyborze wodoru jako filaru dekarbonizacji, oprócz korzyści klimatycznych, to jego ogromna dostępność w atmosferze ziemskiej, wysoka gęstość energetyczna i wartość opałowa oraz przede wszystkim komplementarna rola w stosunku do źródeł OZE. Wodór może bowiem stanowić chemiczny magazyn energii elektrycznej, a sam służyć jako paliwo lub surowiec do wytwarzania amoniaku czy metanolu, które również mogą posłużyć do dekarbonizacji takich branż, jak fracht morski, czy ciepłownictwo (w formie paliwa do turbin).

Rozwój gospodarki wodorowej jest wyzwaniem dla całej Unii Europejskiej, dlatego Komisja Europejska w lipcu 2020 r. ogłosiła „Strategię w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu”, czyli dokument o charakterze miękkiego prawa, kreślącego wizję i metody wdrożenia technologii wodorowych. Najważniejszym postulatem w niej zawartym jest, podkreślenie roli wodoru bezemisyjnego, a więc powstającego w drodze elektrolizy wody zasilanej Odnawialnymi Źródłami Energii jako docelowego modelu produkcji, decydującego o faktycznej dekarbonizacji. Tymczasem Polska jest jednym z największych w Europie producentów wodoru emisyjnego, który wytwarzany w procesie reformingu parowego metanu prowadzi do emisji 10 kg CO₂ na każdy 1 kg wyprodukowanego tak wodoru. Szybki szacunek mówi więc, że aktualnie wytwarzany w Polsce wodór

technologiczny jest odpowiedzialny za ok. 10 mln ton emisji CO₂, co stoi w sprzeczności z celami redukcji emisji gazów cieplarnianych.

Dodatkowo, wodór ten jest na bieżąco wykorzystywany do produkcji amoniaku, obrabiania ropy naftowej (*hydrocracking*), wytwarzania gazu koksowniczego itd. Jego rola jest zatem okrojona do tymczasowego gazu procesowego, co w kontekście budowania kompetencji gospodarki wodorowej przyszłości, ma ograniczoną wartość. Przywoływany często w sferze politycznej, również w Polskiej Strategii Wodorowej, 1 mln ton wodoru jest zatem retoryczną sztuczką, ponieważ jego produkcja wynika z procesu technologicznego wytwarzania nawozów, obróbki rafineryjnej produktów ropopochodnych, gazu koksowniczego i innych, w których wodór jest momentalnie zużywany.

Wdrożenie technologii wodorowych w kontekście polskim zbiegnie się w czasie z gwałtownym przyspieszeniem w obszarze rozwoju nowych źródeł OZE, co jest konieczne do spełnienia celów klimatycznych. Obecnie Polska konsumuje rocznie ok. 170 TWh energii elektrycznej (2020), przed pandemią było to ponad 170 TWh, zużycie paliw kopalnych takich jak ropa naftowa i gaz ziemny jako główne paliwa w sektorze transportu dodają kolejne 330 TWh energii, która nie jest ujmowana w statystykach, a te sektory również muszą ulec pełnej dekarbonizacji do roku 2050. Oznacza to, że nie uwzględniając wzrostu zapotrzebowania na energię, będącego pochodną rozwoju gospodarczego i bogacenia się społeczeństwa, Polska aktualnie ma zapotrzebowanie dekarbonizacyjne na poziomie 500 TWh energii rocznie. W niektórych szacunkach, w roku 2050 będzie to nawet 700 TWh. Aktualnie, OZE odpowiedzialne są za wytworzenie ok. 30 TWh energii rocznie (zainstalowane jest 17,4 GW mocy OZE). Przyrost nowych mocy wymaga rozwoju sieci elektroenergetycznych w całym wachlarzu napięć. Dotychczasowy model energetyki w Polsce, po części odziedziczony z okresu PRL, jak i wynikający z technologii wytwarzania (spalania węgla), jest modelem centralnym, charakteryzującym się obecnością dużych aktywów wytwórczych, zlokalizowanych w obszarach o najgęstszym zaludnieniu oraz dostępności surowca energetycznego – węgla (Śląsk). Rozwój OZE, odwraca tę trajektorię w kierunku modelu rozproszonego, o nieregularnej generacji (zmienna dostępność wiatru i słońca), co przy zakładanej dynamice stanowi nieosiągalne wyzwanie dla systemu dystrybucji energii. Niebagatelny wpływ na pogorszenie tej sytuacji, a jednocześnie zbliżenie do celu neutralności klimatycznej będzie miało rozwinięcie morskiej energetyki wiatrowej oraz energetyki nuklearnej. Obecność obu tych technologii jest wysoce pożądana, jednocześnie generując potrzebę rozwoju kapitałochłonnych połączeń energetycznych wysokich napięć, wyprowadzających tę moc do odbiorców na całym terytorium kraju. Oba te filary przyszłej polskiej energetyki zostaną zlokalizowane na północy kraju, offshore ze względów oczywistych, a elektrownia jądrowa ze względu na konieczny bieżący dostęp do wody morskiej jako czynnika chłodzącego.

Wodór odnawialny stanowi nie tylko nadzieję na domknięcie procesu dekarbonizacji w przemyśle i ciepłownictwie, ale przede wszystkim może okazać się

panaceum na dysproporcję w tempie rozwoju źródeł wytwórczych i nienadążającym rozwojem sieci dystrybucyjnej, bo ze swej natury rozwijanym w trybie reakcyjnym.

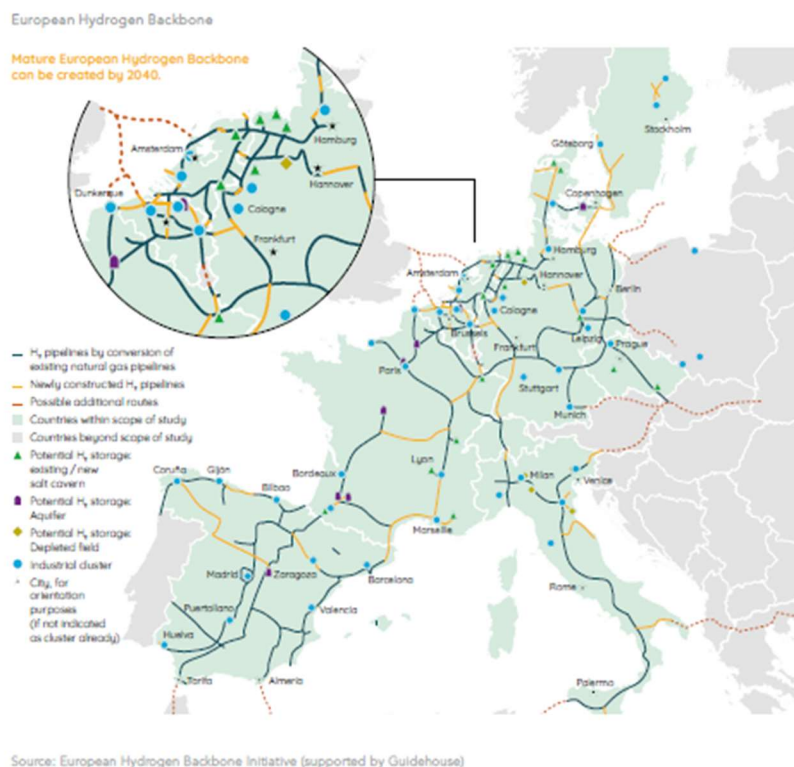
Zwrot w kierunku modelu energetyki rozproszonej pociąga za sobą umocnienie roli samorządu terytorialnego, jako lokalnego dysponenta władzy politycznej, można więc mówić nie tylko o rewolucyjnym charakterze gospodarczym ale i politycznym wdrażania technologii wodorowych.

Rewolucja wodorowa przyniesie zatem nieoczekiwany wzrost roli samorządu terytorialnego, jako gospodarza aktywów publicznych ale i mającego „obsłużyć” infrastrukturalnie i systemowo inicjatywy prywatne. Samorząd, dzisiaj zobligowany prawnie do zaopatrywania mieszkańców w usługi publiczne, takie jak transport publiczny czy ciepło, może otrzymać zadania związane z zarządzaniem akumulacją zasobów energii na swoim terytorium, aby odciążać jednostki centralne i system dystrybucji. O dekarbonizacji swoich aktualnych aktywów w tym zakresie nie wspominając.

Wiodąca rola samorządu terytorialnego wynika również z ograniczeń fizykochemicznych i technologicznych samego wodoru, który powyżej temperatury – 250°C przyjmuje postać gazową, będąc jednym z najłżejszych i najbardziej dyfundujących gazów. Nie jest podatny na wielkoskalowe magazynowanie. Te same cechy, które czynią zeń tak atrakcyjny nośnik energii, stanowią o konieczności przestrzegania surowych norm bezpieczeństwa. Oznacza to, że centralistyczne podejście w odniesieniu do wodoru jest ze względu na jego właściwości fizykochemiczne niedostępne albo nierentowne. Rozwinięcie technologii transportowania wodoru dostosowanymi sieciami gazowymi napotyka na dwa zasadnicze wyzwania technologiczne, tzn. konieczność utrzymania wymaganego poziomu czystości surowca na całym szlaku przesyłu surowca, a także wydajność energetyczną procesu – siła potrzebna do uzyskania wymaganej kompresji w celu transportu najłżejszego gazu. Nie znaczy to, że przesył wodoru sieciami gazowymi jest wykluczony, ponieważ w Europie nie tylko takowe istnieją ale planowany jest intensywny rozwój dedykowanej infrastruktury wodorowej (*Hydrogen Backbone*).

Niemniej idea rozproszonej energetyki odnawialnej, nieograniczonej dostępem do sieci przesyłowej jest na tyle atrakcyjnym scenariuszem, iż już powstają projekty tzw. *off-grid*, czyli pozasieciowe. Powodem, dla których inwestorzy omijają sieć przesyłową/dystrybucyjną, są nie tylko opłaty pobierane przez operatorów (TSO), ale również, jak w polskim przypadku, konieczność uzyskania warunków przyłączenia do sieci jako niezbędnego elementu umożliwiającego rozpoczęcie inwestycji OZE. W 2021 r. Tauron odmówił wydania zgody na warunki przyłączenia dla 25% złożonych wniosków¹.

¹ Globenergia, *Przyłącza instalacji OZE – ile wniosków złożono w 2021 roku?*, <https://globenergia.pl/przylacza-instalacji-oze-ile-wnioskow-zlozono-w-2021-roku/> (dostęp: 16.04.2022 r.).



Rys. 1. Wizja dedykowanej infrastruktury transportu wodoru w całej Europie przez European Hydrogen Backbone

Fig. 1. Vision of a dedicated hydrogen transport infrastructure across Europe by the European Hydrogen Backbone.

Źródło: Hydrogen Europe, *Clean Hydrogen Monitor* 2020.

W polskiej debacie publicznej wodor traktowany jest głównie z perspektywy zamiennego paliwa transportowego, co wynika z najwyższego stopnia zaawansowania technologii (dostępność komercyjna pojazdów, infrastruktury tankowania, również w odniesieniu do pojazdów szynowych). Nie jest to „zły” kierunek myślenia o wodorze, zwłaszcza przez wzgląd na położenie Polski na zbiegu głównych szlaków komunikacyjnych i logistycznych. Jednak klasyfikowanie wodoru tylko przez wzgląd na jego zastosowanie w ogniach paliwowych dla transportu jest daleko idącą krótkowzrocznością, niejako pomija jego strategiczną rolę, jaką ma do odegrania w procesie usuwania emisji z gospodarki krajów UE.

Wodor jako paliwo będzie miał do odegrania znaczącą rolę w sektorze rolno-spożywczym, zarówno do napędu maszyn, jak i magazynowania energii dla wszystkich urządzeń, których nie uda się zelektryfikować.

Warto mieć na uwadze, że sytuacja Polski w odniesieniu do rozwoju gospodarki wodorowej jest na wskroś wyjątkowa. Decydują o tym:

1. specyficzny punkt startowy w procesie dekarbonizacji (jeden z najwyższych % udziałów węgla w wytwarzaniu energii w UE);
2. położenie na głównym szlaku komunikacyjnym wschód-zachód, południe-północ;
3. dostęp do morza i potencjał morskiej energetyki wiatrowej;
4. powierzchnia kraju i wynikający z niej współczynnik potencjału instalacji PV;
5. specyficzna struktura energetyki zawodowej i ciepłej;
6. sieć ciepłownicza (jedna z największych na świecie i największa w UE);
7. konkurencyjność polskiej gospodarki i wynikająca z niej rola zaplecza produkcyjno-przemysłowego UE, zwłaszcza Niemiec, która przypuszczalnie tylko wzrosła w wyniku pandemii COVID-19 i zjawiska *reshoring'u* (powrotu inwestycji przemysłowych do Europy z Dalekiego Wschodu);
8. rola samorządu terytorialnego, który dzięki dużej autonomii daje solidne podstawy do politycznej kontroli i zarządzania lokalnego – synergię energetyki rozproszonej, wykorzystującej wodór, oraz jednostek samorządu terytorialnego.

Wodór nie stanowi konkurencji dla energetyki nuklearnej, ale pozwoli na szersze wykorzystanie źródeł OZE. Jest nośnikiem energii, a nie jej źródłem pierwotnym. Jest i będzie jednym z filarów energetyki niskoemisyjnej, a od roku 2050 bezemisyjnej Unii Europejskiej. Niezależnie od roli Polski w UE, czy nawet samej jej obecności w strukturach Wspólnoty, będzie jedynym dostępnym rozwiązaniem dla szeregu branż energochłonnych. W wyniku przepisów takich jak np. *Carbon Border Adjust Mechanism*, CBAM (cło węglowe, naliczane od obciążenia emisyjnego danego produktu niewytworzonego w reżimie klimatycznym obowiązującym na terenie UE) jego użycie będzie jedyną metodą na utrzymanie konkurencyjności wielu polskich przedsiębiorstw, których procesy nie ulegną pełnej elektryfikacji. Z racji cyklu życia inwestycji w sektorze energetycznym (20–25 lat), a także rosnącego tempa ambicji klimatycznych i ogólnego kierunku regulacyjnego, wodór bezemisyjny pozostaje jednym z niewielu obszarów o względnej stabilności i przewidywalności odnośnie do lokowania projektów.

Rola wodoru w zapewnianiu bezpieczeństwa energetycznego jest wzmacniana przez uniwersalność aplikacji w jakich może być wykorzystany. Warto bowiem zdawać sobie sprawę, że rynek wodoru dzisiaj, gdzie wykorzystuje się go głównie jako gaz techniczny, jest jedynie małym fragmentem przyszłego wolumenu. Aktualnie wąskim gardłem technologii wodorowych jest magazynowanie wodoru, wymagające dedykowanych zbiorników ciśnieniowych. Jednocześnie badane i rozwijane są możliwości bezciśnieniowego magazynowania wodoru w kavernach solnych oraz jego chemicznego przetwarzania na tzw. zielone derywaty wodoru odnawialnego, czyli amoniak i metanol. Obie te substancje mogą być

wykorzystane jako paliwo dla frachtu morskiego, jak i paliwo dla stacjonarnych urządzeń energetyki zawodowej i kogeneracji (CCGT). Największy operator logistyki morskiej A.P. Møller-Mærsk A/S zamówił 12 dużych kontenerowców napędzanych odnawialnym (tzw. zielonym) metanolem, który powstaje na bazie wodoru odnawialnego z elektrolizy i dwutlenku węgla pochodzącego z wychwytu atmosferycznego (ASU)².

Firma Kawasaki produkuje turbiny klasy F zdolne do spalania amoniaku, a wkrótce mieszaniny 100% wodorowej. Podstawą dla produkcji zielonego amoniaku i e-metanolu jest wodór odnawialny, który stanowi trzon bezemisyjnego transportu ciężkiego przyszłości. Niezależnie od tego, czy rozwój technologii pozwoli na upowszechnienie ogniw paliwowych zasilanych samym wodorem, czy też e-metanolem. Podobnie istotna jest rola wodoru w odniesieniu do eliminowania emisji z transportu lotniczego, zarówno poprzez bezpośrednie zasilanie floty powietrznej (konceptyjne projekty Airbus Zero-e, czy konceptyjne rozwiązania proponowane przez Zero Avia), jak i pośrednie przy użyciu zrównoważonych paliw lotniczych (*Sustainable Aviation Fuels* – SAF). Te ostatnie, podobnie jak e-metanol, są chemicznymi odpowiednikami konwencjonalnej ropy naftowej i kerozyny, z tą zasadniczą różnicą, że wiązania wodorowe pochodzą z surowca wytworzonego metodą elektrolizy, a węgiel ze separowanego z powietrza CO₂.

2.3. Bezpieczeństwo energetyczne – zmiana geopolityczna

Agresja Rosji na Ukrainę trwająca od 24 lutego 2022 r. doprowadziła do zasadniczej zmiany pojmowania bezpieczeństwa energetycznego przez kraje UE. W klasycznym trylemacie energetycznym, w którym wierzchołki trójkąta wyznaczone są przez bezpieczeństwo energetyczne, ekonomię i poszanowanie środowiska, do tej pory ekonomia brała górę nad pozostałymi dwoma obszarami. Wprowadzenie Polityki Klimatycznej, zaczęło coraz istotniej przechylać ciężar w kierunku ochrony środowiska, niemniej w dalszym ciągu wiele państw liczyło na powolny proces transformacji przy użyciu rozwiązań pomostowych, którymi w energetyce miał być przede wszystkim gaz ziemny. Uzależnienie od importu nośników energii na poziomie ok. 40% sumarycznej wartości energii dla całej UE, skutkuje tym, że wojna w Ukrainie ma nie tylko potencjał polityczny ale również gospodarczy, aby oddziaływać na wspólnotę Europejską w sposób daleko bardziej znaczący niż kwestie polityki międzynarodowej. Mowa jest w pierwszej kolejności o największym kryzysie bezpieczeństwa od czasu II wojny światowej, w związku z szerokim wykorzystaniem śmiertelnych rodzajów uzbrojenia przez Federację Rosyjską i możliwościach deeskalacji działań zbrojnych. Wśród

² A.P. Moller, *Maersk engages in strategic partnerships across the globe to scale green methanol production by 2025*, Press releases, 2022, <https://www.maersk.com/news/articles/2022/03/10/maersk-engages-in-strategic-partnerships-to-scale-green-methanol-production/> (dostęp: 16.03.2022 r.).

środków podjętych przez państwa reprezentujące nie tylko UE, ale szeroko rozumiany Zachód, znalazły się stale poszerzane, bezprecedensowe sankcje gospodarcze mające powstrzymać możliwość długofalowej zdolności finansowania własnych sił zbrojnych przez Rosję. Poszukując najbardziej dotkliwych dla agresora instrumentów Europa napotyka przeszkodę w postaci uzależnienia energetycznego od importu surowców energetycznych z Rosji. Aby szybko zrewidować swoje stanowisko, Niemcy, największa gospodarka Europy, zdecydowała o trwałym wycofaniu się z projektu drugiej nitki gazociągu Nord Stream (2), będącego na etapie zakończonej budowy i w trakcie procesu certyfikacji. Aby lepiej uświadomić sobie, jak duże znaczenie gospodarcze miał ten projekt dla Niemiec warto zwrócić uwagę, że to właśnie Niemcy forsowały w UE politykę gazową, jako pomost pomiędzy dotychczasowym modelem energetyki opartym na surowcach kopalnych a docelowym bezemisyjnym, w zdekarbonizowanej rzeczywistości roku 2050.

Gaz stanowi dla Niemiec podstawę stabilizującą system energetyczny w wyniku decyzji o wygaszeniu energetyki jądrowej po katastrofie w Fukushima w 2011 r. Niemcy będąc jednym z adwokatów i promotorów polityki klimatycznej z wysokim udziałem OZE w swoim miksie energetycznym, (przekraczającym 48%) liczyły na dodatkowe synergii wynikającą z faktu, że wodór jest gazem. Zatem infrastrukturę początkowo dostosowaną do gospodarki bazującej w podstawie na gazie można będzie stopniowo, ewolucyjnie przestawiać na wodór, w miarę przełamywania kolejnych barier technologicznych. Zapowiedź szybkiego wycofania z importu surowca z Rosji ma zatem podobnie fundamentalne znaczenie jak podjęta przed dekadą decyzja o wycofaniu się z energetyki jądrowej. Od samego początku wojny w Ukrainie rząd niemiecki ustami kanclerza Olafa Scholza mówi o rozbudowie infrastruktury gazowej w celu otwarcia nowych rynków gazu dla Niemiec, głównie terminali LNG, ale również gazociągów z Norwegii, przy założeniu, że w przyszłości będą zdolne do transportu wodoru. Można zatem domniemywać, że podobnie jak stało się w przypadku pandemii COVID-19, władze UE będą chciały wykorzystać sytuację do jeszcze szybszego wdrażania polityki klimatycznej, dodatkowo motywując to dbałością o bezpieczeństwo dostaw energii i uniezależnianie się od agresywnego państwa, będącego tradycyjnym dostawcą nośników energii.

Wojna w Ukrainie ma szansę stać się katalizatorem transformacji energetycznej. Wzrost cen podstawowych jej nośników, który widoczny jest tak na rynku hurtowym, jak konsumenckim, przełamanie kolejnych psychologicznych barier cenowych, jest w pewnym sensie przyspieszeniem zjawisk, których bylibyśmy świadkami niezależnie od wybuchu tego konfliktu. Z pewnością aprecjacja cen postępowałaby wolniej, niemniej takie propozycje legislacyjne jak objęcie systemem ETS paliw płynnych, dyrektywa o opodatkowaniu energii w zależności od efektywności środowiskowej czy zmiana systemu kalkulacji emisji przez pojazdy w UE (*Emission Standard Regulation*), skutkowałyby znaczącym wzrostem cen na stacjach paliw. Wojna przyspieszyła to zjawisko i uświadomiła społeczeństwu, że paliwa mogą osiągać ceny do tej pory trudne do wyobrażenia.

Scenariusz windowania kosztów gospodarki opartej na paliwach kopalnych jest sprawdzonym sposobem na stymulowanie rynków w kierunku transformacji nisko i zeroemisyjnej. Doskonałym tego przykładem jest system handlu emisjami CO₂ EU ETS. Rozszerzanie go na kolejne sektory, co jest już zapowiedzianym działaniem przez pakiet Fit-for-55, będzie tylko pogłębiać presję kosztową w celu dekarbonizacji.

Wodór ma tu do odegrania szczególną rolę jako nośnik, który w połączeniu z niezależnością energetyczną, jaką dają własne źródła OZE, pozwala wyprodukowaną dzięki nim energię efektywnie magazynować zarówno w ujęciu dobowym, jak i sezonowym. Pełni zatem rolę stabilizującą dla systemu wysyczonego źródłami odnawialnymi, które ze swej natury mają charakter niesterowalny.

Tym bardziej istotna jest rola wodoru w sektorze ciepłowniczym, gdzie alternatyw w postaci bezpośredniej elektryfikacji w ujęciu systemu centralnego, obecnego w blisko 400 gminach w całej Polsce i setkach miast dawnego Bloku Wschodniego trudno poszukiwać, szczególnie biorąc pod uwagę zmiany w cyklu dobowym jeśli chodzi o podaż energii ze źródeł odnawialnych. Często pomijamy, a mającym szeroki potencjał elementem jest ciepło odpadowe generowane zarówno po stronie wytwórczej (elektrolizery), jak i konsumującej wodór (ogniwa paliwowe). Biorąc pod uwagę bariery w rozwoju wodoru jako bezpośredniego paliwa w kotłach ciepłowniczych (stabilizacja płomienia), jak i temperatury generowane przez spalanie 100% mieszaniny, ciepło odpadowe wydaje się aktualnie dużo bardziej perspektywiczną opcją.

2.4. Metodologia określenia potencjału produkcji wodoru w państwie

Spojrzenie na metodologię określania potencjału produkcji wodoru w danym kraju wymaga podejścia horyzontalnego, zarówno przez pryzmat celu czyli dekarbonizacji, jak i środków, jakimi dany kraj dysponuje na ścieżce jej osiągnięcia. Dekarbonizacja rozumiana jako eliminacja wszelkich emisji gazów cieplarnianych netto, czyli takich, których nie jest w stanie pochłonąć ekosystem, jest zarówno procesem jak i celem ustanawianym przez Prawo Klimatyczne UE (2050 r.). Sposobem na jej realizację jest pełna elektryfikacja gospodarki, a tam gdzie nie będzie to możliwe, stosowanie technologii wodorowych. Energia elektryczna o zerowym śladzie węglowym, będzie wówczas pochodzić z Odnawialnych Źródeł Energii, być może zabezpieczonych w tzw. podstawie energetyką jądrową.

Na potrzeby niniejszej publikacji proponuje się podejście polegające na uwzględnieniu i odnoszeniu się do potencjału produkcji wodoru w docelowym modelu energetycznym, czyli po dokonaniu się transformacji energetycznej w kierunku bezemisyjnym, co wynika z różnych punktów wyjściowych, w jakich aktualnie znajdują się poszczególne państwa i ich systemy energetyczne. Szacowanie potencjału produkcji wodoru dla systemu będącego w trakcie transformacji, jest o tyle niecelowe, gdyż początkowo wodór będzie wytwarzany (już to się dzieje)

przy użyciu różnych technologii, w tym aktualnie, głównie emisyjnych, a zatem, konkuruje on na rynku jako surowiec wytwarzany, tymi zróżnicowanymi metodami, w „starej” gospodarce zbudowanej w oparciu o produkcję energii ze źródeł kopalnych. Potencjał jego produkcji odnosi się więc do początkowego/wyjściowego modelu energetycznego, który jest zasadniczo odmienny od pożądanego i docelowego. Niniejsza analiza pomija zatem aspekt wykonalności procesu pełnej dekarbonizacji; przyjmuje się że jest ona możliwa, a kierunek nakreślony w Nowym Zielonym Ładzie oparty jest na realnych i możliwych do osiągnięcia założeniach.

Jako docelową metodę produkcji wodoru przyjmuje się tę, która jest wskazywana w unijnej Strategii Wodorowej (Strategia Wodorowa na rzecz Europy neutralnej dla klimatu), ale również w Polskiej Strategii Wodorowej. Jest to produkcja wodoru bezemisyjnego przy użyciu technologii elektrolizy wody zasilanej przez energię ze źródeł odnawialnych. Wynika to wprost z okresu trwałości inwestycji, szacowanego w energetyce na 15–20 lat oraz tempa zaostrzania polityki klimatycznej. Takie podejście pozwala na zachowanie odporności na dalsze zmiany, ponieważ gospodarka zasilana wodorem odnawialnym nie generuje emisji gazów cieplarnianych, a jednocześnie możliwe są do uzyskania wysoce pożądane synergii międzysektorowe, dzięki którym oprócz wytwarzania wodoru można wykreować szereg strumieni wartości.

W związku z powyższym, przyjmuje się, że potencjał produkcji wodoru w danym państwie będzie odpowiadał *de facto* potrzebom/popytowi na surowiec w zdekarbonizowanej gospodarce, jednocześnie będąc w niej obecnym równolegle jako chemiczny magazyn energii odnawialnej, którą głęboko wysyczone będą systemy energetyczne poszczególnych państw. Oznacza to, że w modelu docelowym będą funkcjonowały równolegle dwa „rynki” wodoru, jeden surowcowy, drugi „magazynowy” czy też energetyczny. Niniejsza analiza nie przesądza, że każde państwo będzie w stanie pokrywać własne zapotrzebowanie na wodór samodzielnie. Dostępne dane wskazują, że szczególnie tak mocno uprzemysłowione kraje jak Niemcy nie będą w stanie zapewnić sobie wodoru rodzimej produkcji i zmuszone będą do importu surowca z zagranicy. Mimo że w domenie publicznej stosuje się wobec przesyłu wodoru jako gazu analogię myślenia jak wobec gazu ziemnego, należy pamiętać że rozwój dedykowanej infrastruktury będzie nie tylko kosztowny i czasochłonny, ale przede wszystkim tworzy wyzwanie technologiczne. Magazynowanie i transportowanie wodoru stanowi aktualnie wąskie gardło łańcucha technologii, co wynika wprost z właściwości fizykochemicznych wodoru jako nie tylko najlżejszego pierwiastka w całym układzie okresowym, ale przede wszystkim charakteryzującego się bardzo wysoką skłonnością do dyfundowania. Oznacza to, że przesył wodoru na duże odległości oprócz pogorszenia bilansu energetycznego (kompresja) będzie wymagał ponownej weryfikacji czystości samego gazu, w zależności od przeznaczenia i aplikacji, do jakiej ma zostać finalnie użyty.

Określenie, który z tych rynków przyjmie postać dominującą w poszczególnych krajach, wynika z szeregu czynników. Przede wszystkim należy uwzględnić popyt na wodór surowcowy wynikający z poziomu rozwoju przemysłu ciężkiego który nie ulegnie elektryfikacji. Kraje o wysokim udziale przemysłu ciężkiego, energochłonnego, czy z jakiegokolwiek innego powodu wykorzystującego wodór, będą reprezentowały szeroki potencjał po stronie popytu na wodór surowcowy.

Lokalizacja poszczególnych państw, a zatem to, czy znajdują się na szlaku komunikacyjnym, tak drogowym, kolejowym, jak i morskim zdecyduje o skali inwestycji w infrastrukturę tankowania/bunkrowania wodoru jako paliwa dla transportu. Jest to oczywiście uzależnione od rozwoju technologii w tym obszarze, jednak obecnie nic nie wskazuje na to, aby bariera powstrzymująca implementację bateryjnych rozwiązań w ciężkim transporcie miała zniknąć – jest nią nie tylko czas ładowania/tankowania baterii odpowiadającej potrzebom pojazdów klasy HD, ale przede wszystkim współczynnik użytecznej masy pojazdu, który dla BEV (*Battery Electric Vehicle*), ze względu na masę akumulatorów jest bardzo niekorzystny w stosunku do tego, co oferują obecnie pojazdy spalinowe. Kraje usytuowane na głównych szlakach komunikacyjnych będą musiały pokrywać zapotrzebowanie na następcę oleju napędowego w transporcie, jakim często określany jest wodór, co będzie istotnym czynnikiem stymulującym popyt na surowiec w danym kraju. Warto zaznaczyć, że będzie to się odbywało niejako równoległe i niezależnie od promowania transportu intermodalnego, ponieważ „ostatnią milę” i tak będzie musiał obsłużyć zeroemisyjny pojazd kołowy.

Równoległe obserwowany będzie rozwój rynku wodoru jako chemicznego magazynu energii, jednak nie będzie on oferowany na rynku spotowym właśnie ze względu na tę konkretną jego funkcję użytkową. Będzie to konsekwencją dalszego dynamicznego rozwoju rynku OZE, wynikających z tego dużych nadwyżek podażowych w tzw. peakach pracy tych instalacji oraz braku wystarczającego rozwoju alternatywnych rozwiązań magazynowania. Wodór nie będzie konkurował z magazynami bateryjnymi, lecz je uzupełniał, niemniej w krajach, w których udział OZE w finalnym miksie energetycznym będzie wysoki, nadwyżki energii gromadzone w wodorze mogą pozwolić na zaspokajanie niedoborów w dolinach popytowych.

Warto zauważyć, że, mimo iż wodór surowcowy może pochodzić z nadwyżek tzw. zielonej energii w szczytach podażowych, to już obecnie plany dotyczące certyfikacji wodoru odnawialnego jednoznacznie wykluczają użycie do jego produkcji instalacji OZE wybudowanych wcześniej. Ma to uniemożliwić scenariusz, w którym produkcja wodoru będzie kanibalizować dekarbonizację miksu energetycznego opartą o OZE. Oznacza to, że rozwój rynku wodoru jako chemicznego magazynu energii zabezpieczającego źródła OZE tak w ujęciu dobowym, jak i sezonowym, będzie następował paralelnie w stosunku do rozwoju nowych projektów odnawialnych.

Innym sektorem, który niewątpliwie będzie determinował istotny popyt na wodór jest ciepłownictwo, zwłaszcza to wykorzystujące scentralizowane sieci ciepłownicze. Odziedziczona po czasach PRL infrastruktura sieciowego ciepłownictwa systemowego w wielu miastach stanowi istotne aktywo komunalne, jednocześnie pozwalając na realizację ustawowego (Prawo energetyczne) zobowiązania do zaopatrzenia mieszkańców w ciepło.

Jeżeli chodzi o transport, to kraje tranzytowe leżące na szlakach komunikacyjnych, zarówno lądowych, jak i morskich (zielone pochodne wodoru odnawialnego: amoniak, metanol jako paliwa dla bezemisyjnego frachtu i żeglugi morskiej), a także lotniczych (zrównoważone paliwa lotnicze – SAF, zielona kerozyna i nafta).

Narzędzia, jakie proponuje się do opracowania matrycy to:

1. Zużycie energii finalnej w gospodarce poszczególnych państw, wraz z podziałem na strukturę tego zużycia, czyli zarówno dyferencjację odnośnie do nośników, jak i sektorów, które je konsumują. Pozwala to w dużym uproszczeniu oszacować zapotrzebowanie na energię elektryczną zdekarbonizowanej gospodarki. Podejście to wiąże się z marginesem błędu, który najlepiej obrazuje sektor transportu. Dziś zasilany przez silniki spalinowe, o sprawności nieprzekraczającej 50%, w przypadku silników elektrycznych będzie mowa o sprawnościach przekraczających 98%, jednak póki nie poprawią się parametry pracy akumulatorów litowo-jonowych, zasięg i efektywny cykl życia takich pojazdów również będzie oddziaływał na zużycie energii w takiej zdekarbonizowanym transporcie skutkując krótszym zasięgiem jednostkowym każdego pojazdu elektrycznego.
2. Dostęp do zasobów pozwalających na rozwój źródeł OZE. Nie tylko terytorium kraju, ale również ukształtowanie terenu, parametry wietrzności, długość linii brzegowej, głębokość dna morskiego w pasie szelfu kontynentalnego.
3. Potencjał rozwoju infrastruktury służącej importowi bezemisyjnej energii – sieci przesyłu energii i wodoru.
4. Potencjał geologiczny do kawernowego magazynowania wodoru (jako najbardziej konkurencyjnej kosztowo formy jego magazynowania).
5. Udział przemysłu energochłonnego w PKB danego państwa, zwłaszcza wysokoemisyjnego, który będzie stanowił źródło głównego odbiorcy wodoru surowcowego, jak i dostawcy CO₂ dla wytwarzania e-metanolu, czy zrównoważonych paliw syntetycznych dla lotnictwa (SAF).
6. Zasoby wód powierzchniowych, a zwłaszcza dostęp do mórz, jako „nieograniczonego” źródła wody dla procesów elektrolizy.

Bibliografia

1. Moller A.P., *Maersk engages in strategic partnerships across the globe to scale green methanol production by 2025*, Press releases, 2022, <https://www.maersk.com/news/articles/>

-
- 2022/03/10/maersk-engages-in-strategic-partnerships-to-scale-green-methanol-production/
(dostęp: 16.03.2022 r.).
2. Globenergia, *Przyłącza instalacji OZE – ile wniosków złożono w 2021 roku?*, <https://globenergia.pl/przylacza-instalacji-oze-ile-wnioskow-zlozono-w-2021-roku/>
(dostęp: 16.04.2022 r.).
 3. Hydrogen Europe, *Clean Hydrogen Monitor*, 2020.

Rozdział 3

STRATEGICZNE ZNACZENIE WODORU W RAMACH ŁĄCZENIA SEKTORÓW

The strategic importance of hydrogen within the sector coupling framework

Ewa MATA CZYŃSKA, Marek SIKORA

Abstract: *The text introduces the concept of sector coupling as one way of achieving a large-scale use of hydrogen. It describes the general principles behind the concept, notably considering synergies with the energy sector. The positioning of the concept in the key documents describing the European energy transition is presented, with particular emphasis on decarbonization, electrification and the main role of renewable energy sources (RES). The unprecedented development of distributed RES leads to periodic energy surpluses in the system, often at the local level. This surplus can be used to produce hydrogen, which can be used not only in the energy system, but also in many sectors of the economy. Coupling sectors using hydrogen is described, taking a holistic approach to the issue. The main combinable economic sectors in which hydrogen is used, both now and soon, are briefly presented, industry, transport, and buildings. Furthermore, it is shown that hydrogen can be an important element for integrating an energy system with a high saturation of RES installations, both small and large scale. Increasing the scale of hydrogen use involves its transport and distribution, including over long distances. The progressive deployment of hydrogen end-uses will require a concerted acceleration of the hydrogen supply chain, including additional production, storage, transport, and distribution capacities. This development will help shape the future hydrogen market on many levels. The environmental aspect of the hydrogen chain has been added.*

3.1. Wprowadzenie

Semantyczne znaczenie pojęcia *łączenie sektorów* (ang. *sector coupling*) polega na rozwijaniu synergicznych interakcji pomiędzy dwoma tradycyjnie odrębnymi sektorami energetycznymi. Głównym celem takiej integracji jest optymalizacja odpowiedniej bazy aktywów z wykorzystaniem efektu substytucyjnego (np. optymalny mix inwestycyjny w jednym z dwóch powiązanych sektorów lub minimalny koszt eksploatacji systemów modułowych). W niektórych przypadkach znaczenie tego pojęcia może również obejmować elektryfikację na dużą skalę, czyli zastąpienie przez energię elektryczną nośniki energii kopalnej (gaz ziemny, paliwa olejowe, węgiel brunatny/węgiel brunatny) w zastosowaniach końcowych, takich jak budynki, transport czy ogrzewanie procesowe w przemyśle. Ponadto

w ten proces wpisuje się również wodór jako element kolejnego etapu na drodze do zintensyfikowania działań związanych z dekarbonizacją.

Łączenie sektorów koncentruje się na wzajemnych korzyściach poprzez strategię pozwalającą na zapewnieniu większej elastyczności obu powiązanych sektorom, tak aby można było osiągnąć dekarbonizację w bardziej opłacalny sposób. Podczas gdy łączenie sektorów wskazuje na integrację energii elektrycznej i gazu, powiązanie z większą liczbą sektorów (np. ciepłownictwo, transport i produkcja przemysłowa) jest częściej określane jako *integracja sektorowa* (ang. *sector integration*).

Widać zatem, że definicja łączenia sektorów jest bardzo podobna do definicji integracji systemu energetycznego, jednak integracja systemu energetycznego skupia się na widoku systemu, na szerszym poziomie i wzdłuż całego łańcucha dostaw-transport-użytkowanie końcowe. Przewiduje się, że w przyszłości w każdym z ogniw tego łańcucha będzie dużą rolę odgrywał wodór. Oznacza to głęboką integrację między końcowym popytem na energię a łańcuchem dostaw w celu osiągnięcia najbardziej efektywnej dekarbonizacji przy minimalnym wpływie na środowisko. Proces powinien koordynować zarówno działania operacyjne, jak i planowanie systemów energetycznych zintegrowanych wieloma ścieżkami, aby zapewnić opłacalne usługi energetyczne, a także ich niezawodne dostarczenie. W tych częściach świata, w których przeważa słońce i wiatr, koszty energii odnawialnej spadają tworząc korzystne warunki dla gospodarki wodorowej (np. Australia). Zasadnicze technologie, które mają tu podstawowe zastosowanie, definiuje się jako technologie *Power-to-X*. Technologie te, do których zalicza się technologię *Power-to-Gas* (np. wodór), zostały zaproponowane jako rozwiązania umożliwiające przekształcenie energii elektrycznej w gazowe lub ciekłe nośniki energii. W ten sposób technologie te mogą ułatwić integrację na dużą skalę energii elektrycznej wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii, co prowadzi do ściślejszego powiązania między różnymi sektorami i podsektorami. Mogą one również zapewnić elastyczność systemu energetycznego, np. poprzez zarządzanie popytem lub długoterminowe magazynowanie nośników energii.

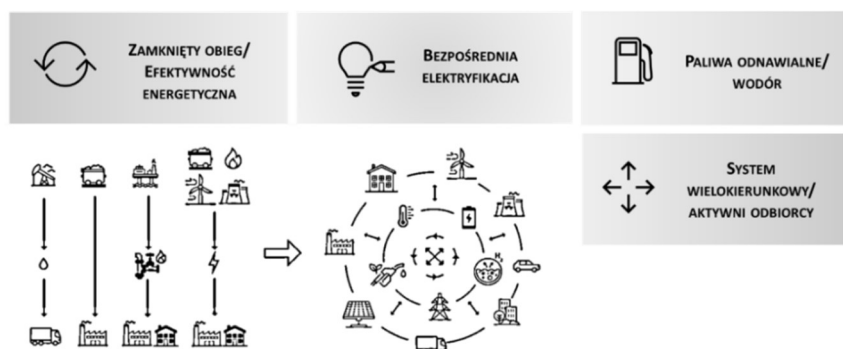
3.2. Miejsce wodoru w strategii Unii Europejskiej w zakresie integracji sektora energetycznego

Wraz z Europejskim Zielonym Ładem (ang. *European Green Deal*¹) i celami klimatycznymi określonymi w porozumieniu paryskim Unia Europejska zobowiązała się do osiągnięcia gospodarki neutralnej pod względem emisji dwutlenku węgla do 2050 r. Aby osiągnąć te cele w zakresie dekarbonizacji, kluczową zmianą ma być zwiększona elektryfikacja we wszystkich sektorach. Jednak natychmiastowe przejście na całkowicie elektryczny system energetyczny nie byłoby ani

¹ Komisja Europejska, Europejski Zielony Ład, Aspirowanie do miana pierwszego kontynentu neutralnego dla klimatu, https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pl (dostęp: 20.03.2022 r.).

możliwe, ani łatwe z wielu powodów, począwszy od trudności z procesem elektryfikacji tak zwanych sektorów trudnych do dekarbonizacji (tj. lotnictwa, produkcji stali itp.), a skończywszy na potrzebach ogromnych inwestycji. System energetyczny ma kluczowe znaczenie dla realizacji tych celów. W przyszłym bezemisyjnym systemie energetycznym czyste molekuly – odnawialne i niskoemisyjne gazy – a zwłaszcza wodór, są uważane za jedno z obiecujących rozwiązań w odpowiedzi na takie potrzeby. Taka ewolucja z pewnością wymagałaby większej koordynacji planowania infrastruktury elektroenergetycznej i gazowej.

Aby te cele osiągnąć, przyszłość energetyczna Europy musi opierać się na coraz większym udziale energii ze źródeł odnawialnych, równomiernie rozłożonych geograficznie i na elastycznej integracji różnych nośników energii, przy jednoczesnym utrzymaniu oszczędnego gospodarowania zasobami oraz unikaniu zanieczyszczenia środowiska.



Rys. 1. Główne założenia integracji systemu energetycznego

Fig. 1. Main assumptions of the energy system integration

Źródło: E. Mataczyńska, *Integracja sektora w kierunku stworzenia wspólnego, europejskiego systemu*, Cykl seminariów naukowych – „Szkoła Energii”, SGH, 20 maja 2021.

Integrację systemu energetycznego oparto na czterech uzupełniających się i wzajemnie się wspierających pojęciach²:

1. system energetyczny o bardziej zamkniętym obiegu, którego kluczowym elementem jest efektywność energetyczna,
2. szerzej zakrojona bezpośrednia elektryfikacja różnych sektorów zastosowań końcowych,
3. **stosowanie paliw odnawialnych i niskoemisyjnych, w tym wodoru**, do zastosowań końcowych, w których bezpośrednio ogrzewanie lub elektryfikacja nie są możliwe,

² Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europy, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, *Impuls dla gospodarki neutralnej dla klimatu: strategia UE dotycząca integracji systemu energetycznego*, Bruksela, dnia 8.07.2020 r. COM(2020) 299 final, s. 3.

4. bardziej zintegrowany system będzie również systemem „wielokierunkowym”, w ramach którego konsumenci odgrywają aktywną rolę, z jednej strony wspierając rynek, a z drugiej wyznaczając, weryfikując i moderując kierunki zmian.

3.3. Paliwa odnawialne/wodór

Do paliw odnawialnych oraz niskoemisyjnych można zaliczyć zrównoważony biogaz i biometan, wodór niskoemisyjny bądź odnawialny lub paliwa syntetyczne³. Mogą one być substytutem w tych procesach, w których z różnych przyczyn (choćby technologicznych) przejście na bezpośrednią elektryfikację jest trudne do przeprowadzenia bądź zupełnie niemożliwe. Największe nadzieje w tym zakresie wiąże się z wodorem, który bez wątplenia będzie nieodłącznym elementem neutralnego dla klimatu koszyka energetycznego. W szczególności będzie niezbędny tam, gdy bezpośrednia elektryfikacja osiągnie swoje granice, a więc:

1. w obszarze długoterminowego magazynowania energii elektrycznej niezbędnej do przetrwania okresów ze zbyt niskim promieniowaniem słonecznym i zbyt słabą siłą wiatru,
2. jako paliwo samochodowe, lotnicze, jako paliwo dla transportu morskiego, ciężkiego transportu drogowego czy publicznego transportu pasażerskiego, również kolejowego,
3. w niektórych procesach przemysłowych. Obecnie wodór wykorzystywany w Polsce w procesach przemysłowych (produkcja stali, amoniaku, rafinerie) nie jest wodorem zeroemisyjnym, czyli wyprodukowanym z energii pochodzącej z OZE. Produkcja wodoru odbywa się z wykorzystaniem surowców kopalnych i jest stałym elementem procesu produkcyjnego.

Wodór produkowany w drodze elektrolizy przy użyciu energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych może odgrywać szczególnie ważną rolę „węzłową” w zintegrowanym systemie energetycznym, w którym może pomóc w zwiększeniu możliwości przyłączeniowych instalacji energii uzyskiwanej ze źródeł odnawialnych, dzięki odciążaniu sieci w okresach dużej produkcji oraz zapewniając długoterminowe magazynowanie energii w systemie energetycznym. Może on również umożliwiać wykorzystanie lokalnej produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych w szeregu dodatkowych zastosowań końcowych.

Wodór może być transportowany do miejsc docelowych (transport kołowy, statki, pociągi), magazynowany np. jako efekt nadwyżek mocy w systemie elektroenergetycznym (źródło elastyczności), przetwarzany do innych postaci (amoniak), które są niezbędnym składnikiem produkcji w różnych gałęziach przemysłu. Może być również ponownie przetwarzany na energię elektryczną i wprowadzany

³ Zgodnie z dyrektywą (UE) 2018/2001 zachęca się do stosowania zaawansowanych biopaliw i biogazu (uzyskanych z niektórych pozostałości i produktów pochodzących z działalności rolniczej i leśnej, odpadów przemysłowych, komunalnych oraz innych materiałów lignocelulozowych) spełniających wymogi w zakresie zrównoważonego rozwoju.

do sieci elektroenergetycznej w sytuacjach braku wystarczającej mocy w systemie do pokrycia zapotrzebowania bądź jako moc będąca elementem wsparcia bezpiecznej pracy systemu.

Powyższe procesy, w zależności od formy, rodzaju i ilości konwersji podstawowego nośnika energii elektrycznej do jej końcowego zużycia są obciążone dużymi stratami. Technologie wodorowe, szczególnie w obszarze wykorzystania zielonego wodoru nie są jeszcze wystarczająco zaawansowane, aby osiągnąć przewagę konkurencyjną na rynku. Są jednak obiecującym elementem przyszłej dekarbonizacji gospodarki, szczególnie jako paliwo odnawialne⁴.

Ważne jest, aby jasno określić, że wodór może stanowić opcję jedynie wówczas, gdy ogrzewanie bezpośrednie lub elektryfikacja nie są technicznie możliwe (albo są możliwe jedynie przy wyższych kosztach). Ponadto, mając na uwadze przyspieszenie dekarbonizacji, produkcja wodoru powinna się odbywać z wykorzystaniem energii elektrycznej produkowanej ze źródeł OZE takiej, która stanowi nadwyżkę w systemie elektroenergetycznym.

3.4. Łączenie sektorów z wykorzystaniem wodoru

Analiza Europejskiego Zielonego Ładu pozwala postawić tezę, że jednym z kluczy do osiągnięcia celu jest zapewnienie i dostarczanie czystej, przystępnej cenowo i bezpiecznej energii oraz szerokie jej wykorzystanie. Energii, która będzie wystarczająca do prawidłowego i niezakłóconego rozwoju gospodarki, transportu i rolnictwa, wzrostu poziomu życia, przy zwiększonej ochronie środowiska i stopniowej eliminacji paliw kopalnych, przekładając się na ogólną dekarbonizację.

Oczywiste jest, że niezwykle istotną rolę w procesie dekarbonizacji pełnić będą Odnawialne Źródła Energii (OZE), których wykorzystanie na szeroką skalę (energia dopasowana do potrzeb) wymaga przeprowadzenia stopniowej elektryfikacji w wielu obszarach oraz właściwej transformacji sektorowej. Przy czym z uwagi na znaczne rozproszenie (decentralizację wytwarzania) oraz generację zależną od warunków atmosferycznych dla niektórych technologii wytwarzania, konieczne będzie zainstalowanie łącznie większej mocy wytwórczej niż przy zastosowaniu źródeł konwencjonalnych do zaspokojenia takiego samego zapotrzebowania na energię końcową. Uwarunkowana pogodowo produkcja energii w OZE spowoduje, że system energetyczny z dużym udziałem takich źródeł, będzie okresowo wykazywał nadwyżki lub niedobory energii wobec zapotrzebowania, szczególnie na poziomie lokalnym. Ponadto, niektóre lokalizacje geograficzne charakteryzują się niezwykle korzystnymi warunkami do stosowania wybranych technologii produkcji, ale z uwagi na niewystarczające zdolności przesyłu energii w systemie, zasoby te mogą nie być właściwie wykorzystane. Przykładem może

⁴ *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan, June 2019, s. 12–16.

być morska energetyka wiatrowa, gdzie trudno byłoby zapewnić lokalny odbiór energii, szczególnie o porównywalnej mocy do zainstalowanej, a przesył energii wymaga rozbudowy sieci, także z uwagi na konieczność zapewnienia lokalnego bilansowania systemu.

Jak już wskazano, jednym ze sposobów na wykorzystanie energii z OZE jest wykorzystanie technologii *Power-to-X*, przy czym na szeroką skalę znaczenia może nabrać konwersja i magazynowanie energii przez produkcję wodoru – zarówno jako sposób *stricte* na produkcję tego paliwa w celu późniejszego zużycia do innych potrzeb, jak i w ramach wsparcia stabilizacji systemu elektroenergetycznego, szczególnie do odbioru nadwyżek energii w systemie, także na potrzeby zbilansowania produkcji i zużycia oraz zwiększenia jego elastyczności.

Jednym z podejść do produktywnego wykorzystania energii z OZE w systemie, jest koncepcja „łączenia sektorów opartego na wodorze” tj. koncepcja [na podst. Polska Strategia Wodorowa do roku 2030⁵] która zakłada:

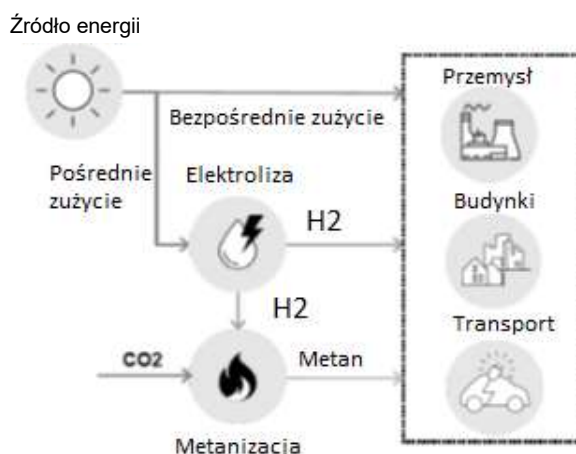
1. ogólny wzrost wykorzystania energii elektrycznej pochodzącej z OZE w systemie,
2. budowę instalacji OZE dedykowanych do produkcji wodoru jako sposobu na wykorzystanie lokalnego potencjału zasobów odnawialnych,
3. wykorzystanie nadwyżek energii elektrycznej z OZE w systemie energetycznym do produkcji wodoru,
4. wykorzystanie zarówno energii z OZE jak i wodoru przez określone sektory gospodarki (takie jak sektor transportowy, różne gałęzie przemysłu oraz ciepłownictwo – ogrzewanie budynków),
5. w celu minimalizacji zależności od paliw kopalnych, przyczyniających się do emisji gazów cieplarnianych do środowiska.

Poglądowo, ideę łączenia sektorów przedstawiono na rys. 2.

Według szacunków z lutego 2020 r., w przypadku elektryfikacji sektorów transportu, przemysłu i budownictwa, potencjał redukcji emisji gazów cieplarnianych w horyzoncie 2050 r. wyniesie ok. 60% w porównaniu z rokiem 2020 (co przekłada się na ok. 71% w porównaniu z rokiem 1990). W przypadku wdrożenia wykorzystania odnawialnego wodoru oraz koncepcji łączenia sektorów tj. energetyki, transportu, przemysłu i ciepłownictwa, potencjał redukcji emisji w roku 2050 względem roku 2020 wyniesie ok. 68% (co odpowiada ok. 83% względem roku 1990)⁶.

⁵ Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040, Warszawa 2021 r.

⁶ Polska Strategia Wodorowa..., s. 13.



Rys. 2. Zasada łączenia sektorów oparta na wodorze

Fig. 2. The principle of sector coupling based on hydrogen

Źródło: Bloomberg New Energy Finance, „Sector coupling in Europe: powering decarbonisation. Potential and policy implications of electrifying the economy”, luty 2020.

3.5. Praktyczne wykorzystanie wodoru w kontekście łączenia sektorów

Obecne wykorzystanie wodoru jest raczej ukierunkowane na natychmiastowe zużycie, niezależnie od rodzaju wodoru (konwencjonalny, niskoemisyjny, odnawialny)⁷. Wraz z rozwojem technologii produkcji, redukcji kosztów pozyskania, transportu i magazynowania oraz powstawania nadwyżek o łatwej dostępności, rozwinie się rynek wodoru jako nośnika energii wspomagającego sektor energetyczny, a możliwe, że w niektórych dziedzinach w znacznej mierze go zastępującego. Wykorzystanie zielonego wodoru należy także rozpatrywać w sposobie jego zastosowania, tj. bezpośredniego albo pośredniego.

W łączeniu sektorów opartym na wodorze, produktem łączącym jest tzw. wodór zielony, który w końcowym użyciu jako nośnik energii może być:

1. uzupełnieniem lub zwiększeniem obecnego poziomu wykorzystywanego wodoru,
2. zastąpieniem wykorzystywanego wodoru, najczęściej konwencjonalnego, odpowiednikiem o niższej emisyjności w sensie pozyskiwania,
3. całkowicie nowym nośnikiem energii, będącym wynikiem zmian technologicznych albo działań innowacyjnych w danym obszarze gospodarczym,
4. czynnikiem ograniczającym wykorzystanie substancji szkodliwych w procesach technologicznych,

⁷ Upowszechniło się także oznaczenie wodoru poprzez odpowiednie kolory, które odzwierciedlają technologię wytwarzania. I tak, podstawowy podział to: GREY (podtypy: Black, Brown), BLUE, GREEN (podtypy: Yellow, Red).

5. czynnikiem zmniejszającym zależność geopolityczną o surowców energetycznych na rzecz lokalnych zasobów energii odnawialnej.

Poniżej przedstawiono podstawowe sektory możliwe do łączenia, w których wodór, zarówno obecnie jak i w niedalekiej przyszłości, znajduje zastosowanie.

Przemysł. Obecnie wykorzystuje się wodór konwencjonalny, szeroko stosowany w kilku sektorach przemysłu (rafinerie, amoniak, metanol, środki chemiczne, obróbka metali).

Niektóre gałęzie przemysłu w ograniczonym zakresie lub wcale nie będą mogły być zelektryfikowane, ze względu na specyfikę procesów technologicznych, przez co stanowią istotne wyzwanie w procesie dekarbonizacji przemysłu. Przykładem⁸ są podsektory wymagające bardzo wysokich temperatur (> 200°C), takie jak stalowy lub chemiczny. Tutaj wodór stanowi szansę na ograniczenie emisji pochodzących z surowców chemicznych i reagentów, tj. amoniak, metanol, redukcja żelaza i produkty petrochemiczne poprzez: produkcję i zastosowanie niskoemisyjnego wodoru w procesach technologicznych, zastosowanie wodoru jako reduktora w procesie wytwarzania stali, oraz mieszania (ang. *blending*) wodoru z gazem naturalnym w procesach przemysłowych. W sektorze stalowym, który odpowiada za 22% emisji CO₂ w sektorze przemysłu wskazane jest zastosowanie wodoru w procesie bezpośredniej redukcji rudy żelaza w wielkich piecach i piecach łukowych z wykorzystaniem technologii DRI (ang. *Direct Reduced Iron*). Zastosowanie wodoru jako paliwa i reduktora w procesach wyrobu stali umożliwi odejście od węgla i koksu, których spalanie przyczynia się do znaczącej emisji CO₂.

Nie ma przeszkód technicznych, aby wodór ten mógł być zastąpiony wodorem odnawialnym, pod warunkiem, że nie wpłynie to istotnie na konkurencyjność gospodarczą, co może wymagać modyfikacji istniejących procesów. Istotnym czynnikiem determinującym zwiększenie wykorzystania wodoru albo zastąpienie innym rodzajem, jest zapewnienie odpowiedniej jego ilości. Wiąże się to z rozwiązaniem problemu zapewnienia długoterminowych dostaw, transportu i magazynowania.

Budynki. Potencjał redukcji emisji CO₂ jest znaczny, szczególnie geograficznie tam, gdzie spora część energii zużywana jest do ogrzewania. Zakrojone na szeroką skalę działania w zakresie poprawy efektywności energetycznej budynków nowych i modernizowanych oraz stosowanie nisko- lub zeroemisyjnych źródeł ciepła, spowoduje wzrost zainteresowania wodorem jako nowym nośnikiem energii do ogrzewania. Należy rozpatrzyć budynki typu komercyjnego oraz gospodarstwa domowe, w tym budynki wielolokalowe, gdyż różnią się one udziałem energii na ogrzewanie, chłodzenie oraz dostarczanie ciepłej wody użytkowej w ogólnym zużyciu energii. Ponadto podział może jeszcze uwzględniać sposób zaopatrzenia w ciepło, tj. indywidualny albo zbiorowy. Zgodnie z zapisami Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie

⁸ Polska Strategia Wodorowa..., s. 17–18.

charakterystyki energetycznej budynków, już od ponad dwóch lat wszystkie nowe budynki powinny być budynkami o niemal zerowym zużyciu energii. W świetle przywołanej dyrektywy, jak i przepisów krajowych⁹, zapotrzebowanie budynków na energię pierwotną zewnętrzną jest wyraźnie ograniczone, a pozostała energia powinna pochodzić ze źródeł odnawialnych.

W tym segmencie, wodór możemy rozpatrywać w kontekście konwersji Gas-to-Power, przy czym energią wyjściową będzie ciepło, pochodzące albo z energii elektrycznej wyprodukowanej z udziałem wodoru albo pochodzące z gazu ziemnego z domieszką tzw. *greengas*, do którego zaliczymy właśnie wodór. Ten drugi sposób nabiera szczególnego znaczenia, gdyż zmniejsza zużycie gazu ziemnego. Ponadto, podejście takie pozwala na sezonowe magazynowanie nadwyżek wodoru (poza sezonem grzewczym) oraz użycie ich w okresie zwiększonego zapotrzebowania.

Transport. Wodór jest postrzegany jako jedna z dróg do redukcji emisji w transporcie. Ma on potencjał do zastępowania paliw kopalnych szczególnie w transporcie miejskim (autobusy), drogowym (transport ciężki i długodystansowy), pojazdach lekkich flotowych (wózki widłowe, samochody dostawcze, taksówki), kolejowym niezelektryfikowanym (pojazdy kolejowe wyposażone w ogniwa paliwowe), morskim i rzeczynym oraz intermodalnym, a w dalszej perspektywie również w lotnictwie¹⁰. Należy podkreślić, że mimo zaawansowanych prac i nowych technologii, elektryfikacja segmentu transportu w niektórych zastosowaniach jest ograniczona albo nieefektywna kosztowo. Przykładowo, o ile segment transportu indywidualnego lub lokalnego transportu zbiorowego jest podatny na elektryfikację, o tyle ciężki transport drogowy albo kolejowy na odcinkach niezelektryfikowanych już nie. Jednym z rozwiązań jest tutaj zastąpienie silników spalinowych silnikami elektrycznymi oraz pobieranie energii elektrycznej z ogniw paliwowych (ang. FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle*) opartych na wodorze. Kolejnym, wykorzystanie wodoru do produkcji paliw syntetycznych albo mieszanii z innymi gazami. Pojazdy napędzane wodorem wytwarzanym z OZE są niskoemisyjną opcją mobilności z wydajnością jazdy pojazdów konwencjonalnych (zasięg, czas tankowania). Stanowią uzupełnienie pojazdów elektrycznych z akumulatorami. Użycie wodoru w transporcie morskim oraz powietrznym wydaje się na dziś ograniczone.

Upowszechnienie pojazdów zasilanych wodorem zależy od budowy odpowiedniej infrastruktury dystrybucyjnej, przede wszystkim stacji ładowania.

Energia – integracja OZE przy pomocy wodoru. Przy pewnym poziomie mocy OZE zainstalowanej w systemie elektroenergetycznym, charakterystycznym dla tego systemu, w systemie uwydatniają się problemy związane z poprawną pracą tych źródeł. Rozproszenie geograficzne źródeł powoduje niekontrolowane

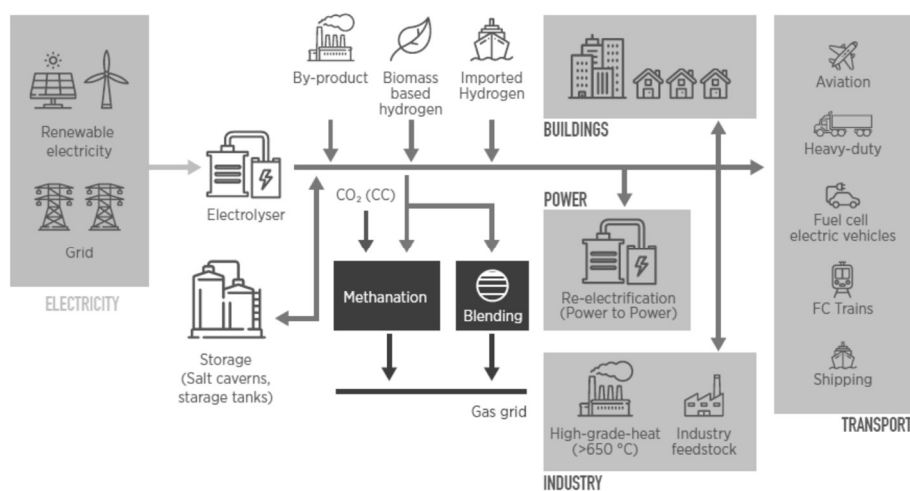
⁹ W Polsce standardy budynków zdefiniowane są w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2019 r., poz. 1065 oraz Dz.U. z 2020 r., poz. 1608, ze zm.)

¹⁰ Polska Strategia Wodorowa..., s. 15.

przepływy energii w sieci mogące skutkować niepoprawną jej pracą oraz zakłóceniami. W skrajnych przypadkach operator sieci może nakazać ograniczenie produkcji (generacji) albo jej całkowite wstrzymanie.

Jednym ze sposobów zapewnienia swobodnej produkcji (bez ograniczeń) przy zachowaniu stabilności systemu jest kierowanie części produkowanej energii do magazynu z wykorzystaniem konwersji typu Power-to-X. W przypadku niedoboru energii w systemie, możliwe jest zastosowanie konwersji X-to-Power dla energii zgromadzonej w magazynie. Sam elektrolizer może być także potraktowany jako odbiornik o zmiennym obciążeniu, który dopasowuje zużycie energii do potrzeb systemu – poprzez zwiększanie lub zmniejszanie produkcji wodoru, możliwe jest lokalne zbilansowanie energii albo zużywanie jej w miarę dostępności. Wodór jako produkt konwersji energii może być zmagazynowany, także poprzez mieszanie z gazem ziemnym albo przesłany do końcowego zużycia. Stanowi to także sposób magazynowania wodoru w celu rezerwowania i stabilizowania przyszłych dostaw do użytkowników. Zastosowanie tych zasad istotnie zwiększa elastyczność systemu energetycznego, rozumianą przez pryzmat zdolności do obsłużenia zmiennej produkcji OZE, silnie uwarunkowaną przez czynniki pogodowe oraz lokalnym rozproszeniem, przez system elektroenergetyczny.

Biorąc powyższe pod uwagę, wodór może stanowić istotny łącznik między systemem elektroenergetycznym a przemysłem, budynkami i transportem, zwiększając poziom elastyczności systemu energetycznego, jednocześnie ułatwiając integrację OZE z tym systemem. Koncepcję tę przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Integracja OZE do zastosowań końcowych za pomocą wodoru

Fig. 3. Integration of RES into end uses by means of hydrogen

Źródło: IRENA (2018), *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Kształtowanie się rynku wodoru. Jak wspomniano poprzednio, zwiększenie skali wykorzystania wodoru wiąże się z jego transportem i dystrybucją, także na duże odległości. Stopniowe wdrażanie zastosowań końcowych wodoru będzie wymagało wspólnego przyspieszenia łańcucha dostaw wodoru, w tym dodatkowych zdolności produkcyjnych, oczyszczania i zwiększania ciśnienia sprężania oraz zdolności transportowych i dystrybucyjnych. Opcji jest wiele, począwszy od produkcji na miejscu (produkcja wodoru tam, gdzie jest on zużywany) aż po scentralizowaną produkcję i dostawy na duże odległości, na przykład za pośrednictwem cystern, zmieszanie z gazem lub dedykowanymi rurociągami wodorowymi.

W rzeczywistości na strukturę łańcucha dostaw będzie miał wpływ rozkład geograficzny i charakter popytu, a także następujące czynniki¹¹:

1. dostępność istniejących źródeł wodoru lub surowca do produkcji wodoru w pobliżu, w porównaniu z kosztami produkcji na miejscu, ponieważ produkcja wodoru jest najbardziej kapitałochłonną częścią łańcucha dostaw,
2. powyżej pewnego progu zużycia produkcja lub dostawa na miejscu za pośrednictwem dedykowanego rurociągu wodorowego może być jedynym realnym głównym sposobem dostaw. Prawdopodobnie pozostaną one takie w najbliższej przyszłości,
3. z punktu widzenia zarządzania ryzykiem, inwestycje w nowe moce produkcyjne na dużą skalę były tradycyjnie dokonywane tylko wtedy, gdy duża część produkcji jest sprzedawana jednemu klientowi (lub ograniczonej liczbie klientów) z długoterminowymi umowami podpisanymi z góry lub jeśli można to uzasadnić posiadaniem wystarczającego bufora kapitałowego na pokrycie początkowych strat lub instrumentami finansowymi zmniejszającymi ryzyko regulacyjne.

Do powyższej listy należy także dodać rozwój technologii wytwarzania, magazynowania i transportowania wodoru, w tym opracowywanie nowych materiałów na zbiorniki i elementy instalacji.

Biorąc powyższe pod uwagę, można przewidywać, że w pierwszych latach rozwoju rynku, transport wodoru odbywać się będzie przede wszystkim przy wykorzystaniu transportu kołowego i kolejowego. Z czasem, gdy zapotrzebowanie odbiorców na wodór wzrośnie, do transportu wykorzystywana będzie istniejąca infrastruktura gazowa lub dedykowane rurociągi wodorowe. Infrastruktura rozwijając się będzie w modelu klastrowym, w którym połączy ona produkcję z centrami popytu. Dzięki temu ograniczy się zapotrzebowanie na kosztowną infrastrukturę liniową do przesyłu. Model ten znany pod postacią „Dolin wodorowych” jest przykładem łączenia sektorów, a także integracji OZE z systemem. W kolejnych latach, gdy powstanie więcej lokalnych centrów produkcji i popytu, dostępne nadwyżki wodoru będą mogły być dystrybuowane pomiędzy zainteresowanymi stronami albo będą mogły stanowić podwaliny pod lokalny rynek wodoru, tj. rynek lokal-

¹¹ IRENA (2019), *Hydrogen: A renewable energy perspective*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

nego produktu. W miarę dalszego rozwoju poszczególnych segmentów rynku, rynek ten może ewaluować w kierunku centralizacji. Przyszły model rynku wodoru, jak i jego struktura, jest otwarty. Obecnie najbliższym rodzajowo rynkiem jest rynek gazu, zarówno ziemnego, jak i LNG. Istotną będzie tutaj kwestia mechanizmu kształtowania ceny zielonego wodoru: całkowite i swobodne mechanizmy rynkowe w ramach giełdy zorganizowanej, rynek kontraktów bilateralnych czy też cena będzie kształtowana w ramach ram regulacyjnych określonych przez regulatora rynku.

Pytaniem otwartym jest także konieczność zapewnienia właściwego nadzoru nad rynkiem – technicznego oraz regulacyjnego. Konieczne doświadczenia w tym zakresie można by pozyskać w ramach współpracy podmiotów skupionych np. wokół „Doliny wodorowej”, przy wykorzystaniu mechanizmów piaskownicy regulacyjnej (ang. *regulatory sandbox*). Konieczne tutaj byłoby ustanowienie organu nadzoru (umocowana instytucja państwowa) nad podjętymi działaniami np. na wzór rynku gazu.

Ochrona środowiska. Przy dekarbonizacji nie sposób pominąć aspektu ekologicznego wodoru, ale w ujęciu całego łańcucha – od sposobu wytwarzania poprzez transport, magazynowanie, jak i wykorzystanie końcowe. W przypadku wytwarzania istotne jest, czy wodór powstał jako niskoemisyjny (niska emisja CO₂ jako produktu ubocznego procesu) – przy udziale źródeł odnawialnych albo przy wykorzystaniu technologii bezemisyjnych – czy też, takiej cechy nie można mu nadać z uwagi na technologię pozyskania (wysoka emisja CO₂). Istnieją także rozwiązania technologiczne, gdzie pomimo wysokiej emisji, prowadzony jest wychwyty dwutlenku węgla (sekwestracja), który następnie będzie składowany lub ponownie wykorzystany. Wówczas, tak wytworzony wodór też możemy zaliczyć do grupy niskoemisyjnej. Inne sposoby uzyskiwania wodoru z nieodnawialnych paliw kopalnych, ze względu na użyte substraty, prowadzą do uzyskania dużej ilości odpadów węglowych – stałych lub gazowych.

Kolejne elementy łańcucha wodorowego możemy uznać na ekologiczne (niskoemisyjne) wtedy, gdy energia użyta do wspierania lub podtrzymania kolejnego procesu będzie miała takie cechy. Przykładem jest sprężanie wodoru, która to operacja wymaga pewnej ilości energii tak jak i magazynowanie. W przypadku transportu, szczególnie kołowego, szynowego czy statkiem, zastosowanie paliwa konwencjonalnego powoduje dodanie pewnego śladu węglowego do procesu. W zakresie końcowego użycia wodoru należy rozpatrzeć dwa aspekty oddziaływania ekologicznego:

1. wykorzystanie wodoru jako zamiennika innych szkodliwych dla środowiska substancji używanych w procesach technologicznych, oraz
2. wykorzystanie wodoru jako uzupełnienie zużywanej energii konwencjonalnej albo zastąpienie paliw kopalnych. Przykładem branży o dużych możliwościach uzyskania efektów ekologicznych z zastosowania wodoru jest przemysł stalowy, zarówno w zakresie zastąpienia substancji szko-

dliwych w procesie obróbki stali, jak i zastąpienia węgla przy jej wytapianiu.

Dla świadomego użytkownika końcowego wodoru, ważne jest pewne źródło wodoru w sensie pochodzenia. Ciekawą tutaj koncepcją jest wykorzystywanie technologii *blockchain* do kontrolowania źródła dostaw wodoru, poprzez wprowadzenie systemu certyfikacji – gwarancji pochodzenia. Ten instrument certyfikacyjny oznacza pochodzenie produktu i dostarcza klientom informacji o źródle tego produktu i sposobie wytwarzania. Poświadcza pochodzenie odnawialnego wodoru oraz zapewnia ocenę wielkości emisji dwutlenku węgla. Jest systemem śledzenia, który ma gwarantować, że wykorzystuje się niskoemisyjny wodór, a nie inny. Projekt ten, pod nazwą „Zero Carbon Certification Scheme”, rozwijany jest w ramach australijskiego programu Narodowa Strategia Wodorowa (*National Hydrogen Strategy*¹²).

3.6. Podsumowanie

Strategiczna długoterminowa wizja czystej planety dla wszystkich Europejczyków oraz nowoczesnej, konkurencyjnej i neutralnej klimatycznie gospodarki, która zakłada pełną dekarbonizację systemu energetycznego do 2050 roku, oznaczają, że wiele krajów zaczęło poważnie planować budowę niskoemisyjnego systemu elektroenergetycznego w krótszym czasie niż typowy czas eksploatacji elektrowni i urządzeń sieciowych. Zainteresowanie wodorem do dekarbonizacji systemów energetycznych bezsprzecznie wzrasta, częściowo z powodu spadających kosztów technologii, większego nacisku politycznego na dekarbonizację oraz ograniczeń w przeprowadzeniu elektryfikacji bezpośredniej w niektórych sektorach gospodarki. Wyjątkowa wszechstronność wodoru jako nośnika energii i jego wielorakie zastosowania wymagają jednak całościowego spojrzenia, aby dokładnie rozpoznać i zdefiniować jego rolę w przyszłych niskoemisyjnych systemach energetycznych i towarzyszących im ścieżkach technologicznych. Ponadto korzyści ekonomiczne i środowiskowe wykorzystania wodoru i energii elektrycznej do różnych zastosowań końcowych, a także ich komplementarność jako wektorów dekarbonizacji systemu energetycznego wydają się oczywiste.

Odnawialne źródła energii, zwłaszcza oparte na energii ze słońca i wiatru, jak również rozwój technologii magazynowania, pokazują znaczną poprawę kosztów i wydajności. Wydaje się zatem, że powinny one stanowić filary, wraz z efektywnością energetyczną, większości długoterminowych strategii dekarbonizacji, w połączeniu z innymi neutralnymi pod względem emisji dwutlenku węgla źródłami energii, wychwytywaniem i magazynowaniem/użytkowaniem dwutlenku węgla, wykorzystaniem (certyfikowanych) gazów zeroemisyjnych, integracją różnych sektorów energetycznych. Ponieważ emisje gazów cieplarnianych nie

¹² COAG Energy Council, Australia's National Hydrogen Strategy, Australia, 2019, <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf> (dostęp: 11.03.2022 r.).

pochodzą wyłącznie z produkcji energii elektrycznej, ale także z transportu, ogrzewania, chłodzenia, przemysłu i rolnictwa, wiele krajów dąży do szeroko zakrojonej dekarbonizacji systemu energetycznego, w tym w połączeniu z innymi sektorami. Dekarbonizacja przynosi nowe wyzwania w działalności operacyjnej i planistycznej pod względem ryzyka związanego z aktywami osieroconymi, ale także możliwości lepszej optymalizacji systemu we wszystkich sektorach energetyki. Zbudowanie połączeń międzysektorowych wydaje się właściwym kierunkiem przyspieszającym dekarbonizację.

Łączenie sektorów za pośrednictwem *Power-to-G* zmniejsza koszty dekarbonizacji systemu energetycznego, a korzyść ta rośnie wraz ze wzrostem zapotrzebowania na wodór w innych sektorach użytkowników końcowych. Jednak uświadomienie sobie korzyści płynących z takiej koordynacji międzysektorowej wymaga reform politycznych i rynkowych. Chociażby w odniesieniu do cen wodoru, można się zastanowić nad możliwością i zasadnością ustalania ich z podobną rozdzielczością czasowo-przestrzenną jak ceny energii elektrycznej, aby zapewnić zachęty i sygnały dla właścicieli infrastruktury wodorowej, a elektrolizery klasyfikując do magazynów energii uczestniczyłyby w rynku elastyczności, z możliwością świadczenia usług pomocniczych dla systemu elektroenergetycznego. Co więcej, zarówno zintegrowana eksploatacja, jak i planowanie sektora elektroenergetycznego i wodoru mogłoby pomóc w pełnym wykorzystaniu korzyści związanych z łączeniem sektorów.

Wodór, jak opisano powyżej, stanowi istotny element łączący wiele sektorów w sposób umożliwiających bardziej efektywne wykorzystywanie potencjału energii ze źródeł odnawialnych.

Bibliografia

1. Bloomberg New Energy Finance, *Sector coupling in Europe: powering decarbonisation. Potential and policy implications of electrifying the economy*, 2020.
2. COAG Energy Council, Australia's National Hydrogen Strategy, Australia, 2019, <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf> (dostęp: 10.03.2022 r.).
3. IRENA (2018), *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
4. IRENA (2019), *Hydrogen: A renewable energy perspective*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
5. Komisja Europejska, Europejski Zielony Ład, Aspirowanie do miana pierwszego kontynentu neutralnego dla klimatu, dostęp online: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pl (dostęp: 10.04.2022 r.).
6. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europy, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. *Impuls dla gospodarki neutralnej dla klimatu: strategia UE dotycząca integracji systemu energetycznego*, Bruksela, dnia 8.07.2020 r. COM(2020) 299 final.
7. Mataczyńska E., *Integracja sektora w kierunku stworzenia wspólnego, europejskiego systemu*, Cykl seminariów naukowych „Szkoła Energii”, SGH, 20 maja 2021.

8. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040*, Warszawa 2021.
9. *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan, June 2019.

Rozdział 4

SPOSOBY PRODUKCJI I PRZESYŁU WODORU ORAZ SKROPLONEGO WODORU – BUDOWANIE PRZEWAG KONKURENCYJNYCH

Ways of producing and transporting hydrogen and liquefied hydrogen – building competitive advantages

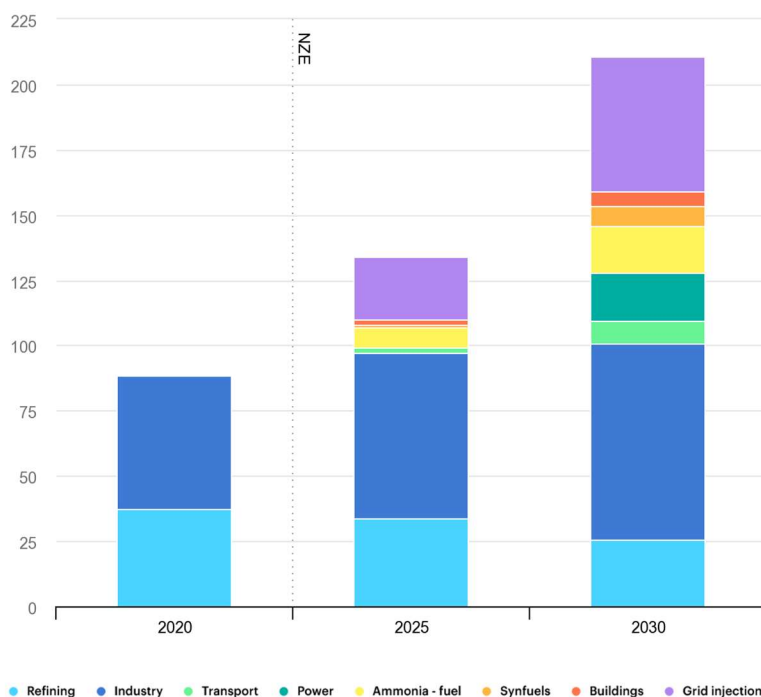
Paweł JAKUBOWSKI

***Abstract:** The purpose of this thesis is to present how hydrogen can be produced and transported in the most effective way including pros and cons of each technology within the energy transformation process. In the first part of this thesis, an extensive discussion is made on the production of hydrogen from natural gas by steam reforming and autothermal reforming integrated with CCS plant. Next, the methane pyrolysis process is presented as one of the most commonly method used to produce hydrogen on a large scale, assuming that the heat delivered is emission-free. The next chapter presents a technology that is completely environmentally friendly – the production of hydrogen from biomass. This covers the process of gasification and pyrolysis of biomass and the use of microorganisms to produce hydrogen from biomass, which according to specific circumstances can even go further than carbon neutral effect – it can have negative carbon footprint on final stage. Finally, the most promising way of producing zero-emission hydrogen – water electrolysis – is presented. In the second part of the work, selected methods of transporting the produced raw material in gaseous and liquid form are described. The similarities with the existing global LNG market are also mentioned in the predictive future development of liquid hydrogen transportation. The costs of hydrogen transportation are presented as well as a plan for the construction of hydrogen pipelines and the use of existing, well-developed gas pipeline infrastructure for hydrogen transportation (retrofitting and repurposing).*

4.1. Wprowadzenie

Światowa produkcja wodoru wynosi obecnie ok. 90 mln, z czego 98% pochodzi z przetwarzania paliw kopalnych, przy czym 72 mln ton H₂ (79%) pochodzi z instalacji dedykowanych do produkcji wodoru (wykorzystując technologię reformingu parowego), a pozostała część (21%) jest produktem ubocznym wytwarzanym przy innych procesach przemysłowych. Wodór jest surowcem wielu syntez chemicznych, jak również wchodzi w skład licznych substancji, zarówno organicznych, jak i nieorganicznych. Jest przede wszystkim szeroko używany w pro-

cesie rafinacji ropy naftowej (ok. 40 mln ton/r). Natomiast jako surowiec przemysłowy w ilości ok. 50 mln ton/r używany jest głównie do produkcji amoniaku i metanolu. W mniejszym stopniu używa się go do produkcji stali w technologii DRI¹.



Rys. 1. Wykorzystanie wodoru według sektorów w perspektywie lat 2020–2030

Fig. 1. Hydrogen use by sector in the 2020–2030 horizon

Źródło: IEA, *Hydrogen*, <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen> (dostęp: 20.04.2022 r.).

Warto wskazać, że globalna produkcja wodoru z wykorzystaniem paliw kopalnych (gł. gazu ziemnego) do celów przemysłowych odpowiada aż za 900 mln ton emisji CO₂, co odpowiada z kolei 2,5% światowych emisji dwutlenku węgla w energetyce i przemyśle ogółem. Dlatego też sektor przemysłowy jest wygodnym „kandydatem” do zwiększenia szerokiego zastosowania zielonego wodoru przy jednoczesnym obniżeniu CO₂ w procesach rafinacji.

Dla porównania cała polska energetyka i energochłonny przemysł emitują rocznie około 350 mln ton ekwiwalentnego CO₂². Dlatego też priorytetem w mię-

¹ Ang. *Direct Reduced Iron* – tzw. bezpośrednia redukcja rudy żelaza, wykorzystująca wodór zamiast węgla jako reduktor w procesie produkcji stali.

² J. Kupecki, M. Wierzbicki, *Wodór jako narzędzie integracji sektorów w nowym modelu energetyki*, „Nowa Energia” 2020, nr 5–6(75–76).

dzynarodowych strategiach wodorowych jest produkcja czystego (tzw. zielonego) wodoru z wykorzystaniem odnawialnych i zeroemisyjnych lub niskoemisyjnych źródeł energii. Niemniej jednak w ramach tego rozdziału zostaną przedstawione różne metody produkcji wodoru, zarówno te dominujące obecnie, jak i te przyszłościowe, mimo że ich udział w globalnej produkcji jest jeszcze marginalny.

Zakładając dynamiczny wzrost produkcji wodoru w ujęciu globalnym, uwzględnienie różnorodności technologicznej jest bardzo istotne z uwagi na *efektywność* używanych zasobów naturalnych do produkcji wodoru. Pojęciem wprowadzonym coraz częściej do publicznej debaty na temat technologii wodorowych jest występowanie tzw. śladu wodnego (*waterfootprint*) w jego produkcji, podobnie jak wprowadzono niegdyś określenie śladu węglowego (*carbonfootprint*³). I tak na przykład przyjmuje się, że zużycie wody w procesie elektrolizy jest najmniejsze i wynosi ok. 9 kilogramów H₂O na jeden kilogram wytworzonego wodoru. W przypadku użycia gazu ziemnego⁴ proporcje te rosną do 13–18 kg H₂O/kg H₂, a już w przypadku gazyfikacji węgla do produkcji wodoru wzrastają do poziomu 40–85 kg H₂O/kg H₂, w zależności od zużycia wody podczas samego wydobycia węgla⁵. Warto dodać, że rozwiązaniem pozwalającym chronić zapasy wody słodkiej w przyszłości może być użycie wody morskiej do procesu elektrolizy.

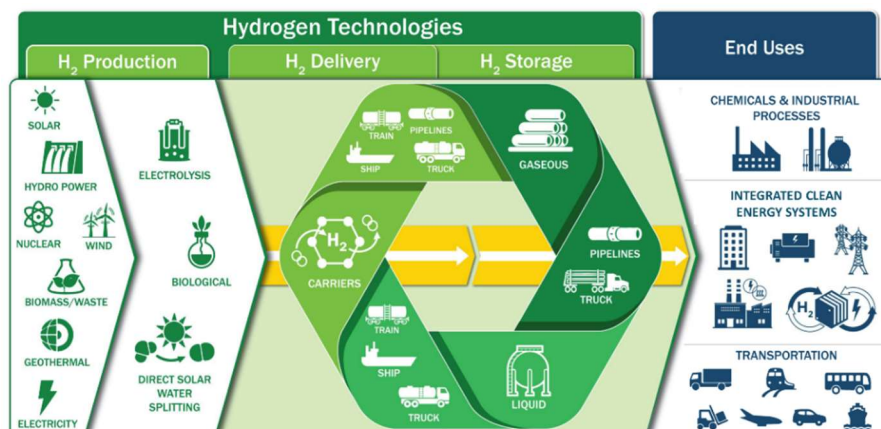
Różnorodne sposoby produkcji wodoru stwarzają też pewien dylemat dotyczący rozwoju i doskonalenia innych elementów technologicznych w *wodorowym łańcuchu wartości* (łańcuchu technologicznym). Otóż powstaje pytanie, czy należy skupić się na promowaniu przede wszystkim wodoru *zielonego* powstającego ze źródeł zeroemisyjnych (tak jak jest to formułowane w strategiach wodorowych w Europie) ze świadomością, że obecnie tak wytwarzanego wodoru jest relatywnie niewiele na rynku? Czy też w sposób mniej ortodoksyjny podchodzić do samego sposobu wytwarzania i uwzględniać np. wodór fioletowy (atom) czy wodór szary i niebieski (gaz ziemny) aby uzyskać silniejszy impuls do rozwoju technologii w dalszych ogniwach łańcucha wartości, równie istotnych do upowszechniania wodoru? Z całą pewnością obydwa podejścia różni kwestia emisji dwutlenku węgla w procesie produkcji, ale należy się zastanowić, czy korzyści z uwzględnienia wodoru pochodzącego ze wszystkich źródeł (czyli uwzględnienia całego produkowanego wolumenu) nie mogą wywołać w najbliższych latach silniejszego impulsu do rozwijania skuteczniejszych technologii transportowania, magazynowania, dystrybucji i finalnie konsumpcji? Innymi słowy, czy warto w określonym czasie uwzględniać wszystkie sposoby produkcji wodoru by uzyskać większą powszech-

³ Ślad węglowy – całkowita suma emisji gazów cieplarnianych związanych z produkcją danego dobra, obejmująca emisje dwutlenku węgla, metanu, podtlenku azotu i innych gazów cieplarnianych wyrażone w ekwiwalencie CO₂.

⁴ W kalkulacji dla gazu ziemnego uwzględnia się technologię CCUS (ang. *Carbon Capture and Utilization or Sequestration*).

⁵ IEA, *Global Hydrogen Review 2021*, listopad 2021.

ność jego stosowania w gospodarce? Warto poświęcić osobną pracę naukową na ten temat.



Rys. 2. Wodorowy łańcuch wartości – produkcja, przesył, magazynowanie i odbiorcy końcowi

Fig. 2. Hydrogen value chain – production, transportation, storage and end users

Źródło: Dr. Ned Stetson, H₂ Technologies Overview, U.S Department of Energy, Office of Energy Efficiency&Renewable Energy, Waszyngton, czerwiec 2021.

Należy również zaznaczyć, że obecnie prowadzone są dyskusje nad certyfikacją wodoru, w celu promowania wyłącznie zeroemisyjnych (zielonych) sposobów jego wytwarzania. Według określonych standardów przemysłowych system certyfikacji wodoru służyłby potwierdzeniu źródła pochodzenia oraz monitorowaniu całego procesu produkcji surowca pod kątem emisji CO₂. Taką koncepcję w marcu 2022 roku przedstawiła m.in. międzynarodowa agencja IRENA (*International Renewable Energy Agency*) proponując konkretne systemy certyfikacji wodoru oraz sposoby oceny ich skuteczności w perspektywie najbliższych trzydziestu lat⁶. W przyszłości można sobie wyobrazić sytuację, w której certyfikaty wodorowe mogłyby wpływać na ocenę atrakcyjności projektów inwestycyjnych przez instytucje finansujące i to zarówno publiczne jak i prywatne.

Wodór, podobnie jak energia elektryczna, jest bezemisyjnym nośnikiem energii co oznacza brak emisji CO₂ uwalnianego do atmosfery podczas jego spalania. Jedynym efektem „ubocznym” jest czysta woda. Jednak podobnie jak w przypadku produkcji energii elektrycznej, nie oznacza to że sama produkcja wodoru odbywa się zawsze w sposób bezemisyjny. Istniejące obecnie rozwiązania stwarzają tutaj szerokie możliwości (zob. tabela 1.).

Wodór musi być wytwarzany z cząsteczek zawierających wodór, ponieważ sam wodór nie występuje w stanie skupionym na ziemi (w przeciwieństwie do

⁶ IRENA, Coalition for Action, *Decarbonising End-use Sectors: Green Hydrogen Certification*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, marzec 2022.

węglowodorów np. złoża gazu ziemnego, ropy i węgla). Zatem wodór musi być wyprodukowany z surowców zbudowanych z cząstek zawierających wodór. Do takiego procesu można zastosować szereg różnych technologii konwersji, które to technologie wymagają ponadto wkładu energii wejściowej. A zatem, aby wyprodukować wodór potrzebny jest odpowiedni surowiec, technologia przetwarzania tego surowca oraz energia pozwalająca wybranej technologii funkcjonować. Obecnie najczęstszym surowcem do produkcji wodoru są paliwa kopalne (cząsteczki wodoru z węglem), ale biorąc pod uwagę obecnie trwający proces transformacji energetycznej szczególnego znaczenia nabiera przede wszystkim woda (cząsteczki wodoru z tlenem), a także biomasa i odpady (cząsteczki wodoru z tlenem i węglem). Finalnie to rodzaj surowca i zastosowany proces wraz z energią wejściową decydują o tym, czy nastąpią bezpośrednia lub pośrednia emisja CO₂ do powietrza w procesie produkcji wodoru. W tabeli 1. zaprezentowano przegląd obecnie stosowanych technologii produkcji wodoru z uwzględnieniem jej poziomu dojrzałości, rodzajów produktów finalnych i związaną z nimi potencjalną emisyjnością CO₂. Warto w tym miejscu wyjaśnić dość powszechną, ale jednak mylną opinię, że produkcja *zielonego* wodoru jest możliwa tylko w procesie elektrolizy wraz z użyciem energii elektrycznej uzyskiwanej z farm wiatrowych lub instalacji fotowoltaicznych. Przedstawione poniżej zestawienie przeczy takiej tezie.

Teoretycznie znanych jest wiele metod, zarówno laboratoryjnych, jak i przemysłowych otrzymywania wodoru. Rozwój czystych, zielonych technologii wytwarzania wodoru ma dzisiaj swoją olbrzymią szansę. Dla przykładu, wykorzystanie biomasy lub odpadów do procesu produkcji wodoru wraz z wychwytywaniem CO₂ może nawet prowadzić do tzw. *ujemnej* emisji CO₂ – czyli sytuacji, w której wytworzenie lub przygotowanie surowca oraz proces technologiczny produkcji wodoru sumarycznie obniżają ilość dwutlenku węgla w atmosferze. A zatem obecnie istniejące technologie produkcji wodoru możemy ogólnie podzielić na trzy kategorie: emitujące CO₂, bezemisyjne, a także z *ujemną* emisją CO₂.

W najbliższej przyszłości należy się spodziewać dalszego doskonalenia obecnie istniejących technologii produkcji wodoru oraz dynamicznego rozwoju nowych. Wiele ośrodków badawczo-naukowych na całym świecie prowadzi szeroko zakrojone badania laboratoryjne w celu osiągnięcia większej wydajności procesów technologicznych, używania mniej kosztownych surowców i prostszych elementów instalacji technologicznych. Ciekawym przykładem jest informacja ujawniona w 2021 roku przez hiszpański koncern energetyczny Repsol⁷. Do końca 2024 roku firma ta zamierza wybudować prototypową instalację do produkcji wodoru wykorzystującą proces foto-elektro-chemiczny. Chodzi tutaj o proces, w którym za pomocą paneli o unikalnej konstrukcji (przypominających panele fotowoltaiczne)

⁷ B. Radowitz, 'Very disruptive' direct solar-to-hydrogen commercially viable by 2030, says oil group Repsol, Recharge, 2021, <https://www.rechargenews.com/energy-transition/very-disruptive-direct-solar-to-hydrogen-commercially-viable-by-2030-says-oil-group-repsol/2-1-1056771> (dostęp: 20.04.2022 r.).

energia słoneczna oddziałuje bezpośrednio na cząsteczki wody, czyli z pominięciem procesu pośredniego – elektrolizy, rozbijając cząsteczki wody na wodór i tlen. Firma przewiduje pełną komercjalizację tej technologii do 2030 r.

Tabela 1. Proces produkcji wodoru, dojrzałość technologiczna procesu, produkty finalne oraz „kolor” wodoru

Table 1. Hydrogen production process, process maturity, final products, and hydrogen “color”

Surowiec [źródło H ₂]	Technologia	Dojrzałość procesu	Produkty	Kategoria H ₂ [kolor]
Gaz ziemny	Reforming prowy metanu (SMR)	Dojrzała	H ₂ + CO ₂	Wodór szary lub niebieski w zależności od stopnia ewentualnego wychwytywania CO ₂
	Auto-termiczny reforming (ATR)	Dojrzała	H ₂ + CO ₂	
	Piroliza metanowa	Pierwsze instalacje w 2025	H ₂ + C	Wodór turkusowy – sam proces nie emituje GHG, więc jeśli energia użyta do procesu jest zielona, to cała technologia może być uznana za bezemisyjną
Węgiel	Częściowa gazyfikacja/utlenianie (POX)	Dojrzała	H ₂ + CO ₂ + C	Wodór brązowy lub niebieski, w zależności od zastosowania CCS (wychwytywanie i składowanie CO ₂)
	Podziemna gazyfikacja węgla	Istnieją wdrożenia przemysłowe	H ₂ + CO ₂	
Stała biomasa i odpady	Gazyfikacja	Blisko dojrzałości	H ₂ + CO ₂ + C	Wodór zielony, Możliwa „ujemna” emisja CO ₂
	Gazyfikacja plazmowa	Pierwsze instalacje w 2023	H ₂ + CO ₂	
Mokra biomasa i odpady	Superkrytyczna gazyfikacja wody	Pierwsze instalacje w 2023	H ₂ + CH ₄ + CO ₂	Wodór zielony, Możliwa „ujemna” emisja CO ₂
	Mikrobiologiczna elektroliza komórkowa	Etap laboratoryjny	H ₂ + CH ₄	
Energia elektryczna i woda	Elektroliza: Alkaliczna	Dojrzała	H ₂ + O ₂	Wodór zielony – o ile energia elektryczna ma „zielone” pochodzenie
	PEM	Blisko dojrzałości	H ₂ + O ₂	
	SOEC	Projekty pilotażowe	H ₂ + O ₂	Wodór fioletowy, gdy energia elektryczna pochodzi z elektrowni jądrowych
Energia słoneczna i woda	Fotoelektrochemiczna	Etap laboratoryjny	H ₂ + O ₂	Wodór zielony

Źródło: Hydrogen Europe, *Hydrogen – a carbon-free energy carrier and commodity*, październik 2021.

Obok produkcji równie ważnym ogniwem technologicznym w łańcuchu wodorowym jest transport i przesył tego surowca. W procesie produkcji wytwarzany wodór ma postać gazową. Jego transport zatem może się odbywać w formie gazowej, np. z wykorzystaniem rurociągów. Problem w tym, że na świecie nie rozwinięto jeszcze odpowiedniej infrastruktury do transportu wodoru w dużej skali. To pierwiastek niezwykle przenikliwy, penetrujący, zmieszany z powietrzem tworzy wybuchową mieszaninę, więc jego transport oraz późniejsze składowanie wymagają nadzwyczajnych środków ostrożności. Można przewidywać, że system transportowy wodoru z wykorzystaniem rurociągów będzie realizowany dwutorowo. Po pierwsze, będzie to budowa rurociągów wodorowych, tzw. wodorociągów, lecz ze względu na duże koszty takich inwestycji, ich ogólny udział w systemie nie będzie w najbliższych latach znaczący. Po drugie, można założyć wykorzystanie istniejącej, dobrze rozbudowanej gazociągowej infrastruktury przesyłowej transportującej do przesyłu wodoru lub jego mieszanin, poprzez jej odpowiednie przystosowanie lub konwersję (tzw. retrofitting). Ze względu jednak na fakt, że ta infrastruktura była zaprojektowana do innego zastosowania, to od właścicieli i operatorów gazociągów należy wymagać przeprowadzenia szeregu badań eksperckich oraz prac badawczo-rozwojowych, w których kluczową rolę będą pełniły kompleksowe i cykliczne badania diagnostyczne. Służyć one będą potwierdzeniu technicznej możliwości bezpiecznej eksploatacji takiej infrastruktury z mieszaniną wodoru. Ponadto poza formą gazową wodór można transportować również w postaci ciekłej (ang. LH₂ – *liquid hydrogen*), podobnie jak to się odbywa w przypadku skroplonego gazu ziemnego (ang. LNG – *liquified natural gas*). Widać tutaj szereg analogii do wykorzystania rozwiązań kriogenicznych oraz przystosowanych statków morskich (*LNG carriers*).

W dalszej części rozdziału zostaną przedstawione wybrane najbardziej powszechne i najbardziej obiecujące technologie produkcji wodoru, z pominięciem węgla jako surowca do produkcji. Następnie zostaną przedstawione perspektywiczne metody transportu wodoru w formie gazowej i ciekłej.

4.2. Produkcja wodoru z gazu ziemnego

Reforming parowy i autotermiczny (SMR, ATR)

SMR (ang. *Steam Methane Reforming*) to obecnie najszerzej stosowany proces chemicznego wytwarzania wodoru, który odbywa się w instalacjach technologicznych dużej skali. Powstały w ten sposób produkt w ramach całego ciągu technologicznego jest wykorzystywany dalej w procesach produkcyjnych danego zakładu przemysłowego. Wodór uzyskiwany jest w dwustopniowej reakcji metanu (CH₄) z parą wodną (H₂O) o wysokiej temperaturze w obecności katalizatora metalicznego. W ten sposób powstaje najpierw gaz syntezowy złożony z tlenku węgla i wodoru. Następnie w drugiej fazie cyklu przetwarzania używa się powstałego tlenku węgla dalej z parą wodną, co pozwala uzyskać dodatkową ilość wodoru

i dwutlenek węgla. Schemat procesu reformingu parowego przedstawia się następująco:

1. $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$ temp = 700–1100°C
2. $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$ temp = 360°C

Istotną cechą tego procesu jest powstawanie dwutlenku węgla, który może być stosunkowo łatwo wykorzystany w zakładach chemicznych do produkcji np. metanolu lub innych paliw ciekłych. W ten sposób powstaje wodór „szary”. Drugą możliwością jest wychwytywanie CO_2 , czyli jego sekwestracja⁸. Zatem proces SMR zintegrowany z instalacją CCS generuje w rezultacie wodór, klasyfikowany jako „niebieski”, uznany za niskoemisyjny, ponieważ przyjmuje się, że liczba emitowanego dwutlenku węgla do atmosfery dzięki sekwestracji obniżona zostaje do poziomu 3,4 kg CO_2 na 1 kg H_2 .

Aby wyprodukować jedną tonę H_2 w przedstawianej technologii należy użyć ok. 5,2 MWh ciepła, 4,5 tony pary wodnej i 2 tony metanu. W efekcie oprócz wodoru otrzymujemy również ok. 5,5 tony dwutlenku węgla. Na obecnym etapie transformacji energetycznej, gdy wiele technologii zero- i niskoemisyjnego wytwarzania wodoru na dużą skalę potrzebuje jeszcze dojrzeć, to koszty wytwarzania H_2 metodą SMR należy uznać za stosunkowo niskie. Dla przykładu: w porównaniu z procesem elektrolizy, gdzie koszt wytworzenia wodoru waha się w przedziale 3,5–8,5 €/kg H_2 , koszt wytworzenia w technologii SMR wynosi tylko 1,3–2,2 €/kg H_2 ⁹.

Warto również zauważyć, że ta obecnie dominująca technologia produkcji wodoru nadal podlega ewolucji i doskonaleniu. Może to mieć znaczenie w dyskusji na temat dylematu zarysowanego na wstępie tego rozdziału. Dotyczy on uznawania bądź nieuznawania technologii produkcji wodoru z innych niż bezemisyjne technologie, przynajmniej w przejściowym okresie dojrzenia i upowszechniania się zielonych technologii, tych najbardziej obiecujących i pożądaných. W tym kontekście ciekawie prezentują się prace nad technologią SMR nowej generacji, nazywanej SMR-X. Jej cechą ma być większa efektywność procesowa uzyskana poprzez redukcję nadmiaru pary. W porównaniu z konwencjonalną technologią reformingu parowego, SMR-X ma być wydajniejszy termicznie przy mniejszej emisyjności dwutlenku węgla. Taką technologię wdrożył m.in. francuski koncern chemiczny Air Liquide¹⁰, który specjalizuje się w wytwarzaniu gazów przemysłowych. W kwietniu 2021 roku w Belgii (port w Antwerpii) firma ta oficjalnie uruchomiła pierwszą instalację przemysłową w technologii SMR-X.

⁸ CCS – ang. *Carbon Capture and Storage*.

⁹ Instytut Energetyki, *Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku*, Warszawa 202, <https://www.gov.pl/attachment/1b590d54-fa1e-49fe-9096-b2d0c6a4fe59> (dostęp: 20.04.2022 r.).

¹⁰ Air Liquide Engineering & Construction, *SMR-X™ – Zero Steam Hydrogen Production, Producing hydrogen without export steam*, <https://www.engineering-airliquide.com/smr-x-zero-steam-hydrogen-production> (dostęp: 20.04.2022 r.).

Odmianą technologii SMR jest reforming autotermiczny ATR (ang. *Autothermal Reforming*), który generuje te same produkty. Różnica polega głównie na tym, że SMR wykorzystuje tlen zawarty w powietrzu, podczas gdy ATR bezpośrednio spala tlen. Zaletą ATR jest możliwość większego manewrowania stosunkiem powstającego H_2 do tlenku węgla, co może być szczególnie przydatne do produkcji niektórych biopaliw.



Rys. 3. Nowoczesna instalacja do reformingu parowego w Belgii wykorzystująca technologię SMR-X

Fig. 3. A modern steam reforming plant in Belgium using SMR-X technology

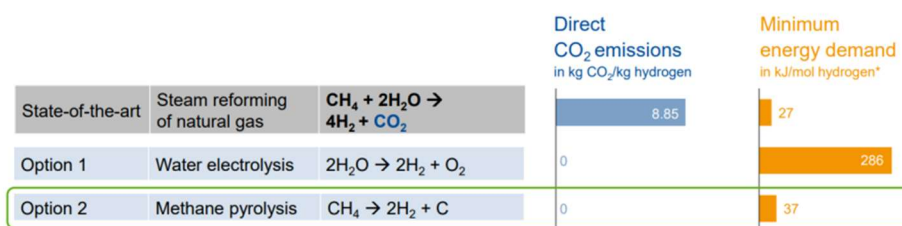
Źródło: Air Liquide Engineering & Construction,
<https://www.engineering-airliquide.com> (dostęp: 20.04.2022 r.).

Piroliza metanu

Piroliza jest podstawą wielu procesów przemysłowych takich jak odgazowywanie węgla kamiennego i brunatnego, kraking ciężkich frakcji ropy naftowej czy destylacja rozkładowa węgla. Jest to proces rozpadu cięższych cząsteczek na lżejsze pod wpływem temperatury bez udziału tlenu. W przypadku pirolizy metanu mamy do czynienia z procesem wysokotemperaturowym, w którym cząsteczka CH_4 rozpada się bezpośrednio na gazową postać wodoru oraz węgiel pierwiastkowy. Na pozór ten proces wydaje się bardzo prosty. Jednak wymaga on temperatur rzędu $1000\text{--}1500^\circ\text{C}$, co powoduje, że jest mocno energochłonny i kosztowny w porównaniu z aktualnie stosowanymi metodami produkcji wodoru, np. omawianym wcześniej reformingiem parowym. Gdyby taką potrzebną energię można było pozyskać z surowców odnawialnych, wódór można by wówczas produkować na

skalę przemysłową zupełnie bez emisji CO₂. Pozyskiwany w tym procesie węgiel mógłby być wykorzystywany na przykład w hutnictwie stali lub aluminium. Od strony chemicznej proces ten wygląda następująco: $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{C} + 3\text{H}_2$.

Od lat 60. XX wieku, kiedy rozpoczęły się pierwsze badania przemysłowe tego procesu, to piroliza metanu nie zyskała szerokiego zastosowania i nie została upowszechniona. Od chemicznej strony jest dobrze rozpoznana, lecz sam przebieg procesu już nie – wiele rozwiązań technologicznych różni się znacząco w wydajności i kosztach. Obecnie staje się atrakcyjna z uwagi na bezemisyjną produkcję wodoru i czystego węgla. I właśnie to może być pewnym wyjaśnieniem, że w ubiegłych dekadach koncentrowano się głównie na samych produktach tego procesu (H₂, C), nie na samym aspekcie braku emisji dwutlenku węgla. To dopiero współcześnie ta cecha pirolizy metanu zyskuje na atrakcyjności. Niestety, nie ma jednak wielu wdrożeń tej metody pozwalających na przemysłową produkcję H₂.



Rys. 4. Czyste technologie produkcji wodoru, porównanie emisyjności i energochłonności procesu

Fig. 4. Clean hydrogen production technologies, comparison of process emissivity and energy intensity

Źródło: Dr. William Daloz, *The quest for CO₂-free hydrogen – methane pyrolysis at scale*, BASF, grudzień 2019.

Według badań prowadzonych przez inżynierów firmy BASF w ostatnich latach, to właśnie piroliza metanu obok elektrolizy wody, jest najlepszą technologią produkcji wodoru, zakładając że energia w postaci ciepła dostarczana do procesu również jest uzyskiwana bezemisyjnie. Ponadto, ich zdaniem, w porównaniu z procesem elektrolizy przewagą pirolizy metanu jest znacząco niższy stosunek energii na jednostkę wytworzonego wodoru¹¹: elektroliza – 286 kJ/mol, piroliza 37 kJ/mol (zob. rys. 4.). Do tej pory niewiele firm jest zaangażowanych w rozwijanie technologii pirolizy metanu, jednak warto wymienić kilka obiecujących projektów. Wspomniany BASF prowadzi zakład testowy pirolizy metanu w Ludwigs-hafen w Niemczech i na ten moment jest to jedyna tego typu instalacja w Europie. Innym przykładem przemysłowego zastosowania pirolizy metanu jest

¹¹ Dr William Daloz, *The quest for CO₂-free hydrogen – methane pyrolysis at scale*, BASF, grudzień 2019 r.

amerykańska firma Monolith Carbon Black¹², która chwali się wysoką optymalizacją procesu w uruchomionej w 2021 pierwszej instalacji do produkcji czystego wodoru Olive Creek (OC1) w Nebrasce. Inna amerykańska firma Huntsman¹³ wykorzystuje pirolizę metanu do uzyskiwania cennej formy czystego węgla, znaną jako produkty węglowe MIRALON®. Ten materiał węglowy może być używany do zastosowań konstrukcyjnych w kompozytach, jako przewodnik elektryczny i potencjalnie jako materiał anodowy do ulepszonych akumulatorów litowo-jonowych. Firma ta planuje uruchomić pierwszy komercyjny zakład pirolizy metanu w 2024 roku.



Rys. 5. Instalacja do pirolizy metanu w Nebrasce w USA

Fig. 5. Methane pyrolysis plant in Nebraska, USA

Źródło: Monolith Carbon Black, *The Monolith Process*, dostęp online: <https://monolith-carbonblack.com/methane-pyrolysis> (dostęp: 20.04.2022 r.).

4.3. Produkcja wodoru z biomasy

Chcąc produkować całkowicie przyjazny środowisku nośnik energii konieczne jest wykorzystanie w tym celu zasobów odnawialnych. Spośród odnawialnych źródeł energii biomasa może stać się jednym z podstawowych i powszechnie dostępnych surowców do produkcji wodoru. Jednak na chwilę obecną należy uznać, że technologia wykorzystująca biomasę nie jest jeszcze na tyle dojrzała, aby być szeroko stosowana. Mimo że istnieją instalacje przemysłowe do spalania,

¹² Monolith Carbon Black, *The Monolith Process*, <https://monolith-carbonblack.com/methane-pyrolysis> (dostęp: 20.04.2022 r.).

¹³ Huntsman Corporation (HUN), *Our Solutions*, <https://www.huntsman.com/sustainability/our-solutions/article/14231/accelerating-the-market-toward-lower-emissions> (dostęp: 20.04.2022 r.).

przetwarzania i reformingu biomasy, nadal trudnym wyzwaniem pozostaje opracowanie bardziej efektywnych i ekonomicznych technologii w celu poprawy wydajności konwersji i zmniejszenia wpływu takiej konwersji na środowisko. Jednym z kluczowych wyzwań związanych z wykorzystaniem biomasy jako surowca do produkcji wodoru jest niska gęstość energetyczna samej biomasy. Zawartość wodoru w biomacie jest relatywnie mała (około 6% w porównaniu do 25% dla metanu¹⁴). Zatem zawartość energii w surowcu jest potencjalnie dużym ograniczeniem dla szerokiego zastosowania takiej technologii. Metody konwersji biomasy można podzielić na dwie kategorie: bezpośrednia produkcja wodoru i produkcja pośrednia poprzez konwersję półproduktów. Drugi sposób ma tę zaletę, że pośrednie etapy produkcji mogą być wykorzystane do dodatkowej produkcji innych pożądaných produktów zwiększających ekonomiczną opłacalność przedsięwzięcia. W taki sposób można również zminimalizować koszty poprzez centralny odbiór półproduktów od rozproszonych dostawców w celu produkcji wodoru na większą skalę w większym zakładzie przetwórczym. Krótko podsumowując, wytwarzanie wodoru z biomasy jest technologicznym i ekonomicznym wyzwaniem, mimo ekologicznych zalet samego surowca. Ponieważ uprawa biomasy wykorzystuje dwutlenek węgla z atmosfery, to w tym przypadku możemy mówić nawet o tzw. *ujemnej* emisji CO₂ w produkcji wodoru, o ile cały proces jest odpowiednio przygotowany. Oznacza to, że wykorzystując biomasę jako odnawialne źródło do produkcji wodoru, możemy uzyskać faktycznie efekt zmniejszania ilości dwutlenku węgla w atmosferze.

Technologie produkcji wodoru wykorzystujące biomasę można podzielić na trzy główne kategorie: termochemiczne i biologiczne.

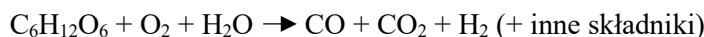
Termochemiczne przetwarzanie biomasy

Procesy termochemiczne to zgazowywanie i piroliza biomasy. Podczas zgazowania biomasa jest podgrzewana z mniejszą ilością tlenu niż jest to potrzebne do dokładnego spalania w celu wytworzenia gazu syntezowego, gdzie następnie gaz syntezowy należy przetworzyć do postaci wodoru (np. poprzez wcześniej opisywany reforming parowy metanu). W trakcie pirolizy szybkie podgrzanie biomasy bez udziału tlenu powoduje powstanie np. biooleju, który jako półprodukt może podlegać dalszej konwersji.

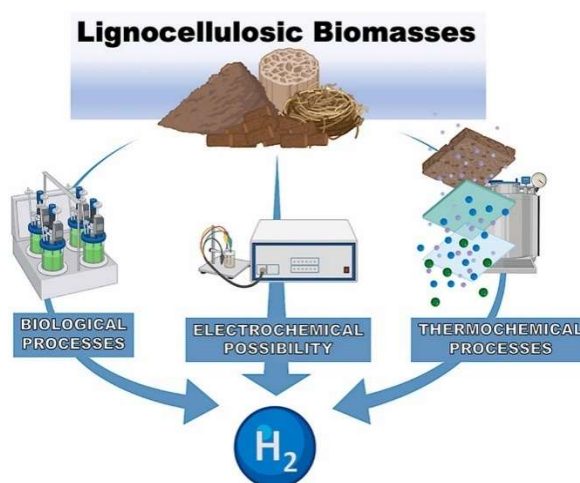
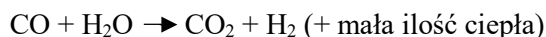
Zgazowywanie biomasy polega na przekształceniu związków organicznych w wysokich temperaturach (700–1400°C) wraz z kontrolowaną ilością tlenu lub pary wodnej, przetwarzając w ten sposób organiczne związki wodór-tlen-węgiel w wodór i inne produkty. W pierwszej fazie uzyskuje się wodór, tlenek i dwutlenek węgla. Następnie tlenek węgla reaguje z wodą, tworząc dwutlenek węgla i więcej wodoru poprzez reakcję konwersji gazu wodnego (tzw. *water-gasshifreaction*).

¹⁴ T.A. Milne, C.C. Elam, R.J. Evans, *Hydrogen from Biomass, State of the Art and Research Challenges*, Vol. IEA/H2/TR-02/001 (Ed.: U. S. D. o. E. Report), 2002, <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/36262.pdf> (dostęp: 20.04.2022 r.).

W dalszej części łańcucha technologicznego absorbery lub membrany mogą oddzielać wodór od strumienia gazu wodnego. Przykładowa reakcja może wyglądać następująco:



następnie reakcja konwersji gazu wodnego:



Rys. 6. Metody wykorzystania biomasy do produkcji wodoru – procesy termochemiczne, elektrochemiczne i biologiczne (fermentacja)

Fig. 6. Methods of using biomass to produce hydrogen – thermochemical, electrochemical and biological processes (fermentation)

Źródło: T. Lepage, M. Kammoun, Q. Schmetz, A. Richel, *Biomass-to-hydrogen: A review of main routes production, processes evaluation and techno-economical assessment*, "Biomass and Bioenergy" 2021, Vol. 144, January, 105920, DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105920 (dostęp: 20.04.2022 r.).

W powyższym schemacie przyjęto kilka upraszczających założeń, aby poprawić czytelność całego procesu, ponieważ w praktyce jest on bardziej złożony. Po pierwsze opisana reakcja zakłada wykorzystanie glukozy jako substytutu celulozy. Tymczasem rzeczywista biomasa ma bardzo złożony skład, a jednym z głównych składników jest celuloza właśnie. Ponadto należy zaznaczyć, że zgazowywanie biomasy zupełnie bez użycia tlenu to proces pyrolizy, opisywany wcześniej przy użyciu metanu jako źródła wodoru. Biomasa nie ulega łatwemu zgazowaniu i dlatego najczęściej w ramach procesu należy wykonać etap z użyciem katalizatora w celu rafinowania łańcuchów węglowodorowych, aby w rezultacie uzyskać czystą mieszaninę wodoru, tlenu i dwutlenku węgla.

W wyniku zgazowania biomasy w środowisku pary, powietrza lub tlenu powstaje mieszanina gazów o różnych stężeniach wodoru. Wśród tych metod użycie pary wodnej daje wyższe stężenie wodoru przy lepszej wartości opałowej otrzymanego gazu niż zgazowanie powietrzem lub tlenem¹⁵.

Termochemiczne przetworzenie biomasy jest w chwili obecnej najbardziej rozwiniętą technologią bazującą na biomase. Wśród konkretnych przykładów warto wskazać zakończony w 2019 roku projekt BONICO¹⁶. Polegał on na uruchomieniu pilotażowej instalacji produkującej wodór bezpośrednio z biomasy pochodzącej między innymi z wysypisk śmieci i składowisk odpadów. Sercem instalacji jest między innymi nowatorski reaktor membranowy, który łączy chemiczne przetwarzanie odpadów z procesem separacji membranowej powstałych w ten sposób gazów. Projekt był dofinansowywany ze środków unijnych (program Horizon 2020). W projekcie wzięło udział 8 instytucji z 7 państw europejskich, m.in. z Włoch, Hiszpanii, Holandii, Wielkiej Brytanii, Szwajcarii, Niemiec i Portugalii¹⁷.

Biologiczne przetwarzanie biomasy

Użycie mikroorganizmów do produkcji wodoru z biomasy ma niewątpliwie zalety w porównaniu do metod termochemicznych (zgazowywanie, pyroliza), ponieważ nie wymagają wysokich temperatur. Wodór można uzyskać poprzez biologiczne przetworzenie biomasy w procesie fermentacji beztlenowej (mikroorganizmy anaerobowe), fotofermentacji lub fotosyntezy. Wykorzystuje się w ten sposób zdolności enzymatyczne różnych gatunków bakterii, które przetwarzając biomasę produkują związki prostsze w tym bezpośrednio wodór.

W wyniku fermentacji biomasy powstaje zatem bio-wodór dzięki rozkładowi materii organicznej przy udziale bakterii beztlenowych, takich jak np. bakterie *Clostridiumthermocellum*. Wówczas taki proces nazywany jest tzw. *ciemną fermentacją*¹⁸. Wadą tego procesu jest stosunkowo duży udział produktów ubocznych, w tym np. kwasu octowego, a także niska wydajność produkcji na jednostkę kosztów inwestycyjnych. Dla przykładu równanie fermentacji glukozy wygląda następująco:



¹⁵ W. Liu, C.M. Liu, P. Gogoi, Y.L. Deng, *Overview of Biomass Conversion to Electricity and Hydrogen and Recent Developments in Low-Temperature Electrochemical Approaches*, "Engineering" 2020, 6, 1351–1363, <https://www.engineering.org.cn/en/10.1016/j.eng.2020.02.021> (dostęp: 20.04.2022 r.).

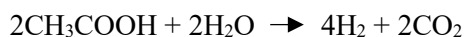
¹⁶ European Commission, *BIOgas membrane reformer for decentralized hydrogen production*, <https://cordis.europa.eu/article/id/394984-bionico-a-pilot-plant-for-turning-biomass-directly-into-hydrogen> (dostęp: 20.04.2022 r.).

¹⁷ BIONICO, *Biogas membrane reformer for decentralized H2 production*, <http://www.bionico-project.eu/> (dostęp: 20.04.2022 r.).

¹⁸ R.N. Moussa, N. Moussa, D. Dionisi, *Hydrogen Production from Biomass and Organic Waste Using Dark Fermentation: An Analysis of Literature Data on the Effect of Operating Parameters on Process Performance*, *Processes* 2022,10, 156, DOI: 10.3390/pr10010156 (dostęp: 20.04.2022 r.).

Składnikiem do produkcji wodoru w procesie ciemnej fermentacji mogą być odpady organiczne i ścieki, które są powszechnie dostępne i których tradycyjne zutyliżowanie wymaga kosztownej infrastruktury. Dlatego też bardzo ciekawym pomysłem są koncepcje uwzględniające bioreaktory ciemnej fermentacji przy oczyszczalniach ścieków jako jeden z elementów łańcucha technologicznego. Obecnie szacuje się koszt produkcji wodoru w procesie ciemnej fermentacji na ok. 2,6 \$/kg H₂¹⁹.

Fotofermentacja jest procesem, w którym używa się kwasów organicznych (np. mlekowy, octowy) do produkcji wodoru. Kluczową rolę odgrywają tutaj *bakterii efotoheterotroficzne* które wykorzystują światło słoneczne do aktywacji specyficznych enzymów. W efekcie produkują z kwasów organicznych wodór i dwutlenek węgla. W tym przypadku równanie chemiczne fotofermentacji dla np. kwasu octowego wyglądałoby następująco:



Z praktycznych względów fotofermentacja jako osobny proces produkcji wodoru jest, według stanu technologii na dzień dzisiejszy, działaniem bardzo mało opłacalnym. Spowodowane jest to koniecznością zapewnienia dużych powierzchni nasłonecznionych oraz wahań w produkcji zależne od pory roku i temperatury. Z tych względów nie jest to technologia szeroko stosowana. Ale warto zauważyć, że ze względu na fakt, że jednym z substratów do procesu fotofermentacji jest kwas octowy, to możliwy jest układ dwustopniowej fermentacji, w której w pierwszym etapie używa się fermentacji beztlenowej uzyskując wodór i kwas octowy, a następnie w drugim etapie zużywa się powstały wcześniej kwas octowy do procesu fotofermentacji uzyskując w efekcie kolejną porcję wodoru i dwutlenek węgla. Według dostępnej literatury w procesie fermentacji dwustopniowej można uzyskać aż do 70% wodoru zawartego w biomase użytej do procesu.

W ramach badań naukowych prowadzonych na całym świecie można zidentyfikować dużą różnorodność opracowywanych procesów biotechnologicznych wykorzystujących biomasę, światło słoneczne, bakterie, rośliny morskie (jak np. algi) lub procesy elektrochemiczne używane do konstrukcji mikrobiologicznych ogniw paliwowych (ang. MFC – *Microbial fuel cell*). Są to nowatorskie metody produkcji wodoru i być może w przyszłości uda się je skomercjalizować. Na chwilę obecną oprócz szeregu projektów badawczych i laboratoryjnych trudno wskazać dojrzałą technologię rokującą do komercjalizacji przedsięwzięcia.

¹⁹ „Analiza potencjału technologii wodorowych...”, Instytut Energetyki, Warszawa 2021.

4.4. Elektroliza wody

Elektroliza jest jednym z najbardziej obiecujących sposobów na produkcję zielonego wodoru w dużej skali. Proces ten polega na tym, że w ogniwie elektrochemicznym generującym wodór (elektrolizer) prąd elektryczny powoduje dysocjację/rozpad wody na wodór i cząsteczki tlenu. Prąd elektryczny przepływa między dwiema elektrodami w roztworze przewodzącym (elektrolit), wytwarzając wodór na elektrodzie ujemnej (katodzie) i tlen na elektrodzie dodatniej (anodzie)²⁰. Elektroliza jest procesem znanym od dawna, jednak dopiero teraz w dobie transformacji energetycznej i działań podjętych w kierunku ochrony klimatu, nabiera specjalnego znaczenia.

Według Międzynarodowej Agencji Energii (ang. IEA – *International Energy Agency*) łączna moc elektrolizerów na świecie potrzebnych do produkcji wodoru z energii elektrycznej podwoiła się w ciągu ostatnich pięciu lat i do połowy 2021 roku osiągnęła sumarycznie moc ok. 300 MW. Przyjmując, że obecnie ok. 350 projektów, które są w trakcie realizacji zakończy się powodzeniem do 2030 roku, to globalna moc zwiększy się aż do wartości 54 GW. Kolejne 40 projektów obejmujących ponad 35 GW mocy znajduje się na wczesnym etapie rozwoju. Jeśli wszystkie te projekty zostaną zrealizowane, globalna podaż wodoru z elektrolizerów może osiągnąć ponad 8 mln ton do 2030 roku²¹. Ważną obserwacją obecnie trwających trendów jest fakt, że średnia wielkość poszczególnych instalacji opartych na elektrolizie stale rośnie od skali kilku megawatów do instalacji o mocy rzędu 10-ciu, a nawet 20 MW. Z tego względu prognozy MAE są tak optymistyczne i zakładają skokowy wzrost łącznej mocy elektrolizerów do końca trwającej dekady.

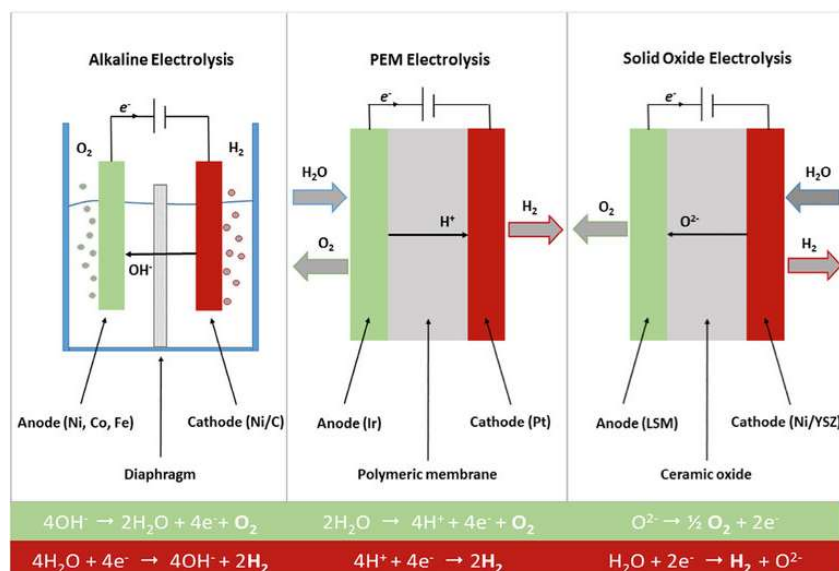
Obecnie stosowane są trzy podstawowe typy elektrolizerów różniące się przede wszystkim rodzajem elektrolitu. Można je podzielić na elektrolizery alkaliczne, PEM i SOE. Poniżej przedstawione zostaną też inne nowoczesne rozwiązania bazujące na procesie elektrolizy, ponieważ jest to współcześnie bardzo dynamicznie rozwijający się segment gospodarki wodorowej na świecie.

Zaletą procesu elektrolizy jest możliwość uzyskiwania bardzo czystego wodoru, niezależnie od samego rodzaju elektrolizera²², ponieważ ten proces jest ekologiczny i wytwarza bardzo mało produktów ubocznych, jedynie cząsteczkowy tlen, który również nadaje się do zagospodarowania.

²⁰ ISO 22734:2019, *Hydrogen generators using water electrolysis — Industrial, commercial, and residential applications*, <https://www.iso.org/standard/69212.html> (dostęp: 20.04.2022 r.).

²¹ IEA, *Global Hydrogen Review 2021*, listopad 2021.

²² J. Kotowicz, M. Jurczyk, D. Węcel, W. Ogulewicz, *Analysis of Hydrogen Production in Alkaline Electrolyzers*, "Journal of Power Technologies" 2016, 96(3), s. 149–156, Silesian University of Technology, 2016, <https://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/view/888/723> (dostęp: 20.04.2022 r.).



Rys. 7. Trzy podstawowe rodzaje elektrolizerów: AEC, PEM, SOE (anoda kolor zielony, katoda kolor czerwony)

Fig. 7. Three basic types of electrolyzers: AEC, PEM, SOE (anode color green, cathode color red)

Źródło: Progress in Energy and Combustion Science, *Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas*, 2017 1–35, <https://www.researchgate.net/journal/Progress-in-Energy-and-Combustion-Science-0360-1285> (dostęp: 20.04.2022 r.).

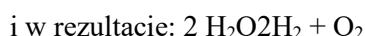
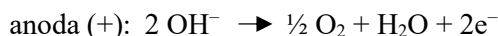
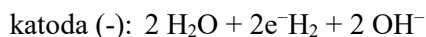
Jednak kluczowym elementem poszukiwań naukowo-badawczych jest jak najwyższa sprawność układu. Miernikiem sprawności może być współczynnik EROEI²³ definiowany jako różnica między nakładem energii, poświęconej na przemianę zastosowanego źródła energii, a energią, którą w rezultacie można z niego uzyskać. Dla wodoru wynosi on średnio ok. 0,8. Pomijając wszystkie aspekty środowiskowe i technologiczne, analizując sprawność układu wyłącznie pod kątem termodynamicznym, wszystkie paliwa z EROEI poniżej jedności nie mają sensu w swoim zastosowaniu. Ekwiwalent energii dostarczonej jest większy niż ekwiwalent energii którą otrzymujemy. Dlatego też tak ważne jest aby do procesu elektrolizy w układzie przemysłowym używać energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł w możliwie dużej skali.

Elektroliza alkaliczna (AEC)

W procesie elektrolizy alkalicznej (ang. *Alkaline electrolysis cell*) elektrolitem jest np. wodny roztwór wodorotlenku potasu (KOH) lub wodorotlenku sodu (NaOH). Zadaniem elektrolitu jest jak najlepsze przewodzenie jonów. Tego typu

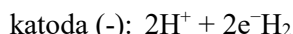
²³ EROEI – ang. *Energy Returned on Energy Invested* – zwrot energii wobec energii zainwestowanej.

elektrolizery charakteryzują się długą wytrzymałością i żywotnością, mogą pracować w zakresie temperatur od 25 do 100°C przy ciśnieniu 1–30 barów. Z ekonomicznego punktu widzenia żywotność tych elektrolizerów, rzędu kilkudziesięciu tysięcy godzin, można uznać za zadowalającą dla ciągłej pracy. Dotychczas osiągały one sprawność rzędu 60–70%²⁴, ale według najnowszych danych z wdrożonych projektów elektrolizery alkaliczne mogą osiągać wyższe wartości do ok. 80%. Reakcje elektrodowe i równanie chemiczne przedstawia się następująco:



Elektroliza PEM

W elektrolizerach typu PEM (ang. *Proton Exchange Membrane* – polimerowa membrana wymiany protonów) elektrolitem jest stały polimer kwasu perfluorosulfonowego – PFSA, który równocześnie pełni rolę membrany wymiany protonów. Parametry pracy elektrolizerów PEM są zbliżone do elektrolizerów alkalicznych, mogą pracować w podobnym zakresie temperatur od 20 do 80°C i osiągają sprawność rzędu 60–80%. Membrany polimerowe cechuje duża wytrzymałość mechaniczna i chemiczna dzięki czemu mogą one pracować w wyższym ciśnieniu do 80 barów. Reakcje elektrodowe przedstawiają się następująco:



Porównując obydwie technologie elektrolizerów (AEC i PEM) można sformułować twierdzenie, że są to technologie o porównywalnej wydajności. Elektrolizery AEC są uważane za mniej kapitałochłonne, jednak wodór wytwarzany w elektrolizerach PEM charakteryzuje się nieco większą czystością²⁵.

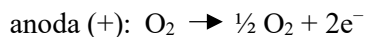
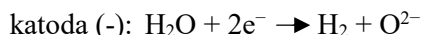
Elektroliza SOE

Elektroliza stało-tlenkowa (ang. *SOE – solid oxide electrolysis*) to najnowsza z trzech najbardziej popularnych technologii elektrolizerów. Różni się od wcześniej opisanych technologii zdecydowanie wyższą temperaturą pracy w przedziale 650–850°C przy ciśnieniu poniżej 10 barów. Działanie elektrolizerów SOE opiera się na wykorzystaniu jako elektrolitu materiałów, które w wysokich temperaturach

²⁴ R.El. Mrabet, A. Berrada, *Hydrogen production and derivatives from renewable energy systems for a best valorization of sustainable resources*, Hybrid Energy System Models, 2021, <https://www.sciencedirect.com/book/9780128214039/hybrid-energy-system-models> (dostęp: 10.04.2022 r.).

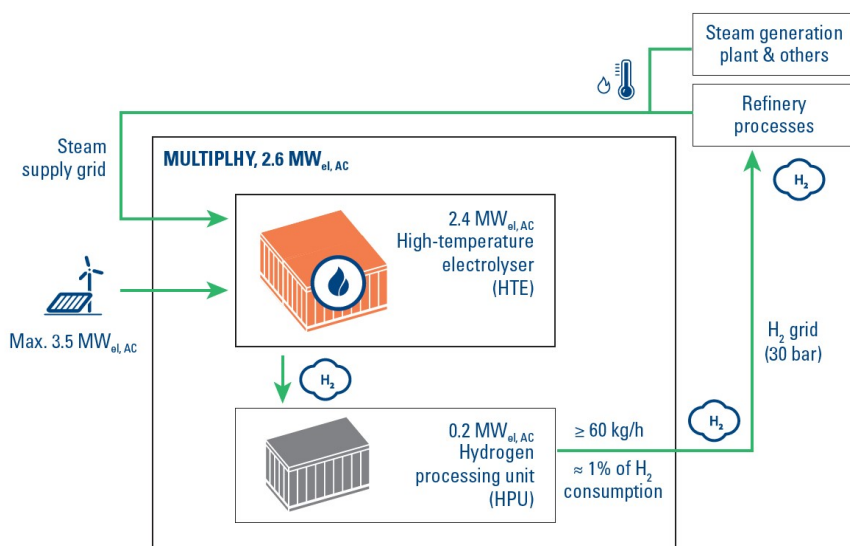
²⁵ J. Kotowicz, M. Jurczyk, D. Węcel, W. Ogulewicz, *Analysis of Hydrogen...*

mają zdolność do przenoszenia jonów tlenowych. Dlatego do budowy membran w elektrolizerach SOE wykorzystuje się np. nikiel. Reakcje elektrodowe przedstawiają się następująco:



Istotną cechą tego typu elektrolizerów jest najmniejsze zapotrzebowanie na energię elektryczną w porównaniu z poprzednimi dwoma rodzajami AEC i PEM. Wynika to z faktu, że część potrzebnej energii do procesu jest dostarczana za pomocą ciepła, by osiągnąć optymalną, wysoką temperaturę pracy. Zatem można stwierdzić, że technologia SOE ma duży potencjał integracji systemowej z innymi instalacjami przemysłowymi, gdzie występuje dużo ciepła odpadowego.

Najnowszym przykładem takiej właśnie integracji systemów może być projekt MultiPLHY²⁶, polegający na budowie pierwszego na świecie elektrolizera SOE o wysokiej mocy (ok. 2,4 MW) na terenie rafinerii Neste w Rotterdamie.



Rys. 8. Projekt MultiPLHY wykorzystujący elektrolizery SOE

Fig. 8. MultiPLHY design using SOE electrolyzers

Źródło: MultiPLHY, Multimegawatt high-temperature electrolyser to generate green hydrogen for production of high-quality biofuels, dostęp online: <https://multiplhy-project.eu/> (dostęp: 21.04.2022 r.).

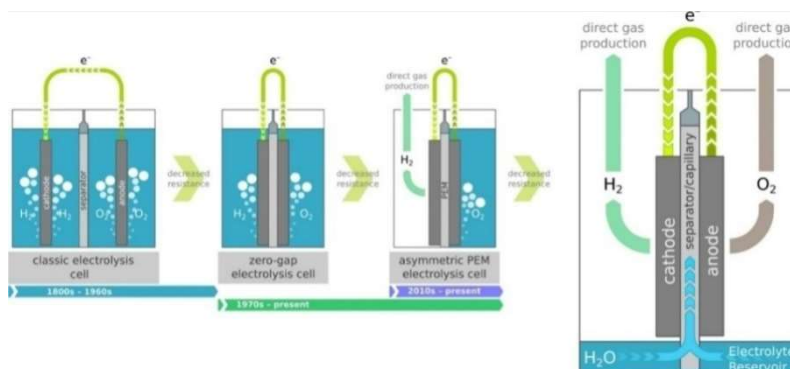
²⁶ MultiPLHY, Multimegawatt high-temperature electrolyser to generate green hydrogen for production of high-quality biofuels, <https://multiplhy-project.eu/> (dostęp: 21.04.2022 r.).

Dostawcą technologii jest niemiecka firma Sunfire²⁷. Wydajność elektrolizera SOE w tym układzie ma wynosić 84%. W ramach integracji elektrolizera SOE z innymi ogniwami technologicznymi układu, wykorzystana zostanie para wodna o wysokiej temperaturze produkowana na terenie rafinerii. Po pomyślnym zakończeniu fazy planowania pod koniec listopada 2021 roku, projekt wszedł w etap realizacji.

Innym przykładem jest duńska firma Topsoe²⁸, która zadeklarowała, że najpóźniej w 2023 roku zaprezentuje instalację do produkcji wodoru z wykorzystaniem elektrolizera SOE. System ma być dużo bardziej efektywny niż elektrolizery alkaliczne czy typu PEM; wydajność ma osiągnąć na poziomie 90%.

Elektrolizer zasilany kapilarnie (CFE)

Jedną z obecnie najbardziej nowoczesnych technologii elektrolizerów, które mają szansę na komercyjne wdrożenie, zaprezentowała firma Hysata²⁹ z Australii. Na początku marca 2022 roku Hysata przedstawiła zupełnie nowy projekt tzw. elektrolizera zasilanego kapilarnie (ang. CFE – *capillary-fed electrolysis cell*). Jest to technologia, która ma mieć wydajność na poziomie 98%, co oznacza, że będzie to najbardziej wydajna instalacja elektrolityczna na świecie. Ponadto firma deklaruje, że koszt wyprodukowanego wodoru będzie oscylował poniżej poziomu



Rys. 9. Koncepcja elektrolizera Hysata zasilanego kapilarnie

Fig. 9. Hysata's capillary-fed electrolysis cell concept (CFE)

Źródło: A. Hodges, A.L. Hoang, G. Tsekouras et. al., *A high...*

²⁷ Sunfire, *Multiplhy project proceeds into execution phase*, Rotterdam, November 23, 2021, <https://www.sunfire.de/en/news/detail/multiplhy-project-proceeds-into-execution-phase> (dostęp: 12.03.2022 r.).

²⁸ Topsoe, *SOEC the next generation of green hydrogen production*, <https://info.topsoe.com/green-hydrogen> (dostęp: 10.03.2022 r.).

²⁹ Hysata, *Hysata's electrolyser breaks efficiency records, enabling world-beating green hydrogen cost*, marzec 2022, <https://hysata.com/news/hysatas-electrolyser-breaks-efficiency-records-enabling-world-beating-green-hydrogen-cost/> (dostęp: 12.04.2022 r.).

1,5 \$/kgH₂. Z opublikowanych danych w naukowym magazynie „Nature”³⁰ wynika, że w tym systemie woda do elektrod będzie dostarczana unikalnym systemem kapilarnym³¹ w taki sposób, że elektrody będą pracowały w sposób zupełnie bez pęcherzykowy. Dzięki takiemu rozwiązaniu system będzie mógł pracować w wysoko deklarowanej wydajności. W roku 2022 firma planuje uruchomić budowę instalacji pilotażowej.

4.5. Transport wodoru

W poprzedniej części rozdziału opisane zostały wybrane sposoby produkcji wodoru. Przedmiotem natomiast tej części będzie przedstawienie metod transportowania wytworzonego surowca. Zatem transport wodoru można scharakteryzować ze względu na:

1. stan skupienia (gazowy lub ciekły),
2. dystans (dalekosiężny lub lokalny),
3. wolumen (duże ilości i małe ilości),
4. skład (czysty wodór, mieszanina gazów lub cząsteczka z wodorem).

Według zaprezentowanej powyżej charakterystyki można założyć, że będą kształtowały się różne łańcuchy wartości w gospodarce wodorowej. Ponadto można też przyjąć, że wraz z dojrzwaniem gospodarki wodorowej liczba łańcuchów wartości będzie rosła, by wykształcić te najbardziej opłacalne i przyszłościowe. Dlatego też przedmiotem niniejszych rozważań nie będą wszystkie teoretycznie możliwe kombinacje, ale dwa główne łańcuchy wartości, które są najbardziej obiecujące i prawdopodobne. Pierwszym istotnym scenariuszem będzie przesył sprężonego wodoru, w tym w mieszaninie z metanem, za pomocą rurociągów. Drugim zaś transport ciekłego wodoru – podobnie do łańcucha wartości LNG.

Można zauważyć, że transport wodoru odbywa się już na szeroką skalę na świecie w sposób pośredni, tzn. w medium pośrednim, takim jak metanol (CH₃OH) i amoniak (NH₃). Jest to o tyle wygodna forma, że wodór uwięziony w cząsteczce amoniaku lub metanolu nie przejawia już takich właściwości penetrujących jak wodór w postaci czystej. Metanol można produkować z paliw kopalnych, biomasy oraz źródeł odnawialnych z wychwytywaniem dwutlenku węgla. Oprócz tego, że jest wykorzystywany do produkcji w wielu branżach przemysłowych, to jest też atrakcyjnym paliwem np. w transporcie morskim. W wyniku spalania czystego metanolu otrzymujemy dwutlenek węgla i wodę. Dlatego jest wykorzystywany jako paliwo lub jako składnik mieszanki w silnikach spalinowych jako ekologiczna alternatywa dla paliw tradycyjnych. Amoniak natomiast nie jest już tak łatwy w transporcie, ponieważ jest substancją żrącą i toksyczną. Najczęściej stosuje się

³⁰ A. Hodges, A.L. Hoang, G. Tsekouras et. al., *A high-performance capillary-fed electrolysis cell promises more cost-competitive renewable hydrogen*, „Nat Commun” 2022, 13, 1304, DOI: 10.1038/s41467-022-28953-x (dostęp: 20.04.2022 r.).

³¹ W technice zjawisko przepływu i kondensacji kapilarnej jest wykorzystywane w membranach kapilarnych, na przykład Gore-Tex.

go do produkcji nawozów sztucznych. W przypadku obydwu substancji można przyjąć, że ich przemieszczanie różnymi środkami transportu, w ciekłym i gazowym stanie skupienia, jest powszechnie stosowane. Takie łańcuchy wartości są rozwinięte i funkcjonują już w gospodarce na całym świecie.

Przesył wodoru w postaci gazowej

Głos w szerokiej dyskusji na temat przyszłego scenariusza przesyłu wodoru prezentuje środowisko branży energetycznej w Europie skupione w dwóch inicjatywach: Europejskim Stowarzyszeniu Operatorów Gazowych ENTSOG³² oraz w inicjatywie *Gas for Climate: a path to 2050*³³. Według zaprezentowanego scenariusza przesył wodoru, zwłaszcza na duże odległości, będzie odbywał się na szeroka skalę z użyciem infrastruktury rurociągowej z uwagi na bezpieczeństwo i koszty transportu. Należy jednak zauważyć, że obecnie taka perspektywa zapowiada się skromnie. Na świecie znajduje się jedynie ok. 5 tys. km rurociągów *stricte* dedykowanych do transportu wodorowego, z czego w Europie zaledwie 1500 km. Istniejące rurociągi na sprężony wodór znajdują się głównie w zakładach przemysłowych związanych z sektorem chemicznym i paliwowo-surowcowym. Mają charakter lokalny w obrębie jednej instalacji przemysłowej i transportują sprężony wodór potrzebny w konkretnym etapie produkcji przemysłowej np. do usuwania siarki z ropy naftowej w procesie rafinacji. Z tego względu zbudowanie odpowiedniego, rozbudowanego systemu dla wielkoskalowego transportu wodoru, będzie jednym z głównych celów i wyzwań powstającej gospodarki wodorowej, bez względu na duży optymizm branży gazu ziemnego.

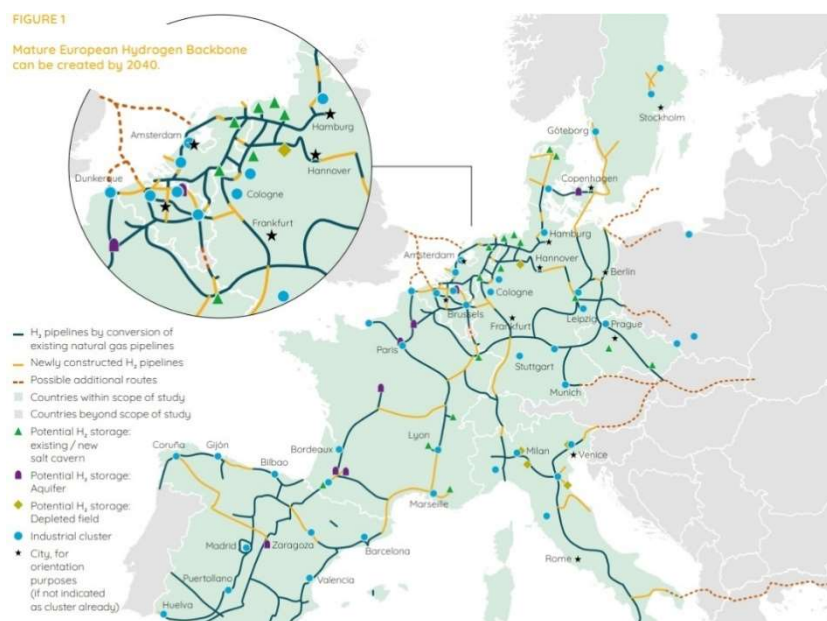
Budowa rurociągowego systemu transportowego wodoru będzie realizowana w Europie dwutorowo. Po pierwsze – planowana jest realizacja zupełnie nowych dedykowanych rurociągów wodorowych tzw. wodorociągów. Jednak należy oczekiwać, że ze względu na duże koszty takich inwestycji, ich ogólny udział w systemie transportowym nie będzie w najbliższych latach znaczący. Po drugie – zakłada się wykorzystanie już istniejącej, dobrze rozbudowanej infrastruktury przesyłowej gazu ziemnego poprzez jej odpowiednie przystosowanie lub konwersję (*retrofitting, repurposing*). Poniżej prezentowana jest mapa systemu przesyłu wodoru w Europie w perspektywie 2040 roku, określana jako tzw. *European Hydrogen Backbone*³⁴. Taką koncepcję wspiera szereg organizacji branżowych i firm z sektora gazu ziemnego. Zakłada się, że w 21 państwach Europy może powstać sieć do transportu wodoru (lub jego mieszanin z metanem) o długości 40 000 km, przy

³² *Advisory Panel For Future Gas Grids – Recommendation Report*, ENTSOG, styczeń 2022, https://entsog.eu/sites/default/files/2022-02/1_entsog_220134_roadmap_2050_FGG_05.pdf (dostęp: 12.04.2022 r.).

³³ DESFA, Enagás, Energinet, Fluxys, Gasunie, GRTgaz, ONTRAS, Open Grid Europe, Snam, Svedegas, Terég, <https://gasforclimate2050.eu/gas-for-climate/who-we-are/> (dostęp: 10.04.2022 r.).

³⁴ *Gas for Climate: a path to 2050, European hydrogen backbone*, Press release, 2021, <https://gasforclimate2050.eu/news-item/european-hydrogen-backbone-grows-to-40000-km/> (dostęp: 12.04.2022 r.).

czym 2/3 tej infrastruktury będą stanowić dostosowane rurociągi na gaz ziemny funkcjonujące obecnie.



Rys. 10. Planowana infrastruktura transportu wodoru w całej Europie przez European Hydrogen Backbone

Fig. 10. Planned hydrogen transport infrastructure across Europe by European Hydrogen Backbone

Źródło: Hydrogen Europe, *Clean Hydrogen Monitor*, 2020.

Wymaga to jednak od operatorów systemów gazowych przeprowadzenia analizy poziomu dostosowania obecnie eksploatowanej sieci do warunków tłoczenia nowego medium. W związku z tym konieczne jest wykonanie szeregu prac badawczo-rozwojowych i badań eksperckich, w których kluczową rolę będą pełnić kompleksowe badania diagnostyczne, np. metodą ultradźwiękową ILI (*in-line inspections*³⁵). Dzięki temu możliwe będzie weryfikowanie nie tylko przydatności infrastruktury rurociągowej już dzisiaj, ale regularne badania pozwolą na optymalne wydłużenie wykorzystania tej infrastruktury w przyszłości. Stan techniczny rurociągów jest tutaj kluczowym parametrem. Obrazowanie wodoru w sieci rurociągów wykonanych ze stopów metalu jest poważnym wyzwaniem ze względu na trzy parametry: dużą ruchliwość wodoru, złożoność składu stopów rur oraz często niejednoznaczne wyniki badanej powierzchni. Dlatego wyspecjalizowana metoda diagnostyczna będzie miała duże znaczenie w ocenie stanu technicznego rurociągów.

³⁵ Unikalna metoda badawcza ILI UT z wykorzystaniem tłoków inteligentnych jest w Polsce rozwijana przez firmę Naftoserwis Sp z o.o. z Grupy Kapitałowej PERN.

Reasumując, gotowość techniczna istniejącej infrastruktury gazowej i urządzeń do bezpiecznej eksploatacji powinna być przedmiotem profesjonalnych badań. Niemniej już dziś szacuje się w jakim stopniu można mieszać wodór w istniejącym systemie gazu ziemnego. Na podstawie aktualnie prowadzonych analiz przez unijną agencję Joint Research Centre³⁶ przyjmuje się, że większość istniejących elementów systemu gazowego będzie w stanie tolerować 5–10% udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym bez potrzeby ich istotnej modyfikacji. Tolerancja może ulec dalszemu zwiększeniu, ale wymagana już jest modyfikacja sieci i adaptacja urządzeń. Dla przykładu, według informacji przedstawionych przez dwóch wiodących producentów turbin gazowych (GE, Siemens) ich obecne układy mogą potencjalnie obsłużyć 15% mieszaninę wodoru z metanem.

Tabela 2. Poziomy nasycenia mieszaniny wodoru z metanem w sieci gazowej
Table 2. Saturation levels of the hydrogen-methane mixture in the gas network

	% objętości H ₂	% spadek ciepła spalania mieszaniny CH ₄ + H ₂
Etap 1 (wczesny)	2–5	0,6–1,6
Etap 2 (średni)	15–20	5,1–7,1
Etap 3 (zaawansowany)	50	23,4

Źródło: European Commission, *Blending hydrogen from electrolysis into the European gas grid*, Joint Research Centre (JRC), styczeń 2022, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC126763> (dostęp: 20.04.2022 r.).

Według wniosków przedstawionych przez JRC można przyjąć trzy następujące etapy przestawiania sieci gazowej na mieszaninę wodorowo-metanową. Pierwszy etap, który można osiągnąć najszybciej, to nasycenie na poziomie 2–5% i nie wymaga to większej ingerencji technologicznej na poziomie sieci przesyłowej i dystrybucyjnej. Drugi etap to nasycenie systemu 15–20% mieszaniną i w tym przypadku duże ingerencje nie byłyby potrzebne, jednak należałoby się liczyć z zauważalną zmianą parametrów gazu (spadek kaloryczności gazu). A to mogłoby już wymagać adaptacji lub zupełnej wymiany urządzeń końcowych opalanych gazem. Trzeci etap to osiągnięcie poziomu 50%, ponieważ zdaniem autorów analiz taki poziom byłby teoretycznie możliwy w przyszłości po 2030 roku. Jednak jest wątpliwe, by tak wysokie nasycenie byłoby możliwe w całym systemie równomiernie, a ponadto spadek kaloryczności gazu (wyrażony liczbą Wobbego) byłby sporym wyzwaniem nie tylko dla systemu przesyłowego i dystrybucyjnego, ale przede wszystkim dla urządzeń końcowych w przemyśle i wśród użytkowników domowych. Dlatego też należy osobno kalkulować ryzyko związane z tzw. liczbą Wobbego w scenariuszu mieszania wodoru z gazem w sieci.

³⁶ European Commission, *Blending hydrogen from electrolysis into the European gas grid*, Joint Research Centre (JRC), styczeń 2022, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC126763> (dostęp: 20.04.2022 r.).

Ryzyko związane z liczbą Wobbego

Ograniczeniem, które może wpłynąć na infrastrukturę i urządzenia gazowe jest tzw. liczba Wobbego, określająca kaloryczność gazu w jednostce objętości, w tym przypadku objętości mieszaniny gazów ($\text{CH}_4 + \text{H}_2$). Wartość liczby Wobbego jest podstawą do podziału paliwa gazowego na podgrupy. Za dolną granicę liczby Wobbego przyjmuje się wartość opałową gazu (ang. LHV – *low heating value*), a za górną jego ciepło spalania (ang. HHV – *high heating value*).

W jednostce masy wodor ma 2 razy większą gęstość energii niż metan, ale w jednostce objętości wodor zawiera trzy razy mniej energii niż metan³⁷. I dlatego z punktu widzenia maszyn i urządzeń gazowych proporcje obydwu gazów w mieszaninie paliwa są bardzo istotne z uwagi na właściwości metali i surowców użytych do ich konstrukcji, ale też przekładają się na ich pracę i wydajność. Uzyskanie takiego samego ciepła (energii) z urządzenia wymaga przepływu trzy razy większej objętości wodoru w stosunku do metanu.

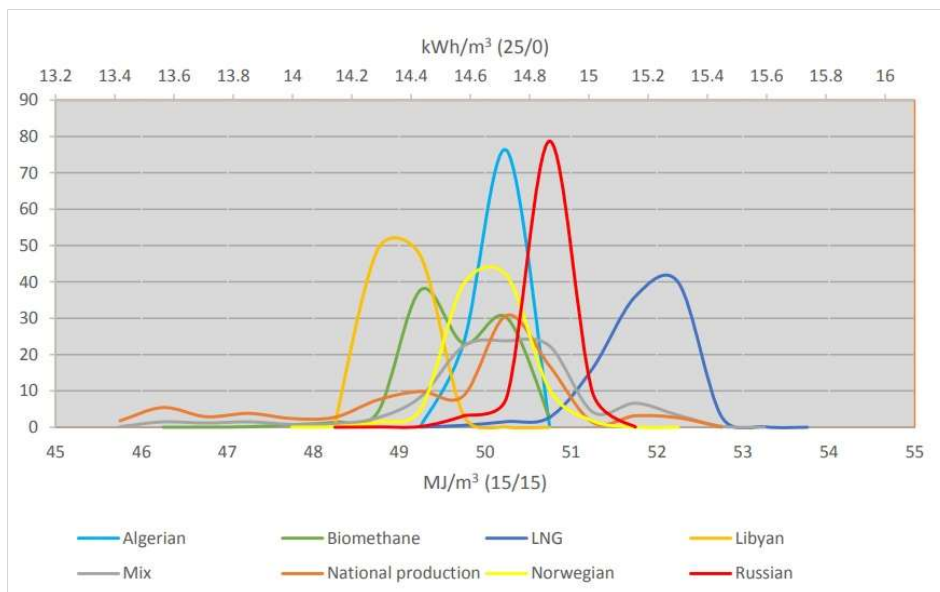
Dla operatorów gazowego systemu przesyłowego i dystrybucyjnego (OSP i OSD) bardzo istotne jest utrzymywanie paliwa gazowego w określonym przedziale kaloryczności z uwagi na możliwości techniczne instalacji przemysłowych i konsumenckich, odbierających i spalających to paliwo. Jak wspomniano wyżej, urządzenia i instalacje gazowe mają fabrycznie zaprojektowane parametry pracy, które tolerują określony zakres kaloryczności paliwa, od turbin gazowych zasilanych z sieci przesyłowych po kuchenki domowe zasilane z sieci dystrybucyjnych.

W systemie europejskim zakres liczby Wobbego nie jest jednolity po stronie podaży, czyli do samego systemu gazowego trafia gaz o różnych wartościach, co musi być uwzględniane przez operatorów odpowiadających za bezpieczeństwo przesyłu i dystrybucji paliwa w sieci. Na rysunkach 11a i 11b przedstawiono zakres zmienności liczby Wobbego ze względu na źródło pochodzenia gazu ziemnego oraz pokazano wartości liczby Wobbego dopuszczalne przez operatorów systemów gazowych w Europie.

Jak widać na przykładzie, gaz pochodzący z Algierii i Rosji ma węższy zakres liczby Wobbego niż gaz z Norwegii czy importowane LNG. Tak samo różnice w tolerancji zakresu liczby Wobbego występują wśród systemów krajowych w Europie, np. zakres indeksu w Holandii i na Węgrzech jest znacznie szerszy niż w Wielkiej Brytanii, Słowenii czy Słowacji.

Konkludując, dodawanie wodoru do systemu gazowego powoduje obniżenie liczby Wobbego mieszanki i w zależności od procentowego stężenia wodoru w paliwie istnieje ryzyko zaniżenia dopuszczalnej granicy ciepła spalania. Dlatego też scenariusz związany z wykorzystywaniem istniejącej infrastruktury gazu ziemnego do mieszania metanu z wodorem generuje wyzwania natury fizyko-chemicznej, na które trzeba zwrócić szczególną uwagę.

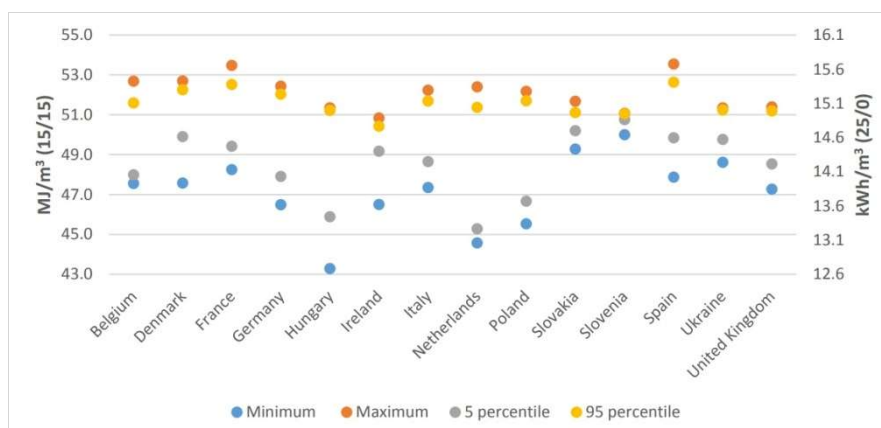
³⁷ Wodor 120 MJ/kg i 10,8 MJ/m³, metan 50 MJ/kg i 35,8 MJ/m³.



Rys. 11a. Zakres zmienności liczby Wobbego (kaloryczność gazu ziemnego) dopuszczany przez operatorów sieci w Europie

Fig. 11a. Range of variation in Wobbe number (calorific value of natural gas) allowed by network operators in Europe

Źródło: ENTSOG 2017, *Wobbe Index and Gross Calorific Value in European networks – Analysis of ranges and variability*, www.entsog.eu (dostęp: 12.04.2022 r.).



Rys. 11b. Zakres zmienności liczby Wobbego w podziale na źródło dostaw gazu od producentów

Fig. 11b. Range of variation in Wobbe number by source of gas supply from producers

Źródło: ENTSOG 2017, *Wobbe Index and Gross Calorific Value in European networks...*

W zależności od kompozycji dostaw gazu ziemnego do sieci z różnych źródeł należy dokładnie oszacować dopuszczalne stężenie wodoru aby zachować optymalny zakres liczby Wobbego. Pozwoli to na optymalizację całego łańcucha infrastruktury technicznej pod nowe paliwo z uwzględnieniem zmiany wolumenu i ciśnienia mieszaniny gazowej w systemie. Będzie też przesłanką do efektywnego planowania i oceny kosztów nowej infrastruktury i adaptacji istniejącej.

Koszty przesyłu i budowy rurociągów wodorowych

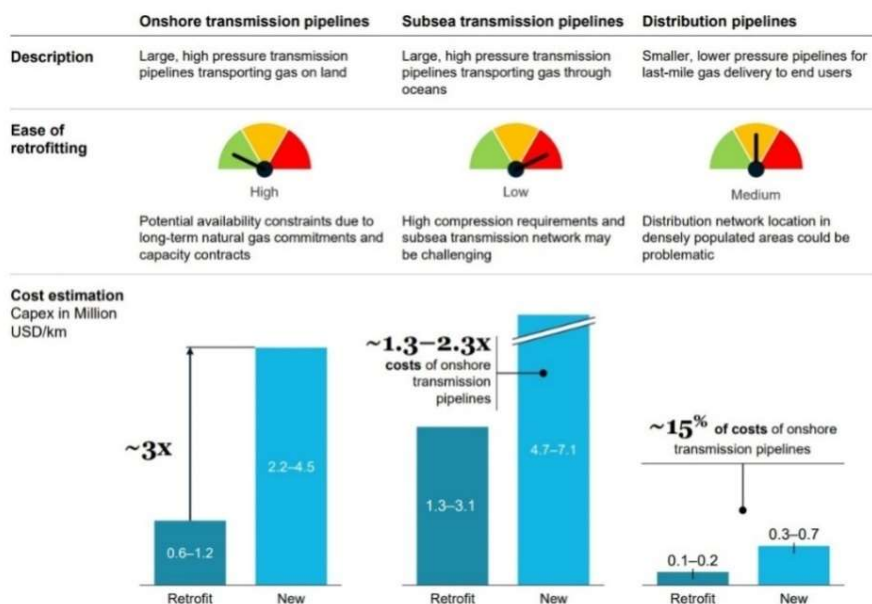
W chwili obecnej brak jest szerokich i wiarygodnych danych na temat możliwych kosztów związanych z transportem wodoru lub jego mieszanin przez system rurociągowy. Rzeczywiste koszty sieci wodorowych będą się różnić w zależności od ich specyficznego rodzaju, długości dla nowych inwestycji oraz dodatkowo stanu technicznego rurociągów adaptowanych pod nowe paliwo (*retrofitting, repurposing*). Według szacunkowych danych można przyjąć, że typowe koszty inwestycyjne dla lądowych sieci przesyłowych (z uwzględnieniem kosztów sprzężania) będą się wahać od 0,6 do 1,2 mln USD za kilometr w przypadku retrofitingu i od 2,2 do 4,5 mln USD dla zupełnie nowych rurociągów. W rezultacie koszt przesyłu wodoru taką siecią może wynosić 0,13–0,23 USD za 1 kg na odcinku 1000 km³⁸. Szczegółowe zestawienie prezentuje rys. 12.

W przypadku rurociągów podmorskich koszty te rosną o 1,3–2,3 razy ze względu na trudniejsze warunki prowadzenia inwestycji oraz bardziej wymagające warunki pracy, np. wyższe ciśnienie. Dla porównania typowe ciśnienie gazociągu przesyłowego to ok. 8,4 MPa, natomiast w rurociągu podwodnym wynosi 15,0 MPa i więcej.

Koszty rurociągów dystrybucyjnych są tańsze niż przesyłowe, z uwagi na fakt że to zwykle są mniejsze średnice i niższe ciśnienie robocze. Jednak te koszty najprawdopodobniej staną się istotne dopiero po przekroczeniu etapu 2 nasycenia sieci, czyli powyżej poziomu 20% zawartości H₂, a nie nastąpi to szybko w najbliższych latach.

Koszty modernizacji istniejących rurociągów pod nową mieszaninę paliwa będą znacznie się różnić i zależą od wielu czynników, nie tylko średnicy, ciśnienia i ogólnej kondycji, ale również od szczegółowego stanu zużycia, poziomu korozji wewnętrznej powierzchniowej, deformacji i międzykrystalicznych uszkodzeń, rodzaju zastosowanych spawów oraz ogólnego stanu innej infrastruktury towarzyszącej, tj. stacje pomiarowe, tłocznie, zespoły zaworowo-upustowe itd.

³⁸ Hydrogen Council, *Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness*, 02/2021.



Rys. 12. Porównanie szacunkowych kosztów inwestycyjnych dla rurociągów transportujących wodór i mieszaninę wodoru z gazem ziemnym

Fig. 12. Comparison of estimated capital costs for hydrogen and hydrogen-natural gas mixture pipelines

Źródło: Hydrogen Council, *Hydrogen Insights: A perspective...*

Transport wodoru w postaci ciekłej

Znakomitą analogią do możliwości transportu ciekłego wodoru (LH₂) jest wykształcony łańcuch wartości LNG, czyli skroplonego gazu ziemnego. Technologia kriogeniczna dla gazu ziemnego jest stosowana z powodzeniem od wielu lat. W Polsce na dobre zagościła w 2016 roku w momencie uruchomienia pierwszego terminala regazyfikacyjnego LNG w Świnoujściu. Umożliwia ona dalekomorski transport LNG od dowolnego producenta na całym świecie oraz dalszą dystrybucję LNG na lądzie np. za pomocą ISO-kontenerów przewożonych kolejną lub transportem kołowym³⁹. W ten sposób z globalnego rynku trafia do Polski surowiec produkowany m.in. w USA, Katarze czy Norwegii, a są to jedni z największych światowych producentów LNG. Gaz skroplony jest atrakcyjną formą surowca do transportu, ponieważ jego objętość jest ponad 600 razy mniejsza od metanu w gazowym stanie skupienia. Skroplenie gazu ziemnego osiąga się przy ujemnej temperaturze 162°C. Typowy łańcuch wartości składa się z następujących elementów:

- 1) źródło wydobycia gazu i transport rurociągiem do miejsca skroplenia,
- 2) terminal skraplający, w którym osiągnane są parametry LNG do załadunku,

³⁹ Taka dystrybucja LNG w mniejszych wolumenach jest określana jako tzw. Small Scale LNG (SSLNG).

- 3) transport morski z wykorzystaniem metanowców (LNG carrier),
- 4) odbiór surowca w terminalu regazyfikacyjnym,
- 5) regazyfikacja LNG do sieci lub przeładunek LNG na mniejsze środki transportu morskiego i lądowego, a następnie regazyfikacja lokalna.

W przypadku rodzajów ciekłego wodoru można wyszczególnić trzy przypadki:

- 1) ciekły czysty wodór (LH_2),
- 2) wodór w formie pośredniej – amoniak (NH_3),
- 3) wodór związany w organicznym medium transportującym (LOHC).



Rys. 13. Statek SuisoFrontier wpływający do portu przeznaczenia w Kobe (Japonia)

Fig. 13. SuisoFrontier vessel entering the port of destination in Kobe, Japan

Źródło: Hystra – Stowarzyszenie Badań Technologii, Organizacja Promocji Łańcucha Dostaw Wolnego Wodoru CO_2 , <https://www.hystra.or.jp/>

Skroplenie wodoru do czystej postaci odbywa się na podobnej zasadzie jak w przypadku gazu ziemnego z tą różnicą, że trzeba uzyskać temperaturę -253°C . Wówczas skroplony H_2 zmniejsza swoją objętość ok. 850 razy. Obecnie nie jest to jeszcze szeroko dostępna forma transportu, ale należy odnotować pierwszą pionierską próbę między Australią⁴⁰ i Japonią⁴¹, która zakończyła się bez żadnych zakłóceń. W Japonii zbudowano infrastrukturę umożliwiającą import płynnego

⁴⁰ Official Australian Government information, *Australia exports world's first shipment of liquified hydrogen to Japan*, luty 2022, <https://www.austrade.gov.au/international/invest/investor-updates/australia-exports-world-s-first-shipment-of-liquified-hydrogen-to-japan> (dostęp: 10.04.2022 r.).

⁴¹ Hystra – Stowarzyszenie Badań Technologii, Organizacja Promocji Łańcucha Dostaw Wolnego Wodoru CO_2 , <https://www.hystra.or.jp/en/gallery/article.html#news06> (dostęp: 12.04.2022 r.).

wodoru: po pierwsze terminal importowy *Hytouch* w Kobe⁴² oraz kluczowy element, czyli pierwszy na świecie statek do transportu ciekłego wodoru *Suiso Frontier*⁴³ przez firmę Kawasaki. Po stronie australijskiej przygotowano skroplony wódór do przewiezienia, fracht trwał dwa miesiące począwszy od 24 grudnia 2021 r. do 25 lutego 2022 r.. Nie był to duży ładunek w porównaniu do średniej wielkości transportu LNG, ponieważ sama ładowność *Suiso Frontier* wynosi 1250 m³, a tymczasem nowoczesne metanowce typu Q-flex wpływające do Świnoujścia mają pojemność 216 tys. m³.

Tabela 3. Specyfikacja techniczna Suiso Frontier

Table 3. Suiso Frontier technical specification

Specifications	
Lengthoverall	116.0 m
Lengthbetweenperpendiculars	109.0 m
Moldedbreadth	19.0 m
Moldeddepth	10.6 m
Molded draft	4.5 m
Gross tonnage	Approx. 8,000 t
Tank cargo capacity	Approx. 1,250 m ³
Propulsion system	Diesel electricpropulsion
Sea speed	Approx. 13.0 kn
Capacity	25 persons
Classification	Nippon KaijiKyokai (ClassNK)
Country of registration	Japan
Shipowner	CO ₂ -free Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association (HySTRA)

Źródło: <https://global.kawasaki.com/>

Jako druga forma, oprócz skroplonego wodoru, istnieje dojrzała technologia i sprawnie funkcjonujący łańcuch wartości dla amoniaku, o czym wspomniano wcześniej w opracowaniu. Trzecia zaś możliwość polega na wykorzystaniu ciekłej formy skroplonego medium służącego do „związania” wodoru na czas transportu oraz magazynowania w postaci skroplonej, aby po dotarciu na miejsce „odzyskać” wódór z tego medium. Ta technologia nosi nazwę LOHC (*Liquid Organic Hydrogen Carrier*), czyli skroplony organiczny nośnik wodoru. LOHC to organiczne związki, które mogą absorbować i uwalniać wódór w reakcjach chemicznych,

⁴² Kawasaki (Powering your potential), *Kawasaki Completes World's First Liquefied Hydrogen Receiving Terminal Kobe LH2 Terminal (Hy touch Kobe)*, grudzień 2020, https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20201203_2378 (dostęp: 20.04.2022 r.).

⁴³ M. Niermann, S. Timmerberg et. al. *Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2021, Vol. 135, January.

mogą zatem służyć jako nośniki do przechowywania wodoru. Zwykle mogą to być związki zawierające podwójne lub potrójne wiązania węgla, np. toluen. Prace nad wdrożeniem takich technologii prowadzą m.in. Kawasaki i Hyundai.

Koszty transportu wodoru w postaci skroplonej

Ze względu na wczesny etap rozwoju gospodarki wodorowej nie ma w obecnie dostępnych sprawdzonych i wiarygodnych danych historycznych dotyczących kosztów transportu dla skroplonego wodoru, niemniej jednak trwają prace analityczne porównujące szacunkowe koszty dla LH₂, NH₃ i LOHC.



Rys. 14. Porównanie szacunkowych kosztów transport wodoru w postaci skroplonej (LH₂, NH₃ i LOHC)

Fig. 14. Comparison of estimated costs for transporting hydrogen in liquefied form (LH₂, NH₃ and LOHC)

Źródło: Hydrogen Council, *Hydrogen Insights: A perspective...*

W długiej perspektywie, w miarę rozwoju ciekłych form transportu wodoru, należy oczekiwać, że optymalny wybór będzie zależał od wielu czynników, które obecnie mogą jeszcze nie wszystkie być brane pod uwagę. Jednak z pierwszych szacunkowych analiz wyłania się taki oto obraz: skroplony wodór (LH₂) będzie najbardziej wydajny w przypadku długich frachtów, zwłaszcza jeśli taka forma wodoru ma być dalej przeładowywana na inne środki transportu lądowego za pomocą np. ISO-kontenerów i dalej używana np. na stacjach tankowania dla pojazdów ciężarowych i osobowych. Pozwala to również zachować względnie najwyższą czystość przewożonego surowca. W przeciwieństwie do amoniaku i LOHC nie ma w tym przypadku potrzeby „odzyskiwania” wodoru z medium transportującego, co może mieć wpływ na ekonomiczną stronę przedsięwzięcia. Natomiast

niewątpliwie wadą LH₂ jest niższa wartość energetyczna transportowanego wolumenu (objętość) w porównaniu z amoniakiem oraz tzw. zjawisko *boil-of-gas*⁴⁴, które analogicznie występuje w transporcie LNG zarówno w przypadku metanowców, zbiorników lądowych i innych mniejszych środków transportu i magazynowania.

Transport płynnego amoniaku jest i prawdopodobnie będzie nadal atrakcyjny dla sektora produkującego nawozy sztuczne. Warto tylko mieć na uwadze, że amoniak jest substancją toksyczną, która może w przyszłości podlegać jeszcze większym rygorom bezpieczeństwa gdyby miał być powszechniej transportowany, dystrybuowany i magazynowany np. w obszarach miejskich.

LOHC ma potencjał, by wykorzystywać zaadaptowane istniejące urządzenia i infrastrukturę do transportu i magazynowania ropy i paliw płynnych. To może być podobna forma *retrofittingu* i *repurposingu* jak w przypadku rurociągów gazu ziemnego dla mieszanin z wodorem.

Na rysunku 14. przedstawiono porównanie szacunkowych kosztów według zaproponowanego podziału na trzy formy transportu wodoru w postaci skroplonej. Zostały one zasymulowane dla teoretycznej trasy z Arabii Saudyjskiej do portu w Rotterdamie przy założeniu transportowania dużych wolumenów surowca. Wyniki symulacji są najbardziej obiecujące dla czystej postaci skroplonego wodoru i wynoszą między 3,2 a 3,8 USD za 1 kg LH₂ na trasie o długości 8700 km. Natomiast zakładając dynamiczny rozwój gospodarki wodorowej w perspektywie 2030 roku, wódór może być transportowany na podobnych trasach jak obecnie transporty LNG, czyli np. z Australii, Bliskiego Wschodu lub USA na rynki w Europie lub Azji. Wówczas należy założyć optymistyczny wariant, że takie koszty mogą być niższe przy efekcie skali i spaść poniżej 3 USD/kgH₂.

4.6. Podsumowanie

Współczesny rozwój wodoru jako surowca, nośnika energii i paliwa nie przesądza o przyszłym kształcie łańcucha wartości lub łańcuchów wartości. Wciąż możliwych jest wiele scenariuszy. Sposoby produkcji wodoru, spełniające kluczowe wymagania odnośnie do emisyjności dwutlenku węgla oraz efektywności, wciąż są rozwijane i doskonalone. Szczególnie zaś obiecujące są te, które mogą funkcjonować w połączonych inteligentnych systemach przemysłowych wykorzystując efekty synergiczne z innymi istniejącymi procesami. Transport wodoru jest pełen wyzwań technologicznych, zarówno w formie gazowej, jak i ciekłej. Istnieją podobieństwa z innymi surowcami wykorzystującymi technologie kriogeniczne w transporcie (LNG), które otwierają również w przyszłości możliwości wykorzystania wodoru jako globalnego surowca podlegającego szerokiej wymianie rynkowej (*global commodity*). Trwający proces szerokiej transformacji w energetyce

⁴⁴ R.K. Panev – DNV, *Understanding the risks of isolated vapour pockets*, September 2021, <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Understanding-the-risks-of-isolated-vapour-pockets.html> (dostęp: 10.04.2022 r.).

jest i będzie miejscem poszukiwania przez przedsiębiorstwa i organizacje przewag konkurencyjnych, być może nawet o zasięgu globalnym.

Bibliografia

1. Air Liquide Engineering & Construction, SMR-X™ – Zero Steam Hydrogen Production, *Producing hydrogen without export steam*, <https://www.engineering-airliquide.com/smr-x-zero-steam-hydrogen-production> (dostęp: 20.04.2022 r.).
2. BIONICO, *Biogas membrane reformer for decentralized H2 production*, <http://www.bionico-project.eu/> (dostęp: 20.04.2022 r.).
3. Daloz W., *The quest for CO2-free hydrogen – methanepyrolysisatsca-le*, BASF, grudzień 2019.
4. DESFA, Enagás, Energinet, Fluxys, Gasunie, GRTgaz, ONTRAS, Open Grid Europe, Snam, Swedegas, Terég, <https://gasforclimate2050.eu/gas-for-climate/who-we-are/> (dostęp: 10.04.2022 r.).
5. Dr. Ned Stetson, *H2 Technologies Overview*, U.S Department of Energy, Office of Energy Efficiency&Renewable Energy, Waszyngton, czerwiec 2021.
6. ENTSOG 2017, *Wobbe Index and Gross Calorific Value in European networks – Analysis of ranges and variability*, www.entsog.eu (dostęp: 12.04.2022 r.).
7. ENTSOG, *Advisory Pannel For Future Gas Grids – Recommendation Report*, styczeń 2022, https://entsog.eu/sites/default/files/2022-02/1_entsog_220134_roadmap_2050_FGG_05.pdf (dostęp: 12.04.2022 r.).
8. European Commission, *BIOgas membrane reformer for decentralized hydrogen production*, <https://cordis.europa.eu/article/id/394984-bionico-a-pilot-plant-for-turning-biomass-directly-into-hydrogen> (dostęp: 20.04.2022 r.).
9. European Commission, *Blending hydrogen from electrolysis into the European gas grid*, Joint Research Centre (JRC), styczeń 2022, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC126763> (dostęp: 20.04.2022 r.).
10. Gas for Climate: a path to 2050, *European hydrogen backbone*, Press release, 2021, <https://gasforclimate2050.eu/news-item/european-hydrogen-backbone-grows-to-40000-km/> (dostęp: 12.04.2022 r.).
11. Hodges A., Hoang, A.L., Tsekouras G. et al., *A high-performance capillary-fed electrolysis cell promises more cost-competitive renewable hydrogen*, “Nature Communications” 2022, 13, <https://www.nature.com/articles/s41467-022-28953-x#Fig1> (dostęp: 12.04.2022 r.).
12. Huntsman Corporation (HUN), *Our Solutions*, <https://www.huntsman.com/sustainability/our-solutions/article/14231/accelerating-the-market-toward-lower-emissions> (dostęp: 20.04.2022 r.).
13. Hydrogen Council, *Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness*, 02/2021.
14. Hydrogen Europe, *Clean Hydrogen Monitor*, 2020.
15. Hydrogen Europe, *Hydrogen – a carbon-free energy carrier and commodity*, październik 2021.
16. Hysata, *Hysata’s electrolyser breaks efficiency records, enabling world-beating green hydrogen cost*, marzec 2022, <https://hysata.com/news/hysatas-electrolyser-breaks-efficiency-records-enabling-world-beating-green-hydrogen-cost/> (dostęp: 12.04.2022 r.).
17. IEA, *Global Hydrogen Review 2021*, listopad 2021.

18. IEA, *Hydrogen*, <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen> (dostęp: 20.04.2022 r.).
19. Instytut Energetyki, *Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku*, Warszawa 2021, <https://www.gov.pl/attachment/1b590d54-fa1e-49fe-9096-b2d0c6a4fe59> (dostęp: 20.04.2022 r.).
20. IRENA, *Coalition for Action, Decarbonising End-use Sectors: Green Hydrogen Certification*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, marzec 2022.
21. ISO 22734:2019, *Hydrogen generators using water electrolysis — Industrial, commercial, and residential applications*, <https://www.iso.org/standard/69212.html> (dostęp: 20.04.2022 r.).
22. Kawasaki (Powering your potential), *Kawasaki Completes World's First Liquefied Hydrogen Receiving Terminal Kobe LH2 Terminal (Hy touch Kobe)*, grudzień 2020, https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20201203_2378 (dostęp: 20.04.2022 r.).
23. Kotowicz, M. Jurczyk, D. Węcel, W. Ogulewicz, *Analysis of Hydrogen Production in Alkaline Electrolyzers*, "Journal of Power Technologies" 2016, 96(3), Silesian University of Technology, 2016. <https://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/view/888/723> (dostęp: 20.04.2022 r.).
24. Kupecki J., Wierzbicki M., *Wodór jako narzędzie integracji sektorów w nowym modelu energetyki*, „Nowa Energia” 2020, nr 5–6(75–76).
25. Lepage T., Kammoun M., Schmetz Q., Richel A., *Biomass-to-hydrogen: A review of main routes production, processes evaluation and techno-economical assessment*, „Biomass and Bioenergy” 2021, Vol. 144, January, DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105920 (dostęp: 20.04.2022 r.).
26. Liu W., Liu C.M., Gogoi P., Deng Y.L., *Overview of Biomass Conversion to Electricity and Hydrogen and Recent Developments in Low-Temperature Electrochemical Approaches*, „Engineering” 2020, 6, <https://www.engineering.org.cn/en/10.1016/j.eng.2020.02.021> (dostęp: 20.04.2022 r.).
27. Milne T.A., Elam C.C., Evans R.J., *Hydrogen from Biomass, State of the Art and Research Challenges*, Vol. IEA/H2/TR-02/001 (Ed.: U. S. D. o. E. Report), 2002, <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/36262.pdf> (dostęp: 20.04.2022 r.).
28. Monolith Carbon Black, *The Monolith Process*, <https://monolith-carbonblack.com/methane-pyrolysis> (dostęp: 20.04.2022 r.).
29. Moussa R.N., Moussa N., Dionisi D., *Hydrogen Production from Biomass and Organic Waste Using Dark Fermentation: An Analysis of Literature Data on the Effect of Operating Parameters on Process Performance*, Processes 2022,10, 156, DOI: 10.3390/pr10010156 (dostęp: 20.04.2022 r.).
30. Mrabet R.El, Berrada A., *Hydrogen production and derivatives from renewable energy systems for a best valorization of sustainable resources*, Hybrid Energy System Models, 2021, <https://www.sciencedirect.com/book/9780128214039/hybrid-energy-system-models> (dostęp: 10.04.2022 r.).
31. MultiPLHY, *Multimegawatt high-temperature electrolyser to generate green hydrogen for production of high-quality biofuels*, <https://multiplhy-project.eu/> (dostęp: 21.04.2022 r.).
32. Niermann M., Timmerberg S. et. al., *Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2021, Vol. 135, January.

33. Official Australian Government information, *Australia exports world's first shipment of liquified hydrogen to Japan*, luty 2022, <https://www.austrade.gov.au/international/invest/investor-updates/australia-exports-world-s-first-shipment-of-liquified-hydrogen-to-japan> (dostęp: 10.04.2022 r.).
34. Panev R.K. – DNV, *Understanding the risks of isolated vapour pockets*, September 2021, <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Understanding-the-risks-of-isolated-vapour-pockets.html> (dostęp: 10.04.2022 r.).
35. Progress in Energy and Combustion Science, *Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas*, 2017 1–35, <https://www.researchgate.net/journal/Progress-in-Energy-and-Combustion-Science-0360-1285> (dostęp: 20.04.2022 r.).
36. Radowitz B., *'Very disruptive' direct solar-to-hydrogen commercially viable by 2030, says oil group Repsol*, Recharge, 2021, <https://www.rechargenews.com/energy-transition/very-disruptive-direct-solar-to-hydrogen-commercially-viable-by-2030-says-oil-group-repsol/2-1-1056771> (dostęp: 20.04.2022 r.).
37. Sunfire, *Multiplify project proceeds into execution phase*, Rotterdam, November 23, 2021, <https://www.sunfire.de/en/news/detail/multiplify-project-proceeds-into-execution-phase> (dostęp: 12.03.2022 r.).
38. Topsoe, *SOEC the next generation of green hydrogen production*.

Rozdział 5

TECHNOLOGIE MAGAZYNOWANIA I KONWERSJI WODORU

Technologies for the storage and conversion of hydrogen

Sławomir WOLSKI

Abstract: *A key factor in the energy transformation is associated with the change of the energy carrier towards green hydrogen. Storage is necessary at every stage of the hydrogen economy chain from production, transport and application. There are several potentially applicable methods of hydrogen storage using physical and chemical methods. It is beyond the scope of this study to discuss all of these technologies. Therefore, this chapter focuses on large-scale hydrogen storage technologies that are technologically mature and can be used commercially. These selected technologies are: salt caverns, artificial pressure vessels, storage of liquid hydrogen and chemical storage of hydrogen as compounds: ammonia and methanol.*

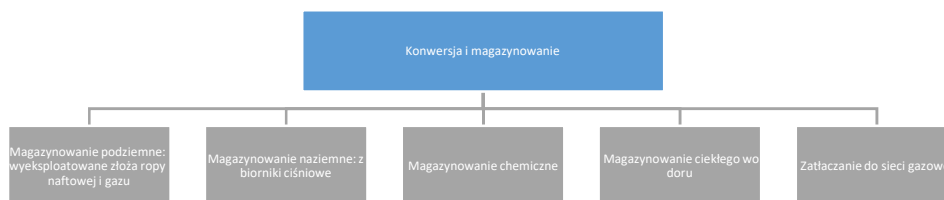
5.1. Wprowadzenie

Kluczowym czynnikiem transformacji energetycznej związanej ze zmianą nośnika energii idącej w stronę wodoru pochodzącego z odnawialnych źródeł są technologie magazynowania wodoru. Magazynowanie jest potrzebne na każdym etapie łańcucha gospodarki wodorowej od etapu produkcji, poprzez transport i wykorzystanie. Można wyróżnić kilka potencjalnie możliwych do zastosowania metod magazynowania wodoru z wykorzystaniem metod fizycznych i chemicznych. Wykorzystanie niektórych metod chemicznych magazynowania wodoru może być związane z konwersją wodoru do związków chemicznych takich jak metanol czy amoniak z powodzeniem może być bezpośrednio stosowane jako źródło energii. W opracowaniu przedstawiona została krótka charakterystyka metod przechowywania i konwersji zielonego wodoru ze szczególnym uwzględnieniem technologii mogących mieć zastosowanie w magazynowaniu wielkoskalowym.

5.2. Magazynowanie wodoru

Dobór treści do poniższego rozdziału jest zgodny z metodami magazynowania i konwersji wodoru (por. rys. 1.) wymienionymi w Polskiej Strategii Wodo-

rowej¹. Wielkoskalowe metody magazynowania wodoru nie mogą być jedynym kierunkiem rozwojowym magazynów. Aby zielony wodór mógł odgrywać strategiczną rolę w transformacji energetycznej niezbędnym aspektem związanym z magazynowaniem jest konieczność jego transportu, co wymaga wybrania małych i średnioskalowych technologii magazynowania wodoru.



Rys. 1. Magazynowanie i konwersja wodoru na podstawie dokumentu Polska Strategia Wodorowa do roku 2030

Fig. 1. Storage and conversion of hydrogen according to the document Polish Hydrogen Strategy until 2030

Źródło: Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Polska Strategia Wodorowa do roku 2030...

Kluczowymi parametrami związanymi z wyborem sposobu jego przechowywania są koszty, gęstość magazynowania i bezpieczeństwo, a najważniejszym wyzwaniem do pokonania przy magazynowaniu wodoru są jego własności fizyczne. Wodór jako najlżejsza cząsteczka, jako gaz, ma również najmniejszą gęstość przy zadanym ciśnieniu w porównaniu z innymi gazami. W warunkach normalnych 1 kg wodoru zajmuje około 11 m³ – dla porównania metan wymaga ponad trzykrotnie mniej miejsca do przechowywania przy zachowaniu równoważnej ilości energii, co przekłada się na trzykrotnie większe koszty przechowywania wodoru. Dlatego dla opłacalności ekonomicznej magazynowania i transportu jego gęstość musi zostać zwiększona. Z każdą z metod przechowywania i konwersji wiąże się wydatek energetyczny lub materiałowy związków, które wiążą wodór. Technologie przechowywania wodoru można podzielić na fizyczne – obejmujące przechowywanie wodoru w postaci cząsteczkowej (sprężonej lub skroplonej) oraz metody chemiczne: poprzez adsorpcję w materiale (słabe wiązania van der Waalsa) i oparte na silnych wiązaniach wodorowych w postaci wodorków chemicznych (amoniak, metanol) i wodorków metali.

Niektóre z tych metod zostały już skomercjalizowane, inne są jeszcze w fazie rozwojowej. Na dzień dzisiejszy za raportem² można wyróżnić osiem głównych technologii przechowywania wodoru w stanie gazowym, ciekłym lub stałym. Ich przegląd zawiera tabela 1.

¹ Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040, Warszawa 2021.

² Bloomberg NEF, Hydrogen: The Economics of Storage, 2019.

Tabela 1. Technologie przechowywania wodoru
Table 1. Technologies for hydrogen storage

	Stan gazowy				Stan ciekły			Ciało stałe
	Kawerny solne	Opróżnione złoża gazowe	Kawerny skalne	Zbiorniki ciśnieniowe	Ciekły wódór	Aminak	LOHC Ciekłe nośniki organiczne	Wodorki metaliczne
Wolumen	Duży	Duży	Średni	Mały	Mały	Duży	Duży	Mały
Cykl przechowywania	miesiące/tygodnie	sezonowo	miesiące/tygodnie	dni	dni/tygodnie	miesiące/tygodnie	miesiące/tygodnie	dni/tygodnie
Pojemność robocza (H₂)	300-10 tys. ton	300-10 tys. ton	300-2,5 tys. ton	5-1100 kg	0,2-200 ton	1-10 tys. ton	0,18-4,5 tys. ton	0.1-20 kg
Ujednolicony koszt przechowywania \$/kg	0,23	1,90	0,71	0,19	4,57	2,83	4,50	Brak szacowania
Docelowy koszt przechowywania \$/kg	0,11	1,07	0,23	0,17	0,95	0,87	1,86	Brak szacowania
Dostępność regionalna	Ograniczona	Ograniczona	Ograniczona	Brak ograniczeń	Brak ograniczeń	Brak ograniczeń	Brak ograniczeń	Brak ograniczeń

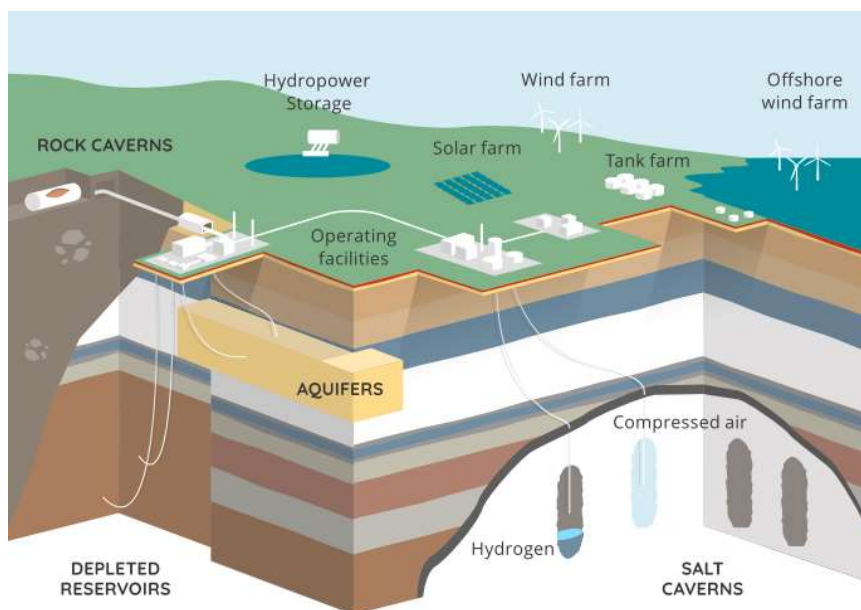
Źródło: Bloomberg NEF, *Hydrogen: The Economics of Storage*, 2019.

Jak widać, każda z wymienionych technologii ma inne zastosowanie oraz swoje zalety i wady. Kawerny solne to najtańsza opcja przechowywania wodoru w dużych ilościach przez długi czas. Jest to sprawdzone rozwiązanie – na świecie funkcjonują tysiące tego typu magazynów do przechowywania gazu ziemnego i innych nośników energii, z czego w 2019 r było dedykowanych sześć kawern solnych do przechowywania wodoru³. Inne możliwości są szeroko rozpatrywane i opisywane w raportach i artykułach⁴. Jako magazyny wodoru mogą teoretycznie posłużyć wyczerpane już złoża gazowe, w tym przypadku ograniczeniami są konieczne rozwiązania związane z mieszaniami metanu z wodorem podczas przechowywania. Trwają także prace nad wykorzystaniem na podobnej zasadzie do przechowywania wodoru warstw wodonośnych występujących w specyficznych warunkach geologicznych. Podobną technologią do kawern solnych są kawerny skalne pozwalające uzyskiwać wysokie ciśnienia, jednak są bardziej skompliko-

³ Alverà, Marco et al., *Global Gas Report 2020*, IGU, <https://www.igu.org/resources/global-gas-report-2020/>

⁴ O. Kruck et al., *Overview on all Known Underground Storage Technologies for Hydrogen*, Technical report European Union, 2013, http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D3.1_Overview-of-all-known-underground-storage-technologies.pdf; J. Andersson, S. Grönkvist, *Large-scale storage of hydrogen*, "International Journal of Hydrogen Energy" 2019, Vol. 44, Issue 23.

wane i droższe w budowie oraz zazwyczaj charakteryzują się mniejszą pojemnością. Schematyczne rozwiązania przechowywania wodoru zostały przedstawione na rys. 2. W przypadku braku możliwości budowy kavern dla przechowywania wodoru w mniejszych ilościach i przez stosunkowo krótki czas najbardziej efektywną technologią są zbiorniki ciśnieniowe. Tego typu zbiorniki są też nieodzowne, jeśli chodzi o transport wodoru. Zgodnie z Polską Strategią Wodorową przyjętą w dniu 2 listopada 2021 r.⁵ magazynowanie wodoru może odbywać się zarówno w zbiornikach podziemnych, jak i naziemnych. Spośród potencjalnych podziemnych magazynów takich jak wyeksploatowane pola naftowe i gazowe, warstwy wodonośne, kaverny skalne czy opuszczone kopalnie, za najbardziej optymalne rozwiązanie uznano komory solne. Nie wykluczono także przechowywania wodoru w dużych naziemnych zbiornikach jako buforach w przypadku wdrażania na masową skalę technologii wodorowych i wzrostu zapotrzebowania i liczby odbiorców.



Rys. 2. Wielkoskalowe magazyny wodoru: kaverny solne, wyeksploatowane złoża, warstwy wodonośne, ciśnieniowe zbiorniki naziemne i podziemne

Fig. 2. Large-scale hydrogen storage: salt caverns, depleted reservoirs, aquifers, ground and underground pressure vessels

Źródło: A. van Wijk, E. van der Roest, J. Boere, *Solar Power to the People*. Nieuwegein-Utrecht: Allied Waters 2017, <https://www.alliedwaters.com/news/solar-power-to-the-people/>

⁵ Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040....

Bardzo obiecującymi technologiami są te pozwalające na przechowywanie wodoru w stanie ciekłym: bezpośrednio skroplonego, jak i związanego chemicznie w postaci amoniaku i innych ciekłych organicznych nośników wodoru (LOHC). Ich zaletą jest niezależność geograficzna i duża gęstość energii, jednak w chwili obecnej są kosztowne, przede wszystkim ze względu na duże ilości energii potrzebnej do chłodzenia lub konwersji chemicznych. Analizując kosztocłonność wyżej wymienionych procesów, wydaje się, że technologie przechowywania wodoru w stanie ciekłym będą stosowane w aspekcie transportu we wszystkich ogniwach łańcucha gospodarki wodorowej.

5.3. Przechowywanie wodoru w postaci gazowej i skroplonej

Wodór w postaci gazowej przechowuje się pod ciśnieniem zależnym od rodzaju zbiornika wahającym się od 20 bar dla niskociśnieniowych zbiorników naziemnych do 200 bar dla kawern solnych. Niskie gęstości gazu dla tych wielkoskalowych zbiorników (dla 100 bar to $7,8 \text{ kg/m}^3$ przy 20°C) prowadzą do dużych objętości zbiorników i co wiąże się z początkowymi wysokimi kosztami inwestycyjnymi. Typowe zbiorniki i ich własności zostały przedstawione w tabeli 2⁶.

Tabela 2. Charakterystyka wybranych magazynów sprężonego wodoru

Table 2. Characteristics of selected pressure vessels for hydrogen

Rodzaj zbiornika	Ciśnienie (bar)	Pojemność (energia termiczna) (MWh)	Gęstość energii (kWh/m ³)
Zbiorniki niskociśnieniowe	20	150	30
Zbiorniki wysokociśnieniowe		2250	
Wysokociśnieniowe zbiorniki rurowe	80	4300	120
Kawerny solne i skalne	200	240 000	300

Źródło: P.T. Moseley, J. Ed. Garche, *Energy Storage for Renewable...*

Kawerny solne

Analizując dane zawarte w tabeli 2., można zauważyć, że największy objętościowy potencjał magazynowania wodoru mają kawerny solne. Technologia magazynowania gazu w grotach solnych jest znana od lat 40. XX w., jako pierwsza zastosowana była w Kanadzie, a następnie w Stanach Zjednoczonych, w Europie ta technologia jest stosowana od lat 70. XX wieku⁷. Kawerny mają zastosowanie do przechowywania gazu, ropy naftowej, ale także jako magazyny energii w postaci sprężonego powietrza czy przyszłościowo jako magazyny wodoru.

⁶ P.T. Moseley, J. Ed. Garche, *Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, Electrochemical*, Elsevier 2015.

⁷ K. Cyran, *Insight Into a Shape of Salt Storage Caverns*, Arch. Min. Sci. 65(2020).

Pierwsze magazyny wodoru w postaci kawern powstały w Saltholme (UK) oraz Texasie (USA). Kawerny solne to zbiorniki zlokalizowane w formacjach geologicznych położonych na głębokości kilkuset metrów powstałych zazwyczaj po wypłukaniu solanki. Dla przykładu wspomniane powyżej zbiorniki wodoru są położone na głębokości 950 m. Typowa kawerna solna ma wysokość do 300 m i średnicę 30–70 m. Sól kamienna dzięki budowie krystalicznej charakteryzuje się bardzo wysoką gazoszczelnością nawet przy wysokich ciśnieniach, dlatego w kawernach solnych można uzyskać ciśnienia gazu rzędu 200 bar. Wysokie ciśnienie robocze w połączeniu z potencjalnie dużą objętością kawerny pozwalają magazynować ilości wodoru rzędu kilku tysięcy ton i pojemności energetycznej do ok. 240 GWh. Przy tak dużych ilościach gazu koszt jednostkowy inwestycji i przechowywania jest stosunkowo niski, a umiejscowienie magazynów pod ziemią zapewnia stosunkowo duże bezpieczeństwo oraz brak niewielką ingerencję krajobrazową. Podstawowe parametry techniczne kawern solnych są zebrane w tabeli 3.⁸

Tabela 3. Parametry techniczne przykładowych kawern solnych dla przechowywania wodoru

Table 3. Technical parameters of selected salt caverns for hydrogen storage

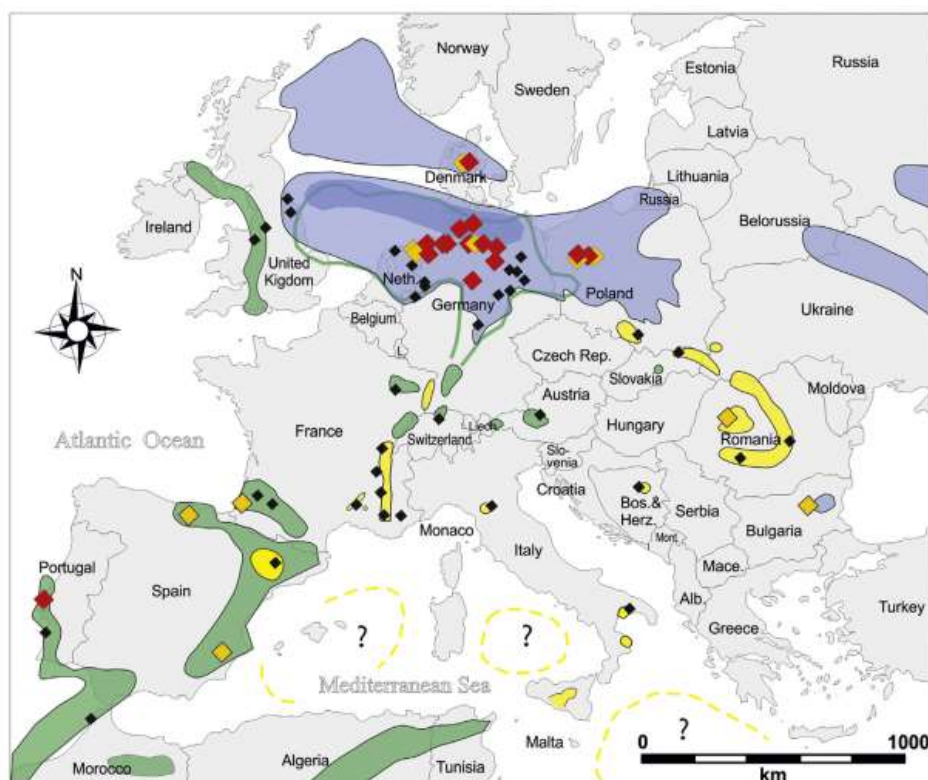
	Clemens (USA)	Moss Bluff (USA)	Teesside (UK)
Struktura geologiczna	Złoże wysadowe	Złoże wysadowe	Złoże pokładowe
Operator	Conoco Phillips	Praxair	Sabic Petroleum
Oddany do użytku	1983	2007	1972
Objętość, m ³	580 tys.	566 tys.	3 x 70 tys.
Głębokość, m	930	>822	350
Ciśnienie, bar	70-135	55-152	~45
Ilość wodoru H ₂ , mln kg	2,56	3,72	0,83

Źródło: O. Kruck et al., *Overview on all...*

Największym problemem i wadą w przypadku dużych podziemnych magazynów wodoru to lokalizacje, które są uzależnione od budowy geologicznej i niejednorodnego występowania pokładów soli. W przypadku Europy obszary potencjalnie korzystne dla lokalizacji magazynów wodoru zostały zebrane w raporcie A. Gillhausa z 2007 r.⁹ – można je zobaczyć na mapie umieszczonej na rys. 3.

⁸ O. Kruck et al., *Overview on all ...*

⁹ A. Gillhaus, P.L. Horvath, KBB UT, *Compilation of Geological and Geotechnical Data of Worldwide Domal Salt Deposits and Domal Salt Cavern Fields*, SMRI Research Report, 2007.



Rys. 3. Podziemne złoża soli w Europie i magazyny gazu i ropy. Kolorami zaznaczono złoża soli: trzeciorzędowe (żółty), mezozoiczne (zielony), paleozoiczne (niebieski), magazyny – kawerny solne (♦, ♦), miejsca produkcji solanki (♦)

Fig. 3. Underground salt deposits of Europe with cavern fields and gas or oil storage. The color are marked: Tertiary salt deposit (yellow), Mesozoic salt deposit (green), Paleozoic salt deposit (blue), cavern storage (♦, ♦), brine production (♦)

Źródło: A. Gillhaus, P.L. Horvath, KBB UT, *Compilation of Geological...*

Zbiorniki ciśnieniowe do przechowywania wodoru

Jak wynika z analizy mapy na rys. 3., nie wszystkie obszary pozwalają na budowę zbiorników podziemnych na bazie dostępnych struktur geologicznych. Jednym z alternatywnych rozwiązań do kawern dla magazynowania gazu są zbiorniki ciśnieniowe. Konstrukcja zbiorników metalowych zwiększa koszty inwestycji, jednak pozwala na magazynowanie wodoru niezależniąc się od warunków geograficznych. W zależności od użytego materiału i konstrukcji zbiorniki mogą mieć różne parametry techniczne: ciśnienie, pojemność i położenie. Możliwe jest lokalizowanie zbiorników pod ziemią i ponad nią. W przypadku tych pierwszych wadami jest konieczność zabezpieczenia antykorozyjnego oraz utrudniona konserwacja i inspekcja. Zaletami są ochrona przed uszkodzeniami zewnętrznymi,

warunkami atmosferycznymi oraz oszczędność miejsca i naturalna izolacja termiczna. Technologia magazynowania wodoru w dedykowanych zbiornikach jest analogiczna do przechowywania gazu ziemnego, dlatego użyte mogą być zbiorniki tego samego typu.



Rys. 4. Niskociśnieniowy zbiornik gazu Hydrogen Center Höchst 2006

Fig. 4. Hydrogen gas holder of Hydrogen Center Höchst 2006

Źródło: A. Boeni, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wasserstoffzentrum.JPG?uselang=de> (dostęp: 14.04.2022 r.).

Obecnie komercyjnie wykorzystywane są trzy główne typy wielkogabarytowych zbiorników metalowych¹⁰:

1. Zbiorniki niskociśnieniowe, o ciśnieniu nieznacznie wyższym od atmosferycznego i dużych objętościach przechowywania. To zbiorniki starego typu, które były budowane już w pierwszej połowie dwudziestego wieku. Gaz jest tam przechowywany pod niskim ciśnieniem i różni się rodzajem uszczelnienia: z uszczelnieniem wodnym i suchym. Ciśnienie robocze tego typu zbiornika to 1,5 bar, a objętości gazu to ok. 700 tys. m³. Zaletą tych zbiorników jest nieskomplikowany technologicznie i tani sposób przechowywania, wadą zaś ogromne wymagania przestrzenne związane z dużymi objętościami zbiorników przy

¹⁰ J. Andersson, S. Grönkvist, *Large-scale storage...*

jednocześnie stosunkowo małej masie przechowywanego czynnika. Historycznie niektóre z tych zbiorników były wykorzystywane do przechowywania wodoru. Przykładowo zbiornik na gaz o pojemności 56 tys. m³ w Neustadt/Coburg został zbudowany w 1914 r. dla tankowania sterowców¹¹. Mimo tej obecnie przestarzałej techniki istnieje jeszcze kilka działających zbiorników wodoru.

2. Średniociśnieniowe zbiorniki sferyczne o ciśnieniu ok. 20 bar. Sferyczne zbiorniki ciśnieniowe były budowane od początku XX wieku. Pierwszy sferyczny zbiornik ciśnieniowy zbudowała w 1923 roku firma Chicago Bridge & Iron Company N.V.¹². W porównaniu do niskociśnieniowych zbiorników opisanych powyżej mają zalety w postaci obniżonych kosztów inwestycyjnych, głównie ze względu na swoje gabaryty. Potencjalnie tego typu zbiorniki mogą magazynować gaz o objętości do 300 000 m³ pracując przy ciśnieniu do 20 bar. Jednak typowe zbiorniki sferyczne mogące mieć zastosowanie do przechowywania wodoru mają znacznie mniejszą pojemność rzędu 15 000 m³ przy ciśnieniu roboczym 12–16 bar. Przykład takiego zbiornika ukazano na rys. 5.



Rys. 5. Sferyczne ciśnieniowe magazyny gazu w rafinerii ropy naftowej MiRO w Karlsruhe

Fig. 5. Spherical pressure vessels at the MiRO oil refinery in Karlsruhe

Źródło: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:MiRO4.jpg#file> (dostęp: 14.04.2022 r.).

3. Zbiorniki rurowe – ciśnienie ok. 100 bar. Obecnie popularnymi magazynami gazu są zbiorniki rurowe. Są one powszechnie używane przez przedsiębiorstwa gazownicze od lat 80. XX wieku aż po dzień dzisiejszy. Tego typu zbiorniki są zbudowane ze standardowych rur o dużej średnicy nominalnej około DN 1400 – DN 1600 (1,4–1,6 m), które są w stanie przenosić wysokie ciśnienia robocze rzędu 60–100 bar. W tabeli 4. zestawiono dane techniczne wybranych magazynów gazu ziemnego.

¹¹ D. Stolten, B. Emonts, Ed., *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH 2016.

Tabela 4. Parametry przykładowych magazynów gazu ziemnego

Table 4. Technical parameters of natural gas pipe storages

	Urdorf /Zürich (Szwajcaria)	Bocholt (Niemcy)	Bern Eymatt (Szwajcaria)	Wiedeń, Leopoldau (Austria)
Operator	ErdgasZürich Transport	Bocholter Energie- und Wasser- versorgung	GVM – Gasverbund Mittelland	Wien Energie Speicher
Uruchomienie	2012	2007	2007	2011
Objętość geom., m ³	6112	3072	7955	12400
Ciśnienie robocze, bar	7–100	do 90	23–70	4–45
Potencjalna magazyno- wanego ilość wodoru H ₂ , mln kg	0,045	0,021	0,030	0,042

Źródło: O. Kruck et al., *Overview on all Known...*

Jeden z największych w Europie rurowych magazynów gazu zbudowany został w ostatnich latach w Urdorf w Szwajcarii (por. rys. 6.). Taki magazyn zawiera 20 ciągów rur o łącznej długości 4140 m, średnica pojedynczej rury wynosi 1422 mm, co daje całkowitą objętość geometryczną 6112 m³ i oferuje pojemność netto 720 000 m³ przy zakresie ciśnień roboczych pomiędzy 100 i 7 bar¹². Taka objętościowa pojemność netto dla wodoru odpowiada masie 64 714 kg i ekwiwalentowi zmagazynowanej energii cieplnej na poziomie 2156 MWh. Widać, że tego typu zbiorniki dzięki wysokiemu ciśnieniu roboczemu mają potencjał magazynowania energii w zakresie gigawatów.

W porównaniu do zbiorników sferycznych i niskociśnieniowych, magazyny rurowe mają zalety szereg zalet technicznych i ekonomicznych. W przypadku zbiorników sferycznych symetryczny kształt minimalizuje zużycie materiału, jednak komplikuje to technologię wytwarzania, a same zbiorniki nie przenoszą wysokiego ciśnienia. W odróżnieniu od nich magazyny rurowe mogą być eksploatowane w znacznie wyższych zakresach ciśnień, charakteryzują się prostą konstrukcją techniczną, co niesie za sobą niskie koszty inwestycyjne. Tego typu magazyny umieszcza się zazwyczaj pod ziemią, co stanowi ochronę przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi i zewnętrznymi uderzeniami mechanicznymi a teren ponad magazynem może być nadal wykorzystywany do innych celów. Tego typu magazyny mogą być potencjalnie wykorzystane do przechowywania wodoru. Warto jednak zauważyć, że sam wodór w odróżnieniu od gazu ziemnego działa

¹² Bilfinger Industrial Services GmbH, <https://bis-austria.bilfinger.com/en/references/energy-and-distribution/gas-storage-and-distribution/natural-gas-accumulator/-/urdorf/> (dostęp: 14.04.2022 r.); F. Fuoli, *Für 21 Millionen entsteht ein riesiger Erdgasspeicher*, dostęp online: <https://www.limmattalerzeitung.ch/limmattal/region-limmattal/fur-21-millionen-entsteht-ein-riesiger-erdgasspeicher-ld.1932696> (dostęp: 14.04.2022 r.).



Rys. 6. Gazowy magazyn rurowy w Urdorf

Fig. 6. natural gas pipe storage in Urdorf

Źródło: F. Fuoli, *Für 21 Millionen entsteht ein riesiger...*

korozyjnie na stal, dlatego magazyny wodorowe muszą być budowane z materiałów odpornych na kruchość wodorową i zmęczenie. Dodatkowo dedykowane do tego celu materiały konstrukcyjne muszą wykazywać wytrzymałość dla pracy w cyklu zmiennych obciążeń dla naprzemiennie wysokich i niskich ciśnień.

5.4. Przechowywanie ciekłego wodoru

Skraplanie wodoru to już dobrze opanowana technologia mająca dotąd największe zastosowanie w eksploracji kosmosu i badaniach naukowych. Niestety konwersja związana ze skraplaniem a następnie przechowywaniem wodoru jest procesem energochłonnym, ale uzyskiwane gęstości są bardzo pożądane w masowym transporcie tego nośnika. Podstawowe parametry fizyczne wodoru zostały przedstawione w tabeli 5¹³.

Tabela 5. Podstawowe własności fizyczne kriogenicznego wodoru

Table 5. Basics physical properties relevant for hydrogen liquefaction

Własność	Wartość	Warunki
Temperatura wrzenia	20,268 K	$p_{(NTP)} = 1.01325 \text{ bar}$
Gęstość – ciekły wodór	70,78 kg/m ³	Dla punktu wrzenia
Gęstość – wodór gazowy	1,338 kg/m ³	Dla punktu wrzenia
Gęstość energii	8,49 MJ/l	$p_{(NTP)} = 1.01325 \text{ bar}$

Źródło: D. Stolten, B. Emonts, Ed., *Hydrogen Science and Engineering...*

¹³ D. Stolten, B. Emonts, Ed., *Hydrogen Science and Engineering...*

Niewątpliwą zaletą jest to, że ciekły wodór ma wyższą gęstość masy (70 kg/m^3 – 1 bar) a zarazem energii niż sprężony wodór gazowy. Podstawowymi problemami związanymi z konwersją i przechowywaniem ciekłego wodoru jest energochłonny proces skraplania oraz konieczność zapewnienia niskiej temperatury przechowywania. Powody, dla których skraplanie wodoru wymaga znacznego nakładu energii to wyjątkowo niska temperatura wrzenia wodoru (-253°C) oraz fakt, że gazowy wodór nie ochładza się podczas procesów rozprężania dla temperatur wyższych niż -73°C ¹⁴. Problemem jest także współistnienie faz para- i ortowodoru – różnica jest spowodowana orientacją momentów magnetycznych atomowych wodorów wchodzącym w skład cząsteczki H_2 . Przejście pomiędzy tymi fazami jest związane z uwalnianiem ciepła prowadzącym do parowania i strat wodoru podczas przechowywania. Mimo komplikacji tego procesu jest on dobrze opanowany i na rok 2009 zainstalowana globalna zainstalowana moc skraplania wodoru wynosiła około 355 ton dziennie, przy czym największy działający zakład ma moc 34 t/d ¹⁵.

W związku z tym, że ciekły wodór jest cieczą kriogeniczną, to po jego skropleniu ważne jest, aby podczas przechowywania zminimalizować parowanie. Odparowanie ciekłego wodoru jest związane nie tylko z utratą energii zużytej na skraplanie wodoru, ale także ostatecznie utratę samego czynnika, gdyż odparowany gaz musi zostać usunięty z powodu wzrostu ciśnienia. Jest to jeden z kluczowych parametrów związanych ze sprawnością procesu magazynowania. Temu negatywnemu czynnikowi zapobiega się poprzez minimalizację powierzchni zbiornika (zbiorniki sferyczne) oraz zaawansowaną izolację, aby zminimalizować utraty ciepła przez ściany zbiornika.

Dlatego zbiorniki do przechowywania ciekłego wodoru są najczęściej dwuścienne, a pomiędzy ścianami przykładana jest wysoka próżnia. Próżnia minimalizuje transport ciepła, ograniczając zarówno przewodnictwo cieplne, jak i konwekcję. Przestrzeń między ścianami zbiornika zawiera również dodatkowe materiały (takie jak arkusze poliestrowe powlekane tlenkiem glinu), które odbijają promieniowanie, aby i w ten sposób ograniczyć straty ciepła. Ze względu na wysoki stopień izolacji i niski stosunek powierzchni do objętości, współczynniki parowania są bardzo niskie dla większych zbiorników kulistych, zwykle poniżej $0,1\%$ na dobę.

Obecnie NASA obsługuje największe obecnie zbiorniki do przechowywania ciekłego wodoru w Cape Canaveral w USA; ilość wodoru w nowo oddanym do użytku zbiorniku szacuje się $1,25 \text{ mln galonów}$ ¹⁶.

¹⁴ J. Andersson, S. Grönkvist, *Large-scale storage...*

¹⁵ S. Krasae, H. Jacob, J.H. Stang, P. Neksa, *Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009*, "International Journal of Hydrogen Energy" 2010, Vol. 35, Issue 10.

¹⁶ D. Sempstrott, Kennedy, *Plays Critical Role in Large-Scale Liquid Hydrogen Tank Development*, 2021, <https://www.nasa.gov/feature/kennedy-plays-critical-role-in-large-scale-liquid-hydrogen-tank-development> (dostęp: 13.04.2022 r.).



Rys. 7. Zbiornik ciekłego wodoru zainstalowany na platformie startowej NASA w Centrum Kosmicznym Kennedy'ego

Fig. 7. Liquid hydrogen tank at launch pad at NASA's Kennedy Space Center

Źródło: <https://www.nasa.gov/content/space-applications-of-hydrogen-and-fuel-cells> (dostęp: 13.04.2022 r.).

Pomimo względnej złożoności konstrukcji, potencjalnie możliwe jest, że zbiorniki do przechowywania i transportu ciekłego wodoru będą miały uzasadnienie ekonomiczne w porównaniu do innych metod przechowywania.

5.5. Magazynowanie chemiczne

W przypadku tego typu magazynowania wykorzystuje się wodorki chemiczne, które wiążą wodór chemicznie. Największą zaletą takiego magazynowania jest to, że wodorki chemiczne są na ogół cieczami w warunkach normalnych, co znacznie upraszcza ich transport i przechowywanie oraz ułatwia procesy odwodornienia i uwodorniania.

Obecnie gotowość technologiczną do magazynowania wodoru można wskazać dla takich związków jak metanol, amoniak i kwas mrówkowy, ze względu na to, że są one powszechnie syntetyzowane z gazu ziemnego. Jest to niewątpliwa zaleta, że istnieje już niezbędna infrastruktura wymagana do ich produkcji, obsługi i transportu. Zasadnicza różnica leży zatem w źródle pozyskiwania czynnika – w przypadku zielonego wodoru – pochodzi on z elektrolizy wody, a nie z gazu ziemnego. Należy także zwrócić uwagę na to, że wodorki chemiczne są wykorzystywane np. do produkcji nawozów, a także mogą stanowić alternatywę jako paliwo dla wodoru, bez ponownego procesu odwodorowienia.

Metanol

Metanol (CH_3OH) jest najprostszym alkoholem pozwalającym na magazynowanie wodoru (12,5% – masowo, co odpowiada gęstości wodoru na poziomie 99 kg/m^3)¹⁷. Proponowanym procesem technologicznym w produkcji e-metanolu ze źródeł odnawialnych jest uwodornienie dwutlenku węgla co dodatkowo pozwala na ograniczenie emisji CO_2 . Uwalnianie wodoru z metanolu może odbywać się na wiele sposobów: reforming parowy, częściowe utlenianie albo termoliza metanolu¹⁸.

Synteza metanolu z CO_2 i wodoru jest technologią już wdrożoną – w 2011 r. została oddana w Islandii pierwsza na świecie instalacja: „George Olah Renewable Methanol Plant”¹⁹. Proces produkcji etanolu oparty na dwutlenku węgla jest podobny to tego opartego na gazie ziemnym nie różni się katalizatorem ($\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$ lub Cu/Zn/SiO_2) zakresem temperatur ($220\text{--}280^\circ\text{C}$) i ciśnień (10–80 bar), co pozwala na szybką adaptację standardowych reaktorów.

Uzyskany w wyniku uwodornienia metanol oprócz funkcji magazynowania wodoru może być stosowany jako surowiec do produkcji paliw syntetycznych, przy dodatkowej funkcji wychwytywania recydingu i przechowywania dwutlenku węgla.

Amoniak

Amoniak (NH_3) jest jednym z najbardziej obiecujących związków magazynujących wodór ze względu na wysoką dużą gęstość magazynowania wodoru (17,7% masowo, co odpowiada gęstości wodoru 123 kg/m^3) dla ciekłego amoniaku gromadzonego pod ciśnieniem 10 bar. Jest to gęstość większa niż wodoru w postaci ciekłej. Ze względu na doskonale opanowany proces produkcji, przechowywania i transportu jest to technologia gotowa do przechowywania wodoru. Oznacza to, że istniejące instalacje amoniakalne można szybko zmodernizować, aby wykorzystywać wodór z elektrolizy, tym bardziej że do lat 60. większość europejskiej produkcji nawozów opierała się na produkcji amoniaku z wykorzystaniem elektrolizy wody.

Głównym procesem technologicznym w syntezie amoniaku jest proces Habera-Boscha²⁰. W tym procesie ciepło nie musi być dostarczane do reaktorów podczas procesu, ponieważ reakcja syntezy amoniaku jest egzotermiczna

¹⁷ J. Andersson, S. Grönkvist, *Large-scale storage...*

¹⁸ O. Özcan, A.N. Akın Nilgün, *Thermodynamic analysis of methanol steam reforming to produce hydrogen for HT-PEMFC: An optimization study*, “International Journal of Hydrogen Energy” 2019, Vol. 44, Issue 27.

¹⁹ J. Kotowicz, D. Węcel, M. Brzęczek, *Analysis of the work of a “renewable” methanol production installation based ON H2 from electrolysis and CO2 from power plants*, “Energy” 2021, Vol. 221.

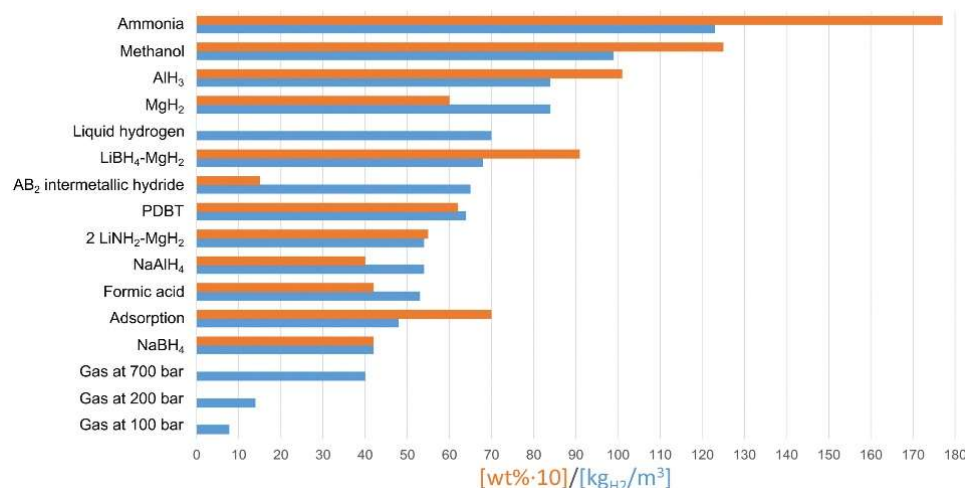
²⁰ A. Hellman, K. Honkala, S. Dahl, C.H. Christensen, J.K. Nørskov, *7.17 – Ammonia Synthesis: State of the Bellwether Reaction*, *Comprehensive Inorganic Chemistry II (Second Edition)*, Elsevir, 2013.

(30,7 kJ/mol). Wymagane są jednak wysokie ciśnienie (200–350 bar) i temperatura z przedziału 300–550°C.

Pomimo dobrze opanowanej produkcji amoniaku problemem jest odzyskanie wodoru w procesie odwodorowienia. Najczęstszym stosowanym procesem w tym przypadku jest termoliza – reakcja odwrotna syntezy amoniaku. Mimo że amoniak zaczyna samorzutnie rozkładać się w temperaturach przekraczających 200°C, to aby osiągnąć całkowitą konwersję, należy dostarczać ciepło w wysokich temperaturach – zwykle powyżej 650°C. Najbardziej aktywne katalizatory rozkładu amoniaku oparte są na rutenie, który jest zbyt drogi do wielkoskalowych zastosowań. Zastosowanie innych katalizatorów opartych na kobalcie, niklu lub żelazie konieczne są znacznie wyższe temperatury reakcji (powyżej 900°C). Tak wysokie temperatury podrażają proces technologiczny i wymagają zastosowania znacznie droższych materiałów dla reaktorów²¹.

6. Podsumowanie

Opracowanie stanowi zarys najbardziej obiecujących technologii, jeśli chodzi o wielkoskalowe przechowywanie wodoru. Przedstawione technologie różnią się sposobem, kosztem i gęstością przechowywanego czynnika i gęstością energii



Rys. 8. Wolometryczne (niebieski) i grawimetryczne (pomarańczowy) gęstości magazynowania wodoru dla wybranych technologii przechowywania

Fig. 8. Volumetric (blue) and gravimetric (orange) hydrogen storage densities of selected technologies

Źródło: J. Andersson, S. Grönkvist, *Large-scale storage...*

²¹ G. Thomas, G. Parks, *Potential roles of ammonia in a hydrogen economy: a study of issues related to the use of ammonia for onboard vehicular hydrogen storage*, US Department of Energy, Washington 2006.

energii w nim zgromadzonej. Chociaż wysoka gęstość przechowywania wodoru jest korzystna dla przechowywania wodoru, jej względne znaczenie w porównaniu z innymi czynnikami różni się w zależności od zastosowanej technologii. Gęstość magazynowania wodoru wpływa na koszty inwestycji: wolumetryczna gęstość magazynowania wodoru określa wielkość magazynu, a grawimetryczna gęstość określa ilość materiału na jednostkową masę wodoru²². Powyższe gęstości dla najczęściej pokazywanych technologii magazynowania wodoru w rozważanych technologiach magazynowania pokazano na rys. 8.

Bibliografia

1. Alverà M. et al., *Global Gas Report 2020*, IGU, <https://www.igu.org/resources/global-gas-report-2020/> (dostęp: 13.04.2022 r.).
2. Andersson J. Grönkvist S., *Large-scale storage of hydrogen*, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 44, Issue 23, 2019.
3. Bilfinger Industrial Services GmbH, <https://bis-austria.bilfinger.com/en/references/energy-and-distribution/gas-storage-and-distribution/natural-gas-accumulator/-/urdorf/> (dostęp: 14.04.2022 r.).
4. Bloomberg NEF, *Hydrogen: The Economics of Storage*, 2019
5. Cyran K., *Insight Into a Shape of Salt Storage Caverns*, Arch. Min. Sci. 65 (2020).
6. Fuoli F., Für, *21 Millionen entsteht ein riesiger Erdgasspeicher*, <https://www.limmattalerzeitung.ch/limmattal/region-limmattal/fur-21-millionen-entsteht-ein-riesiger-erdgasspeicher-ld.1932696> (dostęp: 14.04.2022 r.)
7. Gillhaus A., Horvath P., L.KBB UT, *Compilation of Geological and Geotechnical Data of Worldwide Domal Salt Deposits and Domal Salt Cavern Fields*, SMRI Research Report, 2007.
8. Hellman A., Honkala K., Dahl S., Christensen C.H., Nørskov J.K., 7.17 – *Ammonia Synthesis: State of the Bellwether Reaction*, Comprehensive Inorganic Chemistry II (Second Edition), Elsevier, 2013.
9. Kotowicz J., Węcel D., Brzęczek M., *Analysis of the work of a “renewable” methanol production installation based ON H2 from electrolysis and CO2 from power plants*, “Energy” 2021, Vol. 221.
10. Krasae S., Jacob H., Stang J.H., Neksa P., *Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009*, “International Journal of Hydrogen Energy” 2010, Vol. 35, Issue 10.
11. Kruck O. et al., *Overview on all Known Underground Storage Technologies for Hydrogen*, Technical report European Union, 2013, http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D3.1_Overview-of-all-known-underground-storage-technologies.pdf (dostęp: 13.04.2022 r.).
12. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040*, Warszawa 2021, <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030> (dostęp: 13.04.2022 r.).
13. Moseley P.T., Garche J., Ed, *Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, Electrochemical, Elsevier, 2015.

²² J. Andersson, S. Grönkvist, *Large-scale storage...*

14. Özcan O., Nilgün Akin A.N., *Thermodynamic analysis of methanol steam reforming to produce hydrogen for HT-PEMFC: An optimization study*, "International Journal of Hydrogen Energy" 2019, Vol. 44, Issue 27.
15. Sempsrott D. Kennedy, *Plays Critical Role in Large-Scale Liquid Hydrogen Tank Development*, 2021, <https://www.nasa.gov/feature/kennedy-plays-critical-role-in-large-scale-liquid-hydrogen-tank-development> (dostęp: 13.04.2022 r.).
16. Stolten D., Emonts B., Ed., *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH 2016.
17. Thomas G., Parks G., *Potential roles of ammonia in a hydrogen economy: a study of issues related to the use of ammonia for onboard vehicular hydrogen storage*, US Department of Energy, Washington 2006.
18. Van Wijk A., van der Roest E., Boere J., *Solar Power to the People*. Nieuwegein-Utrecht: Allied Waters, 2017.

Rozdział 6

MOŻLIWOŚCI I POTENCJAŁ ROZWOJU GOSPODARKI WODOROWEJ POLSKI

Opportunities and potential for development of Poland's hydrogen economy

Jolanta STEC-RUSIECKA

Abstract: *The chapter presents the main objectives and directions of development of the hydrogen economy in Poland based on selected literature items, mainly the “Polish Strategy for the Hydrogen Economy until 2030 with an outlook until 2040” and the conclusions from the participation in the entrepreneurial discovery process, in particular a series of Smart Lab workshops organized by PwC on behalf of the Polish Agency for Enterprise Development. Attention was also drawn to the need to increase the pace of development of renewable energy sources and to introduce changes in the production, transmission, and storage of hydrogen. The key conclusion, however, is that in order to accelerate the development of the hydrogen economy, it is necessary to provide financial support for this type of investment and to analyze the necessary areas of support in Poland.*

6.1. Wprowadzenie

Tematyka wodoru w Polsce zaczyna odgrywać coraz większe znaczenie, szczególnie w odniesieniu do ostatnich wydarzeń i aktualnej sytuacji geopolitycznej. Ze względu na wysoką konkurencję organizacje zmuszone są do poszukiwania innowacyjnych rozwiązań, do których niewątpliwie możemy zaliczyć ciągle rozwijające się technologie wodorowe. Jak wynika z analiz, obecnie wodór, szczególnie „zielony” może stać się podstawą funkcjonowania przemysłu, nie tylko w Polsce, ale również w całej Europie. Jednak, aby to było możliwe należy rozwijać źródła odnawialne, dzięki którym możliwa jest produkcja zielonego wodoru¹. Kolejnym istotnym zagadnieniem wpływającym na rozwój odnawialnych źródeł energii jest konieczność zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej, możliwa właśnie dzięki wodorowi, który zostanie wykorzystany w roli magazynu energii². Znaczącą w tym rolę odgrywają między innymi władze państwowe

¹ Raport „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”, Wrocław 2021, s. 24.

² Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040, Warszawa 2021, s. 3.

(kształtujące prawo i tworzące bodźce zachęcające do korzystania z rozwiązań wykorzystujących wodór) oraz klienci (tworzenie popytu rynkowego).

W celu rozwoju rynku wodoru konieczne jest obniżenie kosztów związanych zarówno z produkcją, jak i transportem, dystrybucją i magazynowaniem wodoru.

Raport „Zielony wodór z OZE w Polsce”³ prezentuje nie tylko obecny stan rynku wodoru, ale również perspektywy jego rozwoju i gałęzie gospodarki, które powinny nim być szczególnie zainteresowane. Dużo miejsca poświęcono kwestiom związanym z możliwością produkcji tego paliwa oraz kształtowaniu na nie popytu. Raport podkreśla też konieczność wzrostu tempa rozwoju odnawialnych źródeł energii oraz wprowadzenia zmian w obszarze wytwarzania, przesyłania i magazynowania wodoru. Jednak kluczowy wniosek dotyczy faktu, że do przyspieszenia rozwoju gospodarki wodorowej konieczne jest zapewnienie wsparcia finansowego tego typu inwestycji i analiza koniecznych obszarów wsparcia, która była przedmiotem procesu przedsiębiorczego odkrywania i spotkań w ramach „Smart Lab” dla technologii wodorowych⁴.

6.2. Określenie celów i kierunków rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce – wnioski i rekomendacje

Podstawowym dokumentem kształtującym główne cele i kierunki rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce jest „Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040” (dalej PSW). Dokument ten wpisuje się w światowe działania zmierzające do budowania gospodarki nisko- i zeroemisyjnej. Jest też spójny zarówno z dokumentami europejskimi m.in.: „Europejskim Zielonym Łądem”, czy „Strategią w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu”, jak i krajowymi, m.in.: „Strategią na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.)” przyjętą w 2017 r. czy strategią „Polityka energetyczna Polski do 2040 roku”. Nadrzędnym celem PSW jest ukierunkowanie rozwoju polskiej gospodarki wodorowej, aby stała się ona narzędziem umożliwiającym osiągnięcie neutralności klimatycznej Polski. Jak wskazano w dokumencie, rozwój technologii wodorowych umożliwi obniżenie emisyjności najbardziej energochłonnych sektorów polskiej gospodarki, dzięki czemu przyczyni się do „zrównoważonego wzrostu gospodarczego (...) i przekwalifikowania kadry w sektorach zagrożonych redukcją”⁵. Rozwój technologii wodorowych, szczególnie takich, które umożliwiają produkcję wodoru z odnawialnych źródeł energii jest strategicznym wyzwaniem dla Polski. PWS gospodarkę wodorową rozumie jako scentralizowane i rozproszone technologie wytwarzania, magazynowania, dystrybucji i wykorzystania wodoru w różnych gałęziach gospodarki. Pomimo tego, że Polska plasuje się na trzecim miejscu w produkcji wodoru (wśród krajów europejskich),

³ Raport „Zielony wodór z OZE w Polsce...”

⁴ Zorganizowany był przez PwC na zlecenie Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości – szerzej w dalszej części rozdziału.

⁵ Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040..., s. 3.

znikomy jest udział produkcji wodoru w procesie elektrolizy wody⁶. PWS podkreśla konieczność dywersyfikacji źródeł energii, zauważając, że proces ten jest trudny i długotrwały, a większość polskiej energii nadal wytwarzana jest z wykorzystaniem paliw kopalnych. W strategii podkreślono również znaczenie tworzenia połączeń międzysektorowych dla przyspieszenia tego procesu⁷.

Obecnie wodór w znacznej części wytwarzany jest z paliw kopalnych (głównie węgla i gazu ziemnego), w Polsce stanowi on całość produkcji. Do największych zakładów produkujących wodór w Polsce zaliczamy: Grupę Kapitałową Azoty S.A., która rocznie wytwarza około 420 tys. ton wodoru, a jej udział w rynku sięga 32,3%. Pozostałe spółki całą swoją produkcję przeznaczają na własne potrzeby. Są to: Koksownia Zdzieszowice oraz Przyjaźń, z udziałem ok. 11,5%, produkujące około 149 tys. ton rocznie; PKN Orlen, udział około 10,7%, przy produkcji około 140 tys. ton rocznie oraz Grupa Lotos, z udziałem około 4,5% i produkcją około 59 tys. ton rocznie⁸.

Perspektywą jest produkcja wodoru odnawialnego, powstającego na drodze elektrolizy wody, jednak kluczowe w tym procesie jest zasilanie elektrolizera energią elektryczną, która pochodzi z odnawialnych źródeł energii. Możliwe jest również zastosowanie procesu reformingu biogazu lub biometanu. W Polsce takie rozwiązania w chwili obecnej są wynikiem prac badawczo-rozwojowych lub badań pilotażowych⁹.

Opłacalność produkcji wodoru w wyniku elektrolizy umożliwi dostęp do energii elektrycznej, której cena będzie się wahać w przedziale 10–20 EUR/MWh¹⁰.

PWS jako priorytetowe obszary, gdzie może zostać wykorzystany wodór wskazuje energetykę, transport i przemysł, a dzięki łączeniu sektorów możliwe będzie zwiększone wykorzystanie energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii oraz efektywne wykorzystanie jej przez różne sektory gospodarki¹¹. Dokument określa również sześć celów szczegółowych odnoszących się do kierunków rozwoju gospodarki wodorowej. Są to¹²:

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

⁶ *Ibidem*, s. 7.

⁷ Bloomberg NEF, *Sector coupling in Europe: powering decarbonisation. Potential and policy implications of electrifying the economy*, 2020, s. 8.

⁸ Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040..., s. 8.

⁹ *Ibidem*, s. 10.

¹⁰ *Łączenie sektorów zielonej energii. Co to oznacza dla Polski? Elektryfikacja, decentralizacja, digitalizacja*, red. Ch. Schnell, Instytut Jagielloński, Warszawa 2020, s. 26.

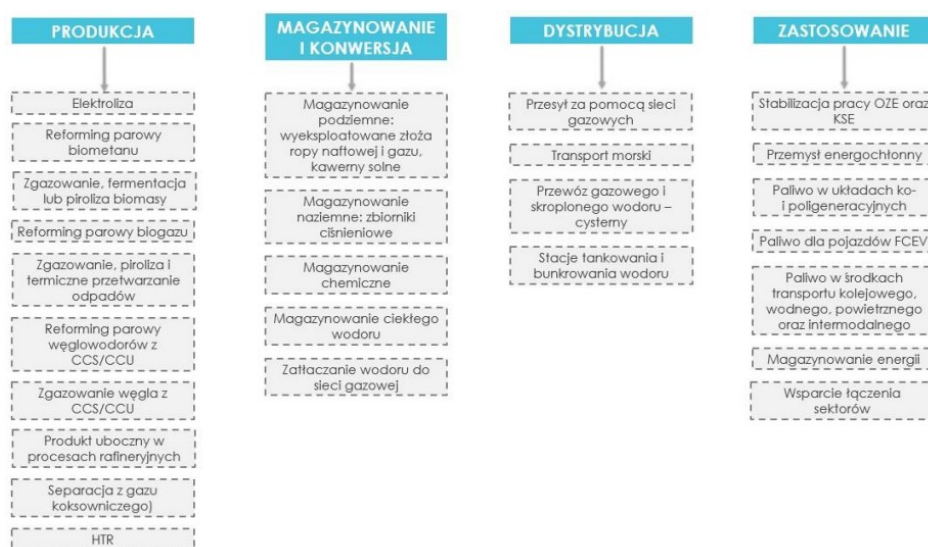
¹¹ Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040..., s. 12.

¹² *Ibidem*, s. 12–23.

Wymienione powyżej cele gospodarki wodorowej Polski będą możliwe poprzez realizację określonych działań. W PSW zostały wskazane¹³ działania (łącznie 44), które umożliwią realizację strategii i osiągnięcie jej celów. Skutkiem realizacji tych działań będzie również wsparcie regionów Polski przez m.in. tworzenie „Dolin wodorowych” (umożliwiających m.in. realizację projektów badawczo-rozwojowych oraz inwestycyjnych) przyczyniających się do rozwoju współpracy pomiędzy krajowymi i zagranicznymi interesariuszami.

PSW podkreśla znaczenie produkcji wodoru nisko- i zeroemisyjnego poprzez wsparcie takich metod jak m.in.: elektroliza wody, technologia zgazowania, fermentacji, pirolizy biomasy, reforming parowania biogazu i biometanu.

W strategii zostały również określone wskaźniki osiągnięcia celów PSW do 2030 roku obejmujące m.in.: osiągnięcie określonej mocy instalacji do produkcji wodoru niskoemisyjnego, utworzenie Ekosystemu Innowacji Dolin Wodorowych, budowę stacji wodorowych i wykorzystanie autobusów wodorowych oraz Utworzenie Centrum Technologii Wodorowych¹⁴.



Rys. 1. Projekt łańcucha wartości polskiej gospodarki wodorowej

Fig. 1. Project of the value chain of the Polish hydrogen economy

Źródło: Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040..., s. 7.

PWS wskazuje i systematyzuje stopień zaawansowania prac nad technologiami wodorowymi w naszym kraju, umieszczając rozwiązania posiadające wysoką gotowość technologiczną w łańcuchu wartości polskiej gospodarki wodo-

¹³ *Ibidem*, s. 14 i n.

¹⁴ *Ibidem*, s. 25–30.

rowej. Rysunek 1. przedstawia polskie osiągnięcia przypisane do poszczególnych elementów łańcucha gospodarki wodorowej. Intensyfikacja prac nad poszczególnymi rozwiązaniami umożliwi Polsce stanie się istotnym graczem rynkowym na dużą skalę, zarówno jako dostawcy, jak i odbiorcy technologii¹⁵.

Dla rozwoju znaczenia Polski w obszarze technologii wodorowych na arenie międzynarodowej decydujący będzie postęp dotyczący wzrostu zdolności komercjalizacji krajowych technologii (określenie działań horyzontalnych dotyczących wykorzystania polskiego potencjału badawczo-rozwojowego w zakresie technologii wodorowych). Aby mogło to nastąpić kluczowe jest wsparcie, które umożliwi stabilny i dynamiczny rozwój gospodarki wodorowej do roku 2030.

6.3. Proces przedsiębiorczego odkrywania – technologie wodorowe¹⁶

W ramach Krajowych Inteligentnych Specjalizacji (KIS) jednym z obszarów jest zagadnienie i rozwój zrównoważonej energetyki. Ten fakt przyczynił się do zorganizowania spotkań, w ramach których wykorzystano proces przedsiębiorczego odkrywania – narzędzie służące weryfikacji i aktualizacji KIS. Głównym jego celem było wyłonienie innowacyjnych i konkurencyjnych obszarów. Proces przedsiębiorczego odkrywania realizowany był w dwu etapach¹⁷:

- 1) „Smart Panel” – którego celem była identyfikacja potencjału społeczno-ekonomicznego przedsiębiorstw oraz stworzenie listy obszarów/dziedzin o wysokim potencjale innowacyjnym.
- 2) „Smart Lab” – cykl spotkań przedstawicieli przedsiębiorstw, świata nauki, otoczenia biznesu i administracji dla obszaru wodoru, których celem jest weryfikacja potencjału obszaru wodoru i opracowanie ekspertyzy (*Business Technology Roadmap – BTR*) wskazującej pożądane kierunki rozwoju. Wynikiem spotkań są również rekomendacje odnośnie zakresu innowacyjnych konkursów.

Podstawowymi efektami „Smart Panelu” było sporządzenie raportów charakteryzujących obszar technologii wodorowych (na podstawie wywiadów, ankiet, analizy projektów oraz analizy dostępnych publikacji naukowych) oraz charakterystyka kwestii rozwoju działalności innowacyjnej przedsiębiorstw z tego obszaru.

¹⁵ *Ibidem*, s. 8.

¹⁶ Proces ten zorganizowany był przez PwC na zlecenie Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości. Celem projektu było zweryfikowanie potencjału wybranych obszarów gospodarczych i aktualizacja KIS.

¹⁷ W obszarze technologii wodorowych przeprowadzone zostały warsztaty „Smart Lab”, w których uczestniczyli przedstawiciele IPE. Celem spotkań było wypracowanie kierunków rozwoju polskich technologii i rozwiązań z obszaru technologii wodorowych, a prezentowane materiały są efektem tych prac.

Do kluczowych wniosków z raportu „Smart Panel” można zaliczyć następujące stwierdzenia¹⁸:

- 1) Istnieje wysoki potencjał rozwojowy technologii wodorowych w Polsce, spowodowany głównie zmianami w polityce energetycznej i klimatycznej.
- 2) Występuje niska aktywność badawczo-rozwojowa przedsiębiorstw w obszarze wodoru. Prowadzone projekty są we wstępnej fazie rozwoju, przedsiębiorstwa inwestują mało środków na prace B+R, nie aplikują o środki publiczne w tym obszarze i jest mało zgłoszeń patentowych.
- 3) Do głównych barier rozwoju zaliczono kapitałochłonność (zarówno wejścia, jak i realizacji prac B+R), ograniczoność środków na realizację projektów innowacyjnych oraz braki legislacyjne.
- 4) Stwierdzono również niską konkurencyjność polskich przedsiębiorstw na arenie międzynarodowej – rozwiązania dotyczące technologii wodorowych mają charakter lokalny i testowy/prototypowy.
- 5) Występuje brak spójności w działaniu polskich jednostek naukowych i przedsiębiorstw (odmienność celów), a przez to spadek efektywności prac B+R. Przedsiębiorcy uważają, że jednostki naukowe wykorzystują przestarzałe metody, a infrastruktura techniczna jest słabo rozwinięta.
- 6) Stwierdzono również niski stopień specjalizacji w technologiach wodorowych wśród polskich przedsiębiorstw. Zielony wodór produkują głównie przedsiębiorstwa z branży energetycznej, paliwowej oraz chemicznej, jednak nie jest on ich głównym obszarem działalności.
- 7) Wodór jest jednym z kluczowych źródeł energii, stopniowo wypierających źródła węglowe i umożliwiającących osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku.
- 8) Brakuje specjalistów branżowych, co jest wynikiem wzrostu dynamiki sektora i braku odpowiedniej liczby specjalistów na rynku.
- 9) Zielony wodór w Polsce wytwarzany jest głównie w ramach projektów B+R (brak komercyjnego wykorzystania).

Gospodarka wodorowa obejmuje łańcuch wartości od wytwarzania i przesyłu, po magazynowanie i jego zastosowanie w różnych obszarach gospodarki, głównie w transporcie, energetyce i ciepłownictwie¹⁹.

Produkcja wodorowa ze względu na zmiany środowiskowe i sytuację geopolityczną nabiera coraz większego znaczenia nie tylko w Polsce, ale i na całym świecie. Kraje takie jak m.in.: Japonia, Francja, Australia, Holandia, Norwegia, Niemcy, Hiszpania, Portugalia posiadają inicjatywy wspierające rozwój technologii wodorowych²⁰.

¹⁸ Wniosków z raportu „Smart Panel” prezentowane przez przedstawicieli PwC podczas warsztatów „Smart Lab” w dniu 16.03.2022 r.

¹⁹ <https://www.gov.pl/web/klimat/gospodarka-wodorowa> (dostęp: 16.03.2022 r.).

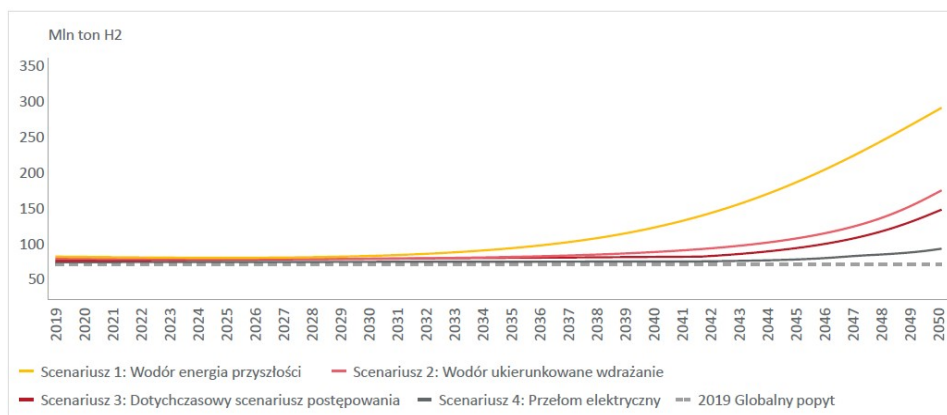
²⁰ *LBST, International Hydrogen Strategies*. A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council Germany, 2020, s. 7.

Kluczowe cele w narodowych strategiach wodorowych możemy podzielić na²¹:

- 1) cele dekarbonizacyjne, a wśród nich kwestie redukcji emisji CO₂ oraz integracja OZE;
- 2) cele ekonomiczne, tj. dywersyfikacja dostaw energii i rozwój produkcji wodoru na eksport.

*International Hydrogen Strategies (2020)*²² wskazuje również główne segmenty zastosowania wodoru w przyszłości. Prognozuje głównie wykorzystanie wodoru w przemyśle, transporcie oraz do wytwarzania energii.

Uwzględniając zapotrzebowanie na wodór oraz trendy rozwojowe Deloitte przewidział cztery scenariusze rozwoju gospodarki wodorowej²³. Zostały one przedstawione na rys. 2. Zakłada się, że w przyszłości globalne zapotrzebowanie na wodór będzie różniło się znacznie w zależności od zastosowanego scenariusza (od popytu sięgającego od 304 Mtpa wodoru w 2050 roku w scenariuszu pierwszym (wodór: energia przyszłości), do nieco ponad 90 Mtpa do 2050 roku w scenariuszu czwartym (wodór: przełom w sektorze elektrycznym)²⁴. Scenariusze te za jeden z kluczowych czynników wpływających na możliwe prognozy popytu uznają możliwości końcowe wykorzystania wodoru, takie jak gaz rurociągowy, produkcja stali i paliwa transportowe.



Rys. 2. Globalne scenariusze rozwoju zapotrzebowania na wodór (mln ton wodoru)

Fig. 2. Global forecasted hydrogen demand (million tonnes hydrogen)

Źródło: opracowanie na podstawie: Deloitte, *Australian and Global Hydrogen Demand Growth Scenario Analysis COAG Energy Council-National Hydrogen Strategy Taskforce*, 2019, s. 12.

²¹ *Ibidem*, s. 21–24.

²² *Ibidem*, s. 36.

²³ *Australian and Global Hydrogen Demand Growth Scenario Analysis, COAG Energy Council-National Hydrogen Strategy Taskforce*, Deloitte, 2019, s. 12.

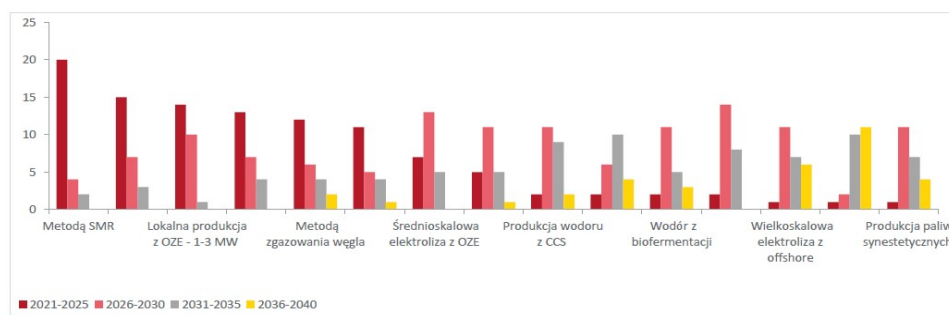
²⁴ *Ibidem*, s. 77.

Pierwszy scenariusz (energia przyszłości) zakłada, że wszystkie aspekty rozwoju przemysłu są korzystne dla wodoru. W ramach drugiego scenariusza kraje przyjmują ukierunkowane podejście, które ma na celu maksymalizację wartości ekonomicznej i korzyści z wdrażania wodoru. Scenariusz trzeci zakłada postępowanie jak do tej pory, jednak z uwzględnieniem pewnych zmian pojawiających się na światowych rynkach, które umożliwiają usunięcie pewnej bariery we wprowadzaniu wodoru. Ostatni ze scenariuszy zakłada przełom elektryczny, wynikający z szybkiego rozwoju technologicznego w elektryfikacji²⁵.

Podstawowymi efektami „Smart Lab” była weryfikacja potencjału obszaru wodoru i opracowanie ekspertyzy (*Business Technology Roadmap – BTR*) wskazującej pożądane kierunki rozwoju wodoru w Polsce.

Elementem rozpoczynającym pracę nad ekspertyzą była analiza łańcucha wartości gospodarki wodorowej w obszarach: produkcji, magazynowania, dystrybucji i zastosowania wodoru.

Pierwszy z analizowanych obszarów (*obszar 1*) dotyczył produkcji wodoru. Obejmował on analizę wykorzystywanych technologii i trendów rozwojowych w ramach tego obszaru. Uwzględnione w analizie technologie zostały przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Produkcja wodoru – perspektywa czasowa wdrożeń technologii i rozwiązań

Fig. 3. Hydrogen production – technology and solutions implementation time perspective

Źródło: opracowanie na podstawie materiałów ze spotkań „Proto Lab” (ankieta „Badanie dojrzałości technologii wodorowych”).

Wśród technologii wzięto głównie pod uwagę: elektrolizę, reforming (CCSU) oraz biogaz; dostępne produkty i trendy rozwojowe.

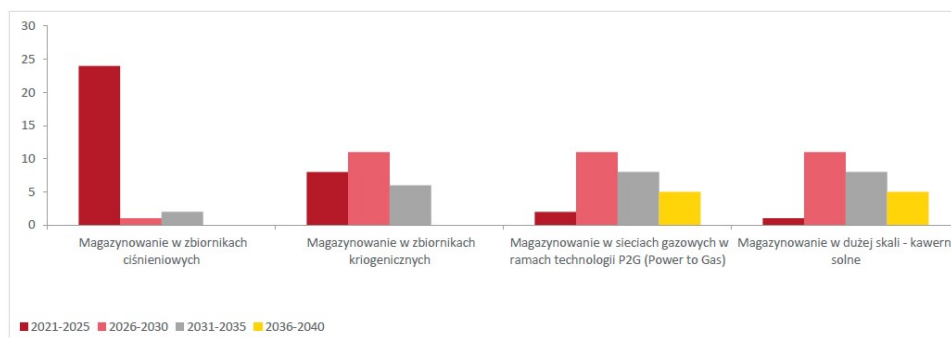
Elektroliza obejmuje technologie alkaiczne (ALK), stałotlenkowe (SOFC) i wysokotemperaturowe (PEM). Ustalono tendencję spadkową dla kosztów CAPEX i OPEX elektrolizerów. Trendy rozwojowe będą dotyczyły: usprawnienia technologicznego – redukcji zużycia energii pierwotnej, wyższe ciśnienia wyjściowe oraz niższych kosztów CAPEX i OPEX (głównie efekt skali).

²⁵ *Ibidem*, s. 139.

Reforming parowy metanu, jako jedna z wiodących metod produkcji wodoru szarego. Technologia CCSU jest na wczesnym etapie komercjalizacji – niezbędna do rozwoju produkcji wodoru niebieskiego. Kluczową sprawę odgrywa efektywność wychwytu CO₂ oraz ekologiczne metody składowania. Trendy rozwojowe dotyczą usprawnienia technologii CCSU oraz redukcji kosztów CAPEX i OPEX dla technologii.

Biogaz – produkcja biogazu z biomasy i następnie produkcja wodoru z wykorzystaniem reformingu są metodami opanowanymi technologicznie. Ponieważ brakuje regulacji i finansowania dla biogazowni i wodoru, rozwiązania komercyjne nie funkcjonują. Trendy rozwojowe uwzględniają wykorzystanie biogazu i biometanu do produkcji wodoru (*Green Deal*).

Drugi z poddanych analizie obszarów (*obszar 2*) – obejmował analizę wykorzystywanych technologii i trendów dotyczących magazynowania wodoru. Na rysunku 4. przedstawiono technologie i rozwiązania w obszarze magazynowania wodoru oraz perspektywę czasową ich wdrożenia. Aktualnie najbardziej rozpowszechnione jest magazynowanie w zbiornikach ciśnieniowych. Z przeprowadzonych analiz wynika, że rozwój w tym obszarze będzie skierowany na magazynowanie w sieciach gazowych w ramach technologii P2G (*Power to Gas*) oraz magazynowania na dużą skalę w kavernach solnych.



Rys. 4. Magazynowanie wodoru – perspektywa czasowa wdrożeń technologii i rozwiązań

Fig. 4. Hydrogen storage – technology and solutions implementation time perspective

Źródło: opracowanie na podstawie materiałów ze spotkań „Proto Lab”....

Wśród technologii wzięto pod uwagę magazynowanie: ciśnieniowe i kriogeniczne, wielkoskalowe oraz paliwa syntetyczne i wodorki metali.

Magazynowanie ciśnieniowe obejmuje analizę wykorzystania zbiorników ciśnieniowych typu 1–4, które są dostępne na rynku oraz pojawiają się nowe rozwiązania (4+) oraz zbiorników kriogenicznych, które są na wstępnym etapie komercjalizacji. Trendy rozwojowe dotyczą rozwoju zbiorników kompozytowych, redukcji wykorzystania metali na rzecz tworzyw sztucznych, prac na odpornością ciśnieniową, zwiększeniem odporności na temperaturę oraz rozwiązania problemów biodegradowalności.

Magazynowanie wielkoskalowe obejmuje zagadnienia dotyczące wykorzystania podziemnych struktur geologicznych (z sektora paliwowego i gazowego) ze szczególnym uwzględnieniem kawern solnych. Badania tego zagadnienia dotyczą głównie rozpoznania podziemnych struktur geologicznych, składu skał, przepuszczalności, wytrzymałości ciśnieniowej i wytypowania tych, które będą najlepiej nadawały się do magazynowania wodoru.

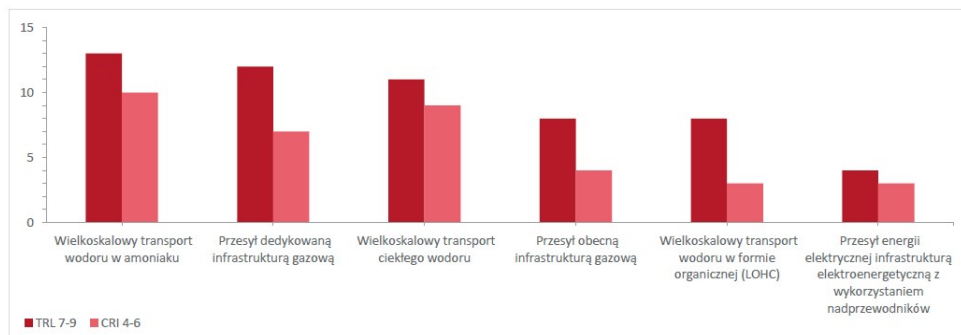
Magazynowanie w paliwach syntetycznych i wodorkach metali uwzględnia wykorzystanie m.in. amoniaku i metanolu jako magazynów wodoru, LOHC rozwijająca się metoda magazynowania wodoru; wykorzystanie wodorków metali – metody badawcze (o dużym potencjale). Trendy rozwojowe skierowane są na produkcji „zielonego” amoniaku i metanolu z zielonego wodoru; badania rozwojowe w zakresie wodorków metali.

Obszar 3 – obejmował zagadnienia dotyczące transportu i przesyłu wodoru. Zostało to przedstawione na rys. 5. Wśród technologii wzięto pod uwagę przesył: lądowy, morski oraz rurociągi.

Przesył lądowy obejmuje zbiorniki ciśnieniowe, kriogeniczne i stalowe. Wykorzystywane są technologie podobne jak w przypadku magazynowania. Do transportu na krótkim dystansie najczęściej wykorzystywane są cysterny. Trendy rozwojowe dotyczą doskonalenia i usprawnienia technologii materiałowych wykorzystywanych do produkcji zbiorników ciśnieniowych oraz kriogenicznych oraz wykorzystania pojazdów zeroemisyjnych do transportu wodoru.

Przesył morski obejmuje redukcję boil-off. Duży potencjał przesyłu na długie dystanse morskie wykazuje amoniak, metanol i LOHC. Wykazują one też kompatybilność z istniejącą infrastrukturą oraz statkami do obsługi LNG.

Przesył przy wykorzystaniu rurociągów uwzględnia budowę rurociągów dedykowanych do wodoru, które będą łączyły najważniejsze ośrodki przemysłowe w państwie. Docelowym rozwiązaniem jest retrofitting oraz projekty rurociągów do transportu CO₂.



Rys. 5. Transport, przesył wodoru – perspektywa czasowa wdrożeń technologii i rozwiązań

Fig. 5. Hydrogen transport, transmission – technology and solutions implementation time perspective

Źródło: opracowanie na podstawie materiałów ze spotkań „Proto Lab”...

Obszar 4 – dotyczył zagadnień dotyczących zastosowania technologii wodorowych. Uwzględniono wykorzystanie technologii wodorowych w sektorze energetyki i ciepłownictwa, mobilności oraz dla przemysłu ciężkiego.

Energetyka i ciepłownictwo – wykorzystanie wodoru nie tylko jako czynnika chłodzącego, ale również wykorzystanie dużych domieszek wodoru do gazu ziemnego do spalania. Trendy rozwojowe rozwijają się w kierunku zwiększania zdolności turbin gazowych do współspalania domieszek wodoru oraz usprawniania procesów spalania mieszanki gazowo-wodorowej.

Mobilność – pojazdy wodorowe wykorzystywane są zarówno w transporcie osobowym, jak i zbiorowym. Trendy dotyczą zastosowania bardziej zaawansowanych zbiorników wodorowych oraz zwiększenia ich ciśnienia. Prowadzi się również badania nad zwiększeniem zasięgu takich pojazdów oraz redukcją kosztów ich zakupu.

Przemysł ciężki powszechnie wykorzystuje wodór szary, jednak wykorzystanie wodoru dla przemysłu rozwija się w kierunku przejścia na wodór niebieski i zielony.

Do analizy polskiego sektora energii podczas spotkań „Smart Lab” zastosowano analizę SWOT, która jest techniką badania umożliwiającą analizę wewnętrznego i zewnętrznego otoczenia. Ocena ta polega na analizie mocnych stron (*S – strengths*), słabych stron (*W – weaknesses*), szans (*O – opportunities*) i zagrożeń (*T – threats*). Słabe i mocne strony dotyczą wnętrza analizowanego obszaru, a szanse i zagrożenia otoczenia zewnętrznego²⁶.

Wynikiem spotkań „Smart Lab” było również przygotowanie rekomendacji odnośnie do zakresu innowacyjnych konkursów w obszarze wodoru w pięciu kategoriach: wytwarzanie, magazynowanie, przesył i dystrybucja, wykorzystanie wodoru oraz szeroko pojętych systemów wodorowych.

W obszarze wytwarzania zdefiniowano potrzebę realizacji projektów dotyczących m.in.: wytwarzania wodoru z odpadów (jako nośnika energii), elektrolizy wysokotemperaturowej w warunkach wysokiego ciśnienia, wytwarzania wodoru w celu magazynowania energii.

Projekty zaproponowane w obszarze magazynowania dotyczą m.in. wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych w pełni podlegających procesowi recyklingu, materiały do chemicznego magazynowania wodoru, sposobów magazynowania wodoru z odnawialnych źródeł energii, pomiarowych narzędzi bezpieczeństwa dla technologii magazynowania wodoru.

Wśród projektów dotyczących przesyłu i dystrybucji eksperci zwrócili m.in. uwagę na: urządzenia służące do wykrywania i pomiaru emisji wodoru (lub wodoru z gazem ziemnym) z infrastruktury przesyłowej i dystrybucyjnej, wytwarzania wysokociśnieniowych rur kompozytowych do przesyłu węglowodorów, systemów separacji wodoru z gazu ziemnego (wielkoskalowego) dla instalacji

²⁶ R. Popper, M. Keenan, I. Miles, M. Butter, G.S. Fuenta, *Global Foresight Outlook 2007*, The European Foresight Monitoring Network, 2007, s. 38.

wysokociśnieniowych; badanie elementów infrastruktury gazowej pod kątem współpracy z wodorem.

W obszarze wykorzystania wodoru m.in. zaproponowano opracowanie typowego szeregu stacjonarnych (i mobilnych) źródeł energii do zasilania rezerwowego (*back-uppower*) lub tzw. pozasieciowego (*off-grid electricity*) z wykorzystaniem wodoru i ogniw paliwowych, zastosowanie wodoru w sektorze militarnym oraz hutnictwie.

W ostatnim obszarze, dotyczącym systemów wodorowych, zdiagnozowano m.in. potrzebę realizacji następujących projektów: zintegrowania systemów wytwórczych, magazynowania i wykorzystanie wodoru w budynkach (wodorowy *smart-grid* dla budynków); stworzenie instalacji umożliwiających „zieloną” niezależność energetyczną miast; opracowanie „rodziny” systemów wodorowych z przeznaczeniem dla gospodarstw domowych.

Wnioski ze spotkań „Smart Lab” zostaną zaprezentowane w ekspertyzie BTR (*Business Technology Roadmap*) wskazującej pożądane kierunki rozwoju technologii wodorowych w Polsce.

6.4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki pokazują, że zarówno „Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040”, jak i inne kluczowe dokumenty krajowe odnoszące się do tematyki wodorowej (m.in. Raport „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”) wskazują na istotność znaczenia w rozwoju polskiej gospodarki wodorowej „zielonego” wodoru. Pierwszym krokiem w kierunku rozwoju technologii i produkcji takiego wodoru jest rozwój produkcji energii z odnawialnych źródeł energii. Kolejny krok dotyczy projektów badawczych w obszarach produkcji, magazynowania, dystrybucji i zastosowania wodoru, umożliwiających wykorzystanie już przebadanych technologii na większą skalę oraz ciągłe doskonalenie i rozwijanie nowych, innowacyjnych rozwiązań wpływających na wzrost efektywności wykorzystania wodoru. Obecna sytuacja pokazuje, że rozwój prac badawczych w takim kierunku jest nie tylko wskazany, ale konieczny, a dywersyfikacja źródeł pozyskiwania energii i produkcja energii niewywierającej negatywnego wpływu na środowisko jest zagadnieniem kluczowym zarówno dla rządu, naukowców, jak i przedsiębiorców.

Bibliografia

1. *Australian and Global Hydrogen Demand Growth Scenario Analysis*, COAG Energy Council-National Hydrogen Strategy Taskforce, Deloitte, 2019.
2. Bloomberg NEF, *Sector coupling in Europe: powering decarbonisation. Potential and policy implications of electrifying the economy*, 2020.

3. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition, [https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication /2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf](https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf) (dostęp: 11.04.2022 r.).
4. *LBST, International Hydrogen Strategies*. A study commissioned by and in cooperation with the World Energy Council Germany, 2020.
5. *Łączenie sektorów zielonej energii. Co to oznacza dla Polski? Elektryfikacja, Decentralizacja, Digitalizacja*, red. Ch. Schnell, Instytut Jagielloński, Warszawa 2020.
6. *National hydrogen roadmap guides finland towards carbon neutrality*, <https://www.businessfinland.fi/en/whats-new/news/cision-releases/2020/national-hydrogen-roadmap-guides-finland-towards-carbon-neutrality> (dostęp: 11.04.2022 r.).
7. Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, *Norwegian Ministry of Climate and Environment, The Norwegian Government's hydrogen strategy towards a low emission society*, Norway, 2020, <https://www.regjeringen.no/contentassets/40026db2148e41eda8e3792d259efb6b/y-0127e.pdf>, (dostęp: 11.04.2022 r.).
8. *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans*, https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Brochure%20FCH%20Finland%20%28ID%209473037%29.pdf (dostęp: 11.04.2022 r.).
9. Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040, Warszawa 2021. Załącznik do uchwały nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. (poz. 1138).
10. Raport „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”, Wrocław 2021.

Część II

ANALIZA BADAWCZA WYBRANYCH PAŃSTW

Rozdział 1

STUDIUM PRZYPADKU – SZWECJA

Case Study – Sweden

Jagoda SIWIEC

***Abstract:** In times of rapid climate changes and their consequences for the future of mankind, it is necessary to develop safe and stable energy sources. Hydrogen as an energy carrier is one of the solutions that have been solving environmental problems in recent decades. Sweden is one of the countries that aims to achieve net zero greenhouse gas emissions by 2045. A hydrogen strategy has been developed which incorporates the actions taken to create a fossil fuel free economy. The article deals with the role that hydrogen can play in enhancing the competitiveness of Seed industry and what policies are needed to promote the development of hydrogen. Sweden has great potential to become one of the first and largest producers of hydrogen from renewable energy sources as it has a high share of electricity obtained from low carbon and renewable sources.*

1.1. Wprowadzenie

Bezpieczeństwo energetyczne w czasie narastających różnego rodzaju konfliktów stale zyskuje na znaczeniu. Można je określić przede wszystkim jako stan, w którym gospodarka danego państwa pozwala na utrzymanie obecnych i przyszłych dostaw paliw i energii przy jednoczesnym poszanowaniu środowiska naturalnego.

W celu zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego oraz nieprzerwalności dostaw energii, niezbędne jest zapewnienie zdywersyfikowanych źródeł dostaw tego surowca. Ważne jest również, aby państwo korzystało z krajowych zasobów energetycznych, co przyczyni się do zmniejszenia poziomu zależności od innych krajów. Opracowywanie oraz korzystanie z coraz nowszych technologii, a także aktywne uczestnictwo w różnego rodzaju spotkaniach czy konferencjach, pozwalają na wypracowanie nowych i lepszych rozwiązań w sferze energetyki.

W obecnych czasach wzrasta potrzeba przede wszystkim szybkiej redukcji emisji gazów cieplarnianych, aby przeciwdziałać galopującemu wzrostowi temperatury na świecie. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie produkcją wodoru, gdy występuje nadwyżka podaży energii elektrycznej i gdy cena energii elektrycznej jest niska. Wodór może służyć nie tylko do magazynowania energii, ale także może zostać ponownie przekształcony w energię elektryczną. Dodatkowo pojawiają się nowe przemysłowe zastosowania wodoru.

Wolny od paliw kopalnych wodór będzie najprawdopodobniej odgrywać kluczową rolę w kilku sektorach na świecie, a także w Szwecji i krajach skandynawskich. To wyjaśnia, dlaczego wzrasta zainteresowanie wodorem, który mógłby zostać wykorzystany jako nośnik energii. Ambitna polityka środowiskowa i klimatyczna doprowadziła do transformacji szwedzkiego systemu energetycznego, co widoczne jest głównie w sektorach energetycznych. Wytwarzanie energii elektrycznej jest prawie bezemisyjne dzięki dużej produkcji z energii wodnej i jądrowej, z których każda stanowi około 40% krajowej produkcji, wraz z energią wiatrową, bioenergią i odpadami, które stanowią pozostałą część.

Szwedzka polityka energetyczna od dziesięcioleci ma na celu ustanowienie zrównoważonego systemu energetycznego skoncentrowanego na efektywności energetycznej i przestawienie się z paliw kopalnych na krajową energię odnawialną. Kraj ma zamiar kontynuować tę samą ścieżkę, poprawiając efektywność energetyczną i zwiększając zużycie energii odnawialnej z już wysokiego poziomu.

W swojej polityce dotyczącej rynku energii rząd dąży do promowania wydajnych i konkurencyjnych rynków w celu zapewnienia niezawodnych dostaw energii po konkurencyjnych cenach. Szwecja w przeszłości stosowała zarówno podatek energetyczny, jak i podatek od dwutlenku węgla (CO₂) w celu stymulowania efektywnego zużycia energii i niskiego – dostawa energii z węgla. Podatek jest powszechnie akceptowany przez opinię publiczną i jest stopniowo zwiększany, aby stymulować zrównoważoną transformację energetyczną.

Pierwsza część rozdziału skupia się na przeanalizowaniu strategii wodorowej, jaką posiada Szwecja. Przedstawione zostają jej główne założenia oraz ramy czasowe, do kiedy mają zostać one osiągnięte.

Następna część rozdziału skupia się na określeniu instrumentów oraz narzędzi gospodarki wodorowej. Wskazany zostaje organ, który zlecił opracowanie propozycji ogólnej strategii wodorowej. W tym podrozdziale zawarte zostały również ogłoszone w 2020 roku inicjatywy i partnerstwa w zakresie wykorzystania wodoru.

Dalej określone zostały cele gospodarki wodorowej do 2050 roku oraz sposoby ich osiągnięcia poprzez wykorzystanie wodoru wolnego od paliw kopalnych w niektórych sektorach, a następnie ukazano strukturę produkcji energii elektrycznej oraz warunki kraju, od których zależy produkcja energii pochodzącej z OZE. Przedstawiona została również produkcja energii z podziałem na źródła odnawialnych surowców.

Następna część rozdziału skupia się na charakterystyce infrastruktury energetycznej na potrzeby gospodarki wodorowej. Wskazane zostają kroki oraz sposoby, jakie należy podjąć, aby wodór mógł być transportowany lub magazynowany.

Ostatni podrozdział zawiera wnioski i rekomendacje w zakresie projekcji, w jaki sposób gospodarka wodorowa będzie wpływać na bezpieczeństwo energetyczne danego państwa.

Szwecja poprzez swoje już obecnie wolne od paliw kopalnych systemy elektroenergetyczne oraz jako kraj posiadający jedną z największych produkcji energii

pochodzącej z OZE posiada doskonałą okazję do przeprowadzenia rozwoju technologii wodorowych.

1.2. Analiza Strategii Wodorowej

Wodór jest istotnym elementem, który może odegrać bardzo ważną rolę dla szwedzkiego przemysłu energetycznego. Przede wszystkim może on być czynnikiem, który przyczyni się do zerowej emisji gazów cieplarnianych w Szwecji. Ponadto wodór ułatwi łączenie sektorów, tj. łączenie i integrowanie różnych zastosowań, takich jak transport, sektor przemysłu, ogrzewanie budynków, aby pomóc ustabilizować podaż i zapotrzebowanie na energię w systemie.

Opracowana została strategia wodorowa Szwecji, ma pomóc w osiągnięciu tego celu. Strategia została podzielona na dwa etapy, które wyznaczają konkretne działania do roku 2030 i 2045¹. W zaproponowanej strategii dwufazowej wyznaczona została również łączna moc elektrolizera wodoru 15 GW w kraju do 2045 roku².

Aby można było osiągnąć wyznaczone cele niezbędne jest również określenie ważnych inicjatyw, które muszą zostać wdrożone, aby wpłynęły pozytywnie na rozwój technologii wodorowych. Do najważniejszych inicjatyw należy zaliczyć przede wszystkim zadbanie o dodatkowe instrumenty, które przyczynia się do obniżenia kosztów między wodorem niezawierającym paliw kopalnych a wodorem kopalnym. Ważnym elementem jest również stworzenie oraz utrzymanie systematycznego dialogu między przedsiębiorstwami, organizacjami branżowymi i podmiotami publicznymi tak, aby mogły współpracować w celu osiągnięcia podobnych celów. Dla władz priorytetem jest wyznaczenie celów, które napędzą rozwój, który przyczyni się do gwałtownej redukcji emisji gazów cieplarnianych.

Emisja pochodząca ze szwedzkiego transportu krajowego z wyłączeniem lotnictwa, do 2030 roku ma zostać zmniejszona o prawie 70%. Dodatkowo na 2030 rok wyznaczony został cel stworzenia warunków dla co najmniej 5 GW mocy elektrolizera, co może prowadzić do redukcji emisji o 1,5–3 mln ton ekwiwalentu dwutlenku węgla, co odpowiada 3–6% całkowitej emisji w Szwecji³.

Natomiast do 2045 roku nastąpi dalsza ekspansja zapewniająca 10 GW mocy elektrolizera, która może przyczynić się do redukcji emisji o 7–15 milionów ton ekwiwalentu dwutlenku węgla, co odpowiada 15–30% całkowitej obecnej emisji w Szwecji⁴. Do 2045 roku Szwecja chce również całkowicie odejść od emisji gazów cieplarnianych Fossil Free Sweden opracowało strategię dotyczącą wykorzystania wodoru do osiągnięcia celów klimatycznych, ale także z naciskiem na nowe

¹ Swedish Energy Agency, *Förslag till Sveriges nationella strategi för vätgas, elektrobränslen och amoniak*, listopad 2021, <https://lighthouse.nu/wp-content/uploads/2021/11/Fo%CC%88rslag-till-nationell-strategi-25-nov.pdf> (dostęp: 27.02.2022 r.).

² *Ibidem*.

³ *Ibidem*.

⁴ J.S. Jones, *Sweden – a national strategy for green hydrogen*, grudzień 2021, <https://www.enlit.world/hydrogen/sweden-a-national-strategy-for-green-hydrogen/> (dostęp: 27.02.2022 r.).

inicjatywy przemysłowe w celu tworzenia innowacji, miejsc pracy i eksportu produktów. Firma Fossil Free Sweden opracowała 22 plany działania z podziałem na poszczególne sektory na rzecz konkurencyjnie wolnej od paliw kopalnych gospodarki⁵.

Strategia od Fossil Free Sweden nie jest oficjalną strategią wodorową Szwecji, ale również dotyczy roli, jaką wodór może odegrać we wzmacnianiu konkurencyjności szwedzkiego przemysłu w przejściu do społeczeństwa wolnego od paliw kopalnych oraz tego, jakie polityki są potrzebne do promowania rozwoju wodoru.

Strategia i ewentualne propozycje działań mają na celu ułatwienie przejścia na wolność od paliw kopalnych. Proponowane środki muszą uwzględniać szacunkowe koszty i konsekwencje społeczno-gospodarcze oraz opierać się na możliwościach skutecznego przyczyniania się ekonomicznie do realizacji celów klimatycznych.

Dodatkowe tematy podjęte w strategiach wodorowych obejmują analizę i potencjału produkcji, magazynowania, transportu i wykorzystania wodoru, w perspektywie krótko-, średnio- i długoterminowej z uwzględnieniem perspektyw ekonomicznych, analizę warunków techniczno-ekonomicznych dla wodoru jako magazynowanie energii w celu zapewnienia elastyczności systemu energetycznego, zidentyfikowanie przeszkód we wprowadzaniu wodoru jako części szwedzkiego systemu energetycznego, podkreślenie istotnych społeczno-ekonomicznych konsekwencji propozycji politycznych zawartych w szwedzkiej strategii dotyczącej wodoru bez kopalin oraz przeanalizowanie, w jaki sposób należy przyjąć odpowiednie propozycje w celu współpracy z innymi państwami.

1.3. Określenie instrumentów, narzędzi gospodarki wodorowej

Rząd Szwecji zlecił Krajowej Agencji Energetycznej opracowanie propozycji ogólnej strategii wodorowej. Celem strategii i proponowanych środków jest przede wszystkim rozwój i wykorzystanie możliwości związanych z wodorem oraz ułatwienie przejścia na paliwo wolne od paliw kopalnych.

Wodór jest jedną z kilku technologii, które ostatecznie będą potrzebne do osiągnięcia neutralności klimatycznej. Rządowy plan działań w zakresie polityki klimatycznej przewiduje, że wodór może w przyszłości odgrywać coraz większą rolę.

Opracowywanie technologii, które pomogą w produkowaniu oraz magazynowaniu wodoru niezawierającego paliw kopalnych, może zapewnić szybki rozwój technologiczny w kilkunastu sektorach oraz wypracować szereg różnego rodzaju zastosowań w przyszłości. Wodór wolny od paliw kopalnych oferuje możliwości

⁵ Fossil Free Sweden, *Strategy for fossilfreecompetitiveness – Hydrogen*, 2021, https://fossilfritt Sverige.se/wp-content/uploads/2021/01/Hydrogen_strategy_for_fossil_free_competitiveness_ENG.pdf (dostęp: 27.02.2022 r.).

połączenia sektorów, co stwarza nowe wyzwania i możliwości rozwoju nowego i przede wszystkim czystsze systemu energetycznego.

Nowe technologie wodorowe będą wymagały ciągłych badań i innowacji w celu wykorzystania potencjału nowych rozwiązań systemowych i zapewnienia korzyści klimatycznych. Będzie istniała również potrzeba wzmocnienia ich zarówno w odniesieniu do budowania wiedzy i przekazywania odpowiednich kompetencji w przyszłości.

W 2020 r. ogłoszono kilka nowych inicjatyw i partnerstw w zakresie wykorzystania wodoru. Oto kilka przykładów⁶:

- 1) inwestycja firmy HYBRIT w stal wolną od paliw kopalnych z wodorem jako środkiem redukującym oraz znaczące uprzemysłowienie tej samej technologii przez firmę LKAB w zakresie bez węglowego żelaza,
- 2) Ovako przygotowuje kolejny krok demonstracyjny dotyczący ogrzewania stali przy użyciu wodoru niezawierającego paliw kopalnych,
- 3) zarówno Scania, jak i Volvo AB inwestują w rozwój ciężarówek napędzanych wodorem,
- 4) „Project Air” firmy Perstorp, gdzie wspólnie z Fortum i Uniper opracowują unikalny proces zrównoważonej produkcji metanolu poprzez połączenie CCU (*Carbon Capture and Utilisation*) i zgazowania,
- 5) Preem i St1 planują zwiększenie produkcji biopaliw z wykorzystaniem wodoru niezawierającego paliw kopalnych,
- 6) St1, Liquid Wind i Jämtkraft przygotowują się do różnych inwestycji w elektropaliwa,
- 7) Nouryon planuje zastąpić wodór kopalny wodorem wolnym od paliw kopalnych do produkcji nadtlenu wodoru.

Równoległe ze strategią dotyczącą wodoru, Szwedzka Agencja Energetyczna przyznała fundusze na projekty wodorowe, które mogą prowadzić do lotnictwa wolnego od paliw kopalnych.

GKN Aerospace prowadzi szwedzki krajowy program współpracy o nazwie „H2JET”, którego celem jest opracowanie rozwiązań technicznych dla trzech ważnych podsystemów silników do napędu H₂ cywilnych samolotów średniego zasięgu. GKN Aerospace otrzymało nagrodę za opracowanie podsystemów silnika w ramach krajowego projektu „H2JET”, w ramach którego badane są napędzane wodorem silniki⁷:

- 1) turbośmigłowe – podobny do silnika turbowentylatorowego, lecz zamiast otunelowanego wentylatora ma zainstalowane normalne śmigło, dodany

⁶ Fossil fritt Sverige, *Hydrogen strategy*, <https://fossilfritt Sverige.se/en/start-english/strategies/hydrogen/> (dostęp: 27.02.2022 r.).

⁷ GKN Aerospace, *GKN Aerospace Leads New Swedish National Project on Hydrogen Propulsion*, <https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2021/gkn-aerospace-leads-new-swedish-national-project-on-hydrogen-propulsion/> (dostęp: 2.03.2022 r.); M. Urkin, *Jak to działa? – Silnik turbinowy*, „Młody Technik” 2004, nr 7, s. 26–29, https://mlodytechnik.pl/archiwum/07-2004_jak_to_dziala.pdf (dostęp: 2.03.2022 r.).

kolejny stopień turbiny zamienia niemal całą energię silnika odrzutowego w ruch obrotowy, zamiast w ciąg,

- 2) turbowentylatorowe – inaczej dwuprzepływowe, w silniku gorące powietrze miesza się z zimnym, opływającym silnik, co w rezultacie znacznie obniża temperaturę.

Oczekuje się, że wodór odegra kluczową rolę w strategii dekarbonizacji lotnictwa, ponieważ może skutecznie zasilać samoloty, pozostawiając wodę jako jedyny produkt uboczny. Energia może być generowana albo poprzez bezpośrednie spalanie, co jest głównym celem „H2JET”, albo przez generowanie energii elektrycznej na pokładzie za pomocą ogniwa paliwowego, na czym skupia się program „H2GEAR” GKN Aerospace⁸.

1.4. Określenie celów gospodarki wodorowej do 2050 roku oraz sposobu ich osiągnięcia

Świat potrzebuje transformacji energetycznej, która jednocześnie musi zapewnić bezpieczeństwo dostaw oraz miejsca pracy. Transformacja systemu elektroenergetycznego przyczyni się przede wszystkim do tego, że energia odnawialna może zredukować do 60% emisji CO₂.

Szwecja dąży do 100% odnawialnej energii do 2045 roku, aby w roku 2050 być krajem, który będzie posiadać neutralność klimatyczną dzięki wykorzystaniu wodoru niezawierającego paliw kopalnych jako nośnika energii. Wytwarzanie energii elektrycznej w tej chwili w Szwecji jest już prawie bezemisyjne dzięki dużej produkcji z energii wodnej i jądrowej, z których każda stanowi około 40% krajowej produkcji, wraz z energią wiatrową, bioenergią i odpadami, które stanowią pozostałą część.

Całkowita dekarbonizacja niektórych sektorów, takich jak transport czy przemysł, a także inne gałęzie wymagające wysokiej jakości ciepła, może być trudna wyłącznie ze względu na już istniejące i rozwinięte sieci elektroenergetyczne. Wyzwaniu temu może sprostać wodór produkowany ze źródeł odnawialnych, który umożliwia skierowanie dużych ilości energii odnawialnej z sektora energetycznego do sektorów końcowego wykorzystania.

Wodór może zatem być brakującym ogniwem w transformacji energetycznej. Energia elektryczna ze źródeł odnawialnych może być wykorzystywana do produkcji wodoru, który z kolei może dostarczać energię sektorom, które inaczej trudno byłoby zdekarbonizować ze względu na elektryfikację. Należy tutaj przede wszystkim wyróżnić działania w takich sektorach jak⁹:

- 1) przemysł – wodór jest szeroko stosowany w kilku sektorach przemysłu (rafinerie, produkcja amoniaku itp.), z których większość jest produk-

⁸ GKN Aerospace, *GKN Aerospace Leads New Swedish National Project...*

⁹ IRENA, *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*, wrzesień 2018, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf (dostęp: 22.03.2022 r.).



- wany z gazu ziemnego. Wodór ze źródeł odnawialnych może zastąpić surowce oparte na paliwach kopalnych w zastosowaniach wysokoemisyjnych,
- 2) energia elektryczna – wodór ze źródeł odnawialnych może być wprowadzany do istniejących sieci gazowych, zmniejszając w ten sposób zużycie gazu ziemnego i emisję w końcowym zużyciu sektorów (np. zapotrzebowanie na ciepło w budynkach),
 - 3) transport – pojazdy elektryczne zapewniają mobilność o niskiej emisji dwutlenku węgla, ponieważ wodór produkowany jest z odnawialnych źródeł energii.

1.5. Struktura produkcji energii elektrycznej

Produkcja energii odnawialnej zależy w dużej mierze od warunków biofizycznych kraju. Regiony górskie, takie jak Szwecja, nadają się do wytwarzania energii wodnej, a regiony przybrzeżne, nadają się do wytwarzania energii wiatrowej. Koszt produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych spada na całym świecie i oczekuje się, że będzie nadal spadał.

Szwecja również dzięki przyjęciu technologii jądrowej zyskała na powstaniu systemu energetycznego, który jest zarówno tani, jak i czysty.

Szwecja jest jednym z niewielu krajów, który zużywa więcej energii na mieszkańca, przy jednocześnie niskiej emisji dwutlenku węgla. Według statystyki Światowego Banku, Amerykanin uwalnia do atmosfery około cztery razy więcej dwutlenku węgla rocznie niż Szwed¹⁰. Szwecja posiada niską emisję, ponieważ większość produkcji energii elektrycznej pochodzi z odnawialnych źródeł energii.

Country	Most Recent Year ^	Most Recent Value	
United States	2018	15.2	
Sweden	2018	3.5	

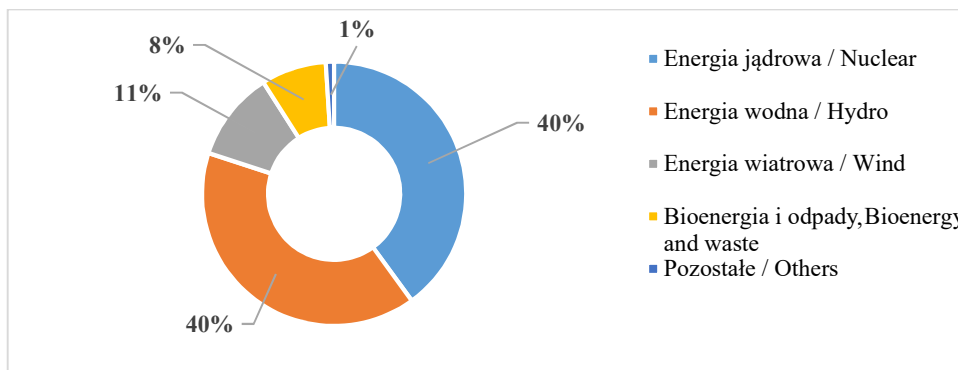
Rys. 1. Emisje CO₂ (tony metryczne na mieszkańca) – Stany Zjednoczone, Szwecja – Wybrane kraje i gospodarki

Fig. 1. CO₂ emissions (metric tons *per capita*) – United States, Sweden – Selected Countries and Economies

Źródło: The World Bank, *CO₂ emissions (metric tons per capita) – United States, Sweden, World, European Union*, https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?end=2018&locations=US-SE-1W-EU&most_recent_year_desc=false&start=1960&view=chart (dostęp: 13.04.2022 r.).

¹⁰ The World Bank, *CO₂ emissions (metric tons per capita) – United States, Sweden, World, European Union*, <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?end=2018&locations=US-SE-1W-EU&start=1960> (dostęp: 1.03.2022 r.).

Szwecja posiada niską emisję, ponieważ większość produkcji energii elektrycznej pochodzi z odnawialnych źródeł energii. Energia elektryczna w Szwecji jest wytwarzana głównie z energii jądrowej i wodnej, przy czym energia jądrowa stanowi bardzo niezawodne źródło, a energia wodna z pewnymi wahaniami sezonowymi. Ze względu na presję środowiskową i obawy dotyczące bezpieczeństwa elektrowni jądrowych, odnawialne źródła energii są szeroko stosowane.



Rys. 2. Dostarczanie energii elektrycznej według źródeł, 2017

Fig. 2. Electricity supply by source, 2017

Źródło: IEA, *Energy Policies of IEA Countries – Sweden 2019 Review*, https://iea.blob.core.windows.net/assets/abf9ceee-2f8f-46a0-8e3b-78fb93f602b0/Energy_Policies_of_IEA_Countries_Sweden_2019_Review.pdf (dostęp: 13.04.2022 r.).

Energia wiatrowa jest nieciągłym źródłem energii, w którym produkcja energii często zmienia się znacznie w ciągu dnia i często jest niższa niż moc zainstalowana. Ta zmienność w produkcji energii wiatrowej musi być zintegrowana i uwzględniona w planowaniu scenariusza zużycia energii z innych źródeł energii, aby utrzymać równowagę systemu.

Fotowoltaika wytwarza głównie produkty od kwietnia do września, z najwyższą produkcją w czerwcu i lipcu. Promieniowanie słoneczne osiąga szczyt w południe, ale produkcja energii elektrycznej zależy również od innych warunków, takich jak przejrzystość nieba, temperatura, wiatr itp. W związku z tym istnieje losowość w zakresie produkcji energii słonecznej fotowoltaicznej.

Rozwój elektrowni wodnych pozwolił na skorzystanie z potencjału energetycznego rzek w Szwecji. Dzięki zrealizowaniu inwestycji dotyczących hydroelektrowni zwiększono niezależność energetyczną państwa¹¹.

Szwedzkie dostawy energii charakteryzują się wysokim udziałem energii wodnej, jądrowej i bioenergii, które łącznie stanowiły około 90% krajowej produkcji energii i około 73% całkowitego zaopatrzenia w energię pierwotną w 2017

¹¹ P. Frączek, *Wybrane aspekty zmiany polityki energetycznej Szwecji*, „Polityka Energetyczna” 2012, t. 15, z. 3, s. 200.

roku¹². Łączna produkcja energii wodnej, jądrowej i bioenergii w Szwecji przekracza 70%, pomimo braku krajowej produkcji paliw kopalnych¹³.

1.6. Charakterystyka infrastruktury energetycznej na potrzeby gospodarki wodorowej

Szwecja podczas przeprowadzania modernizacji sektora energetycznego wykorzystwała istniejące warunki do budowy elektrowni wodnych oraz stworzony został znaczny potencjał elektrowni jądrowych. W wyniku modernizacji sektora energii w Szwecji ograniczono udział paliw konwencjonalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii oraz energii atomowej.

Dzięki temu, że Szwecja w dużej mierze jest w stanie zapewnić sobie energię pochodzącą z odnawialnych źródeł energii, może ona inwestować oraz pracować nad lepszymi rozwiązaniami dotyczącymi przekształcania nadwyżek pochodzących z OZE w wodór. Takie działania mają również pozwolić na wypracowanie pomysłów na magazynowanie energii pochodzącej na przykład z fotowoltaiki i farm wiatrowych, a także całkowicie zastąpić wodór pochodzący z paliw kopalnych.

Wodór obecnie może być produkowany na różne sposoby, jednak potrzebne do tego są odpowiednie źródła energii. Możemy wyróżnić przede wszystkim wodór pochodzący z wykorzystania¹⁴:

- 1) energii elektrycznej – powstaje w procesie elektrolizy wody, natomiast emisja CO₂ zależy od sposobu produkcji energii elektrycznej. Wodór otrzymywany w ten sposób jest czysty, ale sam proces jest energochłonny, dlatego dąży się, aby energia dostarczana była z odnawialnych źródeł energii;
- 2) paliw kopalnych – możemy tutaj wyróżnić dwa sposoby otrzymywania wodoru – reforming gazu ziemnego oraz gazyfikacja węgla. Obie te metody są obecnie jednymi z najtańszych sposobów pozyskiwania wodoru. Negatywnym produktem tego rodzaju uzyskiwania wodoru jest powstawanie tlenków węgla. Dlatego w chwili obecnej odchodzi się od produkcji wodoru z paliw kopalnych na rzecz elektrolizy, która zasilana jest z OZE;
- 3) metod biochemicznych – w tych procesach wodór powstaje poprzez gazyfikację oraz fermentację biomasy. Poza wodorem, otrzymywane również jest CO₂.

¹² IEA, *Energy Policies of IEA Countries – Sweden*, 2019, https://iea.blob.core.windows.net/assets/abf9ceee-2f8f-46a0-8e3b-78fb93f602b0/Energy_Policies_of_IEA_Countries_Sweden_2019_Review.pdf (dostęp: 1.03.2022 r.).

¹³ *Ibidem*.

¹⁴ H2 Wielkopolska, *Jak produkowany jest wodór?*, 2020, <https://h2wielkopolska.pl/faq/2-jak-produkowany-jest-wodor-2/> (dostęp: 1.03.2022 r.).

Najważniejszą decyzją podczas wyboru sposobu produkcji wodoru z wykorzystaniem elektrolizy jest produkcja scentralizowana lub zdecentralizowana. Produkcja zdecentralizowana, taka jak produkcja połączona z energią wiatrową, oznacza produkcję na małą skalę, a tym samym droższą produkcję wodoru. Zdecentralizowana produkcja i odpowiadająca jej infrastruktura powinny dobrze pasować do zastosowania wodoru w transporcie, gdzie popyt jest również rozproszony. W przeciwieństwie do tego, scentralizowana produkcja, którą można wdrożyć w połączeniu z elektrowniami jądrowymi, oznacza obfite dostawy energii z energii jądrowej, podczas gdy istnieją różne potrzeby w zakresie dystrybucji, aby pokryć większe odległości między produkcją a zastosowaniami, a w konsekwencji może być droższa.

Istotnym elementem podczas produkcji wodoru jest również sposób jego transportu. Możemy wyróżnić trzy opcje dystrybucji wodoru, w których koszty zależą od ilości transportowanego wodoru, a także odległości transportowanej:

- 1) zbiorniki ciśnieniowe – dystrybucja ta jest bardzo elastyczna i wiąże się z niskimi inwestycjami początkowymi w sprzęt. Jednak w przypadku większych ilości wodoru należy zastosować alternatywne rozwiązania,
- 2) rurociągi – mogą być wykorzystane do przepompowni lub do określonych gałęzi przemysłu o dużym zużyciu, np. hutnictwa. Wiąże się to z wysokimi kosztami inwestycyjnymi, ale niskimi jednostkowymi kosztami operacyjnymi (koszty krańcowe),
- 3) upłynnianie wodoru – skroplony wodór oznacza załadunek i transport dużych ilości, często z udziałem żeglugi, co umożliwia transfer energii z „wysp energetycznych” do wykorzystania w innym miejscu, nawet dla rynków międzynarodowych. Ponieważ skraplanie wodoru wymaga dodatkowej energii, do zastosowania tej opcji potrzebna jest tania i obfita energia.

Wodór jest produktem, który nie pozostawia pozostałości dwutlenku węgla, atomów węgla, co sprawia, że jest czysty. To jeden z powodów, dla których wodór odgrywa kluczową rolę w przejściu do Szwecji neutralnej dla klimatu.

Rozwój infrastruktury wodorowej w kraju można przyspieszyć poprzez tworzenie międzysektorowych lokalnych i regionalnych klastrów wodoru (Doliny wodorowe). Można je zakładać tam, gdzie istniejące gałęzie przemysłu wykorzystują lub będą wykorzystywać wodór oraz tam, gdzie istnieje już infrastruktura, taka jak porty i koleje.

1.7. Wnioski i rekomendacje w zakresie bezpieczeństwa energetycznego Szwecji

Inicjatywy wodorowe wymagają wielu inwestycji, a na początek mogą one skutkować wyższymi kosztami niż inwestycje konwencjonalne. Dlatego rząd musi wnieść wkład w rozwiązania finansowe i wprowadzić różne instrumenty finansowe, aby zmniejszyć ryzyko inwestycyjne dla firm.

Ponadto w trakcie wprowadzania wodoru na rynek nadal ważne będą badania i rozwój. Istnieje również potrzeba doskonalenia umiejętności w agencjach rządowych i innych podmiotach społecznych w odniesieniu do nowych technologii i systemów wymaganych do tego rozwoju.

Wodór jest używany jako surowiec w kilku kluczowych segmentach przemysłu. W transformacji energetycznej wodór może być „brakującym ogniwem”, które pomoże w dostarczaniu dużych ilości energii odnawialnej do sektorów, które w inny sposób trudno jest zdekarbonizować poprzez bezpośrednią elektryfikację, takich jak transport, przemysł i obecne zastosowania gazu ziemnego. Obecnie potrzebne jest szybkie zwiększenie skali, aby osiągnąć niezbędne redukcje kosztów i zapewnić opłacalność ekonomiczną wodoru jako długoterminowego czynnika umożliwiającego transformację energetyczną.

Aby wodór stał się głównym elementem prowadzącym do dekarbonizacji Szwecji niezbędne jest opracowanie właściwych warunków dla systemu elektroenergetycznego. Głównym punktem przede wszystkim jest zapewnienie odpowiedniej oraz nowej infrastruktury wodorowej, która będzie umożliwiała rozwój tego surowca w każdym aspekcie. Rząd powinien zadbać, aby do 2030 r. mieć zainstalowane 3 GW mocy elektrolizy i co najmniej 8 GW do 2045 roku¹⁵. Należy również rozwinąć infrastrukturę wodorową, a ponieważ rurociągi wodorowe są stosunkowo nowym rodzajem infrastruktury, potrzebne są również nowe przepisy.

Rząd powinien również dokonać przeglądu przepisów dotyczących pozwoleń środowiskowych, tak aby przemysł i zakłady energetyczne, które już produkują i wykorzystują wodór na dużą skalę i które chcą przejść na produkcję wodoru bardziej dostosowaną do klimatu, jedynie musiały złożyć powiadomienie o zmianie zamiast ubiegać się o nowe pozwolenia środowiskowe.

Powinny zostać przeprowadzone na szeroką skalę badania oraz poszukiwania odpowiednich rozwiązań, a także źródeł finansowania dla projektów wodorowych niezawierających paliw kopalnych. Istotne jest również zadbanie o współpracę przedsiębiorstw, które chcą korzystać oraz opracowywać nowe i lepsze rozwiązania umożliwiające korzystanie z wodoru.

Rząd powinien również skupić się oraz opracować odpowiedni program szkolnictwa, który pozwoli na pozyskiwanie obecnej wiedzy na temat wodoru oraz jej poszerzenie.

1.8. Podsumowanie

Źródła energii i paliwa oparte na paliwach kopalnych zmniejszają się z każdym rokiem, a firmy energetyczne posiadają po części obowiązek znalezienia nowych źródeł. Wraz z odnawialnymi źródłami energii, takimi jak energia słoneczna, wiatrowa, wodna itd., nowe technologie i źródła są stale badane w celu uzyskania

¹⁵ Fossil Free Sweden, *Strategy for fossil free competitiveness – Hydrogen*, 2021, https://fossil-frittsverige.se/wp-content/uploads/2021/01/Hydrogen_strategy_for_fossil_free_competitiveness_ENG.pdf (dostęp: 22.03.2022 r.).

bardziej niezawodnych, opłacalnych i praktycznych źródeł, które staną się niezawodnym nośnikiem energii.

Dzięki temu, że szwedzki rząd od samego początku kładł nacisk na zmniejszenie emisji dwutlenku węgla, Szwecja staje się aktualnie państwem, które jest w stanie w większości zapewnić sobie czystą energię pochodzącą z fotowoltaiki, czy też farm wiatrowych. Stało się tak, ponieważ rząd inwestował w tę dziedzinę oraz dostrzegł potencjał w położeniu geograficznym kraju.

Dzięki opracowaniu strategii wodorowej Szwecja wyznaczyła pewne cele, dzięki którym ma stać się krajem z zerową emisją netto gazów cieplarnianych do 2045 roku. Czynnikiem, czy też surowcem, za pomocą którego ma to osiągnąć, jest właśnie wodór pochodzący z odnawialnych źródeł energii. Szwecja zgromadziła bogate doświadczenie w zakresie produkcji oraz eksploatacji maszyn produkujących energię z OZE, w związku z czym stała się ona jednym z wiodących krajów w dziedzinie pozyskiwania czystej energii.

Badacze i naukowcy opracowujący technologie wodorowe, chcą osiągnąć praktyczny poziom produkcji i ich zastosowań. Jedną z głównych barier związanych z wodorem jest kosztowność, która wymaga pewnych ulepszeń i ściślejszej współpracy między przemysłem, środowiskiem, czy też rządami. Należy również rozwinąć infrastrukturę wodorową, ponieważ rurociągi wodorowe są stosunkowo nowym rodzajem infrastruktury oraz niezbędne będzie wypracowanie odpowiednich regulacji wodorowych.

Szwecja postanowiła zaspokoić 100% swojego zapotrzebowania na energię elektryczną ze źródeł odnawialnych do 2045 roku. Dzięki już wdrożonemu niskiemisyjnemu systemowi energetycznemu kraj ten jest dobrze przygotowany, aby móc osiągnąć kluczowe cele klimatyczne.

Bibliografia

1. Ćwik P., *Szwedzi przerabiają domy na elektrownie. Do 2040 r. chcą oprzeć energetykę w 100% na OZE*, luty 2021, <https://smoglab.pl/oze-w-szwecji/> (dostęp: 14.04.2022 r.).
2. Fossil Free Sweden, *Strategy for fossil free competitiveness – Hydrogen*, 2021, https://fossilfritt sverige.se/wp-content/uploads/2021/01/Hydrogen_strategy_for_fossil_free_competitiveness_ENG.pdf
3. Fossil fritt Sverige, *Hydrogen strategy*, <https://fossilfritt sverige.se/en/start-english/strategies/hydrogen/> (dostęp: 16.04.2022 r.).
4. Frączek P., *Wybrane aspekty zmiany polityki energetycznej Szwecji*, „Polityka Energetyczna” 2012, t. 15, z. 3.
5. GKN Aerospace, *GKN Aerospace Leads New Swedish National Project On Hydrogen Propulsion*, <https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2021/gkn-aerospace-leads-new-swedish-national-project-on-hydrogen-propulsion/> (dostęp: 13.04.2022 r.).
6. H2 Wielkopolska, *Jak produkowany jest wodór?* 2020, <https://h2wielkopolska.pl/faq/2-jak-produkowany-jest-wodor-2/>.
7. Hydrogen Fuel in Sweden, *a Comparative Study of Five Countries*, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1571446/FULLTEXT01.pdf> (dostęp: 12.04.2022 r.).

8. IEA, *Energy Policies of IEA Countries – Sweden*, 2019, https://iea.blob.core.windows.net/assets/abf9ceee-2f8f-46a0-8e3b-78fb93f602b0/Energy_Policies_of_IEA_Countries_Sweden_2019_Review.pdf
9. IRENA, *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*, wrzesień 2018, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf (dostęp: 13.04.2022 r.).
10. IRENA, *Innovative Solutions For 100% Renewable Power in Sweden*, 2020, https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jan/IRENA_Sweden_Innovative_power_2020.pdf (dostęp: 13.04.2022 r.).
11. Jones J.S., *Sweden – a national strategy for green hydrogen*, grudzień 2021, <https://www.enlit.world/hydrogen/sweden-a-national-strategy-for-green-hydrogen/> (dostęp: 13.04.2022 r.).
12. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans*, [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Brochure%20FCH%20Sweden%20\(ID%209474490\).pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Brochure%20FCH%20Sweden%20(ID%209474490).pdf) (dostęp: 13.04.2022 r.).
13. Sweden Sverige, *Swedes use a lot of energy – yet, emissions are low. The key? Renewable Energy*, <https://sweden.se/climate/sustainability/energy-use-in-sweden> (dostęp: 13.04.2022 r.).
14. Swedish Energy Agency, *Förslag till Sveriges nationella strategi för vätgas, elektrobränslen och amoniak*, listopad 2021, <https://lighthouse.nu/wp-content/uploads/2021/11/Fo%CC%88rslag-till-nationell-strategi-25-nov.pdf> (dostęp: 13.04.2022 r.).
15. The World Bank, *CO₂ emissions (metric tons per capita) – United States, Sweden, World, European Union*, <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?end=2018&locations=US-SE-1W-EU&start=1960> (dostęp: 13.04.2022 r.).
16. Urkin M., *Jak to działa? – Silnik turbinowy*, „Młody Technik” 2004, nr 7, https://mlody-technik.pl/archiwum/07-2004_jak_to_dziala.pdf (dostęp: 13.04.2022 r.).
17. Zhong J., Bollen M., Rönnberg S., *Towards a 100% renewable energy electricity generation system in Sweden*, luty 2021, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148121003323?casa_token=fuceAIQTFaUAAAAA:nZ3M-zl7IPxqIEWuvJF3VEEuof_SjsQRGysoFxl3WdRk7tF_SBj7gNsfuk4ON4H-K5jmnXjPg (dostęp: 12.04.2022 r.).

Rozdział 2

STUDIUM PRZYPADKU – NORWEGIA

Case study – Norway

Alicja WIĄCEK

***Abstract:** The text is an overview of instrumental and legal conditions responsible for the development of hydrogen economy in Norway. The paper also presents the tools used by the Norwegian state entities in pursuit of rapid development of the hydrogen market. The presented goals of the hydrogen economy and the ways of achieving them are comparative variables in relation to other countries studied in this work. The main objective of this thesis is to present a case study – Norway as an entity that is largely responsible for the security of supply of energy resources to the European Union these days, and the development of the hydrogen market will contribute to the diversification of sources and the possibility of large-scale trade in low-carbon energy sources.*

2.1. Wprowadzenie

W obecnym czasie bezpieczeństwo energetyczne jest odpowiedzialne za międzynarodowy rozwój gospodarczy. Stabilność energetyczna w dużej mierze zależy od inwestycji w dywersyfikację źródeł energii oraz sposobu efektywnego wykorzystania tych nośników. Zakłada się, że w 2050 roku zauważalny będzie wzrost udziału wodoru w bilansie energetycznym Norwegii. Norwegia od dekad pozostaje znaczącym eksporterem ropy i gazu do Unii Europejskiej. Obecne wydarzenia pokazały, że kraj ten w niedalekiej przyszłości będzie nie tylko znaczącym eksporterem, ale największym partnerem handlowym na europejskim rynku energii. Biorąc pod uwagę ogromne zapotrzebowanie na paliwa kopalne, które rośnie wraz ze wzrostem ludności – Norwegia staje w obliczu wyzwania. Pozyskanie większej ilości surowców pierwotnych w dążeniu do zapewniania stabilnych dostaw energii, wydaje się być nieopłacalne z punktu widzenia ochrony środowiska. Przeprowadzona kwerenda badań naukowych, pozycji literaturowych oraz najnowszych raportów wykazała, że wodór stanie się nośnikiem energii, który zapewni bezpieczeństwo energetyczne państw współpracujących oraz przyczyni się do obniżenia emisyjności w tych krajach.

Główny problem badawczy koncentruje się zatem na analizie potencjału i możliwości wytworzenia wodoru, która zostanie zbadana metodą dedukcji na podstawie przesłanek, wynikających z pięciu obszarów: (1) strategii wodorowej, (2) instrumentów i narzędzi gospodarki wodorowej Norwegii, (3) celów gospo-

darki wodorowej do 2050 roku oraz sposobu ich osiągnięcia (4) struktury produkcji energii elektrycznej, (5) infrastruktury energetycznej na potrzeby gospodarki wodorowej.

2.2. Analiza Strategii Wodorowej Norwegii

W opublikowanym w dniu 3 czerwca 2020 r. dokumencie strategicznym dotyczącym wodoru, rząd norweski określił swoje ambicje dotyczące rozwoju łańcuchów wartości dla rozwiązań opartych na wodorze. Dokument strategiczny dotyczy zarówno produkcji, jak i wykorzystania wodoru w Norwegii i w pewnym stopniu na arenie międzynarodowej. Dokument zawiera ogólny przegląd planów rządu dotyczących dalszych badań i rozwoju rozwiązań wodorowych, w tym opracowania przepisów i standardów bezpiecznego użytkowania wodoru. Strategia wodorowa została opracowana we współpracy pomiędzy norweskim Ministerstwem Ropy Naftowej i Energii (MPE) oraz Norweskim Ministerstwem Klimatu i Środowiska (MCE) i obejmuje kilka inicjatyw, które mają pomóc Norwegii w osiągnięciu celu redukcji emisji gazów cieplarnianych o 90% do 95% w porównaniu z poziomem z 1990 r. do 2050 roku¹.

W dokumencie wyznaczone zostały instrumenty prawne, których działania będą skierowane przede wszystkim w rozwój badań, komercjalizację i wykorzystanie wodoru z perspektywy krajowej. Za realizację tych działań odpowiedzialna jest Norweska Rada ds. Badań Naukowych, Innovation Norway oraz Enova. Ponieważ taki rozwój jest kosztowny, w strategii zostały również wyznaczone mechanizmy wsparcia finansowego oraz regulacje prawne, które pozwolą na zwiększenie liczby projektów pilotażowych i demonstracyjnych w Norwegii. Stosunkowo skromny wkład w taki rozwój technologiczny był częścią proponowanego pakietu zielonej restrukturyzacji ogłoszonego przez rząd 29 maja 2020 r., w którym na program ENERGIX przeznaczono 120 mln NOK, w tym m.in. wodór.

Ze względu na to, iż wodór obecnie nie jest opłacalnym nośnikiem energii, strategia stanowi również, że ustalanie cen emisji za pomocą podatków krajowych i systemów kwot UE (EU ETS) powinno przyczynić się do zachęcania do rozwiązań niskoemisyjnych poprzez podnoszenie kosztów rozwiązań emisyjnych. Strategia nie rozwija jednak dalej tego proponowanego systemu podatkowego i kwotowego, z wyjątkiem tego, że będzie działać wraz ze wskazanym już wzrostem podatku od emisji CO₂.

W norweskiej strategii wodorowej sektor morski, wraz z ciężkim transportem i procesami przemysłowymi, zajmują nadrzędną pozycję. Strategia podkreśla, że wyżej wymienione sektory to obszary, w których istnieje niewiele lub nie ma

¹ Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, *Norwegian Ministry of Climate and Environment, The Norwegian Government's hydrogen strategy towards a low emission society*, Norwegia, 2020, <https://www.regjeringen.no/contentassets/40026db2148e41eda8e3792d259efb6b/y-0127e.pdf> (dostęp: 22.03.2022 r.).

alternatyw bezemisyjnych, a ich dekarbonizacja jest kluczowym elementem osiągnięcia założonych celów klimatycznych, zgodnych z porozumieniem paryskim.

W analizowanym dokumencie, podkreślono również, że aby wodór był niskoemisyjnym lub zeroemisyjnym nośnikiem energii, musi być wytwarzany przy zerowej lub bardzo niskiej emisji, na przykład poprzez elektrolizę wody z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii (zielony wodór) lub z gazu ziemnego z wychwytywaniem i składowaniem dwutlenku węgla (niebieski wodór). Ponadto ustanowiono powiązanie między wodorem a bieżącymi wysiłkami rządu norweskiego na rzecz opracowania pełnej infrastruktury łańcucha wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (CCS).

Strategia dotyczy również obecnej i przyszłej współpracy nordyckiej i europejskiej w zakresie wykorzystania i rozwoju technologii wodorowej.

Chociaż rządowa strategia stanowi ważny krok w kierunku opracowania rozwiązań opartych na wodorze, zawiera niewiele zdecydowanych zobowiązań prawnych dla norweskiego rządu. W świetle ambicji Komisji Europejskiej, aby zwiększyć produkcję zrównoważonego wodoru na dużą skalę w dążeniu do realizacji celów klimatycznych na lata 2030 i 2050, strategia będzie musiała towarzyszyć w wypracowaniu stabilnych warunków ramowych i finansowania dla podmiotów gospodarczych, które w następstwie będą siłą napędową w kierunku rozwoju rynku wodoru.

2.3. Określenie instrumentów, narzędzi gospodarki wodorowej

Najważniejszym narzędziem do tworzenia gospodarki wodorowej jest sama Strategia Wodorowa Norwegii, która wyznacza instrumenty i mechanizmy do jej rozwoju.

Za pośrednictwem Norweskiej Rady ds. Badań Naukowych władze Norwegii sfinansowały badania w dziedzinie wodoru, badania w kierunku rozwoju ogniw paliwowych i elektrolizy wody o wartości około 550 mln NOK w latach 2009–2019. W tym zakresie największym projektem badawczym jest szeroki tematycznie program badań energetycznych ENERGIX. Program ten ma pomóc w osiągnięciu celów polityki energetycznej i gospodarczej oraz jest ważnym narzędziem w realizacji strategii badawczo-rozwojowej Energi21. ENERGIX koncentruje się na wodorze, prowadząc badania i opracowując nowe materiały, procesy konwersji i rozwiązania w zakresie produkcji i wykorzystania wodoru oraz technologii wodorowych, w oparciu o zainteresowania środowisk badawczych i technologicznych, wiedzę specjalistyczną, oceny i wytyczne oraz zalecenia strategii Energi21. Ponadto Rada ds. Badań Naukowych Norwegii co roku ogłasza konkursy na fundusze w dziedzinie wodoru. ENERGIX wspiera również udział w międzynarodowych projektach badawczo-rozwojowych².

² *Ibidem*.

Ważnym celem rządu jest również zwiększenie liczby projektów pilotażowych i demonstracyjnych w Norwegii, co przyczyni się do rozwoju i komercjalizacji technologii. Cel ten jest wspierany przez najważniejsze podmioty państwowe działające w branży energetycznej (Innovation Norway, Enova, Research Council of Norway), skupiające się na technologiach i rozwiązaniach zeroemisyjnych. Współpraca tych instrumentów przyczynia się do rozwoju i demonstracji energooszczędnych i efektywnych kosztowo metod i łańcuchów wartości w zakresie produkcji, transportu, przechowywania i wykorzystania czystego wodoru, m.in. poprzez współpracę w ramach programu PILOT-E³.

Innovation Norway jest obecnie członkiem nowo powstałego projektu: HPO Hydrogen&Maritime Solutions Northern Germany, którego celem jest ukierunkowanie norweskiego przemysłu na rozwój technologii wodorowych w Niemczech, z naciskiem na sektor morski.

Enova sfinansowała kilka projektów wodorowych, w tym projekt ASKO, w celu przetestowania pojazdów i związanej z nimi infrastruktury. Rozwój infrastruktury powinien być napędzany przez rynek, dlatego też instrumenty państwowe wdrażają mechanizmy wsparcia finansowego, które pozwolą zbudować infrastrukturę do tankowania zgodną z popytem i popytą.

Research Council of Norway, Rada ds. Badań Naukowych Norwegii, sfinansowała między innymi projekt Hyper, którego celem była waloryzacja norweskich odnawialnych i kopalnych zasobów energii do produkcji pozbawionego emisyjności wodoru z przeznaczeniem na eksport oraz do użytku krajowego. Projekt Hyper przyczynił się również do zlikwidowania luk w wiedzy, które obecnie stanowią bariery w realizacji na dużą skalę efektywnych kosztowo i energetycznie urządzeń do produkcji, skraplania i eksportu wodoru⁴.

2.4. Określenie celów gospodarki wodorowej do 2050 oraz sposobu ich osiągnięcia

W październiku 2019 r. Norwegia i Islandia formalnie zgodziły się, w ramach Porozumienia o Europejskim Obszarze Gospodarczym (EOG), stosować unijne rozporządzenie w sprawie wspólnych starań o ograniczenie emisji z takimi samymi zobowiązaniami i elastycznością jak państwa członkowskie UE. Powołano komitet techniczny pod przewodnictwem Norweskiej Agencji Środowiska, którego zadaniem jest ocena środków i monitorowanie postępów kraju w realizacji wyznaczonych celów. Ponadto obecny rząd zgodził się na zwiększenie krajowych redukcji emisji do 90–95% do roku 2050, przy jednoczesnym ograniczeniu 45%

³ L.S. Græsli, M. Steen, *Integrating policy instruments for mission-oriented innovation*, LUT Scientific and Expertise Publications: ISPIM Conference Proceedings; Manchester 2021.

⁴ S. Brennan, A. Bengauer, M. Carcassi et. al., *Towards minimising hazards in hydrogen and fuel cell stationary applications: key findings of modelling and experimental work in the Hyper project*, Symposium series No. 155, <https://www.icheme.org/media/9555/xxi-paper-058.pdf> (dostęp: 22.03.2022 r.).

emisji poza europejskim systemem handlu uprawnieniami do emisji (EU ETS) oraz wzmocnieniu współpracy w zakresie redukcji emisji za granicą poprzez inicjatywy takie jak Rainforest Foundation Norway⁵. W lutym 2020 roku Norwegia ogłosiła swoje zobowiązania klimatyczne w ramach Porozumienia Paryskiego na rok 2020, w którym cele klimatyczne zostały zaostrzone do 50%, a być może nawet do 55% redukcji emisji gazów cieplarnianych do roku 2030⁶.

Niezależnie od tego, czy celem jest neutralność klimatyczna, czy ograniczenie wzrostu temperatury do 2 stopni Celsjusza, emisja gazów cieplarnianych musi ulec znacznemu zmniejszeniu. Celem UE jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do 2050 r. o 95% w porównaniu z poziomem z 1990 r. Obecnie proponowane są różne sposoby osiągnięcia tego celu. Badania światowe⁷, analizy europejskie⁹, a także raporty z badań skandynawskich¹⁰ podkreślają znaczenie działań na rzecz efektywności energetycznej oraz potrzebę zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii w wytwarzaniu energii.

DNV GL przewiduje, że w skali globalnej wodór będzie wykorzystywany w niewielkim stopniu do 2050 roku, a jego udział w koszyku energetycznym w 2050 roku wyniesie 0,5%¹¹. Wynika to z wysokich kosztów magazynowania i niskiej wydajności konwersji. Badania pokazują, że wodór nadal znajduje się na wczesnym etapie rozwoju i będzie wymagał znacznego wkładu w badania nad technologią i zwiększeniem skali, aby zdobyć udział w rynku. Oczekuje się, że

⁵ O. Bruseth, *Politisk plattform – for enregjeringutgått av Høyre*, Fremskrittspartiet, Venstre og Kristelig Folkeparti, Granavolden, 2019, <https://www.regjeringen.no/contentassets/7b0b7f0fcf0f4d93bb6705838248749b/plattform.pdf> (dostęp: 22.03.2022 r.).

⁶ Regjeringen Solberg, *Norge forsterker klimamålet for 2030 til minst 50 prosent og opp mot 55 prosent*, Klima- og miljødepartementet, 2020, <https://www.regjeringen.no/no/dokumentarkiv/regjeringen-solberg/aktuelt-regjeringen-solberg/kld/nyheter/2020-nyheter/norge-forsterker-klimamålet-for-2030-til-minst-50-prosent-og-opp-mot-55-prosent/id2689679/> (dostęp: 19.03.2022 r.).

⁷ Energy Transitions Commission, *Mission possible. Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by midcentury*. Report from the Energy Transition Commission, 2018, http://www.energytransitions.org/sites/default/files/ETC_MissionPossible_FullReport.pdf (dostęp: 28.03.2022 r.); International Renewable Energy Agency, *Global energy transformation: A roadmap to 2050*, IRENA, 2019, <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition> (dostęp: 22.03.2022 r.); A. Dhahi, F. Boshell et al., *The role of renewable energy in the global energy transformation*. Energy Strategy Reviews, 2019.

⁸ M. Ram, D. Bogdanov et al., *Global Energy System based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport and Desalination Sectors*. University of Technology and Energy Watch Group, Berlin 2019.

⁹ K. Kanelloupolos, R.H. Blanco, *The potential role of H2 production in a sustainable future power system – An analysis with METIS of a decarbonised system powered by renewables in 2050*. European Commission JRC Technical reports. 2019.

¹⁰ Nordic Energy Research and IEA, *Nordic Energy Technology Perspectives, Cities, flexibility and pathways to carbon-neutrality*, Norway, 016. <https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2016/04/Nordic-Energy-Technology-Perspectives-2016.pdf> (dostęp: 20.03.2022 r.).

¹¹ DNV GL, *Energy Transition Outlook 2018. A global and regional forecast to 2050*, 2018. <https://eto.dnvgl.com/2018/> (dostęp: 21.03.2022 r.).

wykorzystanie wodoru wzrośnie od połowy stulecia ze względu na tendencję rynkową do stosowania paliw bardziej przyjaznych dla środowiska. DNV GL zakłada, że wodór będzie wytwarzany w procesie elektrolizy. Również firma Shell Sky spodziewa się wzrostu wykorzystania wodoru głównie od roku 2050 i później¹². Badania przedstawione przez DNV GL oraz Shell Sky, pokazują również, że udział wodoru w rynku energetycznym wyniesie 2% całkowitego zużycia końcowego na świecie, ale 18% w Europie w 2050 roku. Natomiast Hydrogen Council szacuje, że udział wodoru w całkowitym globalnym zużyciu energii będzie wynosił 20% w 2050 roku¹³.

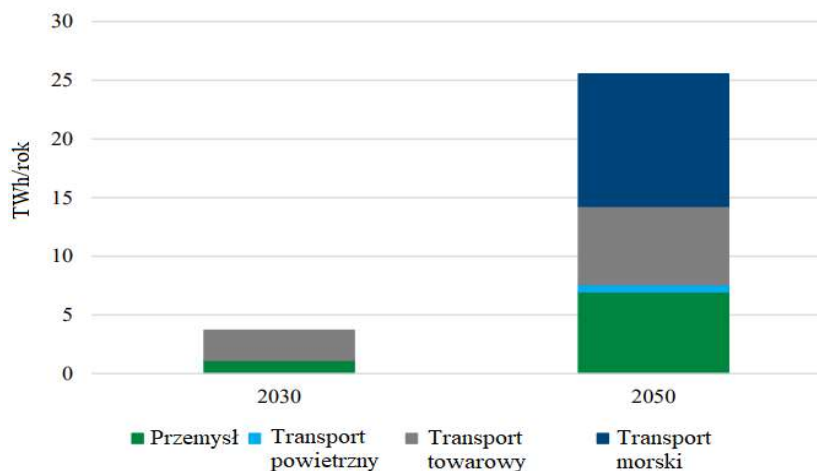
W literaturze przedmiotu odnaleźć można wiele scenariuszy przedstawiających norweską drogę do osiągnięcia celów w zakresie redukcji emisji gazów cieplarnianych w latach 2030 i 2050. W jednej pozycji opracowano scenariusz referencyjny oparty na bieżących trendach, w którym główną przesłanką jest stały wzrost liczby ludności na świecie. Schäffer i in. w swoim scenariuszu dzielą gospodarkę norweską na społeczeństwo przemysłowe i społeczeństwo usługowe¹⁴. Gdzie społeczeństwo przemysłowe zakłada ciągły rozwój technologiczny i transformację energetyczną w przemyśle, natomiast społeczeństwo usługowe zastępuje potrzebne paliwa kopalne, niskoemisyjnymi źródłami energii oraz promuje podnoszenie świadomości proekologicznej.

W scenariuszu „Społeczeństwo przemysłowe” założono, że sektor naftowy zostanie wycofany, a sektor gazowy przekształci się w sektor produkcji wodoru z wykorzystaniem CCS. Model TIMES-Norway zakłada, że w 2050 roku w społeczeństwie przemysłowym łączne krajowe zużycie wodoru wyniesie 26 TWh, z tego 7 TWh, czyli 27%, zostanie wykorzystane w przemyśle, a 19 TWh w sektorze transportu, w celu dekarbonizacji tych sektorów. Energia elektryczna zużywana do produkcji wodoru w procesie elektrolizy wyniesie 19 TWh w 2050 r. Zgodnie z modelem TIMES-Norway dominacja ropy i gazu w norweskim eksporcie będzie się zmniejszać. W roku 2007 udział produktów naftowych i gazowych w eksporcie wynosił 38%. W roku 2050 udział ten zmniejszy się do poniżej 1%. W 2050 roku około 96% wytwarzanego wodoru będzie eksportowana na rynki zagraniczne, natomiast pozostała część będzie sprzedawana krajowemu sektorowi transportowemu. W Norwegii wodór będzie dominował jako wsad energetyczny w transporcie morskim (rys. 1.).

¹² Shell, *Sky scenario. Meeting the goals of the Paris Agreement*, 2018, https://www.shell.com/promos/business-customers-promos/download-latest-scenari-sky/_jcr_content.stream/1530643931055/eca19f7fc0d20adbe830d3b0b27bcc9ef72198f5/shell-scenariosky.pdf (dostęp: 20.03.2022 r.).

¹³ Hydrogen Council, *Hydrogen scaling up – A sustainable pathway for the global energy transition*, 2017, <http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-upHydrogen-Council.pdf> (dostęp: 28.03.2022 r.).

¹⁴ L.S. Schäffer, E. Rosenberg et al., *Veikart for energi Norge mot 2050*. SINTEF Rapport 2019:01467, Norway, 2020.



Rys. 1. Zużycie wodoru w scenariuszu dla społeczeństwa przemysłowego w latach 2030 i 2050

Fig. 1. Hydrogen consumption in the industrial society scenario in 2030 and 2050

Źródło: L.S. Schäffer, E. Rosenberg et al., *Veikart for energi...*

Norwescy eksperci zakładają, że innowacyjne rozwiązania w postaci CCS i technologie wodorowe są już na tyle dojrzałe, że można je wdrożyć w rzeczywiste zastosowanie. W dążeniu do osiągnięcia założonych celów gospodarczych w zakresie budowy społeczeństwa wodorowego do 2050 roku, na obecnym etapie należy rozwijać badania pilotażowe. Obecnie zakres tych badań obejmuje między innymi norweski projekt, w ramach którego powstanie pierwszy na świecie prom wodorowy, który zostanie oddany do eksploatacji w 2022 roku. Innym przykładem badań pilotażowych na rzecz rozwoju rynku wodoru jest opracowywany w Trøndelag bezemisyjny statek pasażerski, napędzany wodorem. W przemyśle istnieją dwa zaawansowane projekty, firma TiZir ma plan rozpocząć produkcję pilotażową na pełną skalę w 2024 roku, podczas gdy pilotażowy projekt Yara ma wejść do produkcji komercyjnej dopiero w 2024 roku.

W scenariuszu „Społeczeństwo usługowe” w projekcie REMES nie uwzględniono rozwoju komercyjnego sektora wodorowego. Oznacza to, że nie przewiduje się przekształcenia transportu lądowego, obecnie szybko rozwijającego się w kierunku wykorzystania energii elektrycznej do zasilania pojazdów na transport zasilany paliwem wodorowym.

W analizach TIMES dotyczących scenariusza społeczeństwa usługowego założono również, że zapotrzebowanie energii w sektorze transportu pozostanie na tym samym poziomie co obecnie, chociaż liczba ludności rośnie (tzn. zużycie energii na mieszkańca znacznie się zmniejsza). Oznacza to, że efektywność energetyczna w sektorze transportu jest na odpowiednim poziomie. Ludzie starają się zmienić swoje zachowania i stają się bardzo świadomi swojego stylu życia. Wraz

z tą świadomością rośnie katalog barier, które ograniczają rozwój technologii wodorowej w sektorze transportu lądowego.

Niniejszy przegląd wykazał, że rozwiązania wodorowe znajdą najszersze zastosowanie w transporcie morskim w społeczeństwie przemysłowym po 2050 roku.

2.5. Struktura produkcji energii elektrycznej

Energia wodna stanowi większość norweskich dostaw energii, a baza surowcowa do jej produkcji uzależniona jest od opadów w danym roku. Jest to znacząca różnica w stosunku do innych krajów europejskich, gdzie bezpieczeństwo dostaw zapewniają głównie elektrownie ciepłe, zależne od zasobów konwencjonalnych dostępnych na rynkach energetycznych.

Szczególną cechą norweskiego systemu hydroenergetycznego jest jego duża pojemność magazynowa. Produkcja jest elastyczna i można ją bez większych problemów zwiększyć lub zmniejszyć – w zależności od zapotrzebowania, przy niskich kosztach. Jest to ważne, ponieważ w systemie elektroenergetycznym musi istnieć równowaga między produkcją a zużyciem przez cały czas. Rosnący udział odnawialnych źródeł energii w miksie produkowanych mocy, takich jak energia wiatrowa czy słoneczna, sprawia, że elastyczność w pozostałej części systemu staje się jeszcze ważniejsza.

Elektrownie odnawialne są zazwyczaj zlokalizowane tam, gdzie jest dostęp do zasobów. Zdolności produkcyjne rozkładają się zatem nierównomiernie pomiędzy różne regiony Norwegii. Dobrze rozwinięta sieć energetyczna jest niezbędna do przesyłu energii elektrycznej do odbiorców we wszystkich częściach kraju. Norweski system elektroenergetyczny jest ściśle zintegrowany z innymi systemami skandynawskimi, zarówno pod względem fizycznym, jak i poprzez integrację rynkową. Z kolei rynek skandynawski jest zintegrowany z resztą Europy poprzez połączenia transgraniczne z Holandią, Niemcami, krajami bałtyckimi, Polską i Rosją. Integracja z systemami elektroenergetycznymi innych krajów, dobrze rozwinięta sieć energetyczna i charakterystyka wytwarzania energii wodnej sprawiają, że norweski system zasilania jest bardzo elastyczny.

Energia wodna jest podstawą norweskiego systemu elektroenergetycznego. Na początku 2021 r. w Norwegii odnotowano 1681 elektrowni wodnych o łącznej mocy zainstalowanej 33 055 MW. W standardowym roku norweskie elektrownie wodne produkują 136,4 TWh, co stanowi 90% całkowitej produkcji energii w Norwegii. Dopływ wody i moc zainstalowana określają, ile energii wodnej może wyprodukować norweski system. Napływ różni się w zależności od pogody. Jest najwyższy wiosną, zwykle spada pod koniec lata, ale ponownie wzrasta jesienią. Napływ jest na ogół bardzo niski w miesiącach zimowych. W latach 1990–2019 roczny dopływ do norweskich elektrowni wodnych wahał się o około 65 TWh.

Norwegia posiada ponad 1000 zbiorników hydroenergetycznych o łącznej pojemności ponad 87 TWh. Elastyczność elektrowni i pojemność zbiorników jest

różna. Niektóre elektrownie wodne z małymi zbiornikami oferują krótkoterminową elastyczność i mogą przenosić produkcję z godzin obciążenia podstawowego (w nocy) do godzin obciążenia szczytowego (w dzień). Elektrownie wodne z większymi zbiornikami mogą magazynować wodę przez dłuższy czas. Największy zbiornik w Norwegii, Blåsjø, ma pojemność 7,8 TWh i przeznaczony jest do magazynowania wody, gdy opady są wysokie, a w następstwie wykorzystania jej w okresie suszy.

Na początku 2021 r. w Norwegii odnotowano 53 farmy wiatrowe o mocy zainstalowanej 3977 MW. Produkcja energii z elektrowni wiatrowych zmienia się wraz z warunkami pogodowymi. Warunki wietrzne mogą się bardzo różnić w dniach, tygodniach i miesiącach. W 2021 r. energia wiatrowa stanowiła 6,4% całkowitej produkcji energii elektrycznej w Norwegii.

Pierwsza farma wiatrowa w Norwegii działa dopiero od 2002 roku. Farma wiatrowa Smøla miała pierwotnie zainstalowaną moc 40 MW, ale została ona zwiększona o 110 MW w 2005 roku, po drugiej fazie budowy. Inwestycje w energetykę wiatrową znacznie wzrosły w ostatnich latach, a rząd norweski zakłada, że ich rozwój będzie jeszcze większy.

Nieznaczna część produkowanej energii w Norwegii pochodzi również z farm fotowoltaicznych. Na początku 2021 r. łączna moc zainstalowanej energii słonecznej w Norwegii wynosiła 160 MW. Statystyki Elhub pokazują, że 85% systemów fotowoltaicznych to elektrownie o mocy poniżej 15 kW i stanowią one tylko jedną trzecią zdolności produkcyjnej. Niniejsze statystyki pokazują, że energia słoneczna nie jest popularna w Norwegii. Dzieje się tak ze względu na brak elastycznej zdolności produkcyjnej oraz wysokie koszty technologii do rozwoju energetyki słonecznej.

Udział elektrowni ciepłych w norweskim miksie wytwarzania energii elektrycznej nie przekracza w skali roku 2%. Wiele z nich znajduje się w dużych instalacjach przemysłowych, które same wykorzystują wytworzoną energię elektryczną. Dlatego produkcja często zależy od zapotrzebowania przemysłu na energię elektryczną. Elektrownie te korzystają z różnych źródeł energii, w tym odpadów komunalnych, przemysłowych, ropy naftowej, gazu ziemnego i węgla. W Norwegii działa 30 elektrociepłowni o łącznej mocy zainstalowanej ok. 700 MW, a ich produkcja od kilku lat utrzymuje się na stosunkowo stabilnym poziomie – 3,4 TWh.

Bilans mocy wyraża relację między produkcją a zużyciem i wskazuje, czy norweski system elektroenergetyczny jest w danym roku eksporterem lub importerem netto. Duże zróżnicowanie dopływów staje się mniejszym problemem wraz ze wzrostem zdolności wymiany mocy z systemami zdominowanymi przez inne źródła energii. Handel energią odgrywa zatem kluczową rolę w norweskim systemie hydroenergetycznym i jest ważny zarówno dla bezpieczeństwa dostaw, jak i tworzenia wartości.

2.6. Charakterystyka infrastruktury energetycznej na potrzeby gospodarki wodorowej

Powyżej analizowany zakres dotyczący celów gospodarki wodorowej oraz sposobu ich osiągnięcia wykazał, że Norwegia w swoich długoterminowych planach koncentruje się bardziej na eksporcie wytworzonego wodoru na rynki zagraniczne niż na krajowej konsumpcji. Szybki rozwój i wdrażanie nowej infrastruktury stanowi ogromne wyzwanie, ale jest również wykonalne w krótkich ramach czasowych przy wystarczającej woli politycznej i mobilizacji podmiotów naukowych i technicznych¹⁵. Zakładając taki scenariusz, lepsze wykorzystanie istniejącej infrastruktury jest kluczowym rozwiązaniem i wiąże się ze znacznie większym potencjałem niż budowa nowej bazy do transportu wodoru. Część istniejącej infrastruktury gazowej może być wykorzystana do przepływu niebieskiego wodoru.

Jeżeli Norwegia ma pozostać wiodącym na świecie eksporterem surowców energetycznych, utrzymanie i budowanie bliskiej współpracy z Europą w nadchodzących latach ma zasadnicze znaczenie. Dlatego też, Norwegia zakłada równoczesne działania na rzecz stworzenia krajowego i eksportowego rynku i infrastruktury wodoru. To jeden z powodów, dla których projekt wychwytywania i składowania dwutlenku węgla Longship jest tak ważny. Longship to zobowiązanie rządu norweskiego do pełnego wdrożenia technologii wychwytywania, transportu i składowania dwutlenku węgla (CCS). Zdolność do wychwytywania i magazynowania CO₂ na dużą skalę jest podstawowym czynnikiem umożliwiającym produkcję błękitnego wodoru w Norwegii, który można wykorzystać do przyspieszenia rozwoju infrastruktury eksportowej.

Biorąc pod uwagę, że w 2017 r. Norwegia wyeksportowała 117,4 mld m³ (1250 TWh) gazu ziemnego¹⁶, a przekształcenie tej objętości w niebieski wodór, przy zakładanej wydajności 75%, dałoby około 22,5 miliona ton wodoru¹⁷, czyli więcej niż obecne zapotrzebowanie europejskiego rynku przemysłowego i rafineryjnego¹⁸ – czyni Norwegię największym partnerem handlowym w Unii Europejskiej¹⁹.

¹⁵ N.M. Dowell, N. Sunny et. al., *The hydrogen economy: A pragmatic path forward*, "Joule" 2021, t. 5, No. 10.

¹⁶ Gassco, *Nøkkeltall – Gasstransportogfinansiellestørrelseri 2016 og 2017*, 2018, <http://gassco.no/om-gassco/nokkeltall/> (dostęp: 28.03.2022 r.).

¹⁷ M. Thema, F. Bauer et. al., *Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 2019, 112.

¹⁸ Shell, *Sky scenario. Meeting the goals of the Paris Agreement*, 2018, https://www.shell.com/promos/business-customers-promos/download-latest-scenari_sky/_jcr_content.stream/1530643931055/eca19f7fc0d20adbe830d3b0b27bcc9ef72198f5/shell-scenariosky.pdf (dostęp: 22.03.2022 r.).

¹⁹ Norwegian Petroleum, Exports of Norwegian oil and gas, <https://www.norskpetroleum.no/en/production-and-exports/exports-of-oil-and-gas/> (dostęp: 28.03.2022 r.).

Obecnie produkcja niebieskiego wodoru na dużą skalę może mieć miejsce w kilku lokalizacjach z ugruntowaną infrastrukturą gazową i CCS, takich jak porty w Bergen i Ålesund lub terminale gazowe w Kårstø lub Melkøya.

Analizując krajową infrastrukturę do tankowania pojazdów wodorowych, można wyróżnić cztery stacje tankowania wodoru: jedna stacja Uno-X w Bergen i dwie poza Oslo, oraz jedna ASKO w Trondheim, która jest przeznaczona głównie dla własnych ciężarówek. Dodatkowo, nowo utworzona spółka Hydrogenisk przejmie dwie stacje paliw HyOP, które zostały zamknięte w 2018 roku. Norweskie Stowarzyszenie Wodorowe przewiduje, że w najbliższym czasie będzie 14 stacji tankowania wodoru. Planowane są również stacje tankowania połączone z planami wodorowych autobusów i promów, a także przez klaster przemysłowy w Herøya.

Dużą szansę na rozwój norweskiej infrastruktury tankowania daje również wdrożony instrument „Łącząc Europę”.

2.7. Podsumowanie

Rozwój gospodarki wodorowej jest w dużym stopniu uzależniony od zachęt politycznych, rozwoju technologii CCS oraz rozwoju technologii konkurencyjnych, takich jak akumulatory. Oczekuje się, że wodór zostanie wykorzystany w sektorach trudnych do elektryfikacji i dekarbonizacji. Nośnik ten odegra znaczącą rolę w sektorze ciepłowniczym, przemysłowym, transportu ciężkiego i zapewni elastyczność przyszłego systemu elektroenergetycznego o dużym udziale zmiennej produkcji energii elektrycznej.

Analiza materiałów naukowych z zakresu badań nad rozwojem norweskiej gospodarki wodorowej wykazała, że istnieją znaczne bariery techniczne, ekonomiczne i prawno-administracyjne dla wtlaczania i dystrybucji wodoru za pośrednictwem istniejącej infrastruktury gazu ziemnego. Dlatego też, rekomenduje się aby zakres ten został uzupełniony, a obecne wysiłki norweskiego rządu koncentrowały się na kontynuacji prac badawczo-rozwojowych w celu dalszej redukcji kosztów oraz aktywacji rynku. Jeśli jednak uwarunkowania te zostaną spełnione, to w perspektywie 10 lat produkcja wodoru metodą reformingu parowego gazu ziemnego (CCS) będzie tańsza niż elektroliza na dużą skalę.

Powodami rozwoju wodoru jako nośnika energii na arenie międzynarodowej są przede wszystkim bezpieczeństwo dostaw energii (bezpieczeństwo energetyczne) oraz względy środowiskowe. Wodór jest postrzegany jako możliwe przyszłe rozwiązanie mające na celu zapewnienie większej elastyczności wyboru innego źródła energii dla państw uczestniczących w wymianie handlowej z Norwegią. Obecnie Norwegia wydobywa najwięcej gazu i ropy naftowej w Europie, który w większości jest eksportowany, co generuje dodatkowe emisje CO₂ na całym świecie. Norweski rząd ma świadomość, że jest odpowiedzialny za zmiany klimatyczne również w innych państwach, do których eksportuje paliwa kopalne. Dlatego wzmocnione działania na rzecz rozwoju krajowego rynku wodoru pozwoli

zapewnić bezpieczeństwo energetyczne na arenie międzynarodowej i przyczyni się do ograniczenia nie tylko rocznych krajowych emisji, ale i zanieczyszczeń w krajach współpracujących.

Znaczący eksport ropy naftowej i gazu ziemnego oraz przyszły potencjał eksportu wodoru sprawiają, że Norwegia zajmuje kluczową pozycję w przyszłości energetycznej Europy. W ten sposób Norwegia może nadal pełnić rolę ważnego podmiotu przyczyniającego się do bezpieczeństwa dostaw energii w Europie w sposób zrównoważony.

Niniejsze opracowanie wykazało, że eksport wodoru na europejski rynek paliw stanowi interesującą ekonomicznie opcję. Zaleca się rozważenie tej opcji jako integralnej części dyskusji politycznych z Komisją Europejską²⁰.

Bibliografia

1. Brennan S., Bengaouer A., Carcassi M. et. al. *Towards minimising hazards in hydrogen and fuel cell stationary applications: key findings of modelling and experimental work in the Hyper project*, Symposium series No. 155, <https://www.icheme.org/media/9555/xxi-paper-058.pdf> (dostęp: 22.03.2022 r.).
2. Bruseth O., *Politisk plattform – for enregjeringutgått av Høyre*, Fremskrittspartiet, Venstre og Kristelig Folkeparti, Granavolden, 2019, <https://www.regjeringen.no/contentassets/7b0b7f0fcf0f4d93bb6705838248749b/plattform.pdf> (dostęp: 22.03.2022 r.).
3. Dhahi A., Boshell F. et. al. *The role of renewable energy in the global energy transformation*, “Energy Strategy Reviews”, 2019.
4. DNV GL, *Energy Transition Outlook 2018. A global and regional forecast to 2050*, 2018. <https://eto.dnvgl.com/2018/> (dostęp: 21.03.2022 r.).
5. Dowell N.M., Sunny N. et. al., *The hydrogen economy: A pragmatic path forward*, „Joule” 2021, 5(10).
6. Energy Transitions Commission, *Mission possible. Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by midcentury*. Report from the Energy Transition Commission, 2018, http://www.energytransitions.org/sites/default/files/ETC_MissionPossible_FullReport.pdf (dostęp: 28.03.2022 r.).
7. Gassco, *Nøkkeltall – Gasstransport og finansielle størrelseri 2016 og 2017*, 2018, <http://gassco.no/om-gassco/nokkeltall/> (dostęp: 28.03.2022 r.).
8. Græslie L.S., Steen M., *Integrating policy instruments for mission-oriented innovation*, LUT Scientific and Expertise Publications: ISPIM Conference Proceedings, Manchester 2021.
9. Hydrogen Council, *Hydrogen scaling up - A sustainable pathway for the global energy transition*, 2017, <http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-upHydrogen-Council.pdf> (dostęp: 28.03.2022 r.).
10. International Renewable Energy Agency, *Global energy transformation: A roadmap to 2050*, IRENA, 2019. <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition> (dostęp: 22.03.2022 r.).

²⁰ NTNU, SINTEF, IFE, Recommendations to the Norwegian Government for the implementation of hydrogen as transportation fuel in Norway, Core Message and Executive Summary, 2019, <https://www.sintef.no/contentassets/ec25f254706f49a18c24d1e47638f1dd/norways-hydrogen-transport.pdf> (dostęp: 23.03.2022 r.).

11. Kanelloupolos K., Blanco R.H., *The potential role of H2 production in a sustainable future power system – An analysis with METIS of a decarbonised system powered by renewables in 2050*. European Commission JRC Technical reports 2019.
12. Nordic Energy Research and IEA, *Nordic Energy Technology Perspectives, Cities, flexibility and pathways to carbon-neutrality*, Norway, 016, <https://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2016/04/Nordic-Energy-Technology-Perspectives-2016.pdf> (dostęp: 20.03.2022 r.).
13. Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, *Norwegian Ministry of Climate and Environment, The Norwegian Government's hydrogen strategy towards a low emission society*, Norway, 2020, <https://www.regjeringen.no/contentassets/40026db2148e41eda8e3792d259efb6b/y-0127e.pdf> (dostęp: 22.03.2022 r.).
14. Norwegian Petroleum, Exports of Norwegian oil and gas, <https://www.norskpetroleum.no/en/production-and-exports/exports-of-oil-and-gas/> (dostęp: 28.03.2022 r.).
15. NTNU, SINTEF, IFE, Recommendations to the Norwegian Government for the implementation of hydrogen as transport on fuel in Norway, Core Message and Executive Summary, 2019, <https://www.sintef.no/contentassets/ec25f254706f49a18c24d1e47638f1dd/norways-hydrogen-transport.pdf> (dostęp: 23.03.2022 r.).
16. Ram M., Bogdanov D. et. al., *Global Energy System based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport and Desalination Sectors*. University of Technology and Energy Watch Group, Berlin 2019.
17. Regjeringen Solberg, *Norge forsterker klimamålet for 2030 til minst 50 prosent og opp mot 55 prosent*, Klima-og miljødepartementet, 2020, <https://www.regjeringen.no/no/dokumentarkiv/regjeringen-solberg/aktuelt-regjeringen-solberg/kld/nyheter/2020-nyheter/norge-forsterker-klimamalet-for-2030-til-minst-50-prosent-og-opp-mot-55-prosent/id2689679/> (dostęp: 19.03.2022 r.).
18. Schäffer L.S., Rosenberg E. et al., *Veikart for energi Norge mot 2050*. SINTEF Rapport 2019:01467, Norway 2020.
19. Shell, *Sky scenario. Meeting the goals of the Paris Agreement*, 2018, https://www.shell.com/promos/business-customers-promos/download-latest-scenari-sky/_jcr_content.stream/1530643931055/eca19f7fc0d20adbe830d3b0b27bcc9ef72198f5/shell-scenari-osky.pdf (dostęp: 22.03.2022 r.).
20. Thema M., Bauer F. et. al., *Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2019, 112.

Rozdział 3.

STUDIUM PRZYPADKU – FINLANDIA

Case study – Finland

Daria RZEMIENIAK

***Abstract:** The aim of this text is to provide detailed analysis of the Finnish Energy and Climate Strategy in relation to hydrogen. It's important to emphasize that Finland, as one of the countries, doesn't have its own hydrogen strategy, but all information on hydrogen is included in the energy strategy. In particular, aspects of the proposal relating hothouse of hydrogen in the Finnish economy and the way green hydrogen is produced a reexamined. An important aspect raised during the work is the transport of hydrogen, as it's one of the prerequisites for building up the country's hydrogen capacity and the instruments to be used for the development of hydrogen in Finland. The analysis clearly shows that the hydrogen aspect sonly marginally addressed in the climate change strategy, which is related to the lack of legal framework for the transport and production of hydrogen.*

3.1. Wprowadzenie

Coraz szybciej postępujące zmiany klimatyczne przyczyniają się do rozwoju alternatywnych źródeł energii, które na przestrzeni czasu pozwoliłyby na odejście od paliw kopalnych, które są zagrożeniem dla środowiska. Jedną z takich innowacji jest zielony wodór, który polega na elektrolizie wody przy użyciu energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE), to właśnie dzięki wykorzystaniu OZE zielony wodór można uznać za zeroemisyjny i bezpieczny dla środowiska. Zielony wodór jako niskoemisyjny nośnik energii jest przydatny w wielu sektorach gospodarki. Może on zastąpić paliwa kopalne i może być tym krokiem świata, który pozwoli na osiągnięcie neutralności klimatycznej. Warto zaznaczyć również fakt, że Unii Europejskiej została Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 19 maja 2021 r. w sprawie europejskiej strategii w zakresie wodoru (2020/2242(INI)), która pozwoli Unii Europejskiej dążyć do wyeliminowania wysokoemisyjnych źródeł energii. Mimo przyjętej rezolucji, każde z państw należących do Unii Europejskiej przyjęło swoje odrębne Strategie Wodorowe, które pozwolą w sposób indywidualny podejść do produkcji zielonego wodoru.

3.2. Analiza Strategii Wodorowej Finlandii

Finlandia jako jedno z nielicznych państw Unii Europejskiej już w 2013 opracowywała działania mające na celu wprowadzanie wodoru do fińskiej gospodarki¹. Obecnie Finlandia jako główny cel obrała sobie osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2035 roku oraz ujemnej emisji dwutlenku węgla do 2050 roku². Finlandia, jako państwo nie ma oddzielnie określonej Strategii Wodorowej. Wykorzystanie wodoru w gospodarce jest integralną częścią Strategii Energetycznej i Klimatycznej Finlandii (*Finland's Integrated Energy and Climate Plan*).

W wymienionym wyżej dokumencie nie ma zbyt wielu szczegółowych informacji, które pozwolą na określenie, w jaki sposób wodór w Finlandii mógłby być produkowany. Temat wodoru potraktowany jest dość marginalnie, dokument ten skupia się na wszystkich surowcach, które mogłyby zapewnić Finlandii niezależność od innych państwa i elastyczność związaną z dostawami wykorzystywanych surowców. Fiński rząd postrzega wodór jako jedną z możliwości, która mogłaby uelastyczyć plan dostaw do systemu elektroenergetycznego. W Strategii Energetycznej i Klimatycznej znajdują się również informacje na temat sektorów, w których wodór mógłby występować i zastąpić paliwa kopalne. Uważa się, że wodór mógłby zyskać na popularności w transporcie, przemyśle oraz ciepłownictwie. W aspekcie transportu przypuszcza się, że wodór nie zyskałby aż takiej popularności w odniesieniu do samochodów osobowych czy pociągów. Jednak z pewnością na produkcji wodoru mógłby skorzystać fiński transport publiczny³. Warto zaznaczyć, że w Strategii Energetycznej i Klimatycznej przypomina się o tym, aby przemysł dążył do neutralności klimatycznej do 2035 roku, a co za tym idzie – do dekarbonizacji⁴. Wskazuje się na to, aby przemysł został zelektryfikowany, w czym zdecydowanie pomogłoby pozyskiwanie wodoru z OZE. Zatem jednym z głównych zadań jest wdrożenie wodoru do gospodarki i obniżenie emisyjności trzech przedstawionych sektorów, ale również wykorzystanie fińskiego potencjału do wytwarzania zielonego wodoru z odnawialnych źródeł energii. Celem Finlandii jest także wyeliminowanie szarego wodoru pozyskiwanego ze źródeł kopalnych i zastąpienie go zielonym wodorem z OZE.

Natomiast w źródłach internetowych można znaleźć wiele analiz, które pozwalają na określenie scenariusza, który określa, jaki potencjał wytwórczy wodoru posiada Finlandia. Jedną z takich analiz jest *Opportunities for Hydrogen Energy*

¹ Trinomics, Ludwig-Bölkow Systemtechnik, *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans*, kwiecień 2020, https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Brochure%20FCH%20Finland%20%28ID%209473037%29.pdf (dostęp: 06.03.2022 r.).

² H. Sarén, J. Laurikko, *National hydrogen roadmap guides finland towards carbon neutrality*, Business Finland, listopad 2020, <https://www.businessfinland.fi/en/whats-new/news/cision-releases/2020/national-hydrogen-roadmap-guides-finland-towards-carbon-neutrality> (dostęp: 06.03.2022 r.).

³ *Opportunities for Hydrogen...*, s. 4.

⁴ Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment, *Finland Integrated Energy and Climate Plan*, 2019:66, 56.

Technologies Considering the National Energy & Climate Plans, która została przygotowana przez Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU) w ścisłej współpracy z Komisją Europejską. Takie badania mają być przydatne państwom do wdrożenia wodoru w swoją gospodarkę. Szacuje się, że w Finlandii najwięcej wodoru może być produkowane za pomocą procesu elektrolizy z wykorzystaniem energii elektrycznej pochodzącej z farm wiatrowych, ponieważ aż od 200 do 1800 MW oraz z farm fotowoltaicznym, dzięki którym Finlandia może pozyskać od 390 do 1380 MW wodoru⁵. Można więc przypuszczać, że większość wodoru w Finlandii produkowana byłaby za pomocą farm wiatrowych. Wodór z wymienionych źródeł byłby pozyskany za pomocą elektrolizy wody. W Finlandii dopuszcza się również zainstalowanie od 0,9 do 3,3 GW mocy z OZE, która byłaby wykorzystana tylko do wytwarzania wodoru⁶. Istnieje również możliwość produkcji wodoru z nadwyżek energii wyprodukowanej z OZE w okresach szczytowych produkcji, jednak uważa się, że główna część produkcji byłaby pokrywana ze źródeł „dedykowanych” do wytwarzania wodoru.

3.3. Określenie instrumentów, narzędzi gospodarki wodorowej

Jak już wspomniano, Finlandia nie ma odrębnej strategii wodorowej. Strategia Energetyczna nie określa również szczegółów związanych z instrumentami czy narzędziami gospodarki wodorowej. Wspomniana wcześniej Strategia Energetyczna i Klimatyczna została sporządzona przez Ministerstwo Gospodarki i Zatrudnienia, więc można przypuszczać, że to właśnie ten organ jest w głównej mierze odpowiedzialny za nadzór nad wprowadzaniem zmian w kontekście wodoru. Na podstawie działań Finlandii można zauważyć, że brakuje z góry nałożonych instrumentów prawnych, które zarządzałyby strefą wodoru.

Firmy, dzięki wdrożonym mechanizmom wsparcia finansowego przez fiński rząd, inwestują w produkcję wodoru. Przykładem tego jest firma P2X Solutions, która jest producentem zielonego wodoru i prekursorem technologii Power-to-X w Finlandii. Fińska firma P2X Solutions poinformowała, że jeszcze w 2022 r. rozpocznie się budowa pierwszej przemysłowej fabryki zielonego wodoru w południowo-zachodniej Finlandii, a dokładnie w miejscowości Harjavalta⁷. Otwarcie pierwszej fabryki P2X jest planowane na pierwszą połowę 2024 roku⁸. Firma ta w Harjavalta chce otworzyć 20-megawatową fabrykę zielonego wodoru i synte-

⁵ *Opportunities for Hydrogen...*, s. 3.

⁶ *Ibidem*, s. 4.

⁷ A. Kauranen, *Germany's Sunfire to provide equipment for Finland's green hydrogen plant*, Reuters, marzec 2022, <https://www.reuters.com/article/finland-hydrogen-sunfire-p2x-solutions/germanys-sunfire-to-provide-equipment-for-finlands-green-hydrogen-plant-idUSL5N2VP3U8> (dostęp: 22.03.2022 r.).

⁸ H. Plit, *P2X Solutions receives public funding to build Finland's first green hydrogen production plant – A great leap towards an emission-free welfare society*, P2X, grudzień 2021, <https://p2x.fi/en/p2x-solutions-receives-public-funding-to-build-finlands-first-green-hydrogen-production-plant-a-great-leap-towards-an-emission-free-welfare-society/> (dostęp: 23.03.2022 r.).

tycznego metanu, jednak plan firmy jest na tyle ambitny, aby rozwinąć inwestycje do mocy 1000 MW w przeciągu 10 lat⁹. Firma P2X otrzymała od Ministerstwa Gospodarki i Zatrudnienia grant w wysokości 26 mln euro, aby rozwijać innowacyjną technologię na terenie Finlandii. Dodatkowo Fundusz Klimatyczny udzielił firmie pożyczki kapitałowej w wysokości 10 mln euro¹⁰. Firma zakłada, że całkowity koszt inwestycji wyniesie około 70 mln euro¹¹. Przykład firmy P2X wydaje się idealnym odzwierciedleniem działania fińskiej polityki, mimo braku szczegółowych informacji na temat wodoru w Strategii Energetycznej, sektor państwowy wspiera działania prywatnych firm w kontekście działań dotyczących wprowadzania innowacyjnych, niskoemisyjnych technologii, takich jak wodór.

Kolejnym przykładem w tym kontekście może być firma Gasgrid, która jest fińską państwową spółką i operatorem systemu przesyłowego gazu ziemnego. Gasgrid we współpracy z Guidehouse w 2021 roku wykonała badania, które określają potencjał wodorowy Finlandii¹². Przeprowadzone badania wykazały, że Finlandia ma znaczne zdolności w gospodarce wodorowej, zarówno jako producent, jak i eksporter wodoru¹³. Gasgrid przeprowadzając to badanie, pokazało, jak ważny jest teraz aspekt wodoru i czy warto będzie w przyszłości angażować się i inwestować w ten nośnik energii. Badanie jednoznacznie pokazało, że Finlandia ma duży potencjał w zakresie produkcji zielonego wodoru dzięki dużym zasobom energetycznym wytwarzanym z farm wiatrowych, dlatego rynek wodorowy tak prędko się rozwija. W omawianych badaniach można znaleźć informacje na temat tego, że wodór jest postrzegany jako bardzo przyszłościowy nośnik energii i wpisuje się on jak najbardziej w działania Finlandii w kontekście dążenia do neutralności klimatycznej. To nie są jedyne działania Gasgrid, które dotyczą wodoru. Firma czynnie angażuje się w strefę wodorową. W roku 2021 dołączyła do:

1. Klastra Wodorowego w Finlandii (*The Hydrogen Cluster Finland* – HCF), czyli sieci firm i stowarzyszeń przemysłowych, które aktywnie promują rozwój wodoru w Finlandii.
2. European Hydrogen Backbone (EHB) – jest to europejska inicjatywa zrzeszającej dwunastu europejskich operatorów gazowych¹⁴. Wizją EBH jest stworzenie dedykowanej infrastruktury dla transportu wodoru całej Europie¹⁵.

⁹ A. Kauranen, *Germany's Sunfire to provide...*

¹⁰ H. Plit, *P2X Solutions receives...*

¹¹ *Ibidem.*

¹² S. Kärki, *Finland has opportunities to become the leading country in hydrogen production*, GASGRID, <https://gasgrid.fi/en/2021/12/16/finland-has-opportunities-to-become-the-leading-country-in-hydrogen-production/> (dostęp: 23.03.2022 r.).

¹³ *Ibidem.*

¹⁴ GRTgaz, *European Hydrogen Backbone*, <https://www.grtgaz.com/en/medias/press-releases/european-hydrogen-backbone> (dostęp: 25.03.2022 r.).

¹⁵ GASGRID, Guidehouse, *Hydrogen potential in Finland*, 2021, s. 10, https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Gasgrid_Study-on-the-Potential-of-Hydrogen-Economy-in-Finland_ENG-FINAL.pdf (dostęp: 25.03.2022 r.).

Gasgrid rozpoczął również wspólny projekt z Fingrid (fiński operator sieci przesyłowej energii elektrycznej), który ma na celu szczegółowo zidentyfikować możliwości fińskiej gospodarki wodorowej¹⁶. Dodatkowo projekt ma wyjaśnić, jak duży wpływ ma infrastruktura energetyczna na rozwój gospodarki wodorowej. Połączony projekt dwóch firm jest ambitnym przedsięwzięciem, którego konsorcjum badawcze składa się z kilku fińskich firm i instytutów badawczych. Wspólne badania mają również na celu opracowanie scenariuszy rozwoju fińskiej gospodarki wodorowej, które będą opierały się na obserwacjach zebranych od interesariuszy¹⁷. Ponadto w zakres projektu, badana jest szansa na wykonalność budowy sieci przesyłowej wodoru oraz tworzenie podstaw dla rynku wodoru i integracji sektora. Działania dwóch państwowych firm przemysłowych pokazują, że temat wodoru w Finlandii jest obecnie poruszany nie tylko w sektorze prywatnym, ale również państwowym, co może wskazywać na już wcześniej wspomniany duży potencjał Finlandii w kontekście produkcji wodoru.

Pokrótkie warto też wspomnieć o Fińskim Kłastrze Wodorowym, będącym siecią firm i stowarzyszeń przemysłowych, które na celu mają promowanie gospodarki wodorowej oraz wspieranie transformacji energetycznej w kierunku neutralności klimatycznej¹⁸. Fiński Klaster Wodorowy zrzesza nie tylko firmy z Finlandii, ale również Europy, czy jak deklarują – z całego świata. Na stronie internetowej HCF obecnie można znaleźć trzy sporządzone sprawozdania i aktualności na temat działania Klastra. Aktualnie Fiński Klaster Wodorowy zrzesza około 55 firm. Należą do nich między innymi: P2X Solutions, Gasgrid czy Siemens.

Warto również wspomnieć o inicjatywie BoH2nia, która ma powstać wokół Zatoki Botnickiej i Morza Bałtyckiego¹⁹. BoH2nia ma na celu stworzenie wielkoskalowej gospodarki wodorowej. Główną misją jest stworzenie aż 115GW nowej mocy farm wiatrowych oraz zbudowanie (lub zaplanowanie) budowy jednego reaktora jądrowego o mocy 3GW²⁰. Pomysł ten został zainicjowany przez ekosystem innowacji Green Electrification kierowany przez CLIC Innovation w Finlandii²¹. Projekt przede wszystkim skupia się na Finlandii i Szwecji oraz niektórych krajach bałtyckich. Dużą zaletą tej koncepcji jest współpraca sektora rządowego i prywatnego. BoH2nia łączy wiele firm, które skupiają się na rozwoju gospodarki wodorowej. Jako ciekawostkę warto dodać, że jedną z instytucji angażującą się w projekt jest Politechnika Lubelska.

Mimo braku szczegółowo określonych instrumentów i narzędzi gospodarki wodorowej w Strategii Energetycznej i Klimatycznej aspekt gospodarki wodo-

¹⁶ *Ibidem*, s. 10.

¹⁷ GASGRID, *Gasgrid and Fingrid launch a joint research project to enable the hydrogen economy*, 2021, <https://gasgrid.fi/en/2021/11/09/gasgrid-and-fingrid-launch-a-joint-research-project-to-enable-the-hydrogen-economy/> (dostęp: 25.03.2022 r.).

¹⁸ H2Cluster, *About us*, <https://h2cluster.fi/about-us/> (dostęp: 25.03.2022 r.).

¹⁹ Clicinnovation, *BoH2nia*, https://clicinnovation.fi/project/both2nia/?fbclid=IwAR0EfkQsTh_K6bAzefyLgPWhqObm9Vms92Cr4KSOpNcQsfgLE4uiF3245yU (dostęp: 27.03.2022 r.).

²⁰ *Ibidem*.

²¹ *Ibidem*.

rowej w Finlandii rozwija się prężnie nie tylko w sektorze państwowym, ale również prywatnym. Ważnym działaniem w tej dziedzinie jest współpraca instrumentów państwowych z firmami prywatnymi, takimi jak P2X, które chętnie rozwijają technologie wodorowe na terenie państwa, a także dzielą się swoją wiedzą i doświadczeniami na arenie międzynarodowej.

3.4. Określenie celów gospodarki wodorowej do 2050 roku oraz sposobu ich osiągnięcia

Unia Europejska szacuje, że do 2050 roku inwestycje w zielony wodór pochodzący z odnawialnych źródeł energii mogą wynieść od 180 do 470 mld euro²². Finlandia nie ma rozbudowanej Strategii Energetycznej i Klimatycznej w zakresie wykorzystania wodoru do 2050 roku, można spotkać się jedynie z określeniem, że jeśli Finlandia w odpowiedni sposób wykorzysta swój potencjał produkcyjny, który posiada w odnawialnych źródłach energii, to do roku 2050 może produkować ok. 150 TWh/rok²³. Są to tylko przypuszczenia odnośnie do tego, jak może prezentować się gospodarka wodorowa w Finlandii. Można uznać, że projekty przedstawione we wcześniejszym podrozdziale są poniekąd celami gospodarki wodorowej do 2050 roku. Obecnie Finlandia bardziej skupia się na zredukowaniu emisji dwutlenku węgla, ponieważ wyznaczyła ambitny cel redukcji emisji o 80–95%²⁴. W Strategii Energetycznej i Klimatycznej można znaleźć informacje na temat celów, jakie powinny być osiągnięte na rok 2050 w zakresie zużycia energii elektrycznej i ciepła w budynkach. Finlandia chce, aby do 2050 roku oszczędność energii w tym sektorze wynosiła 42% w porównaniu z rokiem 2020²⁵. Fiński rząd w Strategii deklaruje, że będą wprowadzane zmiany do tego dokumentu tak, aby działania były zgodne z założonymi celami.

Pomimo niesprecyzowanych działań na rzecz rozwoju gospodarki wodorowej można zauważyć, jak prężnie rozwijają się projekty produkcji i wykorzystania wodoru. Obecnie jednak coraz szybszy rozwój technologii, w tym również systemów produkcji wodoru, nie pozwala szczegółowo określić planów działania do 2050 roku. Dodatkowo Finlandia traktuje zielony wodór nie jako główny cel rozwoju gospodarki wodorowej, a raczej jako środek w dążeniu do osiągnięcia niskoemisyjności państwowej.

²² Static1, *Finland and the hydrogen economy*, Nordic West Office, 2005, https://static1.squarespace.com/static/596def8d579fb3247d0ce5f0/t/5fabfb7923c54b5343498307/1605106621300/Nordic_West+Office_Hydrogen_Report_2020.pdf (dostęp: 26.03.2022 r.).

²³ GASGRID, *Finland has opportunities...*

²⁴ E. Pauku, *How could Finland promote renewable-energy technology innovation and implementation?*, "Clean Energy" 2021, Vol. 5, Issue 3, s. 448.

²⁵ *Finland's Integrated Energy...*, s. 61.

3.5. Struktura produkcji energii elektrycznej

Finlandia postawiła ambitny cel, jakim jest osiągnięcie całkowitej neutralności klimatycznej do 2035 roku. Wskazuje, że obecnie pozostało jedynie 13 lat, aby całkowicie odejść od zużycia emisyjnych źródeł energii i zastąpić je odnawialnymi nośnikami energii. Scenariusz ten może wydawać się całkiem realistyczny, ponieważ już w 2020 roku w Finlandii pierwszy raz od około 50 lat połowa produkcji energii elektrycznej pochodziła z odnawialnych źródeł energii²⁶. Potwierdzeniem tej hipotezy mogą być dane udostępnione przez Międzynarodową Agencję Energetyczną (*International Energy Agency – IEA*), które przedstawiają źródła produkcji energii od roku 1990 do roku 2020 (rys. 1.). Dzięki tak szerokiej perspektywie można stwierdzić, że od 2010 roku widoczny jest spadek wykorzystania węgla w produkcji energii elektrycznej. Dzięki temu zauważalny jest wysoki udział OZE, takich jak wiatr, energetyka wodna, czy biopaliwa. Przedstawione dane pokazują również, że od 1990 roku stale wykorzystana jest energetyka jądrowa do produkcji energii elektrycznej. Udział energetyki jądrowej w krajowym bilansie energetycznym pozwala też na produkcję fioletowego wodoru. Przedstawione poniżej dane obrazują wzrost udziału energetyki wiatrowej w miksie energetycznym. Mimo że w Finlandii rozwój tego źródła energii rozpoczął się stosunkowo późno, nie przeszkodziło to jednak w szybkim rozwoju. Już pod koniec 2019 roku Finlandia posiadała zamontowane 754 turbiny wiatrowe o łącznej mocy 2284 MW²⁷. Ukazane na rysunku 1. dane pokazują dywersyfikację źródeł w krajowym bilansie energetycznym, który pozwala zarówno na produkcję zielonego wodoru, szarego, jak i fioletowego.

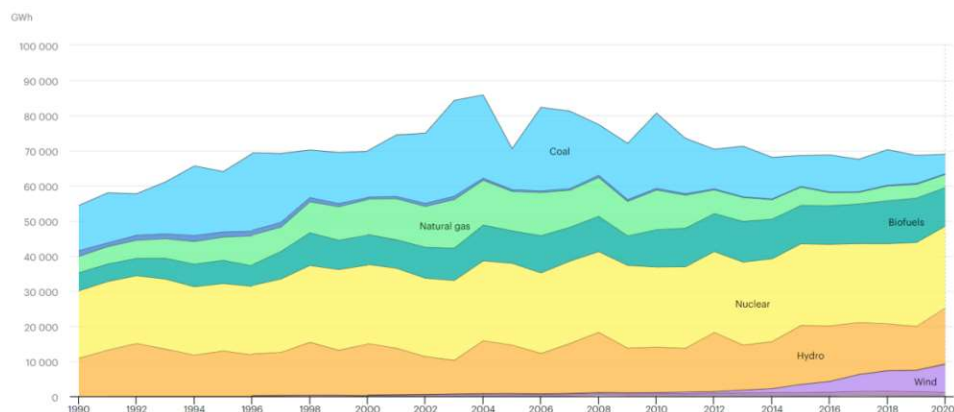
Szacuje się, że Finlandia posiada potencjał wodorowy na poziomie 50 TWh/rok do 2030 roku, jednak aby takie możliwości zostały w pełni wykorzystane, potrzebny jest jeszcze szybszy rozwój farm wiatrowych rozlokowanych na lądzie²⁸. W celu osiągnięcia takich zdolności wodorowych trzeba byłoby rozbudować energetykę wiatrową o co najmniej 90 GW, aby Finlandia mogła sprostać tak ambitnym planom.

W 2021 roku zużycie energii elektrycznej w Finlandii osiągnęło poziom 86 TWh, natomiast w 2020 roku zużycie to wzrosło o 4 TWh. Na rysunku 2. przedstawiono dane na dotyczące zużycia energii elektrycznej z podziałem na sektory. Największe zużycie zauważalne jest w sektorze mieszkalnictwa i rolnictwie, usługach i budownictwie oraz przemyśle leśnym.

²⁶ K. Kaaja, *Over one-half of Finland's electricity was produced with renewable energy sources in 2020*, Stat.fi, listopad 2021, https://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_en.html (dostęp: 26.03.2022 r.).

²⁷ International Trade Administration, *Renewable Energy*, Trade.gov, wrzesień 2021, <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/finland-renewable-energy> (dostęp: 26.03.2022 r.).

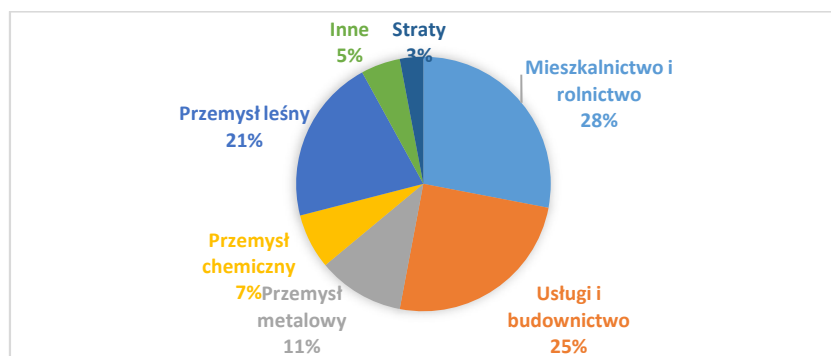
²⁸ *Hydrogen potential...*, s. 21.



Rys. 1. Produkcja energii elektrycznej w Finlandii według źródeł 1990–2020

Fig. 1. Electricity production in Finland by sources 1990–2020

Źródło: IEA, *Finland*, <https://www.iea.org/countries/finland> (dostęp: 26.03.2022 r.).



Rys. 2. Zużycie energii elektrycznej z podziałem na sektory

Fig. 2. Electricity consumption by sector

Źródło: opracowanie własne na podstawie, Finnish Energy, *Energy Year 2021 Electricity*, styczeń 2022, https://energia.fi/files/6678/Electricity_Year_2021.pdf (dostęp: 26.03.2022 r.).

Z przedstawionych danych wynika, że sektor mieszkalnictwa, budownictwa i usług, a także przemysł leśny są największymi emitentami dwutlenku węgla i to właśnie w tych sektorach zauważalny jest największy potencjał w zakresie wdrożenia niskoemisyjnych źródeł energii. Taki scenariusz jest bardzo prawdopodobny, opierając się o dane z IEA, które wskazują, że największymi emitentami dwutlenku węgla są: producenci energii elektrycznej, transport oraz ogólnie pojęty przemysł²⁹.

²⁹ IEA, *Finland*, <https://www.iea.org/countries/finland> (dostęp: 26.03.2022 r.).

W Finlandii zauważalny jest ciągły wzrost udziału OZE w bilansie energetycznym. Zjawisko to jest istotne pod względem rozwoju zielonego wodoru. Jednak w dalszym ciągu, jeżeli Finlandia chciałaby produkować wodór na szeroką skalę, zgodnie z założeniami potrzebny jest rozwój i rozbudowa energetyki wiatrowej. Mimo tego, że Finlandia posiada znaczący potencjał wodorowy w stosunku do innych państw członkowskich UE, bez ciągłego rozwoju i inwestycji w odnawialne źródła energii potencjał ten może nie do końca zostać wykorzystany.

3.6. Charakterystyka infrastruktury energetycznej na potrzeby gospodarki wodorowej

Obecnie państwa członkowskie Unii Europejskiej są na etapie projektowania infrastruktury do przesyłu wodoru. Z pewnością są tu pomocne takie organizacje jak wcześniej wspomniany EHB, którego wizją jest właśnie utworzenie infrastruktury do transportu wodoru. Z perspektywy czasu sam transport wodoru jest dość oczywistym faktem, ponieważ tak jak większość surowców, wodór może być transportowany lokalnie i przesyłany na rynki zagraniczne. Rozwiązaniem tego problemu może być tworzenie specjalnie przystosowanej sieci wodociągów lub wykorzystanie istniejącej infrastruktury gazociągów.

Finlandia obecnie nie posiada, tak jak na przykład Szwecja czy Włochy, planów na rozwój dedykowanych sieci rurociągów do przesyłania wodoru. Aktualnie w Finlandii jest jeden rurociąg do transportu wodoru i znajduje się on między dwoma firmami³⁰. W Finlandii dopuszcza się wykorzystanie gazociągów do przesyłu wodoru (rys. 3.). Infrastruktura gazociągowa nie jest jednak rozwinięta w głąb kraju, co utrudniałoby dalszy transport wodoru.

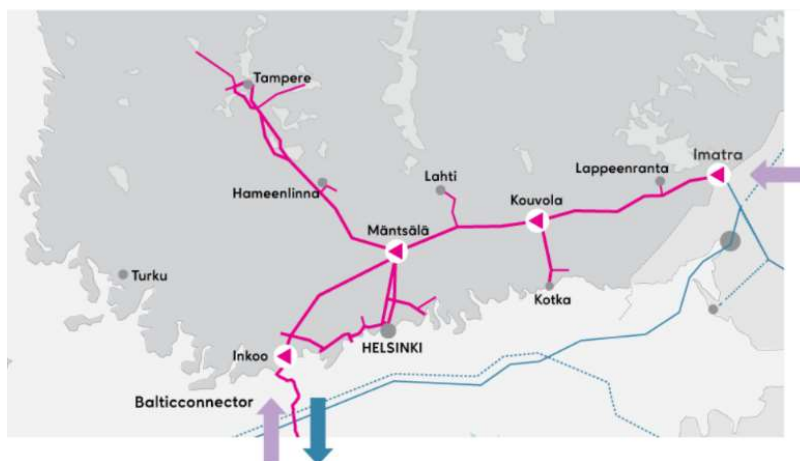
Na ten moment wydaje się, że najkorzystniejszym rodzajem transportu będą naczepy rurowe. Dzięki wykorzystaniu naczep rurowych jest możliwy transport ok. 2000 kg wodoru³¹. Taki rodzaj transportu wodoru jest korzystny z punktu widzenia ograniczeń, które w Finlandii są bardzo restrykcyjne³².

Na ten moment można również znaleźć informacje o tym, że Finlandia chciałaby magazynować wodór za pomocą Lined Rock Cavern (LRC), która charakteryzuje się tym, że ściany jaskiń pokryte są materiałem, który jest warstwą uszczelniającą. Najtańszym rozwiązaniem magazynowania wodoru są groty solne, jednak Finlandia takowych nie posiada. Dlatego też wykorzystanie technologii LRC jest optymalnym rozwiązaniem.

³⁰ J. Laurikko et. al., *National hydrogen roadmap...*, s. 26, https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf_national_hydrogen_roadmap_2020.pdf (dostęp: 26.03.2022 r.).

³¹ *Ibidem*, s. 26.

³² *Ibidem*, s. 26.



Rys. 3. Infrastruktura gazociągowa w Finlandii

Fig. 3. Pipeline infrastructure in Finland

Źródło: GASGRID, *Our operations in brief*, <https://gasgrid.fi/en/> (dostęp: 26.03.2022 r.).

3.7. Podsumowanie

Jednym z pierwszych wniosków, jakie nasuwają się po przeprowadzonej analizie jest to, że Finlandia nie ma określonych planów dotyczących odnawialnych źródeł energii. Zapewne fiński rząd uznał, że naturalne wydaje się rozwinięcie wykorzystania OZE w dążeniu do osiągnięcia założonych celów – niskoemisyjności państwowej. Nie wydaje się być to problematyczne, ponieważ fiński rząd wspiera prywatne projekty, które wprowadzają wodór jako alternatywny nośnik energii do gospodarki. Można również zauważyć, że odnawialne źródła energii czy właśnie wodór są tylko środkami, które pozwalają Finlandii dojść do określonego celu, jakim jest obniżenie emisji gazów cieplarnianych. Fińskie instrumenty państwowe i prywatne przedsiębiorstwa energetyczne wdrażają wodór szczególnie w sektorze przemysłu i budownictwa. Rozwiązania wodorowe wykorzystywane są również w sektorze transportu, jednak w mniejszym stopniu. Podział ten wyróżnia fińską gospodarkę na arenie międzynarodowej, ponieważ większość państw członkowskich Unii Europejskiej priorytetowo traktuje sektor transportu ciężkiego.

Kolejnym wnioskiem jest dominacja inwestycji prywatnych w gospodarce wodorowej. W Finlandii, w dużym stopniu, realizowane projekty są finansowane przez prywatne przedsiębiorstwa energetyczne.

Może to wynikać z braku szczegółowo określonych celów gospodarki wodorowej w fińskiej Strategii Energetycznej. Rozwój gospodarki wodorowej jest również zależny od państwowych firm takich jak Gasgrid czy Fingrid, które przeprowadzają własne badania dotyczące wodoru oraz chętnie angażują się w przedsięwzięcia rozwijające rynek wodorowy.

Następnym wnioskiem jest brak dokładnego wskazania planu rozwoju infrastruktury wodorowej, który jest istotnym ograniczeniem. Przegląd literatury wykazał, że Finlandia ma ogromny potencjał nie tylko na zapewnienie własnego zapotrzebowania energetycznego, ale również może stać się ważnym eksporterem na rynki zagraniczne. Brakuje jednak informacji, jak rynek eksportu miałby wyglądać. Dlatego też, obecnie Finlandia nie jest postrzegana jako nawet potencjalny gracz na międzynarodowych rynku wodoru. Finlandia może być ważnym podmiotem gospodarczym na arenie międzynarodowym, ale pierwszoplanowo musi uzupełnić zakres instrumentalno-prawny w aspekcie produkcji, wytwarzania i przesyłania wodoru.

Rekomendacje, jakie nasuwają się po analizie, to z pewnością ustrukturyzowanie gospodarki wodorowej Finlandii. Przed wszystkim wykazanie przez rząd celów rozwoju gospodarki wodorowej, do jakich powinna zmierzać Finlandia, ale również przedstawienie szczegółowych odpowiedzi na pytania:

1. Jak może zostać wykorzystany potencjał wodorowy Finlandii?
2. Jaka ilość wodoru potrzebna jest do pokrycia zapotrzebowania Finlandii?
3. Jaka ilość wyprodukowanego wodoru może zostać przeznaczona na eksport?
4. Czym wyprodukowany wodór miałby być transportowany?

Strategia Energetyczna i Klimatyczna jest obszernym aktem prawnym, ale nie określa ona szczegółów odnośnie do technologii wodorowych. Dlatego tak ważne byłoby stworzenie ram prawnych dotyczących rozwoju gospodarki wodorowej.

Bibliografia

1. Clicinnovation, *BoH2nia*, https://clicinnovation.fi/project/both2nia/?fbclid=IwAR0EfkQsTh_K6bAzefyLgPWhqObm9Vms92Cr4KSOpNcQsfgLE4uiF3245yU (dostęp: 27.03.2022 r.).
2. Finnish Energy, *Energy Year 2021 Electricity*, styczeń 2022, https://energia.fi/files/6678/Electricity_Year_2021.pdf (dostęp: 26.03.2022 r.).
3. GASGRID, *Gasgrid and Fingrid launch a joint research project to enable the hydrogen economy*, 2021, <https://gasgrid.fi/en/2021/11/09/gasgrid-and-fingrid-launch-a-joint-research-project-to-enable-the-hydrogen-economy/> (dostęp: 25.03.2022 r.).
4. GASGRID, Guidehouse, *Hydrogen potential in Finland*, 2021, https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Gasgrid_Study-on-the-Potential-of-Hydrogen-Economy-in-Finland_ENG-FINAL.pdf (dostęp: 25.03.2022 r.).
5. GASGRID, *Our operations in brief*, <https://gasgrid.fi/en/> (dostęp: 26.03.2022 r.).
6. GRTgaz, *European Hydrogen Backbone*, <https://www.grtgaz.com/en/medias/press-releases/european-hydrogen-backbone> (dostęp: 25.03.2022 r.).
7. H2Cluster, *About us*, <https://h2cluster.fi/about-us/> (dostęp: 25.03.2022 r.).
8. https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf_national_hydrogen_roadmap_2020.pdf (dostęp: 26.03.2022 r.).
9. IEA, *Finland*, <https://www.iea.org/countries/finland> (dostęp: 26.03.2022 r.).

10. International Trade Administration, *Renewable Energy*, Trade.gov, wrzesień 2021, <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/finland-renewable-energy> (dostęp: 26.03.2022 r.).
11. Kaaja K., *Over one-half of Finland's electricity was produced with renewable energy sources in 2020*, Stat.fi, listopad 2021, https://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_en.html (dostęp: 26.03.2022 r.).
12. Kärki S., *Finland has opportunities to become the leading country in hydrogen production*, GASGRID, <https://gasgrid.fi/en/2021/12/16/finland-has-opportunities-to-become-the-leading-country-in-hydrogen-production/> (dostęp: 23.03.2022 r.).
13. Kauranen A., *Germany's Sunfire to provide equipment for Finland's green hydrogen plant*, Reuters, marzec 2022, <https://www.reuters.com/article/finland-hydrogen-sunfire-p2x-solutions/germanys-sunfire-to-provide-equipment-for-finlands-green-hydrogen-plant-idUSL5N2VP3U8> (dostęp: 22.03.2022 r.).
14. Pauku E., *How could Finland promote renewable-energy technology innovation and implementation?*, "Clean Energy" 2021, Vol. 5, Issue 3.
15. Plit H., *P2X Solutions receives public funding to build Finland's first green hydrogen production plant – A great leap towards an emission-free welfare society*, P2X, grudzień 2021, <https://p2x.fi/en/p2x-solutions-receives-public-funding-to-build-finlands-first-green-hydrogen-production-plant-a-great-leap-towards-an-emission-free-welfare-society/> (dostęp: 23.03.2022 r.).
16. Publications of the Ministry of Economic Affairs and Employment, *Finland Integrated Energy and Climate Plan*, 2019:66, 56.
17. Sarén H., Laurikko J., *National hydrogen roadmap guides finland towards carbon neutrality*, Business Finland, listopad 2020, <https://www.businessfinland.fi/en/whats-new/news/cision-releases/2020/national-hydrogen-roadmap-guides-finland-towards-carbon-neutrality> (dostęp: 06.03.2022 r.).
18. Static1, *Finland and the hydrogen economy*, Nordic West Office, 2005, https://static1.squarespace.com/static/596def8d579fb3247d0ce5f0/t/5fabfb7923c54b5343498307/1605106621300/Nordic_West+Office_Hydrogen_Report_2020.pdf (dostęp: 26.03.2022 r.).
19. Trinomics, Ludwig-Bölkow Systemtechnik, *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans*, kwiecień 2020, https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Brochure%20FCH%20Finland%20%28ID%209473037%29.pdf (dostęp: 06.03.2022 r.).

Rozdział 4.

STUDIUM PRZYPADKU – FRANCJA

Case study – France

Lidia MURIAS

Abstract: *The global interest and investment in hydrogen production or projects is relatively new. Many countries that want to use hydrogen in their own economic sectors are developing strategies and investing money from the state budget. One of these countries is France. As one of the largest countries in the European Union, it has a high demand for energy sources. France is therefore committed to the development of the hydrogen sector, which is a promising tool for achieving its strategic objectives. The main target of the energy strategy documents is the decarbonization of the economy and the achievement of a carbon free economy by 2050. The main target of this article, is a case study of the hydrogen sector in the French Republic. This country has a wide energy supply, such as nuclear power plants and renewable energy sources, which is important for the production of green hydrogen. Funds invested in hydrogen projects are also aimed at further expanding the hydrogen industry. French projects and studies are carried out not only at national, but also at local level. This issue is important enough to influence not only the energy transition, but also the competitiveness of the economy and the achievement of climate goals. Hydrogen is also a factor influencing France dependence on energy imports from other countries and competitiveness of its economy. Ownership of hydrogen technologies has a particular impact on attracting new foreign investors to the French market.*

4.1. Wprowadzenie

Szybki rozwój gospodarek wielu państw oraz rosnące zaludnienie na świecie powoduje zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną. Ma to wpływ na wytwarzanie energii, gdyż wciąż w wielu państwach do jej produkcji wykorzystuje się zasoby węgla kamiennego i brunatnego. Spalanie dużych ilości węgla, z oczywistych względów powoduje emisję dwutlenku węgla do atmosfery. Dlatego też, wiele państw prowadzi działania mające na celu redukcję ilości CO₂. Takimi działaniami jest między innymi tworzenie dokumentów strategicznych z zakresu energetyki oraz badania nad nowymi rozwiązaniami, które się do tego przyczynią. Jednym z takich elementów, w którym pokłada się duże nadzieje, jest wodór i sposoby jego wykorzystania.

Wodór od niedawna, bo od zaledwie kilku lat stanowi przedmiot zainteresowania. Jego wszechstronność wykorzystania w sektorach gospodarek wielu państw takich jak energetyka, transport i przemysł mocno przemawia za jego produk-

cją i dalszymi inwestycjami. Wodór stanowi jedno z „paliw przyszłości”, gdyż poprzez jego możliwości zastosowania, stanowić może jedną z opcji, którą będzie można zastąpić węgiel czy ropę naftową – konwencjonalne źródła energii. Szczególną uwagę zwraca możliwość produkowania wodoru z odnawialnych źródeł energii, czyli zielonego lub zdekarbonizowanego wodoru.

Jednym z państw, które aktualnie inwestuje w wodór oraz prowadzi projekty z nim związane, jest Francja. To państwo europejskie pierwsze regulacje prawne związane z transformacją energetyczną wprowadziło już w 2015 roku, poprzez ustawę o transformacji energetycznej. W tej ustawie znalazły się zapisy o osiągnięciu do 2030 roku około 30% udziału OZE w końcowym zużyciu energii i 40% udziału OZE w produkcji energii z redukcją wykorzystania paliw kopalnych o 30% do 2030 roku oraz 10% dekarbonizację gazu. Już wtedy uważano, że wodór pomoże osiągnąć te ambitne cele. Przed 2018 rokiem demonstracyjne projekty wodorowe były inicjowane przez lokalne rejony, wspierane przez ADEME, państwową agencję odpowiedzialną za realizację polityki z zakresu środowiska, energii i zrównoważonego rozwoju.

W 2018 roku przedstawiono pierwszą krajową strategię dotyczącą wodoru, tzw. Plan Hulota. Plan ten przedstawił ówczesny minister energetyki Nicolas Hulot. Strategia ta koncentrowała się na dekarbonizacji przemysłu i rozwoju mobilności wodorowej, poprzez inwestycję funduszy w wysokości 100 mln euro na wsparcie projektów z tego zakresu¹. W 2019 roku został opublikowany kolejny tego typu dokument: ustawa klimatyczno-energetyczna. Dokument ten wyznaczył kolejne cele z zakresu bezemisijnego zużycia wodoru do 2030 roku i ustanowił system Gwarancji Pochodzenia Wodoru. Najnowsza strategia wodorowa pochodzi z 2020 roku i wyznacza cele na kolejne 10 lat do 2030 roku, na które zostanie przekazane finansowanie w wysokości 7,2 mld euro.

4.2. Strategia wodorowa Republiki Francuskiej

Jednym z państw europejskich, które wspiera rozwój i inwestycje w zielone źródła energii jest Francja. Francja już w czerwcu 2018 roku przedstawiła Plan rozwoju wodoru na potrzeby transformacji energetycznej (Plan Hulota). Natomiast we wrześniu 2020 roku rząd francuski opublikował Krajową strategię rozwoju zdekarbonizowanego wodoru, która była częścią Narodowego Planu Odbudowy (France Relance), która ma założone kilka celów, między innymi dekarbonizację sektorów gospodarki, stworzenie nowych miejsc pracy i zmniejszenie zależności kraju od importu wodoru z innych państw. Był to osobny dokument, natomiast w samym Planie Odbudowy związanym z konsekwencjami pandemii COVID-19 France Relance, też znalazły się zapisy związane z wodorem. Również w innym dokumencie France 2030 z października 2021 roku, zostały zawarte zapisy dotyczące celów związanych z rozwojem francuskiego wodoru.

¹ Netherlands Enterprise Agency, *Hydrogen sector study France*, s. 9, <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022/01/Hydrogen-sector-study-France-maart-2021.pdf> (dostęp: 12.03.2022 r.).

Nową strategię wodorową opublikowano w 2020 roku z powodu konieczności dalszego rozwoju czy pobudzenia gospodarki, która zwolniła z powodu pandemii. Postrzega się to ożywienie w gospodarce Francji, jako pewną szansę, która może być wykorzystana w celu uzyskania pozycji lidera w przełomowych technologiach. Za taką technologię uważa się właśnie wodór, ale ze źródeł odnawialnych. Dla Francji wodór jest strategicznym narzędziem do przejścia na gospodarkę zeroemisyjną, docelowo do 2050 roku.

Strategia dla rozwoju zdekarbonizowanego wodoru określa wodór, jako priorytetowy obszar inwestycji dla Francji, który posiada znaczący wpływ na dziedziny funkcjonowania państwa. Po pierwsze, wodór jest czynnikiem, który zapewnia szerokie spektrum rozwiązań w zakresie dekarbonizacji przemysłu i transportu. Po drugie, poprzez jego inwestycję możliwe jest budowanie nowych sektorów przemysłu i tworzenie licznych miejsc pracy. Kolejnym powodem jest szansa na niezależność energetyczną dla Francji, gdyż wodór jest tym elementem, który wpływa na zmniejszenie zależności od importu ropy naftowej i gazu. Inwestycja w wodór i jego technologie również może wpłynąć na konkurencyjność gospodarki Francji w skali globalnej. W związku z tymi założeniami strategicznymi, konieczne jest, by państwo w pełni wspierało rozwój sektora wodorowego².

Aktualnie wodór jest produkowany przede wszystkim z paliw kopalnych, jak węgiel, gaz ziemny czy ropa naftowa. Ale wodór pozyskiwany z takich źródeł, powoduje wysokie poziomy emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Innym źródłem pozyskiwania wodoru jest jego produkcja poprzez technologię elektrolizy, przy użyciu odnawialnych źródeł energii. Wówczas wodór jest nazywany „zdekarbonizowanym”, ponieważ jego produkcja i bezpośrednie użycie nie powoduje emisji dwutlenku węgla. Dlatego też rząd Francji zobowiązał się do pomocy finansowej w celu przyspieszenia możliwości produkcyjnych wodoru poprzez elektrolizę. Francja posiada przewagę w możliwościach produkcji zielonego wodoru, ponieważ aktualny miks energetyczny państwa składa się głównie z OZE oraz energetyki jądrowej. Aktualnie ten pierwiastek we Francji jest powszechnie używany w przemyśle naftowym, rafineryjnym i chemicznym (produkcja nawozów) na poziomie około 900 tys. ton rocznie i pochodzi on z paliw kopalnych³.

Francja była jednym z pierwszych państw, które zidentyfikowało pełen potencjał wodoru, a głównie jego możliwości redukcji emisji gazów cieplarnianych, przy jednoczesnym zachowaniu konkurencyjności. Od 2018 roku Francja wspiera rozwój tego sektora i przeznaczyła fundusze w ramach programu Inwestycje dla Przyszłości (PIA) na ten cel, który zakłada wspieranie konkurencyjnej gospodarki na arenie międzynarodowej.

² Ministry for the Ecological Transition, Ministry of the Economy, Finance and the Recovery, *National strategy for the development of decarbonised and renewable hydrogen in France*, s. 4, <https://www.bdi.fr/wp-content/uploads/2020/03/PressKitProvisionalDraft-National-strategy-for-the-development-of-decarbonised-and-renewable-hydrogen-in-France.pdf> (dostęp: 12.03.2022 r.).

³ SNECI, *France and the hydrogen deployment plan*, <https://www.sneci.com/blog/france-and-the-hydrogen-deployment-plan/> (dostęp: 12.03.2022 r.).

Rozwój technologii wodorowych jest dużą szansą na przyspieszenie transformacji ekologicznej oraz stworzenie dedykowanego sektora wodorowego w gospodarce, na poziomie regionalnym, jak i na skalę europejską. W ramach francuskiej strategii wodorowej wyznaczono trzy główne cele. Po pierwsze, instalacja wystarczającej ilości elektrolizerów, które przyczyniłyby się znacząco do dekarbonizacji gospodarki. Będzie to możliwe poprzez instalację 6,5 GW mocy produkcyjnej wodoru metodą elektrolizy. Rząd francuski przewiduje wsparcie finansowe tego założenia. Kwota wsparcia publicznego wynosi 7 miliardów euro do roku 2030 oraz finansowanie w wysokości 2 miliardów euro w ramach programu „France Relance”.

Po drugie, rozwój „czystej” mobilności, szczególnie w odniesieniu do pojazdów ciężarowych; równoległe z rozwojem lądowego transportu pasażerskiego i towarowego, z wykorzystaniem wodorowych autobusów, pociągów i ciężarówek. W celu dalszego rozwoju transportu wodorowego będą kontynuowane prace nad projektami promów i statków wodnych napędzanych tego rodzaju paliwem. Kolejnym etapem rozwoju francuskiego transportu będą również prace nad projektami samolotów napędzanych wodorem, które mogłyby wejść do użytku od 2030 roku. Przewidywane jest również wsparcie wykorzystania wodoru na szczeblu lokalnym i regionalnym. Inwestycja w modernizację konwencjonalnych środków transportu jest spowodowana założonym celem zmniejszenia emisji CO₂ o ponad 6 milionów ton do 2030 roku i w celu osiągnięcia długoterminowego założenia, czyli zeroemisyjna gospodarka do 2050 roku.

Trzecim priorytetowym założeniem jest budowa francuskiego sektora przemysłowego, który to sektor tworzyłby miejsca pracy i gwarantowałby dalszy rozwój technologiczny oraz wsparcie badań i innowacji związanych z wodorem. Celem tego założenia jest stworzenie od 50 tys. do 150 tys. nowych miejsc pracy we Francji. Nowe miejsca pracy zapewnią stabilność sektorów przemysłowych i dalszy rozwój technologii, w celu utrzymania konkurencyjności gospodarki⁴. W strategii znalazły miejsce również cele związane ze wsparciem krajowych badań i rozwoju w obszarze technologii wodorowych. Strategia jest oparta na wspieraniu rozwoju i nowych możliwości wykorzystania wodoru w kraju. Stawia szereg ambitnych celów oraz wskazuje na wyzwania zaplanowane do 2030 roku.

4.3. Instrumenty i narzędzia gospodarki wodorowej Francji

Instrumentami odpowiedzialnymi za działania związane z rozwojem gospodarki wodorowej jest rząd Francji wraz z wyznaczonymi do tego ministerstwami i instytucjami państwowymi. Innymi instrumentami związanymi z wodorem są też firmy technologiczne i państwowe koncerny energetyczne jak EDF, Areva, czy francuski operator sieci przesyłowych RTE. Wszystkie te instrumenty opracowują dokumenty i strategie, mające na celu rozwój tego sektora.

⁴ Ministry for the Ecological Transition, Ministry of the Economy, Finance and the Recovery, *National strategy for the development...*, s. 6.

Jednak głównym inicjatorem nowych regulacji i organem wyznaczającym cele związanych z wodorem, jest rząd Republiki Francuskiej wraz z administracją, który w zakresie regulacji związanych z sektorem wodoru, pierwsze regulacje ustanowił już w 2015 roku. Następnie, w 2018 roku, Ministerstwo Energii Francji zaprezentowało już plan skupiający się na sektorze wodorowym. Głównymi założeniami tego planu było wytwarzanie „zielonego wodoru” na potrzeby przemysłowe, wykorzystanie wodoru do celów mobilności oraz stabilizacja sieci energetycznych.

Następnie w zaprezentowanej we wrześniu 2020 roku strategii wodorowej, przez francuskie Ministerstwo Środowiska i Ministerstwo Ekonomii, reprezentowane kolejno przez Barbarę Pompili – minister ekologii oraz Bruno Le Maire – ministra gospodarki i finansów. Dokument ten skupiony jest na wyznaczonych celach, jak dekarbonizacja produkcji wodoru i kształtu przemysłu wodorowego oraz na możliwych sposobach ich osiągnięcia⁵. W ramach tej strategii rząd przeznaczył 7,2 mld euro, w tym 2 mld euro do 2022 roku. Francja również przeznaczyła wsparcie finansowe na projekty naukowo-badawcze. Takim priorytetowym programem jest projekt „Zastosowania wodoru”, prowadzony przez Francuską Narodową Agencję Badawczą. Program ten ma wspierać badania nad nowymi generacjami technologii wodorowych – ogniwa paliwowe, zbiorniki, materiały czy elektrolizery. Przyczyni się do doskonalenia francuskich technologii z zakresu wodoru. Kwota wsparcia tego programu wynosi 65 mln euro⁶. Propozycją innego projektu od francuskiego ADEME⁷ jest stworzenie „regionalnych hubów wodorowych”. Huby zrzeszałyby władze lokalne i dostawców rozwiązań przemysłowych, które to łączyłyby różne zastosowania wodoru w przemyśle i mobilności, w celu maksymalizacji korzyści płynących z wodoru.

Poza dokumentami skupiającymi się tylko i wyłącznie na wodorze, zapisy znajdują się również w najnowszym planie inwestycyjnym „France 2030”. Plan ten zaprezentował prezydent Francji Emmanuel Macron. Znalazł się w nim cel o przeznaczeniu 8 miliardów euro na sektor energetyczny do 2030 roku. Plan ten zakłada, iż Francja stanie się liderem w produkcji zielonego wodoru oraz do 2030 roku będzie w posiadaniu co najmniej dwóch gigafabryk elektrolizerów, masowo produkujących wodór oraz technologie związane z tym sektorem⁸. Dla Francji wodór jest „technologią przyszłości”, który jest jednym z głównych narzędzi do dekarbonizacji gospodarki i sposobem na jej rozwój. Energia potrzebna do produkcji wodoru będzie produkowana z OZE oraz elektrowni jądrowych, których Francja posiada kilka i są silnie rozwinięte.

⁵ C. Randall, *France presents national hydrogen strategy*, <https://www.electrive.com/2020/09/14/france-presents-national-hydrogen-strategy> (dostęp: 12.03.2022 r.).

⁶ Ministry for the Ecological Transition, Ministry of the Economy, Finance and the Recovery, *National strategy for the development...*, s. 12.

⁷ Agencja Zarządzania Środowiskiem i Energią.

⁸ Business France, *Presentation of the “France 2030” plan*, <https://www.businessfrance.fr/discover-france-news-presentation-of-the-france-2030-plan> (dostęp: 12.03.2022 r.).

4.4. Projekty wodorowe

W celu wsparcia rozwoju francuskich technologii wodorowych, włączają się firmy i przedsiębiorstwa. Jedną z takich firm jest między innymi GRTgaz. Pomyślam z zakresu rozwoju wodoru jest projekt „Jupiter 1000”⁹ autorstwa GRTgaz, spółki zależnej ENGIE i głównego operatora przesyłu gazu. „Jupiter 1000” to projekt, który ma zaprezentować wykonywalność procesu power-to-gas¹⁰ na dużą skalę przemysłową. Projekt ten zakłada również przetestowanie wtłaczania wodoru i syntetycznego metanu do sieci przesyłowej, za pośrednictwem instalacji o mocy 1 MW do produkcji wodoru. Projekt zaakceptował francuski regulator CRE.

W maju 2020 GRTgaz ogłosił kolejny projekt, przy współpracy z CREOS – projekt „MosaHYc”. Obie firmy zakładają stworzenie sieci wodorowej, która połączy Francję i Niemcy. Celem tego projektu, pomiędzy operatorami systemów przesyłowych gazu jest utworzenie infrastruktury transportu wodoru o długości 70 km. Stanie się to poprzez modernizację istniejącej już infrastruktury przesyłu gazu¹¹.

Kolejnym z wielu działań związanych z rozwojem wodoru jest wspólny projekt „Hydrogène de France” (HDF) i Terega. Firmy te opracowują pilotażowy projekt HyGeo. Projekt ten zakłada opracowanie i dostarczenie rozwiązań dotyczących magazynowania wodoru z elektrolizy w kawernach solnych, w których wcześniej były magazynowane węglowodory. Następnie przy wykorzystaniu ogniw paliwowych, zmagazynowany wodór zostanie wykorzystany do produkcji energii elektrycznej¹².

Inna firma – GRDF, przeprowadzała w 2020 roku przetarg na projekt demonstracyjny „power-to-gas”. Miał on na celu przetestowanie wtłaczania do sieci metanu syntetycznego z wodoru, wytwarzanego w procesie elektrolizy i CO₂ pozyskanego z biometanu. GRDF zobowiązał się do wsparcia finansowego w wysokości 1,25 mln euro zwycięskiego projektu. Z przetargu wybrano trzy zwycięskie projekty:

1. Projekt „Hyaunais”, kierowany przez Storengy i rozwijany w Saint-Florentin, projekt ten umożliwi wykorzystanie wodoru do ekologicznej mobilności oraz produkcję syntetycznego metanu, przy użyciu procesu biologicznej metanizacji; projekt ten zakłada wykazanie zalet technologii „power-to-gas”, jako elastycznej usługi dla sieci elektroenergetycznej.

⁹ GRTgaz, *Jupiter 1000*, <https://www.jupiter1000.eu/> (dostęp: 12.03.2022 r.).

¹⁰ Power-to-gas – technologia polegająca wytwarzaniu gazu (metanu lub wodoru) z energii elektrycznej.

¹¹ M. Torregrossa, *MosaHYc: GRTgaz et CREOS lancent un reseau de transport Europeen 100% hydrogene*, <https://www.h2-mobile.fr/actus/mosahyc-grtgaz-creos-lancent-reseau-europeen-transport-hydrogene/> (dostęp: 12.03.2022 r.).

¹² Fuel Cells Works, *France: HDF and Terega Join Forces In Storage Of Green Hydrogen and Launch the HyGeo Project*, <https://fuelcellworks.com/news/france-hdf-and-terega-join-forces-in-storage-of-green-hydrogen-and-launch-the-hygeo-project/> (dostęp: 12.03.2022r.).

2. Oczyszczalnia ścieków Perpignan, wspierana przez metropolię Perpignan Méditerranée, projekt ten opiera się na oczyszczalni ścieków, która już wytwarza biometan i możliwe będzie uruchomienie procesu biologicznej metanizacji, w celu odzyskania CO₂, przy wykorzystaniu wodoru dostarczonego z hubu wodorowego w Port-la-Nouvelle.
3. Oczyszczalnia ścieków Pau Lescar, to projekt realizowany przez aglomerację Pau Bearn Pyrenees. Metanizacja jest związana z projektem rozwoju jednostki metanizującej na terenie obiektu, co ułatwi sfinansowanie projektu przy jednoczesnym zaoszczędzeniu na oczyszczaniu ścieków (włączanie tlenu z elektrolizera do basenów; wykorzystanie ciepła odpadowego z metanizacji do suszenia osadów)¹³.

Wodór to technologia, która konkuruje w transporcie z bateriami i aktualnie używanymi paliwami. Natomiast koszt wodoru jest wyższy w porównaniu z konwencjonalnymi paliwami. Dlatego też i w transporcie podjęto wyzwanie, aby móc obniżyć koszty jego wytwarzania. W jednym z regionów administracyjnych we Francji, Owernia-Rodan-Alpy zainwestowano w projekt budowy 14 stacji ładowania wodoru. Jest to projekt „Dolina Zero Emisji”. Natomiast inny region – Kraj Loary (Pays de la Loire) przeznaczył budżet 100 mld euro na projekty w inwestycje wodorowe do 2030 roku.

Francja również inwestuje we wspieranie inwestycji ekologicznych i wodoru, jako czystego paliwa. Francuska ADEME jest odpowiedzialna za wspieranie i rozwój czystych technologii. Dlatego też agencja ta ogłasza przetargi na projekty, które w przypadku pozytywnej oceny mogą zostać zakwalifikowane do finansowania przez państwo. Były to konkursy na projekty dotyczące między innymi:

1. Ekosystemy mobilności wodorowej – 2019,
2. Wsparcie dla pojawienia się mobilności wodorowej w sektorze kolejowym – 2020,
3. Innowacyjne projekty o zasięgu europejskim lub krajowym w zakresie projektowania, produkcji i użytkowania systemów wodorowych – 2020,
4. Ekosystemy terytorialne – 2020¹⁴.

Francuska strategia wodorowa jest silnie wspierana przez organizację France Hydrogene (kiedyś AFHYPAC). Organizacja ta skupia wszystkich francuskich aktorów wodorowych i ogniw paliwowych, w celu przyspieszenia rozwoju tego przemysłu, przy jednoczesnym wykonaniu wyznaczonych celów przez ADEME¹⁵.

Patrząc na liczbę różnych projektów dotyczących rozwoju we Francji, można wywnioskować, iż w tym państwie dostrzega się potencjał, jaki kryje wodór. Zarówno władze państwowe, lokalne wraz z organizacjami i uczelniami prowadzącymi badania w tym zakresie są zainteresowane inwestycjami w technologie

¹³ A.E. Rubio, C. Barthelemy, J. Guillemet, *Hydrogen law and regulation in France*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/france> (dostęp: 12.03.2022 r.).

¹⁴ *Ibidem*.

¹⁵ Terega, *What is the Hydrogen Plan in France?*, <https://www.terega.fr/en/lab/what-is-the-hydrogen-plan-in-france> (dostęp: 10.03.2022 r.).

wodorowe oraz jego wytwarzanie. Działania te są silnie umotywowane osiągnięciem celów założonych w narodowej strategii wodorowej do 2030 roku oraz osiągnięciem celu długoterminowego, czyli dojścia do gospodarki zeroemisyjnej do roku 2050.

4.5. Struktura produkcji energii elektrycznej we Francji

Republika Francuska jest jednym z największych państw w Unii Europejskiej (549 087 km²). Graniczy z takimi państwami jak Niemcy, Belgia, Hiszpania, Włochy i Szwajcaria. Posiada również granicę morską z Morzem Śródziemnym, Morzem Północnym oraz Oceanem Atlantyckim. Za sprawą swojego położenia, jest w posiadaniu drugiego, co do wielkości obszaru morskiego – 11 mln km² wyłącznej strefy ekonomicznej z 500 portami morskimi. 12 państwowych portów morskich obsługuje ponad 80% morskiego ruchu towarowego we Francji¹⁶.

Francja uważana jest za jedną z potęg gospodarczych, dlatego zapotrzebowanie na energię elektryczną jest ogromne. Również ludność Francji na tle innych państw europejskich nie jest mała, to około 67,5 mln¹⁷ osób, gdzie w Niemczech to około 83,2 mln osób, a w Rosji do 144 mln osób.

Aktualny miks energetyczny Francji jest skutkiem decyzji rządu podjętych w 1974 roku, po pierwszym szoku naftowym, kiedy to zadecydowano o zwiększeniu produkcji energii ze źródeł jądrowych. Budowanie nowych reaktorów było sposobem na uniezależnienie się od dostaw gazu ziemnego i ropy naftowej. W wyniku decyzji z 1974 roku, Francja posiada znaczny poziom niezależności energetycznej oraz niski poziom emisji CO₂, ponieważ około 80% produkcji energii elektrycznej pochodzi z elektrowni jądrowych i wodnych¹⁸.

Po wzroście produkcji energii elektrycznej od początku lat 70. XX wieku, aktualny poziom pozostaje stabilny wynosi około 550 TWh rocznie. Produkcja energii elektrycznej we Francji charakteryzuje się niskim poziomem emisji CO₂, głównie dzięki wykorzystaniu elektrowni jądrowych i odnawialnych źródeł energii. Strukturę produkcji energii elektrycznej Francji w 2020 roku przedstawia rys. 1.

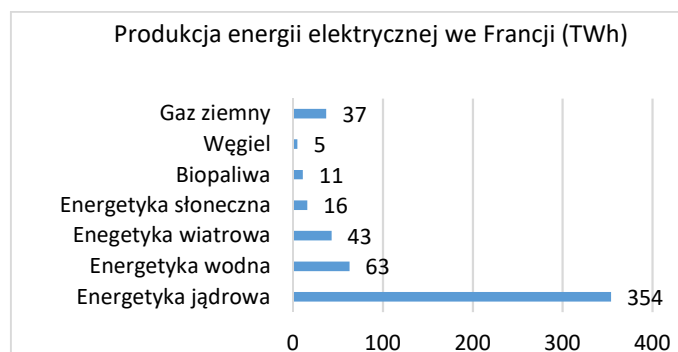
Produkcja energii elektrycznej we Francji w 2020 roku osiągnęła poziom 528 TWh. Głównym źródłem energii była energia jądrowa na poziomie 67%. Poziom ten był niższy niż zwykle, z powodu pandemii koronawirusa oraz zamknięciu dwóch reaktorów jądrowych. Kolejnym największym źródłem wytwarzania energii elektrycznej jest energia wodna – 12%, następnie gaz ziemny – 7% oraz węgiel na poziomie 1%. Poziom wytwarzania energii elektrycznej z węgla spadł

¹⁶ IEA, *France 2021*, "Energy Policy Review", s. 19, <https://www.iea.org/reports/france-2021> (dostęp: 13.03.2022 r.).

¹⁷ Institut national de la statistique et des études économiques, *Demography – Population at the beginning of the month – France*, <https://www.insee.fr/en/statistiques/serie/001641607?idbank=001641607> (dostęp: 13.03.2022 r.).

¹⁸ World Nuclear Association, *Nuclear Power in France*, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx> (dostęp: 13.03.2022 r.).

o 5% od 2010 roku, przy jednoczesnym zwiększeniu znaczenia odnawialnych źródeł energii z 80 TWh w 2010 roku do 116 TWh w 2020 roku. Energetyka wiatrowa zanotowała wzrost z 10 TWh w 2010 roku do prawie 41 TWh w roku 2020. Natomiast energia ze słońca i wiatru stanowiła 11% miks energetyczny we Francji¹⁹.



Rys. 1. Produkcja energii elektrycznej we Francji

Fig. 1. Electricity production in France

Źródło: IEA, *France 2021. Energy Policy Review*.

W 2019 roku zainstalowana moc wytwórcza we Francji wyniosła 135 GW. Energia jądrowa stanowiła 63,2 GW, drugim źródłem pod względem mocy była energia wodna na poziomie 26 GW. Natomiast energia ze słońca zanotowała duży wzrost z 0,3GW w 2009 roku do 9,4 GW. Energetyka wiatrowa zanotowała wzrost z 4,6 GW do 16,5 GW w ciągu ostatnich 10 lat. Duży spadek zanotowały moce wytwórcze z węgla, w 2019 roku Francja miała cztery elektrownie o mocy 3 GW, których plan zamknięcia miał zostać określony do roku 2022. Energia wyprodukowana z węgla stanowiła tylko 1% w roku 2020. Sektorami wykorzystującymi węgiel jest głównie przemysł ciężki²⁰.

Poziom odnawialnych źródeł energii w miksie energetycznym rośnie, jest to głównie energia słoneczna i wiatrowa, natomiast maleje poziom źródeł energii z paliw kopalnych. Jest to spowodowane warunkami ekonomicznymi oraz przyjętymi ustawami, które dotyczą zwiększenia udziału OZE oraz nowych źródeł energii (wodór) do 2030 roku.

4.6. Infrastruktura energetyczna we Francji

Zgodnie z zapisami strategii wodorowej i innych dokumentów z zakresu energetyki, głównymi źródłami produkcji wodoru miałyby być elektrownie jądrowe

¹⁹ IEA, *France 2021. Energy...*, s. 124.

²⁰ RTE, *Bilan Electrique2020*, https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020_0.pdf (dostęp: 13.03.2022 r.).

oraz odnawialne źródła energii, być może wraz z morskimi farmami wiatrowymi offshore. Prezydent Emmanuel Macron ogłosił w ostatnim czasie, iż Francja planuje budowę nowych reaktorów jądrowych w ramach strategii oraz nowe inwestycje w offshore wind. W planach jest zwiększenie do 40 GW mocy zainstalowanej do 2050 roku. Przyczyni się do wybudowania około 50 farm wiatrowych. Aktualnie Francja w swoim portfolio posiada 17 projektów offshore, na różnych etapach ich budowy. Również produkcja w elektrowniach fotowoltaicznych zostanie zwiększona do 100 GW do roku 2050, z aktualnego poziomu 12,4 GW²¹.

Pomimo planów ograniczenia wykorzystania energetyki jądrowej w miksie energetycznym, planowane jest przedłużenie funkcjonowania elektrowni jądrowych w celu osiągnięcia założonych celów energetycznych do 2030 roku oraz 2050 roku. Aktualnie w Francji pracuje 56 reaktorów jądrowych, które w 2020 roku wyprodukowały 379 500 GWh energii elektrycznej²². Natomiast jeden reaktor jest w trakcie budowy, 14 jest zamknięte na stałe. Przy takiej liczbie reaktorów byłaby możliwa instalacja elektrolizerów, które produkowałyby wodór z nadwyżek energii elektrycznej.

4.7. Magazynowanie i transport wodoru

Wyzwanie stanowi zmagazynowanie i ewentualny transport wytworzonego wodoru w elektrowniach. Jeżeli wyprodukowany wodór nie zostałby wykorzystany na miejscu jego produkcji, możliwy byłby jego transport poprzez wtlaczenie go do sieci dedykowanej dla wodoru lub do sieci już istniejących gazociągów. Innym sposobem transportu byłoby wykorzystanie transportu drogowego lub morskiego.

Wtlaczenie wodoru do sieci byłoby możliwe poprzez jego metanację lub bez jego konwersji, ale zgodnie z wymogami technicznymi. W tym zakresie opracowano już zapisy prawne, we Francuskim Kodeksie Energetycznym pod warunkiem zachowania prawidłowego funkcjonowania i zachowania poziomu bezpieczeństwa, operatorzy obsługujący infrastrukturę gazu ziemnego, gwarantują klientom i producentom gazu oraz wodoru niskoemisyjnego, prawo do dostępu do urządzeń przesyłowych i dystrybucji oraz instalacji LNG²³.

Prawo dostępu do przesyłowej sieci gazowej dla producentów zielonego i niskoemisyjnego wodoru zostało również zawarte w ustawie o energii i klimacie z listopada 2019 roku. Natomiast nie określono dotychczas warunków na podstawie, których projekt wodorowy może zostać podłączony do sieci. W razie ustalenia

²¹ P. Rapacka, *Zwrot energetyczny Francji – Macron stawia na atom i offshore wind*, <https://www.gospodarkamorska.pl/zwrot-energetyczny-francji-macron-stawia-na-atom-i-offshore-wind-62745> (dostęp: 13.03.2022 r.).

²² PRIS. Power Reactor Information System, *France*, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=FR> (dostęp: 13.03.2022 r.).

²³ Legifrance, *Code de l'énergie*, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000039370000/ (dostęp: 13.03.2022 r.).

tych warunków, muszą one zostać zatwierdzone przez Komisję Regulacji Energetyki (CRE). Na aktualnym etapie rozwoju projektów wtłaczania wodoru do sieci gazu ziemnego są projekty eksperymentalne – „GRHYD” i „Jupiter 1000”.

Planem w zakresie transportu wodoru jest również współpraca operatorów na skalę europejską. Francuscy operatorzy GRTgaz i Terega z dziewięcioma innymi operatorami w Europie, celują w utworzenie infrastruktury przesyłającej wodór, tzw. europejski „kręgosłup” wodorowy. Sieć ta miałaby długość 23 000 km do roku 2040. Większość tej sieci stanowiłyby istniejące przebudowane sieci przesyłowe gazu ziemnego, z tylko kilkoma nowo wybudowanymi²⁴.

Innym wyzwaniem z zakresu tego działań technologii wodorowych jest infrastruktura dotycząca mobilności i stacji ładowania pojazdów oraz inwestycja w wodór, jako paliwo alternatywne dla transportu zbiorowego i towarowego. We Francji projekty z tego zakresu są głównie inicjowane na szczeblu lokalnym lub regionalnym, silnie wspierane przez ADEME.

Szczególnym wyzwaniem związanym z ogólną infrastrukturą energetyczną jest jego wzmocnienie. Obecnie wybudowane już sieci przesyłowe gazu wymagają wsparcia i ewentualnej przebudowy, aby móc zachować bezpieczeństwo. W celu dalszego rozwoju istotne byłoby wybudowanie infrastruktury i sieci połączeń, specjalnie dedykowanych dla transportu wodoru. Aby móc przeprowadzić te działania, istotne jest też, aby państwo dokonało regulacji prawnych dotyczącej tego rodzaju infrastruktury oraz stworzenia ram prawnych, dotyczących przesyłu wodoru.

Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na sektor infrastruktury energetycznej jest mobilność. Wodór, jako nowe paliwo, zastępujące to z konwencjonalnych źródeł wymaga dostosowania magazynowania, dystrybucji i transportu, zarówno w transporcie lądowym, lotniczym, jak i morskim. W sektorze lotniczym zostały już podjęte kroki z tego zakresu. Największe francuskie firmy jak Airbus oraz Air France KLM wraz z regionem Ile-de-France, Agencją Choose Paris Region i Paris Airport (ADP) w 2021 roku ogłosiło inicjatywę *H2 HUB AIRPORT*. Projekt ten zakładał zbadanie możliwości wykorzystania wodoru oraz przyspieszenie dekarbonizacji sektora lotniczego. Inicjatywa ma charakter międzynarodowy²⁵.

Francja jest w posiadaniu odpowiedniej infrastruktury, która z powodzeniem może sprostać założonym, ambitnym celom produkcji wodoru oraz umożliwić przejście na gospodarkę zeroemisyjną do 2050 roku. Natomiast infrastruktura przesyłowa wodoru wymaga dalszych nakładów pracy. Konieczna byłaby modernizacja istniejących gazociągów oraz budowa nowych połączeń dedykowanych wodorowi, jeżeli Francja planuje transport tego rodzaju. Istotną kwestią jest również ustanowienie regulacji prawnych z zakresu transportu wodoru.

²⁴ L. Battoue, A. Bois-Minot, *The French Hydrogen Strategy*, <https://www.wfw.com/articles/the-french-hydrogen-strategy/> (dostęp: 27.03.2022 r.).

²⁵ Choose Paris Region, *Turning the Airport Into a Hydrogen Ecosystem*, <https://www.chooseparis-region.org/calls-for-applications/h2-hub-airport> (dostęp: 27.03.2022 r.).

4.8. Podsumowanie

Współczesny świat poszukuje nowych rozwiązań, które pomogą w walce ze zmianami klimatu i redukcji emisji CO₂. Wiele państw w celu dalszego utrzymania funkcjonowania gospodarek oraz zapewnienia dostaw energii elektrycznej poszukuje nowych rozwiązań, które by nie eksploatowały konwencjonalnych źródeł energii i środowiska. Jednym z tych narzędzi do tego celu jest właśnie wodór, posiadający szerokie zastosowanie, zarówno w produkcji energii elektrycznej czy jako paliwo w transporcie.

Republika Francuska, jako jedna z większych gospodarek świata, już od roku 2015 pracuje nad inwestycjami oraz projektami wodorowymi. Rząd francuski pracuje nad regulacjami prawnymi w tym zakresie w sposób ciągły i z dużą regularnością. Natomiast główną strategią wodorową jest dokument z 2020 roku – „Krajowa strategia rozwoju zdekarbonizowanego wodoru”, który jest częścią planu odbudowy gospodarki, w związku z pandemią COVID-19. W dokumencie tym zawarto trzy główne cele, po pierwsze dekarbonizacja gospodarki z wykorzystaniem zielonego wodoru, poprzez zainstalowanie 6,5 GW elektrolizerów produkujących wodór. Po drugie, postawienie na rozwój „czystej mobilności” głównie pojazdów ciężarowych, ale też transportu zbiorowego, jak pociągi, autobusy czy samoloty. Trzecim celem jest kontynuowanie budowy francuskiego sektora przemysłowego, przy jednoczesnym wsparciu badań i innowacji powiązanych z technologiami wodorowymi.

Głównymi narzędziami gospodarki wodorowej wykorzystywanymi przed Francją jest inicjowanie projektów wodorowych na szczeblu państwowym i lokalnym. Państwo również inwestuje fundusze – 7 mld euro na dalszy rozwój sektora wodoru czy kolejne 8 mld na samą energetykę. Państwo również wspiera wiele pilotażowych oraz innowacyjnych projektów tworzonych przez wiele instytucji francuskich jak ADEME, GRTgaz, Terega, również przy wsparciu lokalnych samorządów. Poza inwestycjami w badania rząd wprowadza oraz modernizuje regulacje prawne związane z tym sektorem gospodarki.

W strukturze produkcji energii elektrycznej Francji dominuje energetyka jądrowa oraz odnawialne źródła energii. Z racji tych źródeł produkcji będzie możliwa realizacja planów związanych z przejściem na zielony wodór, z niskoemisyjnego. Z zakresu infrastruktury energetycznej dotyczącej wodoru, Francja stoi przed wyzwaniem. W dokumentach strategicznych założono, iż transport wodoru będzie się odbywał poprzez włączanie go do istniejącej sieci gazociągów, a w przyszłości przewiduje się budowę dedykowanych połączeń dla wodoru. Natomiast, z racji nowości zagadnień związanych z wodorem, konieczne jest, aby regulacje prawne były dopracowywane, by sprostać dynamice gospodarki.

Można uznać, iż Francja posiada regularnie dopracowywane dokumenty i dokumenty dotyczące wodoru. Stanowi to podstawę do kontynuowania prac i inwestycji w tym sektorze energetyki. Poprzez posiadane fundusze i nowatorskie projekty wodorowe, możliwym będzie osiągnięcie założonych celów ze strategii do

2030 roku. Do 2050 roku Francja planuje osiągnąć gospodarkę zeroemisyjną i być może jest to możliwe. Natomiast ze względu na dynamikę i szybko zmieniające się warunki w gospodarce i na arenie międzynarodowej, mogą pojawić się wydarzenia, które w niekorzystny sposób wpłyną na realizację tego długoterminowego celu.

Gospodarka wodorowa we Francji i jej dalszy rozwój może w pozytywny sposób wpłynąć na bezpieczeństwo energetyczne państwa. Po pierwsze, jeżeli produkcja zielonego wodoru osiągnie odpowiedni poziom, będzie możliwe całkowite odejście od paliw kopalnych, co przyczyni się do osiągnięcia gospodarki zeroemisyjnej. Po drugie, poprzez produkcję zielonego wodoru przy wykorzystaniu OZE i elektrowni jądrowych, Francja będzie w stanie uniezależnić się od importu surowców energetycznych. Po trzecie, dalszy rozwój projektów wodorowych jest w stanie przyczynić się do tego, iż francuska gospodarka może stać się bardziej konkurencyjna, niż dotychczas.

Bibliografia

1. Battoue L., Bois-Minot A., *The French Hydrogen Strategy*, <https://www.wfw.com/articles/the-french-hydrogen-strategy/> (dostęp: 27.03.2022 r.).
2. Business France, *Presentation of the "France 2030" plan*, <https://www.businessfrance.fr/discover-france-news-presentation-of-the-france-2030-plan> (dostęp: 12.03.2022 r.).
3. Choose Paris Region, *Turning the Airport Into a Hydrogen Ecosystem*, <https://www.chooseparisregion.org/calls-for-applications/h2-hub-airport> (dostęp: 27.03.2022 r.).
4. Fuel Cells Works, *France: HDF and Teréga Join Forces In Storage Of Green Hydrogen and Launch the HyGeo Project*, <https://fuelcellworks.com/news/france-hdf-and-terega-join-forces-in-storage-of-green-hydrogen-and-launch-the-hygeo-project/> (dostęp: 12.03.2022 r.).
5. GRTgaz, *Jupiter 1000*, <https://www.jupiter1000.eu/> (dostęp: 12.03.2022 r.).
6. IEA, *France 2021*, "Energy Policy Review", <https://www.iea.org/reports/france-2021> (dostęp: 13.03.2022 r.).
7. Institut national de la statistique et des études économiques, *Demography – Population at the beginning of the month – France*, <https://www.insee.fr/en/statistiques/serie/001641607?idbank=001641607> (dostęp: 13.03.2022 r.).
8. Legifrance, *Code de l'énergie*, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000039370000/ (dostęp: 13.03.2022 r.).
9. Ministry for the Ecological Transition, Ministry of the Economy, Finance and the Recovery, *National strategy for the development of decarbonised and renewable hydrogen in France*, <https://www.bdi.fr/wp-content/uploads/2020/03/PressKitProvisionalDraft-National-strategy-for-the-development-of-decarbonised-and-renewable-hydrogen-in-France.pdf> (dostęp: 12.03.2022 r.).
10. Netherlands Enterprise Agency, *Hydrogen sector study France*, <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022/01/Hydrogen-sector-study-France-maart-2021.pdf> (dostęp: 12.03.2022 r.).
11. PRIS. Power Reactor Information System, *France*, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=FR> (dostęp: 13.03.2022 r.).

12. Randall C., *France presents national hydrogen strategy*, <https://www.electrive.com/2020/09/14/france-presents-national-hydrogen-strategy> (dostęp: 12.03.2022 r.).
13. Rapacka P., *Zwrot energetyczny Francji – Macron stawia na atom i offshore wind*, <https://www.gospodarkamorska.pl/zwrot-energetyczny-francji-macron-stawia-na-atom-i-offshore-wind-62745> (dostęp: 13.03.2022 r.).
14. RTE, *Bilan Electrique2020*, https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020_0.pdf (dostęp: 13.03.2022 r.).
15. Rubio A.E., Barthelemy C., Guillemet J., *Hydrogen law and regulation in France*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/france> (dostęp: 12.03.2022 r.).
16. SNECI, *France and the hydrogen deployment plan*, <https://www.sneci.com/blog/france-and-the-hydrogen-deployment-plan/> (dostęp: 12.03.2022 r.).
17. Terega, *What is the Hydrogen Plan in France?*, <https://www.terega.fr/en/lab/what-is-the-hydrogen-plan-in-france> (dostęp: 10.03.2022 r.).
18. Torregrossa M., *MosaHYc:GRTgaz et CREOS lancent un reseau de transport Europeen 100% hydrogene*, <https://www.h2-mobile.fr/actus/mosahyc-grtgaz-creos-lancent-reseau-europeen-transport-hydrogene/>(dostęp: 12.03.2022 r.).
19. World Nuclear Association, *Nuclear Power in France*, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx> (dostęp: 13.03.2022 r.).

Rozdział 5.

STUDIUM PRZYPADKU – HISZPANIA

Case study – Spain

Piotr LESZCZYŃSKI

***Abstract:** Today, in the context of climate change, many countries are aiming to decarbonize their economic sectors. Realizing this intention in the energy transition will be possible through the use of green hydrogen as a substitute for today's fossil fuels. Spain will play a particularly important role in the hydrogen market that is taking shape today, as it aims to produce green hydrogen for its own use, as well as for the European Union, by 2050. In addition, Spain has great potential to carry out a rapid energy transformation of the country. The implementation of the Spanish Hydrogen Strategy could contribute to Spain becoming a leader in green hydrogen production and sales.*

5.1. Wprowadzenie

Współcześnie energetyka odgrywa znaczącą rolę w kształtowaniu polityki państw, będąc jednocześnie kluczowym czynnikiem oddziałującym na relacje międzynarodowe i geopolitykę. Zmiany dotyczące sposobu wytwarzania energii i poszukiwania nowych ekologicznych źródeł stwarzają szansę na modyfikację dotychczasowego międzynarodowego układu sił. Jednym z innowacyjnych paliw, które obecnie zyskuje na znaczeniu i ma szansę stać się game changerem przyszłości jest wodór¹. Jako produkt ekologiczny jego produkcja i wykorzystanie są kluczowe dla realizacji i dopełnienia transformacji energetycznej. Jednocześnie wymiana handlowa tym surowcem spowoduje powstanie nowych zależności i wpływów na arenie międzynarodowej.

W związku z tym, zastosowanie wodoru w państwach Unii Europejskiej ma charakter strategiczny i perspektywiczny. Wskazuje na to Strategia Wodorowa Unii Europejskiej, która zakłada, że udział zielonego wodoru do 2050 r. w jej koszyku energetycznym wzrośnie z 2% do 13–14%, natomiast w przypadku wykorzystania go tylko do celów energetycznych, nastąpi przewidywany wzrost do

¹ Ministerio de Defensa, *Energía y Geostrategia 2020*, Instituto Español de Estudios Estratégicos Comité Español del Consejo Mundial de la Energía Club Español de la Energía, Madryt 2020, s. 71.

ponad 23%². W odniesieniu do prognoz Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (IRENA) w 2050 r. prawdopodobnie 30% zapotrzebowania na energię będzie zaspokajane poprzez produkcję wodoru. W optymalnym scenariuszu 2/3 tego surowca będzie wodorem zielonym, natomiast 1/3 wartości będzie stanowił wodór niebieski³. Wysoki potencjał wodoru wynika z jego perspektyw, ponieważ może on być zarówno nośnikiem, surowcem, paliwem i magazynem energii. W konsekwencji tego w Strategii Wodorowej UE przewiduje się, że produkt ten będzie istotny w dekarbonizacji dużej części zużycia energii, a także przysłuży się m.in. dekarbonizacji procesów przemysłowych⁴. Plan w zakresie realizacji powyższych założeń formułuje trzy kluczowe etapy.

Pierwszy z nich w latach 2020–2024 zakłada zainstalowanie elektrolizerów z odnawialnych źródeł energii o łącznej mocy przynajmniej 6 GW. Drugi etap w latach 2025–2030 zakłada, że istotną kwestią będzie rozwój mocy produkcyjnych do co najmniej 40 GW. W tym okresie wodór ma stać się integralnym elementem systemu energetycznego, równocześnie będąc wykorzystywany w procesach przemysłowych, jak i do kwestii magazynowych. Ostatni trzeci etap przypada na lata 2030–2050, w których to technologie wodorowe najprawdopodobniej osiągną wysokie zaawansowanie, co będzie skutkowało wykorzystaniem ich w pozostałych wysokoemisyjnych sektorach gospodarki⁵.

5.2. Analiza Strategii Wodorowej Hiszpanii i określenie celów gospodarki wodorowej do 2050 roku

Strategia Wodorowa Hiszpanii, w dużej mierze opiera się na założeniach Strategii Wodorowej Unii Europejskiej. Jednakże Hiszpania jako państwo członkowskie wyróżnia się na tle innych krajów mając ambitne plany w zakresie produkcji zielonego wodoru. Zamierzenia te spowodowane są osiągnięciem możliwych rezultatów w przyszłości. Szczególnie w tym zakresie należy wziąć pod uwagę, że jeden cykl inwestycyjny w domenę zielonej energii trwa około 25 lat. W związku z tym realną szansą jest możliwe napędzenie gospodarki i wprowadzenie innowacji po zaistniałym kryzysie spowodowanym pandemią COVID-19⁶.

Strategia Wodorowa Hiszpanii została podzielona na trzy główne etapy czasowe z nakreśleniem odpowiednich celów. Pierwszy z nich trwa od 2020 do 2024 roku. Jest to etap, który może być określony mianem wdrożeniowego, ponieważ

² Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu, Bruksela 2020, s. 2.

³ International Renewable Energy Agency, *Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor*, Abu Dhabi 2022, s. 23.

⁴ Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Strategia w zakresie wodoru..., s. 1.

⁵ *Ibidem*, s. 7.

⁶ Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Strategia w zakresie wodoru..., s. 2–3.

ma przygotować Hiszpanię do wprowadzania dalszych rozwiązań w drugiej fazie czasowej. Co jest ważną kwestią, pierwsze dwa etapy są skierowane do rozwoju zielonego wodoru w Hiszpanii na własne potrzeby. Spowodowane jest to tym, że w 2020 r. kraj ten wyprodukował 500 000 ton wodoru, jednakże 99% produkcji stanowił wódz szary. Ponadto surowiec ten był produkowany głównie na potrzeby przemysłu. Dominującym sektorem były rafinerie wykorzystujące 70% wodoru, na drugim miejscu znalazł się przemysł chemiczny wykorzystujący 25%, natomiast pozostałe ilości wodoru przeznaczone były dla sektora metalurgicznego i innych. W związku z tym kluczowym założeniem jest rozpoczęcie budowy elektrolizerów o minimalnej mocy produkcyjnej od 300 do 600 MW⁷. W tym samym czasie w UE mają zostać zainstalowane elektrolizery o mocy 6 GW⁸. Oznacza to, że Hiszpania, sama może osiągnąć 10% celu wyznaczonego dla całej Unii Europejskiej w tym samym czasie. Jednocześnie, co warto podkreślić, planowana produkcja wodoru ma odbywać się w dolinach wodorowych lub klastrach wodorowych.

Drugi etap Strategii Wodorowej Hiszpanii to plan przeznaczony na lata 2025–2030. Związany jest on z większą intensyfikacją działań w różnych obszarach. W związku z tym nacisk kładziony będzie nie tylko na produkcję, ale również na obszary przemysłu i mobilności, które będą wykazywały większe zapotrzebowanie na wodór. W kwestii produkcyjnej Hiszpania planuje uruchomić elektrolizery o łącznej mocy do 4 GW⁹. W tym samym czasie cel Unii Europejskiej zakłada utworzenie mocy produkcyjnych na poziomie 40 GW¹⁰. Jednocześnie szczególną rolę przypisuje się sektorowi transportowemu poprzez rozwój stacji wodorowych, zwiększenie liczby floty autobusów, lekkich i ciężkich pojazdów napędzanych wodorem, a także wprowadzeniu nowych wodorowych połączeń kolejowych. Ponadto ważny aspekt przypisuje się roli magazynowania, ponieważ wówczas ma nastąpić wykorzystanie nadwyżek energii do produkcji wodoru. Strategia do roku 2030 ma podlegać ponownym analizom co trzy lata w celu oceny postępów wyżej wymienionych działań, z możliwością wprowadzania zmian.

Określone cele Strategii Wodorowej Hiszpanii do roku 2030 zostały przedstawione na rys. 1.

⁷ Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable, Madryt 2020, s. 5.

⁸ Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Strategia w zakresie wodoru..., s. 6.

⁹ Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Hoja de Ruta..., s. 5.

¹⁰ Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Strategia w zakresie wodoru..., s. 7.



Rys. 1. Cele Strategii Wodorowej Hiszpanii do 2030 r.

Fig. 1. Objectives of the Spanish Hydrogen Strategy to 2030

Źródło: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Hoja de Ruta..., s. 42.

Jednocześnie trzeci etap przewidziany jest do realizacji od roku 2030 do roku 2050. Ze względu na kluczowe znaczenie dwóch pierwszych etapów, nie określono szczegółowych celów do końca tego etapu w związku z rozwojem zielonego wodoru. Przyjmuje się jednak, że surowiec ten w Hiszpanii ma stać się elementem zapewnienia dostaw energii po konkurencyjnych cenach. Spowodowane ma być to znacznym wzrostem zainstalowanych mocy wytwórczych w odnawialnych źródłach energii, a co się z tym wiąże jednocześnie ma towarzyszyć spadkowi ceny. Dużą rolę ma odegrać tutaj położenie geograficzne Hiszpanii, w której to warunki pogodowe mają działać na jej korzyść. W Strategii Wodorowej Hiszpanii założono, że w związku z powyższą sytuacją cena wodoru stanie się konkurencyjna i będzie również elementem dekarbonizacji transportu morskiego, lotnictwa i przemysłu wymagającego zastosowania wysokotemperaturowych procesów. Ponadto ze względu na położenie geopolityczne Hiszpania zakłada, że stanie się eksporterem odnawialnego wodoru do Europy, gdyż jego zużycie zacznie zdecydowanie rosnąć, a zapotrzebowanie rynku wewnętrznego będzie zaspokojone. Co jest kluczowe dla podejścia tego państwa do tworzenia przyszłego rynku wodorowego, Hiszpania nie wyraża chęci stworzenia systemu sprzedaży wodoru szarego, ze

względu na możliwe zakłócenie rozwoju zielonego wodoru. Perspektywa sprzedaży wodoru po roku 2030 stwarza dla Hiszpanii geopolityczną szansę w perspektywie rozwijającego się rynku wodoru Unii Europejskiej¹¹.

5.3. Określenie instrumentów, narzędzi gospodarki wodorowej

Istotną kwestią Strategii Wodorowej Hiszpanii jest określenie narzędzi, jakimi będą osiągnane wyznaczone cele. Należy wspomnieć, że racje narodowe Hiszpanii w zakresie produkcji zielonego wodoru są ambitne, w związku z tym państwo to przewiduje szereg możliwości wsparcia w tej domenie. Ponadto Hiszpania w sektorze wodorowym upatruje możliwości innowacji swojej gospodarki, a także szansy wzmocnienia pozycji na arenie międzynarodowej, w związku z czym domena ta będzie odgrywała istotną rolę w polityce państwa.

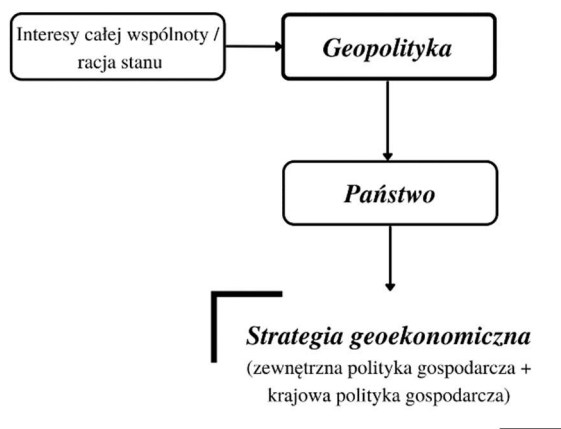
Wobec powyższych planów kluczowym aspektem wsparcia projektów wodorowych będą kwestie finansowe. Technologia wodorowa jest w początkowej fazie powstawania i nie osiągnęła jeszcze swojej dojrzałości technologicznej, co powoduje, że każde rozpoczęcie badań, projektów czy budowy infrastruktury wodorowej będzie bardzo kosztowne. Co warto podkreślić, Hiszpanię w zakresie geoeconomicznym, a co się z tym wiąże – również finansowym cechuje podejście realistyczne, które można utożsamiać z tradycyjnym pojęciem merkantylistycznym, lub państwa rozwojowego. Zasadniczą cechą tej teorii jest między innymi to, że państwo odgrywa najważniejszą rolę w polityce, określaniu celów narodowych i wsparciu długofalowych przemian gospodarczych. Oznacza to, że to państwo jest siłą dominującą, a gospodarka i instrumenty finansowe służą jako narzędzia realizowania celów geopolitycznych¹². Friedrich List, prekursor teorii realizmu, uważał ponadto, że państwo jako najsilniejszy podmiot powinno wspierać całe branże lub sektory gospodarki, co sprowadza się również do pojęcia ochrony przed silniejszymi przedsiębiorstwami czy gospodarkami¹³. W tak rozumianej teorii realizmu wyłania się pewien model geoeconomiczny, który odzwierciedla rolę i wpływ państwa na określanie strategii geoeconomicznej. Kluczowym elementem jest racja stanu, która określana jest na podstawie położenia geopolitycznego, w tym środowiska międzynarodowego. Nadrzędność geopolityki oddziałuje na państwo, które w ramach tworzenia zewnętrznej i wewnętrznej polityki gospodarczej tworzy długofalową strategię geoeconomiczną¹⁴. Omawiany model economiczny przedstawia rys. 2.

¹¹ International Renewable Energy Agency, *La economía del hidrógeno apunta a una nueva dinámica de poder mundial*, Abu Dhabi 2022, s. 1.

¹² T.G. Grosse, *Paliwo dla dominacji. O economicznych podstawach supremacji geopolitycznej*, Instytut Studiów Politycznych PAN, Warszawa 2020, s. 30.

¹³ Por. F. List, *Political and Cosmopolitical Economy* [w:] *The Theoretical Evolution of international political economy*, red. G.T. Crane, A. Amawi, 1997, s. 48–54.

¹⁴ T.G. Grosse, *Paliwo dla dominacji...*, s. 33.



Rys. 2. Model geoeconomii w ujęciu realizmu

Fig. 2. A model of geoeconomics in terms of realism

Źródło: T.G. Grosse, *Paliwo dla dominacji.**O ekonomicznych podstawach supremacji geopolitycznej,*
Instytut Studiów Politycznych PAN, Warszawa 2020, s. 33.

W Strategii Wodorowej Hiszpanii ważną rolę odgrywają instrumenty finansowe, w tym projekty B+R+I. Do najważniejszych z nich można zaliczyć: Proyectos CIEN, Misiones Ciencia e Innovación, Plan MOVES II, lub Programas de la Secretaría General de Industria y de la Pequeña y Mediana Empresa de apoyo financiero a la industria. W większości cechą wspólną projektów jest to, że są skierowane do przedsiębiorstw prywatnych czy osób prawnych. Jednakże kluczowym aspektem w części z nich jest wymóg, dotyczący udziału w konsorcjum biznesowym przynajmniej 1 firmy z domeny publicznej. Powoduje to zachowanie udziału środków publicznych w kwestii rozwoju rynku wodorowego. Wyżej wymienione projekty dotyczą badań przemysłowych, eksperymentalnych prac rozwojowych, dofinansowania na programy pomocowe w zakresie promowania alternatywnych źródeł energii w transporcie lub są przeznaczone na poprawę konkurencyjności przemysłu i reindustrializacji¹⁵.

Analogicznie ważnym aspektem finansowania pozostają instrumenty z obszaru Unii Europejskiej. W ramach najważniejszych zostały wymienione Fundusz Innowacji, Europejski Zielony Ład, Horyzont Europa, Europejski sojusz na rzecz czystego wodoru i inne. Hiszpania zakłada możliwość pozyskania środków z kierunku europejskiego przez rodzime przedsiębiorstwa, co umożliwiłoby znaczny rozwój rynku wodorowego w tym kraju. Jednocześnie w Strategii Wodorowej Hiszpanii podkreślana jest rola narodowych przedsiębiorstw, w tym energetycz-

¹⁵ Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Hoja de Ruta..., s. 46–49.

nych i motoryzacyjnych. Działanie to jest istotne ze względu na możliwość tworzenia technologii przez dane koncerny w przyszłości, a co się z tym wiąże, z ich sprzedażą i potencjalną przewagą na innych rynkach¹⁶.

Istotne dla samej Strategii Wodorowej i przyszłych projektów wodorowych jest poparcie społeczeństwa. W tym zakresie Hiszpania, również jak w kwestiach finansowych, przewiduje zastosowanie działań o charakterze realistycznym. Główną koncepcją jest tzw. strategiczny konstruktywizm, który polega na mobilizacji w zakresie działań społecznych i identyfikacji zagrożeń. Jednocześnie poprzez powyższe działania, władza polityczna i inne instytucje, uczestniczą w kreowaniu kultury strategicznej państwa. W działaniach powyższej koncepcji stosuje się debaty społeczne, informowanie obywateli poprzez środki masowego przekazu w celu uprawomocnienia obranego celu. Zamierzenie to ma charakter strategiczny w odniesieniu zarówno do zatwierdzenia idei na arenie krajowej jak i międzynarodowej¹⁷. W powyższych czynnościach główny udział biorą instytucje państwowe i media, które jednocześnie mają realny wpływ na kształtowanie kultury strategicznej państwa¹⁸. Działania te realizowane będą poprzez stworzenie przez Instytut Dywersyfikacji i Oszczędzania Energii (IDAE) punktu informacyjnego dla wszystkich odbiorców. Ponadto przewidywane są szkolenia zawodowe dla osób, których praca związana będzie z wodorem. Jednocześnie w Hiszpanii kluczowym elementem będą kwestie edukacyjne, zarówno na uczelniach wyższych czy w szkołach średnich¹⁹.

Trzecim rodzajem instrumentu są kwestie prawne. Hiszpania pod tym względem planuje zmiany we własnym prawodawstwie. Mają one dotyczyć głównie kwestii energetycznych, tak aby w ich ramach powstała synergia umożliwiająca łatwiejszą realizację zamierzonych celów. Synchronicznie Hiszpania wraz z Portugalią są wnioskodawcami o obniżeniu cen energii elektrycznej. Obniżenie to miałyby dotyczyć Unii Europejskiej, gdzie za 1 MWh obowiązywałaby cena 180 euro²⁰. Co więcej, w Strategii Wodorowej Hiszpanii zaznacza się istotność stworzenia regulacji w zakresie celów, oznakowania i gwarancji pochodzenia wodoru.

5.4. Struktura produkcji energii elektrycznej

Kluczowym aspektem wodoru w zakresie jego wykorzystania jest sposób jego wyprodukowania. Wodór jako wektor energii, nie jest jej pierwotnym źródłem i w związku z tym wymaga pewnego wkładu energetycznego. „Strategia

¹⁶ *Ibidem*, s. 49–53.

¹⁷ Por. N. Jabko, *Playing the Market: A Political Strategy for Uniting Europe, 1985–2005*, Cornell University Press, Ithaca 2006

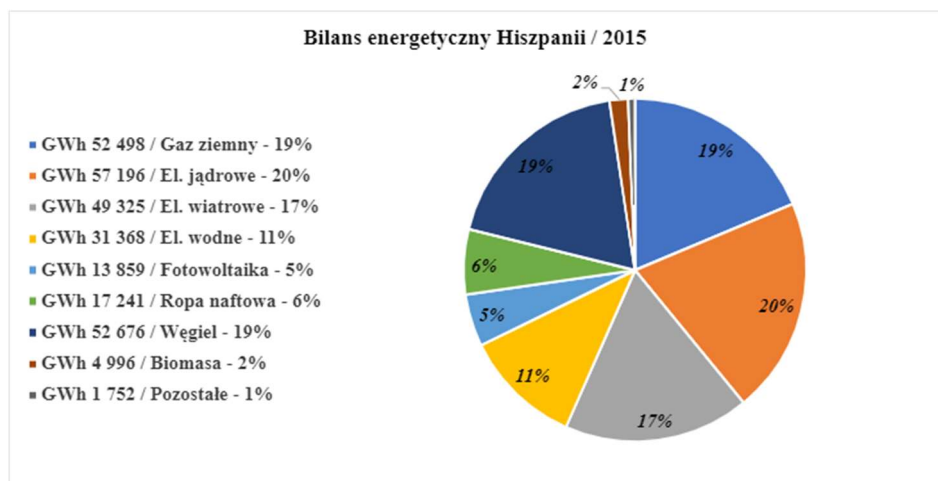
¹⁸ J.S. Lantis. *Strategic culture from Clausewitz to constructivism* [w:] Defense Threat Reduction Agency United States of America, 2006, s.21.

¹⁹ Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Hoja de Ruta..., s. 34–35.

²⁰ El Salto, *España y Portugal propondrán limitar el precio de la electricidad a 180 euros megavatio*, <https://www.elsaltodiario.com/electricidad/espana-portugal-propondran-limitar-precio-electricidad-180-euros-megavatio> (dostęp: 28.03.2022 r.)

w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu”, zakłada, że priorytetem i przyszłością UE jest produkcja wodoru odnawialnego, czyli pozyskanego głównie z energii wiatrowej i słonecznej. Założenie to jest najbardziej zbliżone do celów neutralności klimatycznej. Sytuacja ta sprowadza się do okoliczności, w której wódor pozyskany z nie ekologicznych źródeł energii, w perspektywie długoterminowej będzie dyskwalifikowany na rynku Unii Europejskiej²¹.

W związku z powyższą ideą transformacja energetyczna i geostrategiczne położenie Hiszpanii nabierają nowego znaczenia, ponieważ warunki naturalne tego kraju, stwarzają dobre predyspozycje do rozwoju odnawialnych źródeł energii. W następstwie tego w Hiszpanii powstały dwa kluczowe dokumenty w zakresie realizacji transformacji energetycznej. Pierwszy z nich to Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), który określa zakres zmian w latach 2021–2030. Natomiast drugą strategią o charakterze długoterminowym jest Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (Długoterminowa Strategia Dekarbonizacji), z planem działania do roku 2050²². Punktem wyjścia dla optymalnego scenariusza odchodzenia od paliw kopalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii w PNIEC był bilans energetyczny Hiszpanii z 2015 r. Dane te przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Bilans energetyczny Hiszpanii w 2015 r.

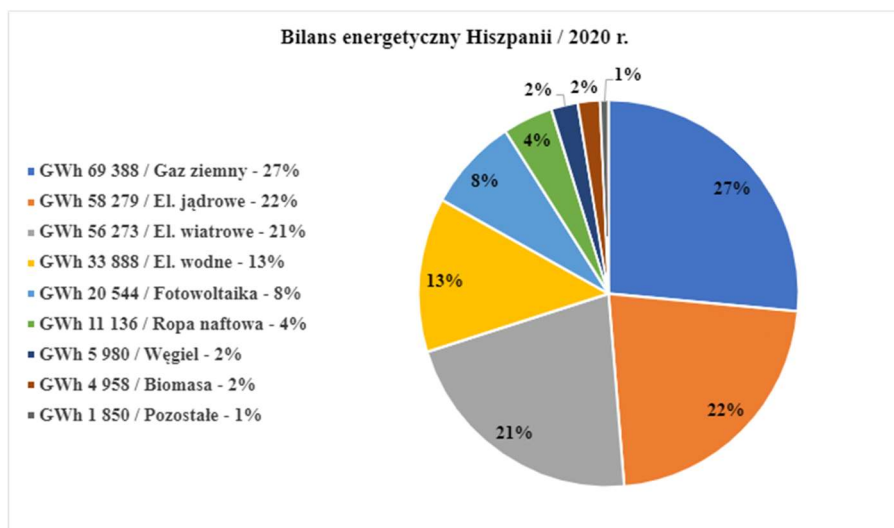
Fig. 3. Spain's energy balance in 2015

Źródło: opracowanie własne na podstawie: danych z International Energy Agency, *World Energy Balances Highlights 2021* oraz Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *Borrador Actualizado del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021–2030*, s. 286–287.

²¹ Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Strategia w zakresie wodoru..., s.11.

²² Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *Libro La Energía en España 2019*, Madryt 2022, s.10.

Analizując rys. 3. można zaobserwować, że największy udział w bilansie energetycznym Hiszpanii w 2015 r. miała energetyka jądrowa wytwarzając odpowiednio 20% energii elektrycznej w kraju. Jednocześnie na podobnym poziomie drugie miejsce zajęły gaz ziemny i węgiel wytwarzając odpowiednio po 19% zapotrzebowania. Czwarte miejsce pod względem wielkości produkcji zajęły elektrownie wiatrowe z ogólnym wynikiem 17%. Oznacza to, że cztery nośniki energetyczne w 2015 r. w Hiszpanii odpowiadały łącznie za 75% wytworzonej energii. Jednocześnie aż dwa z nich (węgiel i gaz ziemny) są paliwami kopalnymi, które nie są ekologiczne i nie przyczyniały się do dekarbonizacji systemu elektroenergetycznego. Wobec tej sytuacji Hiszpania określiła stopniowe odchodzenie od paliw kopalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii. Zauważalny jest fakt, że w perspektywie krótko i średnioterminowej nie można zrezygnować z możliwości wytwórczych w elektrowniach jądrowych, gdyż działanie to negatywnie wpłynęłoby na sytuację gospodarczą Hiszpanii. Z tej przyczyny elektrownie jądrowe będą wytwarzały energię elektryczną do momentu znacznego zredukowania użycia paliw kopalnych w systemie elektroenergetycznym tego kraju. Dobrym odzwierciedleniem powyższej polityki jest bilans energetyczny z 2020 roku.



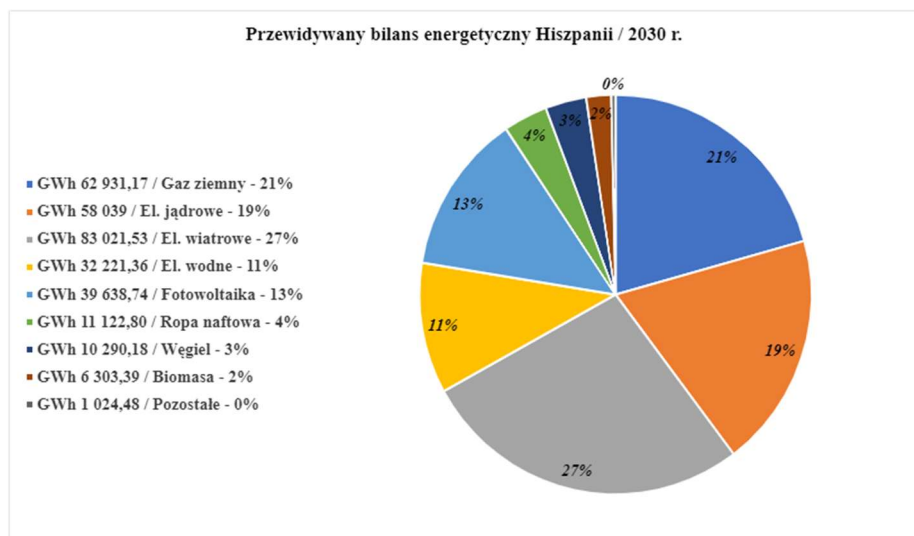
Rys. 4. Bilans energetyczny Hiszpanii w 2020 r.

Fig. 4. Spain's energy balance in 2020

Źródło: opracowanie własne na podstawie: danych z International Energy Agency, *World Energy Balances Highlights 2021*.

Na rysunku 4. przedstawiającym bilans energetyczny Hiszpanii w 2020 r. można zauważyć drastyczny spadek udziału węgla w miksie energetycznym kraju, aż o 17%. Decyzja odchodzenia od tego nośnika w pierwszej kolejności najprawdopodobniej jest spowodowana faktem największej emisyjności CO₂ tego surowca

wobec pozostałych nośników. Krytyczne wycofanie tego produktu z udziału w rynku skutkowało jednocześnie wzrostem udziału innych nośników w bilansie energetycznym. Produkcja energii elektrycznej została oparta w pierwszej kolejności o 27% udziału gazu ziemnego, który stał się paliwem przejściowym Hiszpanii w transformacji energetycznej. Jednocześnie w tym samym czasie moce wytwórcze w odnawialnych źródłach energii wzrosły łącznie o 9% wyprzedzając 8% wzrost udziału gazu ziemnego wobec bilansu energetycznego z 2015 r. Prognoza dokumentu Plan Nacional Integrado de Energía y Clima zakładał stopniowe odejście od paliw kopalnych głównie węgla i ropy naftowej i przygotowanie gospodarki Hiszpanii na dalsze zmiany po 2030 r. Prognoza bilansu energetycznego została przedstawiona na rys. 5.



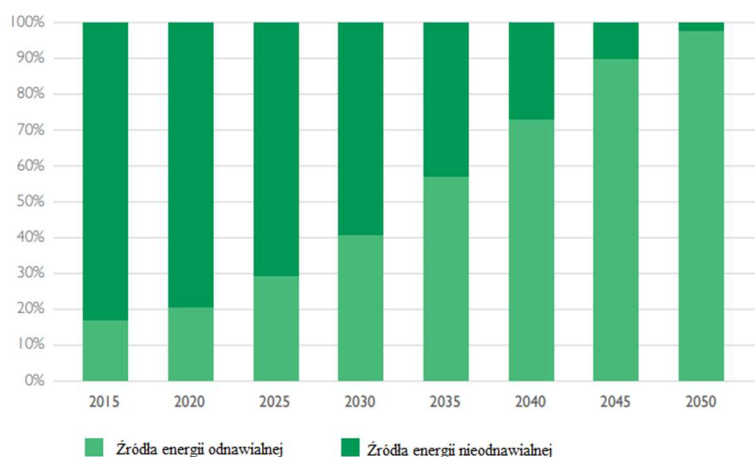
Rys. 5. Przewidywany bilans energetyczny Hiszpanii w 2030 r.

Fig. 5. Spain's projected energy balance in 2030

Źródło: opracowanie własne na podstawie: danych z Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *Borrador Actualizado...*, s. 286–287.

W odniesieniu do prognozy bilansu energetycznego z 2030 r. można wywnioskować, że Hiszpania osiągnęła zakładany cel redukcji dla węgla i ropy naftowej już w 2020 r. Jednocześnie w zakładanym bilansie energetycznym wobec obecnej sytuacji musi nastąpić dalszy wzrost udziału elektrowni wiatrowych i fotowoltaiki w mocach wytwórczych. Jednakże na przestrzeni kolejnych 9 lat do 2030 r. prawdopodobne jest, że cele te zostaną osiągnięte, a nawet przekroczone wobec zakładanego scenariusza. Sytuacja ta jest korzystna dla Hiszpanii wobec planów produkcji zielonego wodoru, który będzie najprawdopodobniej potrzebował nadwyżek energetycznych z bilansu energetycznego.

Drugim ważnym dokumentem strategicznym, jednakże określającym działania na okres długoterminowy jest Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo, która zakłada całkowite przejście systemu energetycznego Hiszpanii na odnawialne źródła energii do 2050 r. Ważnym elementem tego dokumentu jest deklaracja przez Hiszpanię całkowitej rezygnacji produkcji energii elektrycznej z elektrowni jądrowych do 2036 roku²³. Wobec takiego stanu rzeczy, Hiszpania będzie potrzebowała nowego nośnika energetycznego, który w porównaniu do odnawialnych źródeł energii będzie stabilnym źródłem. Najbardziej prawdopodobnym scenariuszem jest to, że wodór wraz z gazem ziemnym zastąpi również energetykę jądrową jako stabilizator systemu energetycznego. W momentach nadwyżki energetycznej będzie on magazynem energii, natomiast w chwilach mniejszej mocy wytwórczej z OZE, stanie się stabilizatorem systemu.



Rys. 6. Scenariusz udziału energii odnawialnej w końcowym zużyciu energii do 2050 r.

Fig. 6. Scenario for the share of renewable energy in final energy consumption by 2050

Źródło: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050: Estrategia a largo plazo para una economía, española, moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050*, Madryt 2020, s. 24.

Na rysunku 6. można zaobserwować scenariusz z Długoterminowej Strategii Dekarbonizacji dotyczący stopniowego zwiększania energii odnawialnej w zużyciu końcowym.

²³ R. Roca, *El Gobierno dará vida a la nuclear: el apagón se llevará a cabo entre 2025 y 2036*, <https://elperiodicodelaenergia.com/el-gobierno-dara-vida-a-la-nuclear-el-apagon-no-se-lleva-a-cabo-nunca-antes-de-2025-y-seguira-produciendo-hasta-2036/> (dostęp: 27.08.2022 r.).

5.5. Charakterystyka infrastruktury energetycznej na potrzeby gospodarki wodorowej

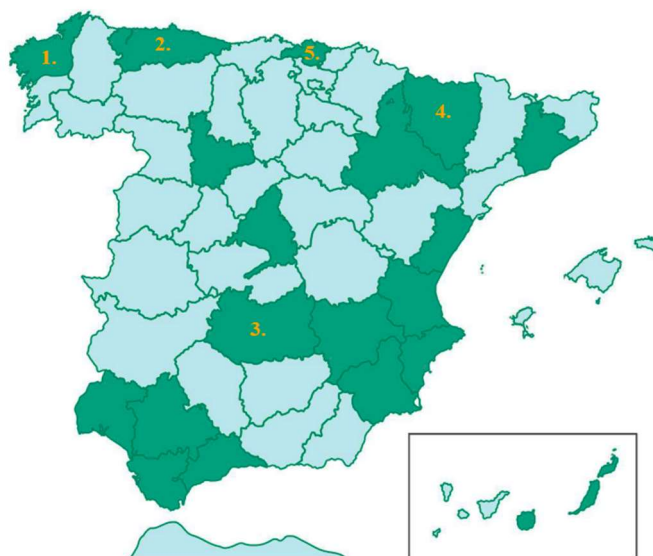
Zarówno w perspektywie krótkoterminowej, jak i długoterminowej ważną rolę dla wodoru będzie miała infrastruktura energetyczna. Współcześnie rynek wodoru dopiero podlega kształtowaniu i ma charakter lokalny, ponieważ około 85% wodoru gazowego produkuje się i zużywa na miejscu w ramach pracy przedsiębiorstw²⁴. Jednakże dzisiejsze współtworzenie infrastruktury, ukształtuje przyszły rynek wodoru.

Wobec powyższego zadania w Strategii Wodorowej Hiszpanii został położony nacisk od pierwszego etapu na rozwój, elektrolizerów. Produkcja wodoru planowana jest w najbliższym otoczeniu przemysłu, tak aby nie stanowiło to przeszkody logistycznej. W głównej mierze wodór początkowo będzie wytwarzany w tzw. dolinach wodorowych, jednakże perspektywy handlu wodorem i wykorzystania go jako magazynu energii, powodują, że równie ważnym zadaniem będzie rozwój infrastruktury, przesyłowej, a także magazynowej. W perspektywie czasu 2030 r. wodór zielony może zacząć konkurować z innymi rodzajami wodoru, poprzez co popyt znacznie wzrośnie. W zakresie logistycznym według Strategii Wodorowej Hiszpanii istotnym elementem będzie rozwój samochodów ciężarowych czy rurociągów. Natomiast w zakresie odbioru i dystrybucji wodoru z ośrodków produkcyjnych najważniejszą rolę odegra infrastruktura konwersji, rekonwersji i magazynów.

Na obecnym etapie w Strategii Wodorowej Hiszpanii rozpoczęto realizację projektów wodorowych, które będą kluczowe dla całej gospodarki wodorowej. W dokumencie zawarto informacje o realizacji 5 projektów, jednakże w pierwszym zakresie ma zostać zrealizowanych 20 projektów zielonego wodoru. Rysunek 7. przedstawia lokalizację geograficzną wyżej wspomnianych przedsięwzięć. Ponumerowane regiony odpowiadają następującym regionom i celom projektów:

1. W miejscowości Coruna planowane jest rozpoczęcie produkcji wodoru odnawialnego z przeznaczeniem do różnych zastosowań przemysłowych.
2. W regionie Asturii wodór zostanie wykorzystany do produkcji stali.
3. W mieście Ciudad Real wodór będzie przeznaczony do produkcji nawozów.
4. W mieście Huesca planowana jest produkcja wodoru odnawialnego z jego późniejszym wykorzystaniem w mobilności.
5. W prowincji Vizcaya zostanie rozpoczęta produkcja paliw syntetycznych z odnawialnego wodoru.

²⁴ International Renewable Energy Agency, *Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor*, Abu Dhabi 2022, s.33.



Rys. 7. Regiony Hiszpanii wraz z projektami odnawialnego wodoru (stan na 2020 r.)

Fig. 7. Spanish regions with renewable hydrogen projects (as of 2020)

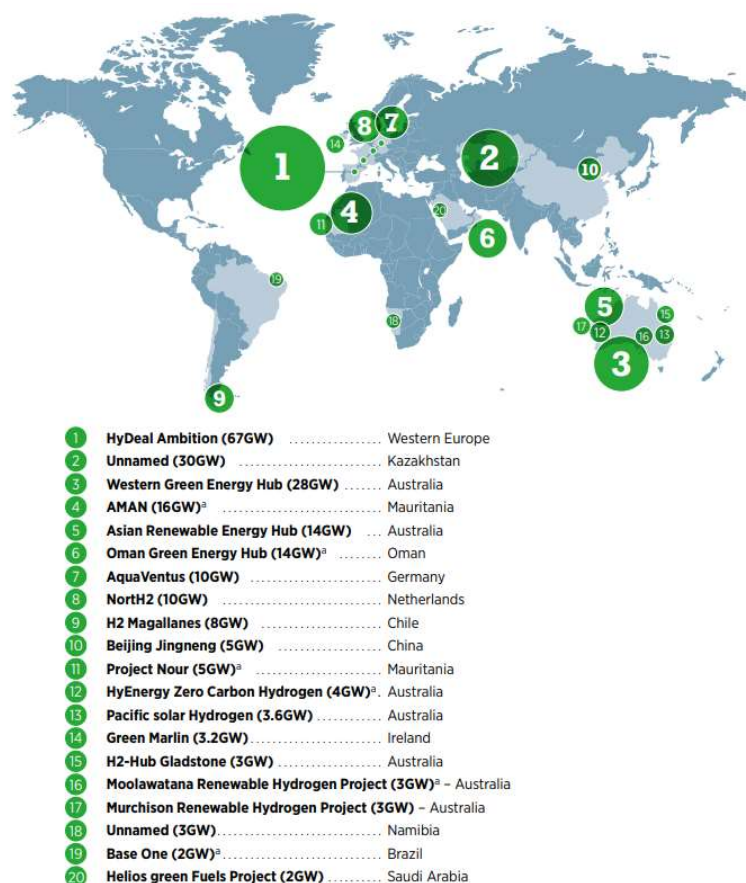
Źródło: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Hoja de Ruta..., s. 58.

Projekt HyDeal według Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (IRENA) jest największym projektem produkcji zielonego wodoru na świecie. Zainstalowana moc w elektrolizerach ma wynieść 67 GW i zostać osiągnięta po 2030 roku. Oznacza to, że projekt ten wychodzi znacząco poza ramy Strategii Wodorowej Europy, osiągając wartość o 67,5% wyższą dla celu w 2030 roku. Ponadto jest to również przykład ambicji m.in. Hiszpanii w zakresie stawania się jednym z liderów wodorowych w Unii Europejskiej. Inicjatywa ta współtworzona jest przez różne przedsiębiorstwa, ale na obecnym etapie większość stanowią firmy hiszpańskie. Natomiast terytorialnie projekt związany będzie z trzema gospodarkami europejskimi takimi jak: Hiszpania, Francja i Niemcy. Jednocześnie w Europie realizowanych jest kilka innych projektów o wysokiej wartości wytwórczej dla wodoru²⁵.

Geopolityczne położenie Hiszpanii sprawia, że graniczy ona z regionem Afryki Północnej, w której również planowane są projekty wodorowe. Ze względu na panujące warunki naturalne opłacalność produkcji energii odnawialnej może być w perspektywie czasu większa niż w Europie. Dla przykładu 4. i 11. największy projekt wodorowy na świecie ma zostać zrealizowany w Mauretanii. Według IRENA łączna wartość zainstalowanych mocy do produkcji wodoru może wynieść 21 GW. Wartość ta według innych źródeł dla samego projektu AMAN wynosi

²⁵ International Renewable Energy Agency, *Geopolitics of the Energy...*, s. 87.

30 GW²⁶, z kolei dla projektu Nour wynosi 10 GW²⁷. Natomiast odległość pomiędzy Madrytem a Nawkszutem wynosi niecałe 3500 km. W związku z tym może okazać się opłacalne wybudowanie rurociągów dla transportu wodoru. Przy transportowanej ilości 1,5 mln ton wodoru rocznie i odległości do 4000 km handel wodorem w ramach takiego projektu byłby opłacalny²⁸. Stwarza to szansę dla Hiszpanii stania się hubem wodorowym dla Europy w okresie długoterminowym. Rysunek 8. przedstawia 20 największych projektów zielonego wodoru na świecie.



Rys. 8. 20 największych na świecie projektów zielonego wodoru

Fig. 8. The world's top 20 green hydrogen projects

Źródło: International Renewable Energy Agency, *Geopolitics of the Energy...*, s. 87.

²⁶ Argus, *Mauritania expands green H2 ambitions with new deal*, <https://www.argusmedia.com/en/news/2258395-mauritania-expands-green-h2-ambitions-with-new-deal> (dostęp: 28.03.2022 r.).

²⁷ A. Shahkar, *Mauritania announces Project Nour- a 10GW green hydrogen project*, <https://www.h2bulletin.com/mauritania-announces-project-nour-a-10gw-green-hydrogen-project/> (dostęp: 28.03.2022 r.).

²⁸ International Renewable Energy Agency, *Geopolitics of the Energy...*, s. 87.

5.6. Podsumowanie

Przyjęcie Strategii Wodorowej przez Unię Europejską przyczyniło się do wytyczenia drogi dla innych państw związku. Hiszpania realizując transformację energetyczną i przyjmując własną Strategię Wodorową, ma ambicje stać się ważnym podmiotem na arenie międzynarodowej w długiej perspektywie czasu. Koncepcja ta ma swoje uzasadnienie, kiedy to zielony wodór stanie się konkurencyjny wobec nieodnawialnego wodoru poprzez osiągnięcie niższego lub równomiernego kosztu produkcji. Wówczas to zapotrzebowanie na ten produkt znacznie wzrośnie. W związku z tym państwa, które dzisiaj rozpoczną produkcję, budowanie infrastruktury, jak również rozwój własnego rynku wodorowego, staną się liderami tego sektora. Jednocześnie handel nowym surowcem przyczyni się do utworzenia nowych łańcuchów dostaw i zależności. Hiszpania ma jedno z najlepszych warunków do rozwoju odnawialnych źródeł energii, co wiąże się z późniejszą możliwością produkcji wodoru z tych nośników energetycznych. Wobec tego cena zielonego wodoru w Hiszpanii według Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej może stać się tańsza już w 2026 roku.

Drugim państwem z możliwością osiągnięcia takiego wyniku jest Szwecja, pozostałe państwa europejskie taki cel według prognozy osiągną w późniejszych latach. Hiszpania planuje w pierwszych dwóch etapach Strategii Wodorowej skupić się na własnym rynku, zastępując stopniowo wodór szary. Jednocześnie prawdopodobnie Hiszpania nie będzie dążyć do handlu wodorem do roku 2030, w związku z dużą ilością wodoru szarego na rynku. Wymiana handlowa mogłaby zakłócić ambitny proces dotyczący zielonego wodoru. Jednakże powstanie takiego rynku w ocenie Hiszpanii jest możliwe po 2030 r., gdzie popyt na wodór zielony zacznie znacząco rosnać. Wobec tego Hiszpania planuje eksport tego produktu do innych państw, stając się jednym z wodorowych liderów Europy.

Bibliografia

1. Argus, *Mauritania expands green H2 ambitions with new deal*, <https://www.argusmedia.com/en/news/2258395-mauritania-expands-green-h2-ambitions-with-new-deal> (dostęp: 28.03.2022 r.)
2. El Salto, *España y Portugal propondrán limitar el precio de la electricidad a 180 euros megavatio*, <https://www.elsaltodiario.com/electricidad/espana-portugal-propondran-limitar-precio-electricidad-180-euros-megavatio> (dostęp: 28.03.2022 r.)
3. Grosse T.G., *Paliwo dla dominacji. O ekonomicznych podstawach supremacji geopolitycznej*. Instytut Studiów Politycznych PAN, Warszawa 2020.
4. International Energy Agency, *World Energy Balances Highlights 2021*, Paris 2022.
5. International Renewable Energy Agency, *Geopolitics of the Energy Transformation the Hydrogen Factor*, Abu Dhabi 2022.
6. International Renewable Energy Agency, *La economía del hidrógeno apunta a una nueva dinámica de poder mundial*, Abu Dhabi 2022.
7. Jabko N., *Playing the Market: A Political Strategy for Uniting Europe, 1985–2005*, Cornell University Press, Ithaca 2006.

8. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, *Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu*, Bruksela 2020.
9. Lantis J.S., *Strategic culture from Clausewitz to constructivism* [w:] Defense Threat Reduction Agency United States of America, 2006.
10. List F., *Political and Cosmopolitical Economy* [w:] *The Theoretical Evolution of international political economy*, red. G.T. Crane, A. Amawi, Paperback, January 1997.
11. Ministerio de Defensa, Energía y Geostrategia 2020, *Instituto Español de Estudios Estratégicos Comité Español del Consejo Mundial de la Energía Club Español de la Energía*, Madryt 2020.
12. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050: Estrategia a largo plazo para una economía, española, moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050*
13. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable*, Madryt 2020.
14. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, *Libro La Energía en España 2019*, Madryt 2022.
15. Roca R., *El Gobierno dará vida a la nuclear: el apagón se llevará a cabo entre 2025 y 2036*, <https://elperiodicodelaenergia.com/el-gobierno-dara-vida-a-la-nuclear-el-apagono-se-lleva-a-cabo-nunca-antes-de-2025-y-seguira-produciendo-hasta-2036/> (dostęp: 27.08.2022 r.).
16. Shahkar A., *Mauritania announces Project Nour- a 10 GW green hydrogen project*, <https://www.h2bulletin.com/mauritania-announces-project-nour-a-10gw-green-hydrogen-project/> (dostęp: 28.03.2022 r.).

Rozdział 6

STUDIUM PRZYPADKU – AUSTRIA

Case study – Austria

Maciej PASZYN

Abstract: *The aim of this chapter is to outline the processes and activities that have made Austria an important point on the European map of the hydrogen economy. This process is due to the fact that over the last decade, Austria has become not only a country where renewable energy sources are the basis of the energy mix, but also a leading producer of green hydrogen. It happened thanks to the existing technologies related to renewable energy sources (hydrology, photovoltaics, biomass), which can be a source of hydrogen using appropriate procedures. Leading energy and transmission companies in Austria, involved in the acquisition of renewable energy sources, have the resources and technologies to produce, transmit and store green hydrogen. The environmental awareness of politicians, business circles and the general public has resulted in the majority of Austrian citizens supporting changes in ecology and energy. Thanks to this, business and universities, local governments and central authorities can develop and support initiatives related to the hydrogen economy. This is despite the fact that Austria, unlike other European Union countries, still does not have its own Hydrogen Strategy. However, the already existing Austrian and European legal acts allowed to undertake a number of activities thanks to which the country became an important producer of hydrogen. This fuel has been used and will be used in energy, transport, heating and other areas where energy from hydrogen can be used. The activities and projects described in the following text are probably the beginning of activities that, despite the costs and difficulties, will lead to a clean environment for the citizens of Austria and other countries.*

6.1. Wprowadzenie

Problem powstawania i funkcjonowania gospodarki opartej na użyciu odnawialnych źródeł energii, funkcjonuje w przestrzeni politycznej, gospodarczej i społecznej krajów UE, od początku istnienia tej instytucji. Znalezienie niskoemisyjnych źródeł energii to jeden z etapów budowania gospodarki i państwa przyjaznego środowisku, w którym żyjemy. Austria z racji swojego położenia i topografii, jest krajem, w którym OZE zdominowały energetykę. Po 2015 roku rozpoczęto kolejny etap budowy gospodarki niskoemisyjnej, a być może i zeroemisyjnej. Jest to gospodarka oparta na wodorze, konkretnie na tzw. zielonym wodorze, uzyskanym z odnawialnych źródeł energii.

6.2. Analiza Strategii Wodorowej Austrii

W 2018 r. austriacki rząd rozpoczął prace nad „austriacką strategią wodorową”, na czele której miało stanąć austriackie Federalne Ministerstwo Działań na rzecz Klimatu, Środowiska, Energii, Mobilności, Innowacji i Technologii. Zawierania polityczne doprowadziły do wyboru nowego rządu z udziałem konserwatywnej Austriackiej Partii Ludowej i Partii Zielonych. Doprowadziło to do jeszcze większego skupienia się na produkcji energii odnawialnej. Jednak pomimo bardziej ambitnych celów klimatycznych, wodór nie znalazł się w agendzie politycznej¹. Austriacka strategia wodorowa istnieje jako szkic i była konsultowana na poziomie landów. I tu cele uzyskały aprobatę przedstawicieli krajów związkowych.

Austriacka strategia jest dopiero opracowywana, miała się ukazać w 2021 roku – jednak informacje wskazują, że wydanie strategii przeciągnie się prawdopodobnie do początku III kwartału 2022 r. Opóźnienie wynikać może z faktu, że od roku 2020 nowa koalicja OVP i Zielonych próbuje stworzyć dokument dotyczący strategii wodorowej Republiki, choć obie partie w porozumieniu dot. powołania rządu zobowiązały się do stworzenia takiej ustawy. Brak jasnej strategii wodorowej grozi Austrii stratami w kilku obszarach. Duże ilości wodoru będą potrzebne w przemyśle, mobilności, dostawie ciepła i stabilizacji sieci elektrycznej. Pokrycie zapotrzebowania wyłącznie ze źródeł krajowych nie będzie możliwe.

Dlatego też pod względem prawnym wyznacznikiem działania na polu tworzenia gospodarki wodorowej są akty UE i prawodawstwo Republiki, dotyczące funkcjonowania poszczególnych aspektów tej działalności.

Od roku 2017 uchwalono kilka aktów prawnych UE dotyczących tworzenia gospodarki wodorowej. Należą do nich Renewable Energy Directive – RED I (2009), RED II (2018). W RED II umieszczono propozycję dla państw członkowskich stanowiącą o rozszerzeniu list gwarancji pochodzenia (Guarantee of Origins) o gaz ze źródeł odnawialnych, m.in. wodór. Zawarta w RED definicja OZE wyklucza traktowanie zdekarbonizowanych gazów (tj. chociażby „niebieskiego” wodoru) za zeroemisyjne źródło energii. W ramach pakietu Fit For 55 (propozycja legislacyjna KE opublikowana 14.07.2021 r.) znaleźć możemy definicję zielonego wodoru jako paliwa odnawialnego (wraz z certyfikacją). Ponadto zakłada ona osiągnięcie 50% udziału zielonego wodoru w konsumpcji przemysłowej².

W ramach Fit For 55 (z 14.07.2021 r.) wprowadzono rozwiązanie Carbon Border Adjustment Mechanism Fit For 55, który ma wprowadzić opłatę węglową dla produktów importowanych spoza UE, tak aby uwzględnić generowany ślad węglowy (obecnie faza przejściowa uwzględnia tylko emisje bezpośrednie).

¹ M. Selenic, *Hydrogen in Austria: Waiting for a strategy*, “Balkan Green Energy News” 2021, 16 November.

² D. Kryczki, *Rozwój gospodarki wodorowej w UE i państwach członkowskich. Środowisko regulacyjne i finansowe*, https://ungc.org.pl/wp-content/uploads/2021/12/Rozwo%CC%81j_gospodarki_wodorowej.pdf, s. 11.

CBAM docelowo może także objąć produkcję wodoru, będąc bodźcem dla zwiększenia produkcji H₂ w UE – jednak w proponowanej pierwszej fazie wdrożenia mechanizmu nie ma jeszcze mowy o uwzględnieniu importu wodoru³. Z kolei Directive on Alternative Fuels Infrastructure wyróżnia wodór jako nośnik energii o dużym potencjale w obszarze transportu; dyrektywa zawiera ramowy plan wdrażania infrastruktury wodorowej, zakłada ona dostępność jednej stacji wodorowej co 150 km w ramach sieci TEN-T. Nowe standardy emisji dla pojazdów zawiera ReFuel EU Aviation, Fuel EU Maritime Fit For 55. Wprowadzenie tej dyrektywy oznacza faktyczny zakaz rejestracji samochodów spalinowych po 2035 r. Działanie to ma otworzyć rynek dla e-mobility oraz rozwiązań wodorowych⁴. Ponadto wprowadza nowe standardy dla paliwa lotniczego i paliwa dla statków, w tym wymogi wzrostu udziału paliw odnawialnych w konsumpcji paliwa przez te sektory, także wodoru.

Wspólne Przedsięwzięcie na rzecz Ogniw Paliwowych i Wodoru (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), ustanowione w 2008 r., jest pierwszym ilustracyjnym przykładem instrumentu partnerstwa publiczno-prywatnego w ramach Europejskiego Strategicznego Planu w dziedzinie Technologii Energetycznych (European Strategic Energy Technology Plan), znanego głównie pod nazwą SET-Plan⁵. Jej głównym celem jest przyspieszenie rozwoju technologii ogniw paliwowych i technologii wodorowych w Europie, aby umożliwić ich komercjalizację w latach 2010–2020. W dniach 15–16 listopada 2010 r. ogłoszono zaproszenia do składania wniosków, w partnerstwie publiczno-prywatnym z budżetem wynoszącym prawie 220 mln EUR, który zostać miał zainwestowany w projekty badawcze, które zostaną wybrane w czterech obszarach zastosowań, infrastruktury transportowej i tankowania; produkcja i dystrybucja wodoru; stacjonarne wytwarzanie energii; mikroogniwa paliwowe, pojazdy do transportu materiałów i rozwiązania w zakresie zasilania awaryjnego. Z kolei piąty obszar zastosowań koncentruje się na zagadnieniach przekrojowych przydatnych w przypadku kilku rodzajów zastosowań, w szczególności w celu wyeliminowania barier nietechnicznych, takich jak opracowanie ram monitorowania i oceny technologii oraz modelowanie finansowe⁶. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking zakończyło działalność 29 listopada 2021 r. Jego następcę, Clean Hydrogen JU, utworzono 30 listopada 2021 r. w celu przejęcia dotychczasowego portfolio i dalszego rozwoju europejskiego łańcucha wartości w zakresie bezpiecznych i czystych technologii wodorowych. Obecne członkostwo obejmuje Komisję Europejską i 64 firmy, od

³ *Ibidem*, s. 11.

⁴ *Ibidem*.

⁵ SET-Plan, to sposób współpracy z państwami członkowskimi, przemysłem, środowiskiem naukowym i podmiotami finansowymi w celu wprowadzenia na rynek nowych technologii energetycznych (znany w Polsce jako Horyzont 2020), przy jednoczesnym inwestowaniu w badania i rozwój w dłuższej perspektywie (Horyzont 2050). Obecnie jest uznawany za technologiczny filar polityki energetycznej i klimatycznej UE.

⁶ FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), *Development of business cases for fuel cells and hydrogen. Applications for regions and cities*, 2017.

międzynarodowych po małe i średnie przedsiębiorstwa, a także 54 uniwersytety i instytuty badawcze, zatrudniające ponad 2000 naukowców specjalistów w dziedzinie ogniw paliwowych i wodorowych.

18 marca 2022 r. grupa zadaniowa ds. pilotażowej europejskiej przestrzeni badawczej ds. zielonego wodoru przedstawiła strategiczny plan badań i innowacji (SRIA), którego celem jest przyspieszenie konkurencyjnej europejskiej gospodarki wodorowej. Eksperti z całej Europy wspólnie zidentyfikowali najpilniejsze pytania badawcze dotyczące ekologicznego wodoru na poziomie europejskim i podsumowali je w strategicznym programie badań i innowacji. W proces zaangażowana była również Komisja Europejska oraz przedstawiciele wielu krajów europejskich, nauki, przemysłu i społeczeństwa obywatelskiego⁷.

European Agenda Process on Green Hydrogen to pilotażowa inicjatywa Europejskiej Przestrzeni Badawczej, która została podjęta w ramach dostosowania Europejskiej Przestrzeni Badawczej (ERA) podczas niemieckiej Prezydencji w Radzie UE w 2020 r. i w ścisłej współpracy z krajami partnerskimi trio prezydencji Rady UE, Portugalii i Słowenii⁸. Rozwój pilotażowego działania EPB „odnawialny wodór” w obszarze badań i innowacji znajduje również odzwierciedlenie w działaniu 11 Agendy Polityki EPB na lata 2022–2024 „ERA na rzecz zielonej transformacji.

6.3. Określenie instrumentów, narzędzi gospodarki wodorowej

Obecnie nie istnieją żadne ramy prawne dotyczące wyłącznie wodoru. Ustawodawstwo dotyczące austriackiej energetyki, ustawa o branży i organizacji elektroenergetycznej oraz ustawa o przemyśle gazowym również prawie nie wspomina o technologiach związanych z wodorem. Zaledwie kilka aktów prawnych uchwalonych przez parlament austriacki poruszało sprawę OZE. Były to m. in:

- 1) Ustawa o transporcie towarów niebezpiecznych (Gefahrgutbeförderungsgesetz) – uwzględnia wodór w zakresie m.in. transportu,
- 2) Ustawa o urządzeniach ciśnieniowych (Druckgerätegesetz) – uwzględnia wodór w zakresie m.in. transportu,
- 3) Ustawa o taryfach drogowych (Bundesstraßen-Mautgesetz) – niższe taryfy dla pojazdów napędzanych wodorem,
- 4) Reforma podatkowa z 2019 roku (Steuerreformgesetz I 2019/20) wprowadziła ulgi i zwolnienia podatkowe dla wodoru⁹.

⁷ Komisja Europejska, *Joint EU initiative on Green Hydrogen presents its Strategic Research & Innovation Agenda*, Bruksela, 2022, https://ec.europa.eu/info/news/joint-eu-initiative-green-hydrogen-presents-its-strategic-research-innovation-agenda-2022-mar-23_pl (dostęp: 12.04.2022 r.).

⁸ ERA Portal Austria, *Strategic Research Agenda for a European Hydrogen Economy published*, 2022, <https://era.gv.at/news-items/strategic-agenda-for-a-european-hydrogen-economy-published> (dostęp: 12.04.2022 r.).

⁹ D. Kryczki, *Rozwój gospodarki wodorowej...*

W celu wsparcia projektów wodorowych stworzono w Austrii Klima- und Energie Fonds – wygospodarowany przez rząd Austrii fundusz zapewniający wsparcie finansowe dla firm angażujących się w zrównoważone technologie w energetyce i prowadzących badania w tym zakresie; finansowano z niego także inicjatywy wodorowe¹⁰. Początkowo planowano przeznaczyć na projekty wodorowe 1 500 mln EUR, finansowanie było przewidziane przez projekt ustawy Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz. Powstał także Krajowy plan na rzecz energii i klimatu (NECP), który przewiduje inwestycje w technologie wodorowe na poziomie 3,82 mld EUR ze źródeł publicznych (ale nie unijnych), prywatnych i z „zielonych” instrumentów finansowych, nie określa jednak udziału poszczególnych źródeł w całkowitej kwocie¹¹.

Dopiero w lipcu 2021 r. wprowadzono ustawę o ekspansji energii odnawialnej („REEA”). Została ona uchwalona przez parlament austriacki. REEA jest najważniejszym aktem prawnym w dziedzinie energii w Austrii od dziesięcioleci. Spodziewano się, że wodór będzie odgrywał główną rolę w REEA. Podjęto dopiero pierwsze kroki, jeśli chodzi o wprowadzenia dotacji na rozwój technologii dla gazów odnawialnych, w tym na przemianę energii elektrycznej w wodór. W sumie na ten cel będzie dostępnych rocznie 40 mln euro dotacji, Pomoc będzie udzielana w formie dotacji inwestycyjnych, które pokryją do 45% kosztów budowy każdego zakładu. Dotacje mogą być wyższe, jeśli wodór zostanie wykorzystany do wspierania stabilności sieci¹².

Jednym z głównych osiągnięć w prawodawstwie dotyczącym wodoru jest dotowanie zakładów elektrolizy do produkcji ekologicznego wodoru. Budowa instalacji elektrolizy do konwersji energii elektrycznej na wodór lub gaz syntetyczny o mocy min. 1 megawata (MW) może być dofinansowana z dotacji inwestycyjnej. Co istotne, finansowanie jest wykluczone w przypadku elektrowni, które są budowane i obsługiwane przez operatorów i sieci, które dodają wodór do gazu ziemnego w publicznej sieci gazowej.

6.4. Określenie celów gospodarki wodorowej do 2050 roku oraz sposobu ich osiągnięcia

Austria ma ambitne cele, co do przyszłości odnawialnych źródeł energii. Do 2030 r. kraj ten chce pozyskiwać całą energię elektryczną z odnawialnych źródeł energii. Kolejnym krokiem ma być neutralność klimatyczna osiągnięta do 2040 r. Oznacza to, że do 2030 r. roczną produkcję energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii należy zwiększyć o 27 terawatogodzin (TWh), 11 TWh z fotowoltaiki, 10 TWh z wiatru, 5 TWh z hydroenergetyki i 1 TWh z biomasy. Zgodnie z rządowym programem do 2030 roku Austria zamierza wyprodukować

¹⁰ *Ibidem*.

¹¹ *Ibidem*, s. 37.

¹² M. Selenic, *CMS Expert Guide to hydrogen energy law and regulation in Austria*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/austria> (dostęp: 12.04.2022 r.).

5000 GWh zielonego gazu (w tym wodoru). Wodór będzie odgrywał coraz większą rolę w realizacji ambitnych celów klimatycznych. W związku z zapotrzebowaniem na zielony wodór do 2025 roku austriacka strategia wodorowa przewiduje instalacje na poziomie krajowym o mocy 200 MW, a do 2030 roku 1–2 GW mocy elektrolizy¹³.

Najważniejszym wydarzeniem w rozwoju gospodarki wodorowej jest publikacja Austriackiej Strategii Wodorowej, która ma nastąpić w 2022 roku. Częścią strategii mają być:

- 1) Rozwój technologii wodorowej specjalnie dla sektorów gospodarki i transportu, aby Austria stała się wiodącym krajem wodorowym.
- 2) Wdrożenie Centrum Ochrony Klimatu i Wodoru jako klastra badań, innowacji i technologii, aby pozycjonować Austrię jako pioniera w dziedzinie energii odnawialnej i wspierać austriacką gospodarkę eksportową oraz
- 3) Rola Austrii wśród krajów rozwijających OZE:
 - a) pionier w wytwarzaniu energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii,
 - b) lider innowacji w technologii wodorowej.

W przyszłości Austria ma zamiar połączyć strategię wodorową ze wsparciem i modernizacją rozwoju budownictwa mieszkaniowego. Chodzi o stopniowe dostosowanie ogrzewania i chłodzenia budynków do odnawialnych źródeł energii. Działania te podejmowane będą w zurbanizowanych ośrodkach, gdzie obecnie dysponuje się odpowiednią infrastrukturą, zwiększone zostanie wykorzystanie zielonego wodoru, w szczególności w elektrociepłowniach. Wprowadzone mają zostać programy wsparcia i dofinansowania dla właścicieli budynków, którzy chcą inwestować w ciepło ze źródeł innych niż gaz ziemny i olej opałowy.

Z produkcją wodoru wiążą się następujące wyzwania: niepewność popytu – obecnie produkcja wodoru o niskiej emisji dwutlenku węgla na skalę komercyjną jest niewielka. Za kilka lat okaże się, jaki będzie popyt ze strony konsumentów. Wiemy, że cena odgrywa dużą rolę w ewentualnym wykorzystaniu. Brak struktury regulacyjnej i politycznej – przepisy i polityka dotyczące wodoru pozostają w tyle za początkowym wdrożeniem niskoemisyjnej produkcji wodoru. Elementy procesu produkcji, transportu, przechowywania i dystrybucji wodoru często wchodzą w zakres różnych przepisów i regulacji, podczas gdy inne aspekty pozostają bez jasnych regulacji. Brak fizycznej infrastruktury do dystrybucji i magazynowania – aby w pełni wykorzystać zdolność niskoemisyjnego wodoru do dekarbonizacji systemu energetycznego i zużycia energii, potrzebna jest efektywna infrastruktura do dystrybucji i magazynowania. Zdolność do przechowywania wodoru oznacza, że zielony wodór może być wytwarzany w czasach nadmiaru energii odnawialnej, a następnie magazynowany do czasu, gdy będzie potrzebny, na przykład w przypadku gwałtownego wzrostu zapotrzebowania na energię. Potrzebna jest infrastruktura dystrybucyjna, aby zapewnić, że niskoemisyjny wodór może być wy-

¹³ A. Fedorska, *Ciepłownictwo w centrum uwagi austriackiej strategii wodorowej*, „Rzeczpospolita” z 6.11.2020.

korzystywany do zaspokojenia zapotrzebowania na energię poza miejscem produkcji.

Każde z tych wyzwań zwiększa złożoność i ryzyko związane z inwestycją i rozwojem takich projektów, przynajmniej na początku. Ponadto fakt, że niskoemisyjny wodór to rosnący i rozwijający się sektor o wielu zastosowaniach, oznacza, że obecna produkcja i związana z nią technologia prawdopodobnie szybko się rozwiną, gdy już się uruchomi szereg projektów realizowanych obecnie w Austrii. Niektóre z nich zostaną omówione w dalszej części rozdziału.

6.5. Struktura produkcji energii elektrycznej

Austria, jako kraj o słabym nasłonecznieniu i małym potencjale energetycznym wiatru posiada, z racji położenia, potencjał do rozwoju hydroenergii. Topografia Republiki, liczne górskie rzeki powodują, że większość energii zużywanej w Austrii pochodzi z elektrowni wodnych o stosunkowo niskim potencjale mocy wytwórczych. Jak podawała w czerwcu 2020 roku „Rzeczpospolita”, W Austrii istnieje 4300 elektrowni wodnych¹⁴. Jedyne 3036 z nich ma moc powyżej 0,1MW, co uzasadnia ich funkcjonowanie w ramach systemu energetycznego. Wkład pozostałych elektrowni w produkcję energii jest niewielki. Według Ministerstwa Środowiska tylko jedna na pięć austriackich elektrowni spełnia minimalne normy ekologiczne. Reakcją Austrii na problemy energetyki wodnej jest ofensywa w rozwoju energii słonecznej. Do 2030 roku władze chce osiągnąć poziom produkcji prądu z instalacji fotowoltaicznych rzędu 14 TWh.

Jak pokazuje tabela 1., Austria jest krajem, w którym OZE stanowią blisko $\frac{3}{4}$ źródeł energii pozyskiwanej przez przemysł i gospodarstwa domowe. Resztę zapotrzebowania realizuje import gazu, które wynosi od 12 do 15 mld m³ rocznie.

Tabela 1. Procentowy podział źródeł energii w Austrii
Table 1. Percentage breakdown of energy sources in Austria

Energia wodna – 55 – 67%
Kogeneracja (KWK) – 15%
Energia ciepła – 13%
Energia wiatrowa – 10%
Fotowoltaika – 3%
Udział energii odnawialnych w całkowitej produkcji energii elektrycznej – 77%

Źródło: Federalne Ministerstwo Rolnictwa, Regionów i Turystyki (BMLRT), „Energia w Austrii 2021. Liczby, dane, fakty”.

W Austrii nie ma pojedynczego producenta prądu ani operatora sieci przesyłowej. Największym operatorem jest Austrian Power Grid (APG), spółka odpowiedzialna za 95% przesyłu. APG należy do grupy Verbund, ale działa jako pod-

¹⁴ *Ibidem*.

miot niezależny. Verbund, założony w 1947 r., jest największym dostawcą energii elektrycznej w Austrii¹⁵. Przez lata koncern był własnością państwa, ale w 1988 r. akcje firmy wprowadzono na giełdę, poprzez częściową prywatyzację. Dziś w rękach państwa pozostaje 51% akcji. Ponad 25% akcji ma syndykat firm Wiener Stadtwerke oraz EVN. EVN zajmuje się dostawami prądu, gazu, wody i ciepła, i wytwarzaniem energii elektrycznej i gospodarką odpadami. Z kolei Wiener Stadtwerke zajmuje się zarządzaniem infrastrukturą miejską Wiednia, począwszy od dostaw elektryczności, poprzez komunikację miejską, Udziałowcem Verbund (powyżej 5% akcji). TIWAG, kolejny operator sieci przesyłowej i dystrybucyjnej oraz wytwórca energii elektrycznej, posiada nieco ponad 5% rynku.

Tabela 2. przedstawia główne firmy energetyczne Austrii (uszeregowane pod względem wielkości obrotów w mln euro).

Tabela 2. Główne firmy energetyczne Austrii pod względem obrotów (mln euro)

Table 2. Austria's main energy companies by turnover (million euro)

1	OMV AG	16 550,00
2	Verbund AG	3 234,58
3	EVN AG	2 107,50
4	Wien Energie GmbH	1 950,56
5	Energie AG Oberösterreich	1 843,70
6	Energie Steiermark AG	1 584,90
7	Salzburg AG für Energie, Verkehr und Telekommunikation	1 450,44
8	Tiwag – Tiroler Wasserkraft AG	1 160,00
9	Kelag – Kärntner Elektrizitäts-AG	1 061,00
10	Illwerkekw AG	678,58

Źródło Advantage Austria, Liczby i fakty, https://www.advantageaustria.org/pl/zentral/branchen/energiewirtschaft/zahlen-und-fakten/Zahlen_und_Fakten.pl.html (dostęp: 12.04.2022 r.).

Po wejściu w 1995 r. do Unii Europejskiej Austria rozpoczęła proces uwalniania rynku energii. Oficjalnie rynek został w pełni otwarty w październiku 2001 r. Wtedy powstała giełda energii EXAA (*Energy Exchange Austria*). Rok wcześniej powstała spółka CISMO (*Clearing Integrated Services and Market Operations*) zajmująca się m.in. zarządzaniem energią, działalnością doradczą, rozliczaniem transakcji na rynkach gazu i elektryczności oraz prowadzeniem rejestru certyfikatów emisji CO₂. W 2005 r. EXAA stała się członkiem grupy CISMO. Pieczę nad energetyką sprawuje federalne Ministerstwo Gospodarki, Rodziny

¹⁵ Posiada łącznie 126 elektrowni, w znacznej większości wodnych. Firma zaspokaja ok. 40% zapotrzebowania na energię elektryczną w Austrii, a 90% jej produkcji pochodzi hydroenergetyki; W. Kwinta, *Rynek energii: Austria*, „Polska Energia” 2011, nr 3–4.

i Młodzieży. Regulatorem rynków energii i paliw jest Energie-Control Austria (E-Control) – państwowa spółka powołana w 2001 roku¹⁶.

6.6. Charakterystyka infrastruktury energetycznej na potrzeby gospodarki wodorowej

Najczęściej słyszymy o „szarym”, „niebieskim” i „zielonym” wodorze, wytwarzanym odpowiednio przy użyciu metanu, gazu metanowego z technologią wychwytywania i składowania dwutlenku węgla oraz z energii odnawialnej.

Do niedawna wodór produkowano głównie z surowców kopalnych, gazu ziemnego i węgla. Produkcja „szarego” wodoru uwalnia od 230 do 318 g emisji CO₂ na kWh wytworzonego wodoru. Jeśli CO₂ jest w dużej mierze oddzielony przez zastosowanie energii, nazywa się go „niebieskim” wodorem, a emisje zwykle wahają się od 23 do 150 g CO₂ na kWh. Następnie oddzielony CO₂ może być wykorzystany jako surowiec lub składowany w formacjach geologicznych. Natomiast „zielony” wodór powstaje, gdy wykorzystywane są odnawialne źródła energii, takie jak elektroliza (rozkład wody na wodór i tlen za pomocą odnawialnej energii elektrycznej), fotoliza (bezpośredni rozdział wody za pomocą energii słonecznej) lub zgazowanie biomasy. Na początku opisywanych procesów tworzenia gospodarki wodorowej w różnych krajach, w 2018 roku, globalne zapotrzebowanie na wodór wyniosło 120 mln ton¹⁷. Z tego 40% uzyskano jako produkt uboczny procesów przemysłowych, a 60% zostało wytworzonych celowo. W chwili obecnej tylko 2% pochodzi z elektrolizy wody, a 0,7% jest produkowane w oparciu o odnawialne źródła energii lub energię kopalną z separacją CO₂. Technologie produkcji i wykorzystania wodoru poczyniły w ostatnich latach ogromne postępy. W Austrii trwają intensywne badania w tej dziedzinie, opracowywane i wdrażane są pionierskie koncepcje i rozwiązania. Technologie wodorowe są postrzegane jako ważny element realizacji austriackiego celu „neutralności klimatycznej do 2040 roku”.

W ciągu kilku lat, po 2017 roku, w Austrii rozpoczęto szereg przedsięwzięć biznesowych i naukowych, które mają za zadanie rozwijanie gospodarki opartej na wodorze. Opisywane tutaj przykłady dotyczą głównie produkcji tzw. zielonego wodoru, opartego na odnawialnych źródłach energii.

W lipcu 2018 roku największy austriacki koncern energetyczny – VERBUND, we współpracy z pięcioma partnerami: voestalpine, APG, K1-MET, ECN i Siemensem pracuje nad systemem do elektrolizy wykorzystującym elektrolit w postaci polimerowej membrany (PEM). Taki system zainstalowany ma być w hucie stali voestalpine w Linz w Austrii. Konsorcjum chwali się, że może on

¹⁶ W. Kwinta, *Rynek energii...*

¹⁷ Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, *Hydrogen: a renewable energy perspective september*, Japan 2019.

generować do 6 MW¹⁸. Jego uruchomienie przewidziane jest na drugi kwartał przyszłego roku. Ponieważ wodór nie występuje naturalnie w postaci wolnej, wytwarza się go na drodze elektrolizy wody. PEM wykorzystywane są w tym celu – separują one wodór od innych produktów elektrolizy. Przy mocy 6 MW jest w stanie wygenerować 1200 m²/h wodoru.

Wydajność systemu opracowanego w ramach projektu to 80%. Korzystanie z takiego systemu ma wiele zalet. Koszty utrzymania są niskie, a wodór produkowany jest przy zerowej emisji i bez konieczności wykorzystania dodatkowych, niebezpiecznych dla środowiska czy operatora związków chemicznych.

W dniu 10 lipca 2019 roku koncerny OMV i Verbund poinformowały, że postawią farmę fotowoltaiczną o mocy 16 MW, która powstanie na terenie 200 tys. m² należącym do OMV i która będzie się składać z około 60 tys. modułów PV. Jak poinformowano, obie firmy mają wydać na tę inwestycję po około 5–6 mln euro. Szacowana roczna produkcja energii to 18 GWh. Odpowiada to rocznemu zapotrzebowaniu na energię około 5,5 tys. austriackich gospodarstw domowych¹⁹. Uruchomienie produkcji miało nastąpić w czwartym kwartale 2020 roku. Energię wytwarzaną na tej największej farmie fotowoltaicznej w Austrii, OMV i Verbund mogły wykorzystać do produkcji „zielonego” wodoru, który OMV stosuje m.in. w procesach chemicznych.

Verbund, jako największy austriacki dostawca energii elektrycznej, która pochodzi niemal wyłącznie z OZE, rozpoczął pracę nad innym projektem, zakładającym produkcję wodoru z energii odnawialnej, realizowanym we współpracy z Siemensem i producentem stali Voestalpine. Ten dofinansowany ze środków unijnych projekt o nazwie H2FUTURE ma skutkować budową w Linzu instalacji „power-to-gas” o mocy 6 MW²⁰. Cel to osiągnięcie sprawności przetwarzania energii elektrycznej w wodór na poziomie 80%²¹. Współpraca obu wiodących koncernów austriackich w zakresie produkcji wodoru zaczęła się w 2017 roku, kiedy to OMV przejął 40% udziałów w firmie Smatrics (w której również 40% ma Verbund), a pracującej nad rozwiązaniami dla elektromobilności. Pozostałe 20% akcji należy do Siemensu.

Polska firma Solaris rozpoczęła projekt pojazdu wodorowego, dzięki której władze regionalne oraz operatorzy transportu mogą zapoznać się z zastosowaną

¹⁸ Voestalpine, *Siemens and VERBUND are building a pilot facility for green hydrogen at the Linz location*, 2022, <https://www.voestalpine.com/group/en/media/press-releases/2017-02-07-voestalpine-siemens-and-verbund-are-building-a-pilot-facility-for-green-hydrogen-at-the-linz-location/> (dostęp: 12.04.2022 r.).

¹⁹ Gramzielone.pl, *Największa farma PV w Austrii. W planach produkcja zielonego wodoru*, <https://www.gramzielone.pl/energia-sloneczna/101081/najwieksza-farma-pv-w-austrii-w-planach-produkcja-zielonego-wodoru> (dostęp: 12.04.2022 r.).

²⁰ Study on the potential for implementation of hydrogen technologies and its utilisation in the Energy Communityfile

²¹ Gramzielone, *Największa farma PV w Austrii...*

technologią²². Od 2019 roku w regionie Karyntia rozpoczął kursowanie autobus Urbino hydrogen napędzany energią pochodzącą z wodoru. Wydarzenie, w którym uczestniczyli przedstawiciele Solaris Bus&Coach, Solaris Austria, ÖBB Postbus, władz regionu Karyntii, było częścią projektu „H2 Carinthia”. Jego celem jest stworzenie modelowego regionu wodorowego, przy wykorzystaniu energii pochodzącej z wodoru w transporcie publicznym i przemyśle. Program zakłada także budowę stacji tankowania wodorem. List intencyjny w tej sprawie podpisali już m.in. najwięksi austriaccy przewoźnicy, władze miejskie i dostawcy energii. Na początku 2021 roku Solaris zawarł umowę z ÖBB Postbus, która to umowa przewidywała zakup przez austriackiego przewoźnika 40 autobusów wodorowych do 2023 roku. W grudniu 2021 roku ÖBB kupił od polskiej firmy pięć sztuk Solaris Urbino hydro. Pojazdy te wykorzystują energię wytworzoną w ogniwach wodorowych. Dzięki zastosowanej technologii autobus może przejechać do 350 km bezemisyjnie. Do listopada 2022 roku te innowacyjne autobusy będą obsługiwały rejon Villach w Karyntii²³.

W 2021 r. OMV i Kommunalkredit ogłosiły, że zainwestują 25 milionów euro w budowę instalacji do produkcji wodoru. Wspólnie budują największą w Austrii instalację elektrolizy w rafinerii OMV Schwechat. Elektrolizer o mocy 10 MW wyprodukuje do 1500 ton metrycznych zielonego wodoru, zmniejszając w ten sposób emisję CO₂ nawet o 15 000 ton metrycznych²⁴. Celem inwestycji jest, z jednej strony zwiększenie skali ekologicznego wodoru na rzecz mobilności i przemysłu poprzez inwestycje w zielony łańcuch wartości H₂ od produkcji po elektrolizę, ładowanie przyczep i stacje tankowania autobusów, z drugiej strony rozwój nowatorskiego pomiaru jakości i masy gazu, zgodnych z wymaganiami prawnych UE i Republiki.

Ta sama OMV AG i Post AG podpisały list intencyjny w sprawie zastosowania ekologicznego wodoru w transporcie ciężkim. Celem jest rozwój komercyjnej elektromobilności na potrzeby transportu ciężkiego w dziedzinie wodorowych ogniwo paliwowych. Do 2030 roku ma zostać oddanych do użytku 2000 ciężarówek na ogniwa paliwowe, które będą zasilane zielonym wodorem²⁵.

Wien Energie, regionalny dostawca energii, ogłosił utworzenie spółki zależnej „Wiener Wasserstoff GmbH”, skupiającej się wyłącznie na rozwoju techno-

²² Transport publiczny, *Austria testuje wodorowe Solarisy*, <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/austria-testuje-wodorowe-solarisy-68892.html> (dostęp: 15.04.2022 r.).

²³ CAF Group, *Austria's biggest carrier orders first hydrogen buses*, 2021, <https://www.solarisbus.com/en/press/austria-s-biggest-carrier-orders-first-hydrogen-buses-1687> (dostęp: 12.04.2022 r.).

²⁴ OMV Group, *OMV and Kommunalkredit invest in green hydrogen production*, <https://www.omv.com/en/news/210215-omv-and-kommunalkredit-invest-in-green-hydrogen-production> (dostęp: 12.04.2022 r.).

²⁵ OMV Group, *OMV and Post sign MoU for green hydrogen in heavy goods transport*, <https://www.omv.com/en/news/210224-omv-and-post-sign-mou-for-green-hydrogen-in-heavy-goods-transport> (dostęp: 16.04.2022 r.).

logii wodorowych, w tym elektrolizera o mocy 2,5 MW. Celem średnioterminowym działań Wien Energie jest stanie się hubem wodorowym w regionie²⁶.

Ponadto realizowanych jest szereg projektów naukowo-badawczych, które będą podstawą generowania wodoru z OZE. Przykładem może być Projekt „Renewable Gas field” zlokalizowany w Styrii. Projekt ten realizuje podejście typu „power-to-gas”, które generuje ekologiczny wodór z odnawialnej energii elektrycznej, poprzez elektrolizę i łączy dwustopniową metanizację katalityczną na dużą skalę w celu zapewnienia zrównoważonych dostaw energii w dziedzinie energii, mobilności i przemysłu²⁷. Z kolei Projekt „Underground Sun Storage 2030” bada bezpieczne, sezonowe magazynowanie energii odnawialnej w postaci wodoru z energii słonecznej i wiatrowej w podziemnych złożach gazu²⁸. Pod kierownictwem RAG Austria AG wraz z partnerami projektu, takimi jak Voestalpine i stowarzyszenie WIVA P&G, zbadane zostaną możliwości podziemnego składowania wodoru.

Nad podobnym projektem pracuje ADX, australijska firma energetyczna, która niedawno nabyła dawne pola naftowe i gazowe w Dolnej Austrii, opracowuje sposoby wykorzystania wyeksploatowanych złóż gazu nadających się do przechowywania wodoru²⁹.

Innym przykładem aktywności w zakresie rozwoju regionalnej, zielonej gospodarki wodorowej jest Projekt „HyWest”, który jest finansowany przez Fundusz Klimatu i Energii kwotą 9,2 miliona euro. Badane są procesy międzysektorowej produkcji, magazynowania i zastosowania zielonego wodoru. Celem projektu jest produkcja, metanizacja i zasilenie zielonego wodoru oraz wykorzystanie zielonego wodoru w procesach przemysłowych³⁰.

Innym rozpoczętym projektem jest HyTruck Projekt, który koncentruje się na opracowaniu i testowaniu bezemisyjnego układu napędowego z ogniwami paliwowymi do pojazdów użytkowych. Celem jest opracowanie i symulacja instalacji zbiorników wodoru do pojazdów użytkowych³¹.

Projekt „HyTrain” ma na celu wykorzystanie austriackiego know-how do opracowania pierwszego na świecie wąskotorowego pociągu napędzanego wodorem. Obejmuje to wytwarzanie, magazynowanie i tankowanie pociągu zielonym

²⁶ CMS Expert Guides, *Current State of Hydrogen Projects in Austria*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/austria>, https://www.wienerstadtwerke.at/o/document/wienerstadtwerke/wiener-stadtwerke_annual-report-2020_en (dostęp: 12.04.2022 r.).

²⁷ Energie Agentur Steiermark, *Renewable Gas field*, <https://www.ea-stmk.at/renewable-gasfield> (16.04.2022 r.).

²⁸ Underground Sun Storage, *Start of the project Underground Sun Storage 2030*, <https://www.underground-sun-storage.at/en/> (dostęp: 16.04.2022 r.).

²⁹ ADX Energy, *A strategic and complimentary business expansion into green energy production and decarbonisation technologies*, 2021, <https://adx-energy.com/wp-content/uploads/2021/05/Vienna-Basin-Green-Hydrogen-Storage-Project-Business-Case.pdf> (dostęp: 12.04.2022 r.).

³⁰ WIVA P&G Energy Model Region, *WIVA P&G HyWest: Regional Green Hydrogen Economy*, 2020, <https://www.wiva.at/v2/portfolio-item/hywest/> (14.04.2022).

³¹ CMS Expert Guides, *Current State of Hydrogen Projects in Austria*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/austria> (dostęp: 14.04.2022 r.).

wodorem. Wodorowy system pociągów przystosowano do zastosowań w pociągach o wysokiej wydajności, takich jak pociągi dużych prędkości³². Wspomniany projekt został w 2020 r. częściowo zrealizowany gdy austriackie koleje zaczęły testować iLint, pierwszy na świecie pociąg napędzany wodorowymi ogniwami paliwowymi. Trzymiesięczne jazdy testowe były realizowane na czterech wymagających trasach, w południowym rejonie Dolnej Austrii, w Wiedniu i wschodniej Styrii. Austriackie Koleje Federalne (ÖBB) potwierdziły, że został w pełni zatwierdzony do regularnej obsługi pasażerskiej. Stało się tak, po decyzji austriackiego Federalnego Ministerstwa Ochrony Klimatu, Środowiska, Energetyki, Mobilności, Innowacji i Technologii (BMK)³³.

Obok uczestnictwa w programach unijnych, Austria od 2015 r. współpracuje z innymi podmiotami w ramach Międzynarodowej Agencji Energii (IEA). Jest to Program Współpracy Technologicznej Hydrogen³⁴. Ten program technologiczny ma na celu przyspieszenie wykorzystania technologii wodorowych poprzez koordynację działań na poziomie międzynarodowym w obszarze analizy, badań stosowanych i komunikacji³⁵. Tematyka badań obejmuje produkcję i magazynowanie wodoru, bezpieczeństwo, technologie power-to-x (gaz, ciepło, woda) oraz możliwe zastosowania wodoru w obszarach energetyki i mobilności.

Ponadto Austria jest członkiem globalnego sojuszu badawczego Mission Innovation (MI), który został założony przez wiodące kraje w dziedzinie technologii energetycznych w celu zwalczania zmian klimatycznych i przyspieszenia rozwoju technologii czystej energii. Mission Innovation Challenges promuje globalne wysiłki badawcze w celu stworzenia zrównoważonej przyszłości energetycznej. Wchodzący w skład Mission Innovation projekt „Renewable and clean hydrogen” jest poświęcony badaniom rozwojowi zielonych technologii wodorowych. Jego celem jest pokonanie przeszkód technologicznych w produkcji, dystrybucji, przechowywaniu i wykorzystaniu H₂, oraz stworzenie opłacalnego łańcucha wartości wodoru. Powinno to przyspieszyć tworzenie globalnego rynku wodoru.

³² Fuel Cells Works, *Austria: EUR 3.1 Million in Funding for the Zillertalbahh HyTrain Project*, 2020, Austria: EUR 3.1 Million in Funding for the Zillertalbahh HyTrain Project (dostęp: 15.04.2022 r.).

³³ Rynek-kolejowy, *Wodorowy iLint może wozić bez przeszkód pasażerów w Austrii*, <https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/austria-kolejnym-krajem-w-europie-z-akceptacja-dla-wodorowych-pociagow-alstom-99845.html> (dostęp: 14.03.2022 r.).

³⁴ IEA, *CEM Hydrogen Initiative*, <https://www.iea.org/programmes/cem-hydrogen-initiative> (dostęp: 14.04.2022 r.).

³⁵ IEA Research Cooperation, *About the IEA Research Cooperation*, 2022, <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/iea/> (dostęp: 14.04.2022 r.).

6.7. Wnioski i rekomendacje w zakresie projekcji, w jaki sposób gospodarka wodorowa będzie wpływać na bezpieczeństwo energetyczne danego państwa

Produkcja zielonego wodoru stwarza nowe możliwości zwiększenia bezpieczeństwa dostaw energii i zmniejszenia zależności od importu paliw kopalnych. Odnawialny wodór, zarówno jako nośnik energii, jak i surowiec, odgrywa również ważną rolę w dekarbonizacji różnych sektorów konsumpcji, zwłaszcza energochłonnych gałęzi przemysłu i transportu³⁶.

Konwersja energii za pomocą technologii *power-to-gas* otwiera wiele możliwości dla przyszłych zintegrowanych systemów energetycznych i umożliwia połączenie sektorów elektryczności, ciepła i mobilności. Nadwyżki energii wiatrowej i słonecznej są przetwarzane przez elektrolizery na wodór, który można transportować i magazynować w istniejącej infrastrukturze gazu ziemnego. Kluczowym wyzwaniem jest wykorzystanie technologii wykorzystującej wodór w wielu sektorach i na wielu poziomach zarządzania. Zrozumienie potrzeb infrastrukturalnych różnych podmiotów będzie kluczowe dla podejmowania decyzji przez polityków. Bez dokładnych informacji o kosztach wskaźniki absorpcji technologii pozostaną wysoce niepewne. Można i trzeba wprowadzić mechanizmy sprawozdawczości sektora publicznego, jak i prywatnego, z korzyścią dla wszystkich stron. Koordynacja i wzmocnienie, istniejących i planowanych inicjatyw wielostronnych. Wdrożenie infrastruktury wodorowej nie zostanie zrealizowane bez skutecznych partnerstw pomiędzy wszystkimi, którzy mogą zapewnić fundusze, wdrożyć regulacje, zarządzać bezpieczeństwem i, przede wszystkim, nawiązać kontakt ze społecznościami lokalnymi³⁷.

W perspektywie średnio- i długoterminowej najbardziej interesującą opcją energetyczną dla wodoru ze źródeł odnawialnych w Austrii jest świadczenie usług transportowych pojazdami, które wykorzystują gazowy wodór wytwarzany z odnawialnej energii elektrycznej (z energii wodnej i wiatrowej). W przyszłym zrównoważonym austriackim systemie energetycznym wkład odnawialnego wodoru w sektorze transportu może być znaczący³⁸. Dzięki elektrolizie „na miejscu” na stacji tankowania wodoru, można wykorzystać istniejącą infrastrukturę energii elektrycznej. Należy pamiętać, że pojazdy na ogniwa paliwowe z wodorem mogą stać się atrakcyjne dopiero po rozwoju technologicznym połączonym ze znaczną redukcją kosztów. Z ogólnego ekonomicznego punktu widzenia nie jest możliwe

³⁶ Energy Systems of Tomorrow, *Hydrogen from renewables in Austria an energy carrier of the future?*, <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/edz/projects/hydrogen-from-renewables-in-austria-an-energy-carrier-of-the-future.php> (dostęp: 14.04.2022 r.).

³⁷ The Future of Hydrogen Report prepared by the IEA for the G20, *Japan Seizing today's opportunities*.

³⁸ Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology, *Energy Innovation Austria – Green hydrogen Helping to shape the future of energy*, <https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/11/eia-01-20-fin-english.pdf> (dostęp: 12.04.2022 r.).

stworzenie w Austrii gospodarki wykorzystującej odnawialne źródła wodoru w perspektywie krótkoterminowej, ponieważ bezpośrednie wykorzystanie energii odnawialnej do usług energetycznych jest ekonomicznie bardziej wykonalne. Aby jednak móc skorzystać ze średnio- i długoterminowych możliwości, konieczne są dalsze wysiłki badawczo-rozwojowe, aby opracować i zademonstrować technologie odnawialnego wodoru. Działania te powinny być powiązane z istniejącymi i planowanymi sieciami międzynarodowymi, np. Europejską Platformą Wodoru i Ogniw Paliwowych (HFP), Porozumieniem Wdrażania Wodoru IEA, czy Międzynarodowym Partnerstwem na rzecz Gospodarki Wodorowej (IPHE)³⁹.

Proces tworzenia gospodarki wykorzystującej zielony wodór, rozpoczęty zaledwie kilka lat temu, zapewne będzie trwał kolejne dekady. Warto pamiętać, że obecne wysokie koszty wytwarzania wodoru, z czasem będą niższe i będzie to zapewne korzystne dla odbiorców. Zmiany technologiczne w zakresie produkcji H₂ spowodują, że będzie nie tylko tańszy, niż obecnie, ale bardziej dostępny dla odbiorców prywatnych i przedsiębiorstw. Dzięki temu transport, oparty na wodorze, podobnie jak energetyka, czy ciepłownictwo przyczynią się do dalszego rozwoju nisko lub bezemisyjnej gospodarki, bardziej przyjaznej dla środowiska, w którym żyjemy.

Bibliografia

1. ADX Energy, *A strategic and complimentary business expansion into green energy production and decarbonisation technologies*, 2021, <https://adx-energy.com/wp-content/uploads/2021/05/Vienna-Basin-Green-Hydrogen-Storage-Project-Business-Case.pdf> (dostęp: 12.04.2022 r.).
2. CAF Group, *Austria's biggest carrier orders first hydrogen buses*, 2021, <https://www.solarisbus.com/en/press/austria-s-biggest-carrier-orders-first-hydrogen-buses-1687> (dostęp: 12.04.2022 r.).
3. CMS Expert Guides, *Current State of Hydrogen Projects in Austria*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/austria>, https://www.wienerstadtwerke.at/o/document/wienerstadtwerke/wiener-stadtwerke_annual-report-2020_en (dostęp: 12.04.2022 r.).
4. Energie Agentur Steiermark, *Renewable Gasfield*, <https://www.ea-stmk.at/renewable-gas-field> (dostęp: 16.04.2022 r.).
5. Energy Systems of Tomorrow, *Hydrogen from renewables in Austria an energy carrier of the future?*, <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/edz/projects/hydrogen-from-renewables-in-austria-an-energy-carrier-of-the-future.php> (dostęp: 14.04.2022 r.).
6. ERA Portal Austria, *Strategic Research Agenda for a European Hydrogen Economy published*, 2022. dostęp online: <https://era.gv.at/news-items/strategic-agenda-for-a-european-hydrogen-economy-published> (dostęp: 12.04.2022 r.).

³⁹ Nachhaltig Wirtschaften, *Hydrogen from renewables in Austria – an energy carrier of the future?*, <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/edz/projects/hydrogen-from-renewables-in-austria-an-energy-carrier-of-the-future.php%20https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/11/eia-01-20-fin-english.pdf> (dostęp: 12.04.2022 r.).

7. FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), *Development of business cases for fuel cells and hydrogen. Applications for regions and cities*, 2017.
8. Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology, *Energy Innovation Austria - Green hydrogen Helping to shape the future of energy*, <https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/11/eia-01-20-fin-english.pdf> (dostęp: 12.04.2022 r.).
9. Fedorska A., *Ciepłownictwo w centrum uwagi austriackiej strategii wodorowej*, „Rzeczpospolita” z 6.11.2020.
10. Fuel Cells Works, *Austria: EUR 3.1 Million in Funding for the Zillertalbahh HyTrain Project*, 2020, Austria: EUR 3.1 Million in Funding for the Zillertalbahh HyTrain Project (dostęp: 15.04.2022 r.).
11. Gramwzielone, *Największa farma PV w Austrii. W planach produkcja zielonego wodoru*, <https://www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/101081/najwieksza-farma-pv-w-austrii-w-planach-produkcja-zielonego-wodoru> (dostęp: 12.04.2022 r.).
12. IEA Research Cooperation, *About the IEA Research Cooperation*, 2022, <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/iea/> (dostęp: 14.04.2022 r.).
13. IEA, *CEM Hydrogen Initiative*, <https://www.iea.org/programmes/cem-hydrogen-initiative> (dostęp: 14.04.2022 r.).
14. Komisja Europejska, *Joint EU initiative on Green Hydrogen presents its Strategic Research & Innovation Agenda*, Bruksela 2022, https://ec.europa.eu/info/news/joint-eu-initiative-green-hydrogen-presents-its-strategic-research-innovation-agenda-2022-mar-23_pl (dostęp: 12.04.2022 r.).
15. Kryczki D., *Rozwój gospodarki wodorowej w UE i państwach członkowskich. Środowisko regulacyjne i finansowe*, Warszawa 2021.
16. Kwinta W., *Rynek energii: Austria*, „Polska Energia” 2011, nr 3–4.
17. Nachhaltig Wirtschaften, *Hydrogen from renewables in Austria - an energy carrier of the future?*, <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/edz/projects/hydrogen-from-renewables-in-austria-an-energy-carrier-of-the-future.php%20https://energieforschung.at/wp-content/uploads/sites/11/2020/11/eia-01-20-fin-english.pdf> (dostęp: 12.04.2022 r.).
18. OMV Group, *OMV and Post sign MoU for green hydrogen in heavy goods transport*, <https://www.omv.com/en/news/210224-omv-and-post-sign-mou-for-green-hydrogen-in-heavy-goods-transport> (dostęp: 16.04.2022 r.).
19. OMV Group, *OMV and Kommunalkredit invest in green hydrogen production*, <https://www.omv.com/en/news/210215-omv-and-kommunalkredit-invest-in-green-hydrogen-production> (dostęp: 12.04.2022r.).
20. Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, *Hydrogen: a renewable energy perspective september*, Japan 2019.
21. Rynek-kolejowy, *Wodorowy iLint może wozić bez przeszkód pasażerów w Austrii*, <https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/austria-kolejnym-krajem-w-europie-z-akceptacja-dla-wodorowych-pociagow-alstom-99845.html> (dostęp: 14.03.2022 r.).
22. Selenic M., *CMS Expert Guide to hydrogen energy law and regulation in Austria*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/austria> (dostęp: 12.04.2022 r.).
23. Selenic M., *Hydrogen in Austria: Waiting for a strategy*, Balkan Energy News.
24. The Future of Hydrogen Report prepared by the IEA for the G20, *Japan Seizing today's opportunities*.

25. Transport publiczny, *Austria testuje wodorowe Solarisy*, <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/austria-testuje-wodorowe-solarisy-68892.html> (dostęp: 15.04.2022 r.).
26. Underground Sun Storage, Start of the project Underground Sun Storage 2030, <https://www.underground-sun-storage.at/en/> (dostęp: 16.04.2022 r.).
27. Voestalpine, *Siemens and VERBUND are building a pilot facility for green hydrogen at the Linz location*, 2022, <https://www.voestalpine.com/group/en/media/press-releases/2017-02-07-voestalpine-siemens-and-verbund-are-building-a-pilot-facility-for-green-hydrogen-at-the-linz-location/> (dostęp: 12.04.2022 r.).
28. WIVA P&G Energy Model Region, *WIVA P&G HyWest: Regional Green Hydrogen Economy*, 2020, <https://www.wiva.at/v2/portfolio-item/hywest/> (dostęp: 14.04.2022 r.)

Rozdział 7

STUDIUM PRZYPADKU – SŁOWACJA

Case study – Slovakia

Justyna TRUBALSKA

Abstract: *The contemporary tendency of states to operate in the low-emission economy formula is in line with several global trends. They include both the search by states for a way to ensure energy self sufficiency, and thus have a direct impact on the improvement of energy security. Moreover they stimulate innovative processes and development in the field of obtaining energy from relatively new, low-emission energy carriers. Actions taken by states are a response to the climate and energy policy, especially in the European Union countries. Properly selected strategies and tools allow building a technological advantage in the next energy sector, which improves the competitiveness of the economy. This determines states to take individual, bilateral and multilateral actions to undertake long-term actions in this area. This requires introducing certain modifications to strategic documents, adjusting legal provisions that take into account both the national interest and comply with the requirements resulting from international cooperation. The issues of the development of hydrogen technology constitute a challenge for the energy policy of states, and at the same time meet the trends of the low-emission economy. The analysis of the normative and institutional foundations for the development of hydrogen policy as well as for hydrogen activities in Slovakia is an interesting research problem for several reasons. First, Slovakia has significant potential for the development of this technology, especially in the transport sector. Secondly, it has a gas energy infrastructure that can be used for the transport and storage of hydrogen. Next, due to its one-sided dependence on natural gas (the Russian Federation), it has a strong need to diversify not only the sources of energy, but also the diversification of its carriers.*

7.1. Wprowadzenie

Współczesne dążenie państw do funkcjonowania w formule gospodarki niskoemisyjnej wpisuje się w kilka światowych trendów. Obejmują one zarówno poszukiwania przez państwa sposobu na zapewnienie samowystarczalności energetycznej, a przez to w sposób bezpośredni wpływają na poprawę bezpieczeństwa energetycznego, jak również pobudzają procesy innowacyjne i rozwój w zakresie pozyskania energii, ze stosunkowo nowych, niskoemisyjnych nośników energii. Ponadto są odpowiedzią na politykę klimatyczno-energetyczną, zwłaszcza w państwach Unii Europejskiej. Odpowiednio dobrane strategie i narzędzia pozwalają na budowanie przewagi technologicznej w kolejnym sektorze energetycznym, co

wpływa na poprawę konkurencyjności gospodarki. Determinuje to państwa do podejmowania działań zarówno indywidualnych, bilateralnych oraz wielostronnych do podejmowania długoterminowych działań w tym zakresie. Wymaga to wprowadzenia pewnych modyfikacji do dokumentów strategicznych, dostosowania przepisów prawnych, które uwzględniają zarówno interes narodowy, jak również wpisują się w wymagania wynikające z współpracy międzynarodowej. Kwestie rozwoju technologii wodorowej stanowią wyzwanie dla polityki energetycznej państw, a jednocześnie wychodzą naprzeciw trendom gospodarki niskoemisyjnej. Znaczenie wodoru, w kontekście dążenia do gospodarki niskoemisyjnej, jest nieocenione. Technologie wodorowe zapewniają zeroemisyjność w sektorach, w których do tej pory było to niemożliwe lub nieopłacalne. Wodór może być stosowany jako: nośnik, paliwo, a także może zapewniać sezonowe magazynowanie energii, przez co ma zastosowanie w energetyce, transporcie, przemyśle oraz budownictwie. Dodatkowo ma zastosowanie w sektorach przemysłu, które są określane jako „trudne” w procesach dekarbonizacji oraz sektorach energochłonnych. Rozwój technologii wodorowych oraz oparcie gospodarki na wodorze jest jedną z płaszczyzn zainteresowania rządu Republiki Słowacji.

Analiza podstaw normatywno-instytucjonalnych w zakresie tworzenia polityki wodorowej, a także działań wodorowych w Słowacji jest interesującym problemem badawczym z kilku powodów. Po pierwsze – Słowacja posiada istotny potencjał do rozwoju tej technologii, zwłaszcza w sektorze transportu. Po drugie – posiada infrastrukturę energetyczną magazynową i przesyłową gazu ziemnego, którą można wykorzystać na potrzeby przesyłu i magazynowania wodoru. Po trzecie – ze względu na jednostronne uzależnienie od gazu ziemnego (Federacja Rosyjska) ma silną potrzebę dywersyfikacji źródeł pozyskania energii, również z punktu widzenia nośników wytwarzania energii.

Wykorzystanie technologii wodorowych stanowi szansę zwiększenia zaangażowania słowackich firm w rozwój sektora energetycznego. Wykorzystanie technologii wodorowych stanowi szansę na powstanie nowej infrastruktury do produkcji i wdrażania wybranych typów urządzeń oraz sprzętu, co przekłada się nie tylko na bezpieczeństwo energetyczne państwa, ale również będzie miało wymierny efekt na rynku pracy. W ramach wzmacniania współpracy międzynarodowej Republika Słowacka będzie aktywnie i z zaangażowaniem uczestniczyć w projektach i politykach UE, które bezpośrednio są związane z technologiami wodorowymi.

Celem polityki energetycznej Republiki Słowacji, obok zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, jest dążenie do samowystarczalności, a także budowa gospodarki neutralnej klimatycznie. W tym kontekście technologie wodorowe są jedną, obok energetyki jądrowej, alternatywą na osiągnięcie zakładanych celów.

7.2. Analiza Strategii Wodorowej Republiki Słowacji

Komisja Europejska, przyjmując w dniu 8 lipca 2020 r. Strategię w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu (dalej: Strategia wodorowa UE)¹, wyznaczyła główny kierunek rozwoju, w zakresie technologii wodorowych. Tym samym wskazała kolejny sposób na dywersyfikację miksów energetycznych w perspektywie do 2035 i 2050 roku. Strategia wodorowa UE wymaga przyjęcia analogicznych dokumentów na poziomie państw członkowskich, z uwzględnieniem państwowych uwarunkowań, a także posiadanego potencjału dla wykorzystania wodoru. Wpisuje się to w Strategiczną wizję UE neutralnej dla klimatu. W Komunikacie „Czysta planeta dla wszystkich. Europejska długoterminowa wizja strategiczna dobrze prosperującej, nowoczesnej, konkurencyjnej i neutralnej dla klimatu gospodarki”, przyjęto wzrost udziału wodoru w miksie energetycznym Europy do 2050 r. z obecnych poniżej 2% do 13–14%². Dodatkowo zarówno na poziomie UE, jak również jej państw członkowskich zobowiązano do znacznej redukcji emisji gazów cieplarnianych i dekarbonizacji w sektorze przemysłu, ciepłownictwa oraz transportu.

W czerwcu 2021 r. rząd Republiki Słowackiej przyjął „Narodową Strategię Wodorową Przygotowaną na Przyszłość”³ (dalej: NSW), która jest spójna z opracowanymi wcześniej dokumentami strategicznymi w obszarze alternatywnych źródeł energii, ochrony środowiska naturalnego oraz transformacji przemysłowej Słowacji. W dokumencie podkreślono wiodącą rolę państwa w zakresie realizacji działań związanych z rozwojem technologii wodorowej na Słowacji. Celem strategii wodorowej jest zwiększenie konkurencyjności gospodarki słowackiej, która uwzględnia budowę społeczeństwa neutralnego klimatycznie. Do 2021 roku nie było dokumentu, który próbowałby w sposób spójny i kompleksowy stworzyć ramy dla wykorzystania technologii wodorowych w zakresie jego produkcji, transportu, dystrybucji i magazynowania. Znaczenie wodoru dla rozwoju gospodarki wynika z możliwości jego szerokiego zastosowania, zarówno w przemyśle petrochemicznym, metalurgicznym, a także transporcie. Wodór jest wartościowy ze względu na możliwość wykorzystania go jako nośnika energii, co przekłada się na możliwość dywersyfikacji struktury paliwowo-surowcowej. Dodatkowo wykorzy-

¹ Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu, Bruksela, dnia 8.07.2020 COM (2020) 301 final.

² Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów i Europejskiego Banku Europejskiego, „Czysta planeta dla wszystkich. Europejska długoterminowa wizja strategiczna dobrze prosperującej, nowoczesnej, konkurencyjnej i neutralnej dla klimatu gospodarki”, Bruksela, dnia 28.11.2018 r. COM(2018) 773 final.

³ J. Sinay, M. Jesný, J. Weiterschütz, P. Blaškovič, R. Sulík, *Národná vodíková stratégia: Pripravení na budúcnosť (National Hydrogen Strategy of the Slovak “Ready for the Future”)*, 2021, <https://rokovania.gov.sk/download.dat?id=361F8BABC3FC4DED81622AEAC353040C-7E6A87522DA19835FF227E896470F449>.

stanie wodoru wpływa na dekarbonizację energetyki oraz procesów przemysłowych, a docelowo pozwala na zastąpienie paliw kopalnych w energetyce i transporcie.

W przyjętym dokumencie określono ogólne ramy dla rozwoju technologii wodorowej na Słowacji. Wskazano na środki potrzebne z punktu widzenia, wdrożenia i rozwoju technologii wodorowych w wybranych obszarach gospodarki: transporcie, przemyśle, ciepłownictwie. W dokumencie wskazano konieczność ujednoczenia terminologii, a także wprowadzenia środków dla wykorzystania wodoru w słowackiej gospodarce. Wytyczne przyjęte w NSW mają docelowo przyczynić się do wypracowania standardów niskiej emisji dwutlenku węgla w całym procesie pozyskania i eksploatacji wodoru.

W pierwszej części NSW uporządkowano terminologię związaną z wodorem, którego rodzaje zostały wyróżnione, ze względu na sposób wytwarzania: wodór zielony, szary oraz niebieski. W dalszej części dokumentu wielokrotnie podkreślono, że priorytetem rozwoju gospodarki jest jej oparcie o technologie zielonego wodoru, który wytwarzany jest w procesie elektrolizy wody za pomocą elektrolizera zasilanego energią elektryczną z odnawialnych źródeł energii, a także niebieskiego wodoru, który z kolei produkowany w taki sam sposób jak szary wodór, ale dwutlenek węgla, który powstaje podczas produkcji, jest bezpiecznie składowany w podziemnych złożach (tzw. proces CCS) lub wykorzystywany do produkcji użytecznych produktów chemicznych (tzw. proces CCU). Niebieski wodór można również wytwarzać poprzez elektrolizę wody za pomocą elektrolizerów, zasilanych energią elektryczną z niskoemisyjnych źródeł energii. Jednocześnie w NSW nie wykluczono wykorzystania szarego wodoru, wytwarzanego w procesach wykorzystujących jako surowiec paliwa kopalne, zwłaszcza gaz ziemny i węgiel. Prognozowany przeważający udział zielonego wodoru w gospodarce jest efektem wskazanego celu NSW, która zakłada dekarbonizację gospodarki i budowę społeczeństwa neutralnego⁴.

W analizowanym dokumencie podjęto próbę odniesienia się w sposób kompleksowy do eksploatacji wodoru w gospodarce słowackiej. Obszarem zainteresowania NSW są procesy jego produkcji, transportu, magazynowania, a także wykorzystania w końcowych technologiach i produktach. Słowacja jest zdeterminowana w zakresie wdrażania działań mających na celu rozwój technologii wodorowych. Warunkowane jest to przede wszystkim potrzebą dywersyfikacji portfela paliwowo-energetycznego, jak również dążeniem do osiągnięcia samowystarczalności gospodarczej. Jednocześnie warto wskazać, że bezpieczeństwo energetyczne współczesnych państw, a także sprawna realizacja polityki energetycznej jest uzależniona od posiadania przewagi technologicznej względem innych podmiotów, w konkretnej technologii. Technologie wodorowe stanowią szansę w osiągnięciu przewagi technologicznej przez Słowację. Zaangażowanie w rozwój tej dziedziny potwierdza utworzenie Centrum Badań Technologii Wodorowych

⁴ *Ibidem*, s. 6.

Republiki Słowackiej, które ma wspomagać rozwój technologii wodoru i ich wykorzystanie w transporcie, co daje pewną przewagę w analizowanym zakresie. Dodatkowo działania podejmowane przez sektor publiczny oraz prywatny pozwalają twierdzić, że Słowacja ma duży potencjał dla stworzenia konkurencyjnej gospodarki opartej na wodorze względem pozostałych państw członkowskich UE w zakresie produkcji i wykorzystaniu wodoru w przyszłości.

W NSW wskazano na potrzebę rozwijania współpracy międzynarodowej, co z kolei pociąga za sobą konieczność stworzenia warunków dla przyszłych inwestycji związanych z wodorem na Słowacji. W analizowanym dokumencie odniesiono się również do wyzwań związanych z rozwojem technologii wodorowych. Wskazano na konieczność stworzenia innowacyjnych rozwiązań w segmencie dystrybucji i transportu. Jednocześnie podkreślono, że w przyszłości do przesyłu wodoru może być używana istniejąca infrastruktura przesyłowa i magazynowa gazu ziemnego, jeśli jej przepustowość nie zostanie w pełni wykorzystana. Mając na uwadze specyficzną budowę sieci przesyłowej gazu ziemnego na Słowacji, można stwierdzić, że obecnie używana infrastruktura przesyłowa gazu ziemnego oraz jego magazynowania pozwala na jej wykorzystanie do dystrybucji i magazynowania wodoru. W dokumencie zaznaczono jednak, że w przyszłości będą poszukiwane rozwiązania mające na celu rozbudowę i modernizację połączeń przesyłowych z sieciami przesyłowymi państw członkowskich Unii Europejskiej. Z kolei w obszarze gospodarki cieplnej wyzwaniem stanowi akumulacja wodoru w okresach letnich i jej późniejsze wykorzystanie w okresach niedoboru energii elektrycznej. Mimo że obecnie Republika Słowacji wykorzystuje wodór w transporcie między innymi w transporcie publicznym, również i ten sektor ma przed sobą wiele wyzwań.

Wstępne prognozy poczynione w NSW wskazują, że wzrost zużycia wodoru będzie generował potrzebę jego importu, przy czym priorytetem wytwarzania i jego eksploatacji jest wykorzystanie potencjału krajowego⁵. Wodór docelowo jest rozpatrywany jako nośnik, który przy obniżonych kosztach produkcji może zastąpić gaz ziemny w sektorze ciepłownictwa i chłodnictwa, a także w przemyśle. Prognozowane zwiększenie zapotrzebowania na wodór jest istotne ze względu na konieczność rozbudowy i modernizacji istniejącej infrastruktury energetycznej.

Mankamentem strategii wodorowej jest brak ilościowych wskaźników oraz terminów realizacji, które w sposób kompleksowy sprecyzowały cele w analizowanym zakresie. Dokument ma bardzo ogólny charakter, tworzy pewne ramy jednak bez konkretnych rozwiązań, co może mieć wpływ na wdrażanie odpowiednich działań w zakresie rozwoju technologii wodorowych na Słowacji.

Podsumowując, strategia wodorowa Słowacji jest dokumentem, który należy traktować jako pewnego rodzaju punkt wyjścia, który wymaga modyfikacji i doprecyzowania. Jednocześnie odchodząc od oceny struktury dokumentu i jego słabych stron, autorzy dokumentu dostrzegają potencjał w rozwoju technologii

⁵ *Ibidem*, s. 9.

wodorowych w Słowacji. Analizowane technologie przyniosą korzyści zarówno obywatelom, jak i państwu. Na poziomie państwa korzyści wynikające z wykorzystania technologii wodorowych przełożą się między innymi na zwiększenie poziomu samowystarczalności energetycznej, a tym samym nastąpi zmniejszenie zależności energetycznej. Dodatkowo przybliży słowacką gospodarkę do celu osiągnięcia neutralności klimatycznej. Dywersyfikacja nośników energii w sposób bezpośredni przełoży się na poprawę bezpieczeństwa energetycznego. Zaangażowanie Słowacji w rozwój technologii wodorowych wpłynie na zwiększenie innowacyjności gospodarki, rozbudowę infrastruktury energetycznej, a także poprawę sytuacji na rynku pracy.

7.3. Instrumenty gospodarki wodorowej

W NSW wskazano szereg instrumentów, które mają znaczenie dla wdrażania i rozwoju technologii wodorowych w Słowacji. W przywołanym dokumencie, wodór jest postrzegany jako warunek osiągnięcia celu dekarbonizacji gospodarki oraz budowania przewagi w sektorze energetycznym. Instrumenty gospodarki wodorowej, które wynikają zarówno z NSW, założeń Unii Europejskiej oraz Międzynarodowej Agencji Energetycznej, można podzielić na kilka podgrupy: polityczne, gospodarcze, badawcze.

Do grupy instrumentów politycznych zaliczono przede wszystkim działania normatywno-instytucjonalne. Tym samym jednym ze środków osiągania zakładanych celów jest opracowanie polityk, które będą stymulowały popyt na wodór. W tym celu rząd podjął się wdrożenia działań wspierających tworzenie innowacyjnych produktów, technologii i rozwiązań przemysłowych do produkcji wodoru i jego przetwarzania w ramach procesów w słowackim przemyśle i energetyce. Wśród tej grupy instrumentów znalazły się również działania, które mają na celu opracowanie wspólnego standardu niskiej emisji dwutlenku węgla podczas produkcji i eksploatacji wodoru, a także działania, mające na celu stworzenie ogólnej terminologii i kryteria certyfikacji technologii wodorowych. Rząd Republiki Słowackiej chce aktywnie współtworzyć program pilotażowy, który będzie wspierał rozwój niskoemisyjnych technologii. Dodatkowo w ramach instrumentów zakwalifikowanych do tej grupy należy wskazać na działania obejmujące długoterminowe zachęty dla inwestorów zewnętrznych oraz stymulowanie popytu komercyjnego na wodór. W grupie politycznych instrumentów działania wskazano również na konieczność podjęcia środków, które ograniczają zagrożenia będące następstwem wprowadzenia nowej technologii w całym łańcuchu dostaw wodoru. Istotne, z punktu widzenia wymiany doświadczeń i dobrych praktyk, jest wsparcie badań rozwoju i wymiany wiedzy w zakresie zastosowań technologii wodorowych. Natomiast dla tworzenia wspierającego otoczenia dla rozwoju i funkcjonowania gospodarki wodorowej jest harmonizacja przepisów prawnych, a także usuwania barier legislacyjnych, które opóźniają wdrażanie rozwiązań wodorowych.

Drugą grupą instrumentów gospodarki wodorowej są instrumenty gospodarcze. W tym miejscu warto podkreślić, iż rozwój gospodarki wodorowej jest projektem, który ma znaczenie dla Unii Europejskiej. W praktyce przekłada się to na zainteresowanie Komisji Europejskiej tego typu projektami, a co za tym idzie – projekty mogą liczyć na wsparcie finansowe UE. NSW zakłada realizację projektów nie tylko na obszarze Słowacji, ale również projektów o charakterze transgranicznym, w zakresie połączeń przesyłowych. Wskazane projekty mają największą szansę do zakwalifikowania ich na listę tzw. ważnych projektów będących przedmiotem wspólnego europejskiego zainteresowania. Finansowanie pochodzące z budżetu UE można łączyć, co generuje dodatkowe wsparcie finansowe. W NSW wskazano na kilka instrumentów finansowych, przy czym mają one przede wszystkim charakter zewnętrzny i wynikają z instrumentów i wsparcia UE.

Można do nich zaliczyć m.in.:

1. Instrumenty naprawy i odporności na rzecz inwestycji i reform, z naciskiem na gospodarkę ekologiczną i cyfrową. Wskazany instrument ma na celu wsparcie ożywienia gospodarczego, zwłaszcza w zakresie technologii ekologicznych.
2. Europejskie Fundusze Strukturalne i Inwestycyjne na okres programowania 2021–2027.
3. Fundusz Sprawiedliwej Transformacji, który do tej pory był powiązany z regionami węglowymi, ale może mieć szerszy zakres dla regionów z przemysłami energochłonnymi.
4. Instrument Inwestycji Strategicznych mający na celu mobilizację inwestycji prywatnych z pomocą Europejskiego Banku Inwestycyjnego i krajowych banków prorozwojowych.
5. Instrument „Łącząc Europę” – dotacje na sfinansowanie odpowiedniej infrastruktury, dostosowanie sieci gazowych lub stacji tankowania wodoru.
6. Fundusz InvestEU, z którego 30% zostanie przeznaczone na działania wspierające rozwiązania w zakresie zmian klimatycznych.
7. Unijny mechanizm finansowania wspólnych projektów energii odnawialnej w celu wspierania powszechnego przyjmowania innowacyjnych technologii.

Na poziomie państwa wśród instrumentów finansowych wskazano na konieczność wykorzystania potencjału partnerstwa publiczno-prywatnego oraz *venture capital* zwłaszcza dla realizacji dużych projektów infrastrukturalnych.

Ostatnia grupa instrumentów obejmuje badania. Środki w tej grupie odnoszą się przede wszystkim do rozwoju współpracy w zakresie badań i innowacji. Do tej grupy instrumentów należy zarówno budowanie partnerstw międzynarodowego w zakresie wykorzystania wodoru, a także przygotowanie i realizacji dwu- i wielostronnych projektów badań stosowanych i rozwoju przemysłowego. W NSW wskazano na konieczność zaangażowania Słowacji w realizacji projektów unijnych, przy jednoczesnym promowaniu i angażowaniu środowiska akademickiego,

instytutów badawczych, a także integracje pomiędzy sektorem publicznym i prywatnym.

7.4. Określenie celów gospodarki niskoemisyjnej do 2050 roku oraz sposobu ich osiągnięcia

Republika Słowacji określiła cele w zakresie redukcji emisji, których efektem końcowym jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do roku 2050. Warto podkreślić, iż kluczowym działaniem dla osiągnięcia wskazanego celu klimatyczno-energetycznego jest aktywizacja działań w latach 2020–2030. W dokumencie „Strategia niskoemisyjnego rozwoju Republik Słowackiej do 2030 r. z perspektywą do 2050 r.”⁶, określono trzy rodzaje scenariuszy redukcji emisyjności. Pierwszy scenariusz zakłada osiągnięcie celów w oparciu o istniejące środki (WEM), drugi przewiduje konieczność wdrożenia środków dodatkowych (WAM). Jednak jak podkreślono w przywołanym dokumencie, aby ambitne cele dekarbonizacji zostały osiągnięte, istotne jest poniesienie dodatkowych środków, które są przewidziane w tzw. scenariuszu neutralnym, mającym na celu zbliżenie Słowacji do celów wyznaczonych w perspektywie do 2050 roku.

Słowacja posiada cel w zakresie dekarbonizacji do 2050 r., który przewiduje optymistyczny poziom redukcji emisji o 90% w stosunku do 1990 r., co w dalszym ciągu nie będzie wystarczające do osiągnięcia celu neutralności klimatycznej. Warto wskazać, że według szacunków Banku Światowego redukcja emisji przez Słowację o 70% w porównaniu z 1990 r., będzie generowała koszty na poziomie 8 mld EUR w latach 2020–2030, natomiast w okresie 2031–2050 koszty na poziomie 196 mld EUR. Zatem ambitne plany Słowacji będą wymagały poniesienia wyższych kosztów i większych nakładów związanych z dekarbonizacją gospodarki⁷.

Działania, których realizację przewidziano w latach 2020–2050 będą finansowane zarówno przez rząd Słowacji, jak również będą pochodziły z budżetu UE, ze środków przewidzianych między innymi na zwalczanie zmian klimatu. Mimo przyjęcia ambitnego celu zmniejszenia emisji do 2050 r. do 90% w dalszym ciągu poziom emisji będzie wynosił co najmniej 14 Mt CO₂/eq⁸. Warto podkreślić, że zakładane spadki emisyjności wymagają zarówno zmiany zachowań społecznych, jak i podjęcia wielosektorowej i głębokiej transformacji słowackiej gospodarki.

Słowackie cele redukcji emisji gazów cieplarnianych są oparte na celach i wskaźnikach przyjętych na poziomie UE (tabela 1.). Słowacja zobowiązała się do stopniowej dekarbonizacji gospodarki narodowej. Główny punkt ciężkości został położony na redukcję gazów cieplarnianych w sektorze zaliczanym do sektorów w ramach Europejskiego Systemu handlu Emisjami (EU ETS) to jest

⁶ *Low-Carbon Development Strategy of the Slovak Republic until 2030 with a View to 2050. Proposal.*

⁷ *Ibidem*, s. 6.

⁸ *Ibidem*, s. 15.

w przemyśle i energetyce o 43%. Z kolei redukcja emisji gazów cieplarnianych w sektorze poza systemem handlu emisjami (GHG) obejmujących pozostałe sektory gospodarki jak: budownictwo, transport, rolnictwo i gospodarkę odpadami o 20%. Pociąga to za sobą konieczność zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii, określonych na poziomie 19,2% oraz poprawy efektywności energetycznej do poziomu 30,3%⁹.

Tabela 1. Cele w zakresie dekarbonizacji do 2030 r.

Table 1. Targets for 2030

Wyszczególnienie	Cele UE	Cele narodowe
Emisja gazów cieplarnianych (punkt odniesienia 1990)	Minimum 40%	Nieokreślone
Emisja w sektorze ETS* (rok odniesienia 2005)	-43%	-43%
Emisja GHG** rok odniesienia 2005)	-30%	-12% (-20%)
Udział OZE	32%	19,2%
Efektywność energetyczna	32,5%	30,3%

* ETS – Europejski System Handlu Emisjami;

** GHG – Emisje gazów cieplarnianych poza EU-ETS.

Źródło: *Low-Carbon Development...*, s. 19.

W kontekście wdrażania założeń polityki klimatyczno-energetycznej istotne są przede wszystkim instrumenty polityczne, wśród nich Dyrektywa wprowadzająca system handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych¹⁰ w Unii (EU ETS) oraz Rozporządzenie w sprawie wiążących rocznych redukcji emisji gazów cieplarnianych przez państwa członkowskie w latach 2021–2030 dla sektorów gospodarki, która nie jest objęta unijnym systemem handlu uprawnieniami do emisji¹¹. W ramach wskazanych dokumentów, a także określonych w ramach EU ETS sektory, które odpowiadają za około 45% emisji UE, muszą zredukować swoje emisje o 43% do 2030 r. w porównaniu z 2005 r. Wysoka emisyjność gospodarki słowackiej sugeruje, że koszt dostosowania gospodarczego dla sektorów energochłonnych może być wysoki. Jednak, jeśli zostaną odpowiednio dobrane środki polityczne i gospodarcze, to Słowacja posiada wysoki potencjał opłacalnej redukcji emisji. Dodatkowo wyznaczono również cele, które obejmują sektory, które nie są sektorami objętymi systemem handlu uprawnieniami do emisji, muszą łącznie zredukować o około 30% poniżej poziomu z 2005 roku (na poziomie unijnym).

⁹ *Low-Carbon Development...*, s. 19.

¹⁰ Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/410 z dnia 14 marca 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2003/87/WE w celu zwiększenia opłacalności redukcji emisji i inwestycji niskoemisyjnych oraz Decyzja (UE) 2015/1814 (Dz. Urz. UE L 76 z dnia 19.03.2018), s. 3–27.

¹¹ Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/842 z dnia 30 maja 2018 r. w sprawie wiążących rocznych redukcji emisji gazów cieplarnianych przez państwa członkowskie w latach 2021–2030 przyczyniających się do działań na rzecz klimatu w celu wypełnienia zobowiązań wynikających z porozumienia paryskiego oraz zmieniające rozporządzenie (UE) Nr 525/2013 (Dz. Urz. UE L 156 z dnia 19.06.2018), s. 26–42.

Słowacja zwiększyła swój cel o 12%¹² redukcji emisji gazów cieplarnianych spoza ETS do 2030 r., natomiast w strategii środowiskowej 2030 cel ten został określony jako zmniejszenie o 20%.

Cele gospodarki niskoemisyjnej w Republice Słowacji należy uznać za ambitne. Biorąc pod uwagę uwarunkowania polityki energetycznej, obecną strukturę produkcji energii elektrycznej, a także emisyjność gospodarki będą one trudne do osiągnięcia przy wykorzystaniu znanych i obecnie stosowanych środków i technologii. Ambitne cele niskoemisyjnej gospodarki wymagają wprowadzenia nowych technologii, zmian zachowań konsumenckich. Umiejętne balansowanie pomiędzy interesami narodowymi, celami ogólnounijnymi oraz wykorzystanie możliwości technologicznych oraz inwestycyjnych w zakresie wodoru stanowią obecnie realną alternatywę dla osiągnięcia neutralności klimatycznej Słowacji do 2050 roku. Warto wskazać, że w Strategii niskoemisyjnej wskazano na konieczność podjęcia dodatkowych działań i środków w celu osiągnięcia przyjętych celów. Przy czym nie wskazano, jakie mają być to środki i jaki powinien być właściwy kierunek działania. Mając na uwadze dążenie Unii Europejskiej do budowania Europejskiego Zielonego Ładu, a także opracowanie strategii wodorowej na poziomie UE, a w konsekwencji w państwach członkowskich, wydaje się, że rozwój technologii wodorowych może stanowić główny środek w osiągnięciu neutralności klimatycznej. W dążeniu do zielonego ładu, gospodarki neutralnej dla środowiska, jak również utrzymania konkurencyjności przemysłu, technologie wodorowe są interesującą alternatywą, zwłaszcza, że wodór jest określany jako czysty nośnik energii. Mając na względzie przyjęcie Strategii wodorowej, oczekuje się, że wodór będzie odgrywał istotną rolę w różnych procesach chemicznych, zwłaszcza w branżach energochłonnych, takich jak przemysł szklarski i metalurgiczny. Większość produkcji wodoru jest obecnie powiązana z wykorzystaniem surowców kopalnych (gaz ziemny, węgiel), co oznacza, że produkcja wodoru generuje CO₂ i inne gazy cieplarniane. Fakt ten wymaga poszukiwania alternatywnych rozwiązań, które zastąpią tradycyjną produkcję wodoru. Mając na uwadze rosnący udział odnawialnych źródeł energii, można prognozować produkcję zielonego wodoru, co w sposób bezpośredni przełoży się na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Zastosowanie wodoru na Słowacji jest brane pod uwagę również w przemyśle stalowym i procesach metalurgicznych, które stanowią ważną część słowackiej gospodarki¹³.

Dodatkowo wodór w stanie gazowym może być mieszany z siecią dystrybucji gazu ziemnego, którą Republika Słowacka ma bardzo dobrze rozwiniętą. Będzie można go wykorzystać do transportu wodoru po modyfikacjach technicznych, które zostaną poprzedzone szczegółową ekspertyzą stanu technicznego rurociągu. Wykorzystanie wodoru i różnych form mieszanin gazowych zawierających wodór będzie odgrywać ważną rolę w dekarbonizacji gospodarki cieplnej¹⁴. Według

¹² *Low-Carbon Development...*, s. 20.

¹³ J. Sinay i in., *Národná vodíková...*, s. 7.

¹⁴ *Ibidem*, s. 8.

założeń poczynionych w Strategii wodorowej do 2030 r., Słowacja będzie zużywała 178 kT wodoru rocznie. Intensywne wykorzystanie wodoru zakłada wzrost jego całkowitego zużycia od 400 do 1470 kT do 2050 roku, czyli z 18 do 66,2 TWh. Biorąc pod uwagę ograniczenia mocy systemu elektroenergetycznego, realizacja najbardziej ambitnego scenariusza produkcji wodoru będzie wymagała zaangażowania wszystkich dostępnych technologii produkcji wodoru oraz metod jego transportu i przechowywania. Z kolei zmiana w procesie produkcji stali na niskoemisyjną z wykorzystaniem wodoru, spowodowałaby, że zużycie wodoru w przemyśle wzrosłoby 2,8-krotnie. Natomiast zmiany w sektorze transportu, poprzez wykorzystanie napędu wodorowego do 2050 r. pozwoli na dekarbonizację wskazanego sektora do poziomu 50% (obejmujące segment pojazdów lekkich, autobusów, ciężarówek i pociągów)¹⁵. Wykorzystanie wodoru w transporcie może przyczynić się do dywersyfikacji źródeł paliw.

Dodatkowo środki osiągania zakładanych celów gospodarki niskoemisyjnej obejmują szereg działań o różnym stopniu zaawansowania i są indywidualne dla każdego z podsektorów. W sektorze budowlanym działania będą polegały na poprawie właściwości cieplno-technicznych budynków poprzez wprowadzenie opłacalnej gruntownej renowacji budynków. Ustawodawstwo i zmiany w krajowych normach technicznych po 2012 roku wprowadziły warunki do stopniowego zaostrzania wymagań dotyczących charakterystyki energetycznej nowych budynków oraz budynków poddawanych generalnej renowacji, które podlegają regularnym przeglądom. Najważniejszym źródłem potencjalnych oszczędności energii do 2030 roku są działania w sektorze budowlanym¹⁶. W sektorze ciepłowniczym optymalizacja systemów ciepłowniczych – przejście z paliw kopalnych na biomasę i gaz ziemny oraz montaż jednostek kogeneracyjnych, poprawa efektywności systemów ciepłowniczych, instalowanie innowacyjnych technologii ciepłowniczych, poprawa zaopatrzenia w ciepło z elektrociepłowni. Dodatkowo stopniowe wycofywanie z eksploatacji instalacji grzewczych na paliwa stałe od 2025 roku, natomiast w transporcie dotacje na wsparcie pojazdów napędzanych paliwami alternatywnymi¹⁷. Obecny rząd wspiera rozwój technologii wodorowych, zwłaszcza w sektorze transportu, w tym transportu publicznego¹⁸.

Warto wskazać również na działania, które mają na celu ograniczenie emisji z sektora wydobywczego, obejmujące zakończenie produkcji energii elektrycznej w Nováky (wstrzymanie produkcji energii elektrycznej z węgla ma nastąpić do końca 2023 r.) i stopniowe ograniczenie wydobycia węgla. Przy czym elektrownia Nováky może pozostać głównym źródłem ciepła dla regionu po jego przekształceniu ze stałych paliw kopalnych.

¹⁵ *Ibidem*, s. 9.

¹⁶ *Low-Carbon Development...*, s. 29.

¹⁷ *Ibidem*, s. 29.

¹⁸ Ł. Ogrodnik, *Przyspieszenie klimatyczno-energetycznej transformacji Słowacji*, „Biuletyn PISM” nr 130 (2328) z 8 lipca 2021.

Emisje dwutlenku węgla z sektora energetycznego są nadal prognozowane w samym 2050 r. na poziomie wyższym, tworząc lukę, która musi zostać wyeliminowana do 2050 r. Jest to warunek konieczny do osiągnięcia celu neutralności klimatycznej przez Słowację. Dokumenty strategiczne określające poziom redukcji emisji zostały określone do 2040 r., bowiem po tym czasie rząd zakłada konieczność przeprowadzenia głębokiej i jakościowej aktualizacji polityk w tym zakresie. Niemniej jednak warto w tym miejscu odwołać się do efektów łagodzących zakładanych w Strategii wodorowej według scenariusza do 2035 roku.

Tabela 2. Redukcja emisji gazów cieplarnianych do 2035 r. (Gg CO₂eq.)Table 2. Reduction of greenhouse gas emission for 2035 (Gg CO₂ eq.)

Nazwa środka łagodzącego	Redukcja emisji gazów cieplarnianych do 2035 r. (Gg CO ₂ eq.)		
	UE ETS*	GHG**	Razem
Wpływ środowiskowe i używanie produktów		69,85	69,85
Poprawa efektywności energetycznej (propozycja KE)	995,73	422,33	1 418,07
Cele dla OZE (propozycja KE)	301,73	69,45	371,18
Optymalizacja sieci ciepłowniczej DHS	634,26	105,47	739,72
Likwidacja elektrowni na paliwa kopalne	631,88	105,07	736,95
Dekarbonizacja wytwarzania energii elektrycznej (WAM)***	611,79	140,81	752,6
Kontynuowanie poprawy końcowej efektywności energetycznej dla wszystkich sektorów	1507,13	639,24	2145,36

* ETS – Europejski System Handlu Emisjami;

** GHG – Emisje gazów cieplarnianych poza EU-ETS;

*** WAM – scenariusz z dodatkowymi środkami.

Źródło: *Low-Carbon Development...*, s. 82.

7.5. Struktura produkcji energii elektrycznej

Całkowita produkcja energii elektrycznej w 2020 r. wyniosła 28 590 GWh, co oznacza wzrost o 9% w stosunku do 1990 r. (tabela 3.). Od 2005 r. systematycznie i dynamicznie wzrasta produkcja energii z biopaliw, przy jednoczesnym spadku udziału węgla i ropy naftowej. Republika Słowacji konsekwentnie dąży do osiągnięcia niskoemisyjnej produkcji energii elektrycznej.

Słowacki system produkcji energii elektrycznej jest modernizowany na poziomie wytwarzania i przesyłu. Produkcja energii elektrycznej jest zdominowana przez źródła niskoemisyjne: energię jądrową oraz wodną. Dodatkowo systematycznie wzrasta udział energii odnawialnej. Przeszło 80% produkcji energii

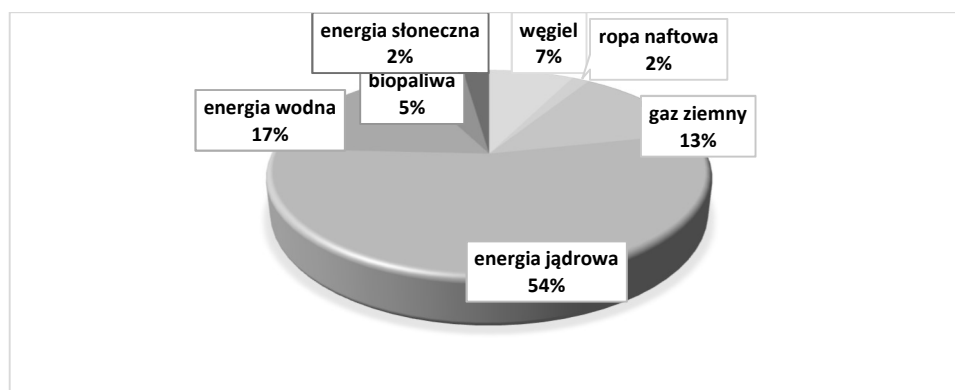
elektrycznej ma charakter niskoemisyjny (rys. 1.). Techniczny zmienny potencjał produkcji odnawialnej energii elektrycznej jest prawie dwa razy wyższy niż oczekiwane zapotrzebowanie na energię elektryczną w 2030 r. na Słowacji, co według oceny stwarza umiarkowane możliwości wykorzystania tego potencjału odnawialnej energii elektrycznej do produkcji wodoru poprzez elektrolizę¹⁹.

Tabela 3. Produkcja energii elektrycznej (GWh)

Table 3. Electricity generation by source (GWh)

	Węgiel	Ropa naftowa	Gaz ziemny	Energia jądrowa	Energia wodna	Odpady	Biopaliwa	Inne	Energia wiatrowa	Energia słoneczna
1990	8123	1635	1823	12036	2515					
1995	6990	740	2381	11437	5226					
2000	6111	202	3344	16494	4975	32				
2005	5980	741	2184	17727	4741	47	9	20	6	
2010	4080	600	2206	14574	5649	46	640	40	6	17
2015	3332	384	1604	15146	4137	48	1640	100	6	506
2020	2121	426	3618	15417	4739	38	1509	62	4	656

Źródło: IEA, *Slovak Republic*, <https://www.iea.org/countries/slovak-republic> (dostęp: 15.04.2022 r.).



Rys. 1. Produkcja energii elektrycznej w 2020 r. (%)

Fig. 1. Electricity generation by source 2020 (%)

Źródło: IEA, *Slovak Republic*, <https://www.iea.org/countries/slovak-republic> (dostęp: 20.04.2022 r.).

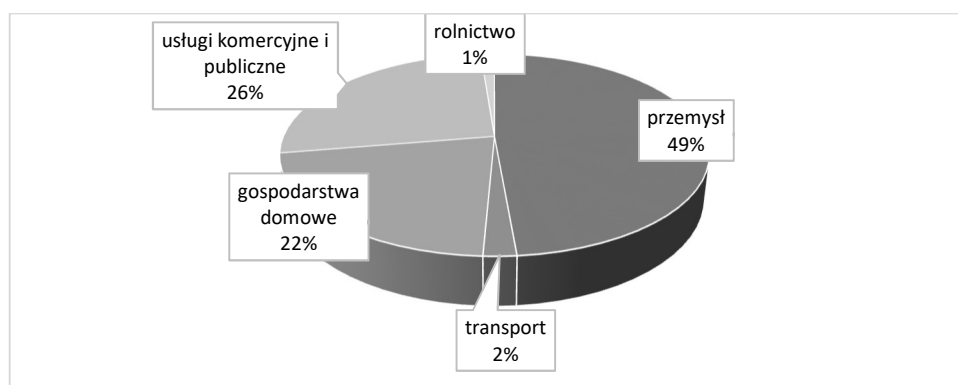
Poziom udziału odnawialnych źródeł energii wyznaczony przez UE dla Słowacji na poziomie 14% pokazuje, że istnieje potencjał do osiągnięcia wytycznych

¹⁹ *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies. Considering the National Energy & Energy Climate Plans, Slovakia*, FCH 2020, s. 10.

Komisji Europejskiej²⁰. Stały udział energii jądrowej przy jednoczesnym wzroście odnawialnych źródeł energii rekompensują odchodzenie od węgla i gospodarki wysokoemisyjnej.

Przyjęcie celu dążenia do samowystarczalności energetycznej przez Słowację oraz analiza produkcji oraz konsumpcji energii elektrycznej wskazuje, że Słowacja konsekwentnie przybliża się do tego celu. Świadczy o tym dążenie do zmiany struktury paliwowo-energetycznej, która uwzględnia spadek wydobycia gazu ziemnego z własnych źródeł, a co za tym idzie – również spadek konsumpcji, na rzecz odnawialnych źródeł energii oraz energii jądrowej.

Z punktu widzenia wyzwań dla strategii energetycznej Słowacji warto zwrócić uwagę na strukturę zużycia energii elektrycznej według sektorów (rys. 2.). Najwyższy odsetek zużycia energii elektrycznej jest właściwy dla przemysłu, który obejmuje 49% oraz usług komercyjnych i publicznych, które zużywają 26% energii elektrycznej. Przekłada się to na wyzwania we wskazanych sektorach gospodarki, które wymagają głębokich reform, zwłaszcza w zakresie redukcji emisji.



Rys. 2. Zużycie energii elektrycznej według sektorów w 2019 r.

Fig. 2. Electricity consumption by sector 2019

Źródło: IEA, *Slovak Republic*, <https://www.iea.org/countries/slovak-republic> (dostęp: 15.04.2022 r.).

Warto nadmienić, że zapotrzebowanie na energię elektryczną, które jest pokrywane przez Słowację generuje stały spadek importu energii netto. Poziom importu energii netto w 2020 r. wyniósł 371.3692 TJ, co stanowi spadek o 45% w stosunku do 1990 r. Zatem aby utrzymać tendencje samodzielnego pokrywania potrzeb w zakresie zapotrzebowania energii elektrycznej, przy uwzględnieniu wymagań ochrony środowiska oraz konkurencyjności gospodarki istotne jest wprowadzanie dalszych reform w sektorze energetycznym. Słowacja posiada potencjał rozwoju gospodarki neutralnej klimatycznie przede wszystkim ze względu na niski

²⁰ Ł. Ogrodnik, *Przyspieszenie klimatyczno-energetycznej...*

śląd węglowy miski energetycznego, co jest konsekwencją udziału energetyki jądrowej oraz dobrze rozwiniętej energetyki wodnej. Należy odnotować ograniczony potencjał odnawialnych źródeł energii.

Jak wskazano powyżej, alternatywą dla istniejących i funkcjonujących obecnie rozwiązań jest inwestycja, rozwój i umacnianie swojej pozycji w zakresie technologii wodorowych. Na Słowacji zapotrzebowanie na wodór generowany jest zwłaszcza w sektorze przemysłu oraz usług komercyjnych i publicznych. Obecnie wykorzystanie wodoru jest w dalszym ciągu ograniczone. Wdrożenie technologii wodorowych przyczyni się przede wszystkim do dekarbonizacji dostaw gazy w sektorze przemysłu. Największe możliwości dla rozwoju technologii wodoru są związane z ich wdrożeniem w sektorze transportu drogowego. We wskazanym sektorze wartością będzie dekarbonizacja ciężarówek oraz autobusów. Dodatkowo, wraz z elektryfikacją, wodór może zostać wykorzystany do zastąpienia paliw kopalnych w sektorze samochodów osobowych. Jedną czwartą zapotrzebowania na energię przemysłową na Słowacji pokrywaną przez gaz ziemny można stosunkowo łatwo zastąpić odnawialnym wodorem. Ponadto ponad połowa zapotrzebowania na energię w przemyśle jest wykorzystywana do wytwarzania ciepła. Stanowi to dużą szansę na zastosowanie wodoru, ponieważ jest to jeden z niskoemisyjnych nośników energii, który doskonale nadaje się do wytwarzania ciepła o wysokiej temperaturze²¹.

7.6. Charakterystyka infrastruktury energetycznej na potrzeby gospodarki wodorowej

Rozwój technologii wodorowych wymaga stworzenia infrastruktury wodorowej do jego przesyłu, magazynowania oraz skraplania. Przesył wodoru jest możliwy przy wykorzystaniu różnych wariantów logistycznych. Jednak istotne jest, aby dla opłacalności prowadzonych inwestycji nie generowały dodatkowo wysokich kosztów. Najwyższe koszty generuje transport drogowy. Najtańszym sposobem dostarczania dużych ilości wodoru jest wykorzystanie przesyłu rurociągami. Obecnie możliwości tego przesyłu są ograniczone ze względu na infrastrukturę, która funkcjonuje przy istniejącej sieci dystrybucji, a ta z kolei znajduje się w pobliżu rafinerii i zakładów chemicznych. Transport wodoru jest możliwy za pośrednictwem wykorzystania istniejącej infrastruktury gazowej, jednak będzie on obejmował zaledwie przesył wodoru o objętości do 20% w gazie ziemnym. Dużym wyzwaniem jest budowa infrastruktury magazynowej wodoru. Magazynowanie wodoru w formie gazowej jest możliwe zarówno z zastosowaniem butli, jak również z wykorzystaniem istniejącej podziemnej infrastruktury magazynowej gazu ziemnego²².

²¹ *Opportunities for Hydrogen Energy...*, s. 12.

²² Návrh Národného politického rámca pre rozvoj trhu s alternatívnymi palivami.

W związku z możliwością wykorzystania infrastruktury przesyłowej i magazynowej gazu ziemnego, warto dokonać analizy istniejącego potencjału infrastrukturalnego w Słowacji.

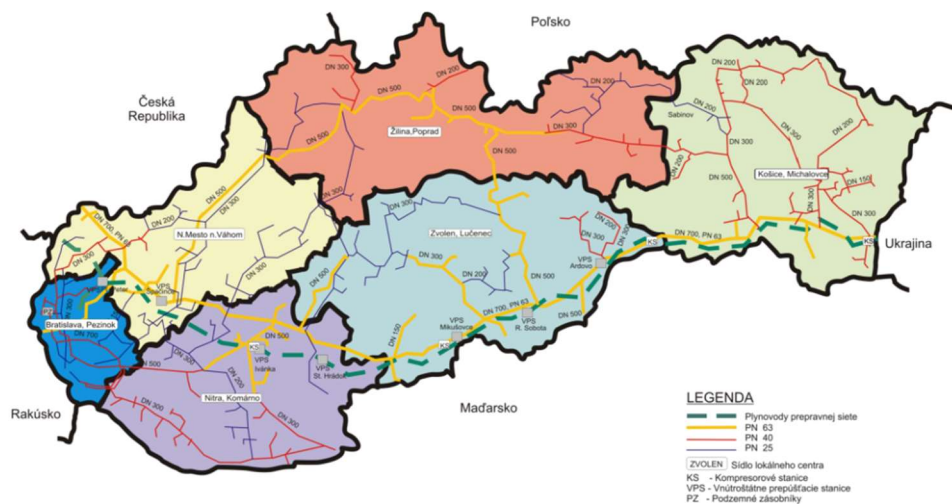
Operatorem systemu przesyłowego ciśnienia jest spółka Eustream. System jest połączony z głównymi szlakami przesyłowymi w Ukrainie, Czechach i Austrii. Najważniejsza sieć kompresorów znajduje się w Veľké Kapušany na granicy słowacko-ukraińskiej, z łączną mocą prawie 300 MW i jest największą tłocznia w UE. Moc techniczna w punkcie wejścia do Veľké Kapušany wynosi 2028 GWh, co odpowiada 195 mln m³ dziennie. Zgodnie z komunikatem wydanym w dniu 31 sierpnia 2021 r. przez Eustream, spółka ta przygotowuje swoją sieć do transportu gazów odnawialnych i niskoemisyjnych. Dostosowania mają na celu zapewnienie technologicznych możliwości transportu wodoru do 5% z transportowanym gazem ziemnym. Modernizacja ma zostać osiągnięta do 2023 roku. Przy obecnych wskaźnikach przesyłowych Słowacji wprowadzone zmiany stworzą możliwość transportu ponad 2 mld m³ wodoru rocznie. Dodatkowo istniejące połączenia międzysystemowe z państwami sąsiednimi, które są zbudowane z czterech do pięciu równoległych rurociągów, mogą być wykorzystane do modernizacji części przesyłowej, która będzie przeznaczona tylko do przesyłu wodoru w 100%²³.

Na uwagę zasługuje projekt realizowany wraz z polską spółką Gaz-System, którego celem jest integracja systemów przesyłowych Polski i Słowacji. Warto nadmienić, że połączenie jest częścią realizacji projektu budowy korytarza Północ-Południe, co ma zapewnić dywersyfikację i stabilność dostaw gazu do obydwu państw oraz wzmocnienie rynku gazu w regionie. Mając na uwadze rozwój technologii wodoru, infrastruktura przesyłowa gazu w Słowacji posiada duży potencjał. Analizowane połączenie oprócz zapewnienia dostępu do gazu na polskim rynku, w tym LNG (z Morza Adriatyckiego), może w przyszłości zaoferować nie tylko rynkowi słowackiemu, ale i całemu regionowi pozyskanie surowców z regionu Morza Bałtyckiego oraz złóż niekonwencjonalnych w Polsce.

Dodatkowo, jak wskazano powyżej, do dystrybucji i przechowywania wodoru może służyć istniejąca infrastruktura magazynowa gazu ziemnego. Obecnie pojemności magazynowe na Słowacji zapewniają Nafta i Pozagas, a dodatkowo również magazyn SPP Storage należący do SPP Infrastructure w miejscowości Dolní Bojanovice w Czechach, który jest obecnie podłączony do słowackiego systemu gazowego i służy do bilansowania krajowej sieci dystrybucyjnej. Firma podjęła niedawno ostateczną decyzję inwestycyjną o podłączeniu do czeskiej sieci w 2022 roku. Łączna pojemność magazynowa gazu ziemnego na Słowacji wynosi 37 647 GWh lub 3,55 mld m³ gazu. Razem ze zbiornikiem na Morawach daje łącznie 43 764 GWh, czyli 4,12 mld m³²⁴.

²³ EP Infrastructure, *EUSTRAM technologically ready to transport hydrogen from 2023*, <https://www.epinfrastructure.cz/en/news/eustream-technologically-ready-to-transport-hydrogen-from-2023/> (dostęp: 23.03.2022 r.).

²⁴ EnergoKlub, *Skladovanie plynu laka novych investorov aj na Slovensku*, <https://energoklub.sk/sk/clanky/skladovanie-plynu-laka-novych-investorov-aj-na-slovensku/> (24.03.2022).



Rys. 3. Mapa gazowej sieci dystrybucji gazu ziemnego w Słowacji

Fig. 3. Map of the natural gas distribution network in Slovakia

Źródło: SPP Distribúcia, Mapa distribučnej siete, <https://www.spp-distribucia.sk/o-spolocnosti/co-robime/mapa-distribucnej-siete/> (dostęp: 26.04.2022 r.).

Zastosowanie technologii wodorowych ma potencjał również w sektorze transportu. Jednak opcja rozwoju tych technologii w tym sektorze ma zagorzałych przeciwników, głównie ze względu na argumenty dotyczące małej wydajności. Słabą stroną inwestycji jest również brak infrastruktury. W transporcie technologie wodorowe mają konkurencję w postaci technologii elektrycznych. Obecnie prace nad wykorzystaniem wodoru w sektorze transportu są we wczesnej fazie rozwoju. Wodór w transporcie może być wykorzystany zarówno w transporcie indywidualnym, jak również w transporcie publicznym, obejmującym nie tylko autobusy, ale również w transporcie kolejowym i morskim.

7.7. Wnioski

Unia Europejska przyjmując Strategię wodorową UE stworzyła państwom członkowskim ramy działania dla wprowadzenia kolejnej niskoemisyjnej technologii. Jednak nie nałożyła obowiązku stworzenia powszechnie dostępnej infrastruktury wodorowej, pozostawiając tę kwestię do indywidualnej decyzji państw członkowskich. Warto zaznaczyć, że cele klimatyczne wyznaczone na poziomie unijnym wymuszają rozwój nowych technologii zapewniających zarówno niskoemisyjność, jak również samowystarczalność. Jak wskazano powyżej, miks energetyczny Słowacji na obecnym etapie jest zdominowany o niskoemisyjne nośniki energii. Natomiast potencjał odnawialnych źródeł energii jest ograniczony. Dotychczasowe utrzymanie obecnych poziomów nie zapewnią Słowacji osiągnięcia

neutralności klimatycznej do 2050 r. Wymagane jest zatem podejmowanie dodatkowych środków w tym celu.

Słowacja dysponuje potencjałem dla rozwoju technologii wodorowych. Rozwój nowej technologii jest obarczony wieloma barierami i wyzwaniem. Jednym z istotnych jest problem z ewentualną korozją sieci przesyłowej gazu ziemnego na skutek wykorzystania wyższego stężenia wodoru. Z punktu widzenia rozwoju technologii wodoru w sektorze transportu barierą pozostaje brak sieci stacji paliw. Zgodnie z zapowiedziami słowackiego Ministerstwa Gospodarki do 2023 r. powstanie podstawowa sieć stacji paliw.

Poważnym wyzwaniem dla wprowadzania i rozwoju technologii wodorowych na Słowacji jest brak konkretnych ram prawnych w omawianym zakresie. Obecnie realizowane projekty mają swoje umocowania prawne w przepisach odnoszących się bezpośrednio do ustawodawstwa z zakresu energii odnawialnej. Pewnego rodzaju wyzwaniem dla Słowacji jest brak doświadczenia w aplikacji i wykorzystaniu środków pochodzących z funduszy UE, do tej pory Słowacja nie wykorzystwała potencjału finansowego.

W transporcie wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego wymaga budowy szerokiej, efektywnej finansowo i energetycznie infrastruktury, zdolnej do transportu dużych ilości na duże odległości²⁵.

Rozwój technologii wodorowych jest jednak szansą dla budowy bezpieczeństwa energetycznego Słowacji oraz regionu. Wpływ na wskazaną sytuację jest konsekwencją kilku zmiennych. Po pierwsze, z punktu widzenia umacniania współpracy regionalnej potencjał technologii wodorowych nie został dotąd wykorzystany. Oznacza to, że plany rozwoju technologii wodorowych stworzą nową płaszczyznę współpracy zarówno bilateralnej, jak również wielostronnej. Warto nadmienić, że położenie geopolityczne Słowacji, jak również istniejące gazowe połączenia międzysystemowe z Ukrainą, Austrią, Węgrami, Czechami oraz Polską, stwarzają techniczne możliwości realizacji tego typu projektów, a co za tym idzie – mogą wzmacniać współpracę regionalną. Zasadne jest w tym miejscu wskazanie na realizację przez Orlen Polska międzynarodowego projektu wodorowego – Hydrogen Eagle, który zakłada budowę międzynarodowej sieci hubów wodorowych, które będą zasilane odnawialnymi źródłami energii oraz innowacyjnymi instalacjami, które będą przetwarzały odpady komunalne w wodór. Projekt jest realizowany przez Czechy, Słowację i Polskę. Technologie wodorowe mogą stanowić pewnego „rodzaju nowe otwarcie we współpracy energetycznej” w ramach Grupy Wyszehradzkiej. W dalszej perspektywie współpraca na tym poziomie pozwoliłaby na wzmocnienie pozycji państw regionu na forum Unii Europejskiej. Po drugie, technologie wodorowe w Słowacji, jeśli zostanie wykorzystany potencjał, mogą zapewnić samowystarczalność energetyczną przy osiągnięciu neutralności energetycznej. W perspektywie 2030 r. oraz 2050 r. jest to atrakcyjna alternatywa. Dodatkowo dynamiczny rozwój technologii wodorowej w Słowacji

²⁵ Návrh Národného politického..., s. 25.

ma potencjał wzmocnienia jej roli na rynku oraz osiągnięcia przez nią przewagi konkurencyjnej. Po trzecie, dynamicznie zmieniające się środowisko międzynarodowe oraz cyklicznie pojawiające się kryzysy energetyczne, powoduje, że rozwój wodoru staje się interesującą alternatywą zapewniającą bezpieczeństwo energetyczne. Wskazane zmiany stawiają państwa, w tym Słowację, która jest uzależniona od jednostronnych dostaw gazu ziemnego z Rosji, w sytuacji, że musi ona stworzyć warunki do elastycznego kształtowania miksu energetycznego. W dłuższej perspektywie technologie wodorowe mają przyczynić się do uniezależnienia się od importu paliw od niestabilnych dostawców. Rozwijanie nowych technologii zapewniających dostęp do energii elektrycznej stanowi wyzwanie i jednocześnie szansę dla Słowacji.

Bibliografia

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/410 z dnia 14 marca 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2003/87/WE w celu zwiększenia opłacalnych redukcji emisji i inwestycji niskoemisyjnych oraz Decyzja (UE) 2015/1814 (Dz. Urz. UE L 76 z dnia 19.03.2018).
2. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/842 z dnia 30 maja 2018 r. w sprawie wiążących rocznych redukcji emisji gazów cieplarnianych przez państwa członkowskie w latach 2021–2030 przyczyniających się do działań na rzecz klimatu w celu wypełnienia zobowiązań wynikających z porozumienia paryskiego oraz zmieniające rozporządzenie (UE) Nr 525/2013 (Dz. Urz. UE L 156 z dnia 19.06.2018).
3. Komunikat Komisji do Parlament Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów i Europejskiego Banku Europejskiego, „Czysta planeta dla wszystkich. Europejska długoterminowa wizja strategiczna dobrze prosperującej, nowoczesnej, konkurencyjnej i neutralnej dla klimatu gospodarki”, Bruksela, dnia 28.11.2018 r. COM(2018) 773 final.
4. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu, Bruksela, dnia 8.07.2020 COM (2020) 301 final.
5. EnergoKlub, *Skladovanie plynu laka novych investorov aj na Slovensku*, <https://energoklub.sk/sk/clanky/skladovanie-plynu-laka-novych-investorov-aj-na-slovensku/> (dostęp: 24.03.2022 r.).
6. EP Infrastructure, *EUSTRAM technologically ready to transport hydrogen from 2023*, <https://www.epinfrastructure.cz/en/news/eustream-technologically-ready-to-transport-hydrogen-from-2023/> (dostęp: 23.03.2022 r.).
7. *Low-Carbon Development Strategy of the Slovak Republic until 2030 with a View to 2050. Proposal.*
8. Ogrodnik Ł., *Przyspieszenie klimatyczno-energetycznej transformacji Słowacji*, „Biuletyn PISM” nr 130 (2328) z 8 lipca 2021.
9. *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies. Considering the National Energy & Energy Climate Plans, Slovakia*, FCH 2020.
10. Sinay J., Jesný M., Weiterschütz J., Blaškovič P., Sulík R., *Národná vodíková stratégia: Pripravení na budúcnosť (National Hydrogen Strategy of the Slovak “Ready for the Future”)*, 2021, <https://rokovania.gov.sk/download.dat?id=361F8BABC3FC4DED81622AEAC353040C-7E6A87522DA19835FF227E896470F449>.

Rozdział 8

STUDIUM PRZYPADKU – KOREA POŁUDNIOWA

Case study – South Korea

Daria PAJDOWSKA

Abstract: *In just 60 years, Korea has moved from an agricultural economy to an economy driven by high-value industries such as automotive, shipbuilding and advanced manufacturing. Currently, hydrogen is considered the cleanest energy source with significant storage and transport capacity. South Korea's policy as a country with significant opportunities in the hydrogen market is an important example in terms of supporting domestic potential in the broadly understood energy sector. This text analyzes the state's hydrogen strategy, pointing to its goals, instruments to implement them, and the consequences of the development of the hydrogen market for energy security.*

8.1. Wprowadzenie

Globalne dążenie do gospodarki niskoemisyjnej stanowi wyzwanie zarówno pod względem ekonomicznym, technologicznym, jak i prawnym. Już dekadę temu technologie wodorowe uznawane były za mogące dogłębnie zmienić sektor energetyczny¹. Wykorzystanie wodoru w energetyce *sensu largo* stanowi wyzwanie nie tylko z perspektywy krajowej, lecz także międzynarodowej. Według szacunków Komisji Europejskiej czysty wodór może zaspokoić 24% światowego zapotrzebowania na energię do 2050 roku².

Zastosowanie tzw. zielonego wodoru jest uważane za jeden z istotnych elementów osiągnięcia zerowej emisji CO₂ netto w energochłonnych, trudnych do dekarbonizacji sektorach, takich jak stal, chemikalia, transport dalekobieżny, transport morski i lotnictwo. Koszt zielonego wodoru jest obecnie około dwa razy wyższy w porównaniu z tak zwanym niebieskim wodorem, który jest wytwarzany przy użyciu paliw kopalnych z zastosowaniem wychwytywania i składowania dwu-

¹ W. Ciechanowicz, S. Szczukowski, *Transformacja Europy z Ery Ognia do Ekonomii Wodoru. Przyszłość ogniwi paliwowych spalających metanol. Czy Polska wykorzysta szansę?*, 2009, http://elektroenergetyka.pl/upload/file/2009/4/elektroenergetyka_nr_09_04_e1.pdf (dostęp: 19.04.2022 r.).

² European Commission, *Questions and answers: A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe*, 2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/qanda_20_1257/QANDA_20_1257_EN.pdf (dostęp: 19.04.2022 r.).

tlenku węgla (CCS)³. Ze względu na brak opłacalności dotychczasowego wykorzystania wodoru do celów energetycznych, technologia ta pozostawała na niskim poziomie rozwoju⁴.

Rosnące zainteresowanie rozwojem technologii wodorowych może w przeważającej mierze wynikać z przypisywanych mu powszechnie następujących cech:

1. Wodór może stanowić doskonały magazyn energii dla niestabilnych odnawialnych źródeł.
2. Wodór może potencjalnie zasilać obecne systemy gazowe (przesyłowe i dystrybucyjne).
3. Wodór może mieć zastosowanie w energetyce, przemyśle oraz transporcie⁵.

Cele Korei Południowej w zakresie rozwoju rynku wodoru są niewątpliwie ambitne, a kraj uznawany jest za posiadający wysoki potencjał rozwoju gospodarki wodorowej. Powyższe sprawia, iż działania rządu Korei w przedmiotowym zakresie, w szczególności strategia wodorowa kraju, stanowią niezwykle interesujący przedmiot analizy.

8.2. Analiza Strategii Wodorowej Korei Południowej

Geneza działań regulacyjnych na rzecz szeroko pojętego zrównoważenia w zakresie energetyki w przypadku Korei Południowej sięga 1980 r., kiedy to przyjęto ustawę o racjonalizacji zużycia energii (ang. *Energy Use Rationalization Act*)⁶. Celem ustawy jest promowanie tzw. zielonego wzrostu, przy jednoczesnym dążeniu do wsparcia międzynarodowych działań na rzecz przeciwdziałania zmianom klimatycznym. Ustawa nakłada na rząd obowiązek rozważenia działań służących skutecznej realizacji celu polityki energetycznej państwa, jakim jest stabilność popytu i podaży na energię niezbędną dla prawidłowego rozwoju gospodarki narodowej, minimalizacja czynników degradacji środowiska powodowanych przez energetykę oraz racjonalizacja wykorzystania energii⁷. Korea Południowa stosunkowo szybko odpowiedziała na kształtujące się wówczas międzynarodowe trendy w zakresie ochrony środowiska. W tym miejscu, jako przykład analo-

³ IRENA, *Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up electrolyzers to meet the 1.5 C climate goal*, 2020, https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf (dostęp: 19.04.2022 r.).

⁴ Uchwała nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. w sprawie przyjęcia „Polskiej strategii wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.” (M. P. z 2021 r., poz. 1138).

⁵ Cire.pl, *Wodór – nowe cudowne rozwiązanie wszystkich problemów energetycznych?*, 2020, <https://www.cire.pl/artykuly/opinie/154847-wodor-nowe-cudowne-rozwiazanie-wszystkich-problemow-energetycznych> (dostęp: 19.04.2022 r.).

⁶ Climate Change Laws of the World, *London School of Economics*, <https://www.climate-laws.org/geographies/south-korea> (dostęp: 20.03.2022 r.).

⁷ *Ibidem*.

gicznych działań o wymiarze międzynarodowym, można wskazać m.in. Konwencję o transgranicznym zanieczyszczeniu powietrza z 1979 roku⁸.

Stosunkowo szybko podjęto również wysiłki na rzecz rozwoju technologii w wrześniu 2005 r., Plan wdrożenia gospodarki wodorowej oraz Strategia sukcesywnego rozwoju w tym zakresie⁹. Powyższy dokument poddano swoistej rewitalizacji w 2019 r., przyjmując Plan rozwoju gospodarki wodorowej do 2040 roku (ang. *Korea Hydrogen Economy Roadmap 2040*) (dalej: Plan rozwoju). Dla ukazania zaawansowania działań Korei Południowej na stosunkowo wczesnym etapie warto wskazać, iż jakkolwiek powyższa strategia, przyjęta w 2019 r., zakłada dużo bardziej precyzyjne cele pod kątem rozwoju przemysłu wodorowego, stanowi ona bezpośrednią kontynuację polityki przyjętej w 2005 roku¹⁰. Jako kluczową różnicę między powyższymi dwoma regulacjami, która jednocześnie determinuje kształt dalszych uregulowań, można wskazać na myśli przewodnie przyświecające dokumentom. W przypadku strategii z 2015 r. jest to budowanie przyjaznej dla środowiska gospodarki wodorowej, jako państwo rozwinięte, z kolei w przypadku strategii z 2019 r. jest to budowanie wzrostu jako światowej klasy lider gospodarki wodorowej¹¹.

Aby w pełni zobrazować strategię wodorową Korei Południowej należy wskazać także na regulacje wykraczające poza Plan rozwoju gospodarki wodorowej do 2040 roku. W zakresie przedmiotowej materii można odnieść wrażenie, iż strategia tego kraju nie została w pełni określona w jednym dokumencie. Rząd Korei Południowej przewidział w tym zakresie szereg aktów prawnych istotnie wpływających na strategię państwa *sensu largo*. Poniższe dokumenty, jakkolwiek nie stanowią strategii wodorowej *sensu stricto*, istotnie dopełniają Plan rozwoju:

1. Ustawa o promocji gospodarki wodorowej i zarządzaniu bezpieczeństwem wodorowym.
2. Koreański Nowy Ład.
3. Strategia na rzecz neutralności emisji dwutlenku węgla do 2050 roku.
4. Ustawa ramowa na rzecz zielonego wzrostu neutralnego pod względem emisji dwutlenku węgla w celu rozwiązania kryzysu klimatycznego.

W zakresie wskazanych powyżej regulacji, z perspektywy ich charakteru prawnego można przyjąć dychotomiczny podział na akty prawne (ang. *laws*) oraz polityki (ang. *policies*). Z perspektywy określania strategii polityki zdają się z oczywistych względów istotnie bardziej doniosłe, aczkolwiek nie należy pomijać istniejących regulacji prawnych w przedmiotowym zakresie.

⁸ C. Mik, *Związek Unii Europejskiej prawem międzynarodowym zmiany klimatycznej* [w:] *Zmiany klimatu w świetle prawa Unii Europejskiej i prawa polskiego na tle porównawczym*, Warszawa 2021, <https://ios.edu.pl/wp-content/uploads/2021/12/Zmiany-klimatu-w-swietle-prawa-Unii-Europejskiej-i-prawa-polskiego-na-tle-porownawczym.pdf> (dostęp: 26.03.2022r.).

⁹ K. Hoon Chu, J. Lim., *Strategies for the expansion of green hydrogen production in South Korea*, "International journal of hydrogen energy" 2022, 47, s. 1412.

¹⁰ *Ibidem*, s. 1412.

¹¹ *Ibidem*, s. 1415.

Jak zauważono powyżej, kluczowym z perspektywy przedmiotowych rozważań dokumentem pozostaje przede wszystkim Plan rozwoju gospodarki wodorowej Republiki Korei do 2040 roku. Naczelny cel strategii, przyjętej w 2019 r., można określić najogólniej jako zwiększenie udziału wodoru w sektorach transportu i energetyki do 2040 roku¹². Wstęp do Planu rozwoju gospodarki wodorowej stanowi odwołanie do znaczenia gospodarki wodorowej i zarys wynikających z niej implikacji. Zamieszczona na wstępie definicja gospodarki wodorowej, określa ją w sposób przejrzysty i klarowny jako system ekonomiczny, w którym wodór stanowi ważne źródło energii, a technologie konwersji energii oparte na wodorze (m.in. ogniwa paliwowe) są opracowywane i wykorzystywane w celu ograniczenia zużycia paliw kopalnych i emisji CO₂¹³. Jakkolwiek dokument wiąże gospodarkę wodorową z redukcją emisji dwutlenku węgla, nie określa on wymiernych celów redukcyjnych. Brak takiego bezpośredniego odniesienia stał się przedmiotem krytyki wśród autorów, podnoszących, iż bez powiązania z konkretnym celem redukcji emisji CO₂ wodór staje się „niczym ponad kosztowne źródło energii”¹⁴.

Realizacja strategii wodorowej Korei niesie za sobą szereg doniosłych konsekwencji dla gospodarki i bezpieczeństwa państwa. Jako jedną z pierwszych autorzy Planu rozwoju wskazują skutki dla transportu oraz dla przedsiębiorstw sektora energii, zarówno zajmujących się poszukiwaniem i eksplorowaniem złóż (ang. *upstream*), jak i zajmujących się przetwarzaniem i rafinacją (ang. *downstream*). W ramach generalnej refleksji, autorzy wskazują na możliwość powstania szeregu nowych branż. Wśród konsekwencji dla transportu wskazano, iż nowy ekosystem przemysłowy można stworzyć dzięki wykorzystaniu wodoru w całym sektorze transportu, od samochodów osobowych po pojazdy użytkowe, m.in. ciężarówki, wózki widłowe, pociągi, jak i statki i samoloty¹⁵. W kontekście sektora energii wskazano głównie na powstanie ogniw paliwowych, charakteryzujących się wysoką sprawnością wytwarzania energii, będąc jednocześnie przyjazne dla środowiska. Mają one, zgodnie z Planem rozwoju, okazać się optymalną alternatywą dla rozproszonej produkcji energii¹⁶. Odnosząc się do tzw. przedsiębiorstw typu *downstream*, wskazano na wysoki poziom wartości dodanej możliwy do wygenerowania w dziedzinie projektowania chemicznego i mechanicznego materiałów i części (m.in. produkcji wodoru, transportu i przechowywania). Plan rozwoju zakłada korzystne skutki dla małych i średnich przedsiębiorstw¹⁷. Większość części i materiałów wykorzystywanych do produkcji pojazdów wodorowych i ogniw paliwowych jest wytwarzana jest w Korei Południowej właśnie przez małe i średnie

¹² Climate Change Laws of the World, *London School of Economics*, <https://www.climate-laws.org/geographies/south-korea/policies/korea-hydrogen-economy-roadmap-2040> (dostęp: 26.03.2022 r.).

¹³ Government of Korea, *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*, 2019, https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_551e67dca75340569e68e37eea18f28e.pdf (dostęp: 27.03.2022 r.).

¹⁴ K. Hoon Chu, J. Lim, *Strategies for the expansion...*, s. 1412.

¹⁵ Government of Korea, *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*, 2019...

¹⁶ *Ibidem*, s. 2.

¹⁷ *Ibidem*, s. 3.

przedsiębiorstwa. W konsekwencji ekspansja przemysłu przetwórczego doprowadzić ma do zwiększenia inwestycji, tworzenia miejsc pracy i wzrostu zatrudnienia¹⁸.

Autorzy Planu rozwoju gospodarki wodorowej do 2040 roku odwołują się do problematyki generowania przyjaznej środowisku energii jako do narzędzia mającego przyczynić się do niezależności energetycznej kraju¹⁹. Dokument z 2019 r. podobnie jak pierwotna strategia z 2005 r. istotnie odnosi się do znaczenia zagadnień środowiskowych²⁰. Mimo to, można przy tym odnieść wrażenie, iż kwestie środowiskowe nie stanowią jedynej determinanty opracowywanych planów, lecz jeden z kluczowych elementów kształtujących politykę kraju. Powyższe ujęcie można określić mianem niewątpliwie racjonalnego z perspektywy bezpieczeństwa energetycznego, jak i gospodarki państwa. Jako w pewnym sensie przełomową w kwestii dbałość o środowisko wskazano możliwość konwersji energii odnawialnej na wodór, celem magazynowania i transportu. W tym zakresie wykorzystanie wodoru pozwala przezwyciężyć dotychczasowe problemy związane z odnawialnymi źródłami energii, m.in. energią słoneczną i wiatrową²¹.

Jak wspomniano, rozwój przyjaznych środowisku źródeł energii w perspektywie Planu rozwoju gospodarki wodorowej Korei Południowej ma stanowić narzędzie dążenia do energetycznej niezależności. W ujęciu dokumentu krajowa produkcja wodoru, przy zastosowaniu metod takich jak ekstrakcja wodoru i elektroliza wody, może zmniejszyć zależność od obcej energii, a tym samym promować niezależność energetyczną, w konsekwencji prowadząc do zastąpienia paliw kopalnych wodorem²². W tym miejscu warto wskazać, iż obecnie 97% paliw kopalnych w Korei, będących dla tego kraju głównym źródłem energii, jest pozyskiwanych z importu. Z kolei Korea uplasowała się na 33. miejscu wśród 35 krajów Organizacji Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD), pod kątem niezależności energetycznej w 2016 roku. Powyższe informacje autorzy zdecydowali się zamieścić w Planie rozwoju, celem zobrazowania znaczenia przewidzianych zmian²³.

Ponadto, odnosząc się do ekonomicznego aspektu działań w zakresie środowiska wskazano również, iż poza produkcją krajową, możliwe będzie importowanie wodoru produkowanego za granicą, wpływając na dywersyfikację importu²⁴.

Interesujący element Planu rozwoju gospodarki wodorowej Korei Południowej stanowi odwołanie się do zagranicznych rynków wodoru, odnoszące się do strategii Japonii, Stanów Zjednoczonych, Niemiec, Australii oraz Chin. Powyższe

¹⁸ *Ibidem*, s. 3.

¹⁹ *Ibidem*, s. 3.

²⁰ *Ibidem*, s. 2–4.

²¹ *Ibidem*, s. 4.

²² *Ibidem*, s. 4.

²³ *Ibidem*, s. 4.

²⁴ *Ibidem*, s. 4.

ujęcie, raczej niespotykane m.in. w ustawodawstwie polskim, zdaje się być korzystne, gdyż pozwala również na określenie kluczowych elementów współpracy międzynarodowej nie w sposób abstrakcyjny, lecz w kontekście.

Kraje azjatyckie określa się jako mające przewodzić wzrostowi rynku ogniw paliwowych. Azja już w 2017 r. odpowiadała za 80% ich globalnej dystrybucji. Wśród wniosków w powyższym zakresie wskazano również na następujące rozróżnienie: globalne firmy przejawiają zaangażowanie w dominację na rynku pojazdów wodorowych, podczas gdy firmy koreańskie i japońskie konkurują o dominację na rynku ogniw paliwowych²⁵.

W tym miejscu warto wskazać na istniejącą już współpracę w formie partycypacji w organizacjach międzynarodowych. Korea Południowa jest członkiem Międzynarodowego Partnerstwa na rzecz wodoru oraz ogniw paliwowych w gospodarce (IPHE), powstałego w 2003 r., a także uczestniczy w inicjatywie Wodowego Spotkania Ministerialnego (ang. *Hydrogen Ministerial Meeting*)²⁶.

W zakresie projektowanych działań Korei Południowej, warto odnieść się do stanu i potencjału gospodarki wodorowej państwa. Treść Planu rozwoju pozwala na stwierdzenie, iż poziom zaawansowania Korei w zakresie gospodarki wodorowej, na tle globalnym jest korzystny. Mimo to, w powyższym kontekście w treści dokumentu bezpośrednio wskazano, iż rozwój gospodarki wodorowej będzie wymagał fundamentalnych zmian zarówno w strukturach gospodarczych, przemysłowych, jak i w odniesieniu do źródeł energii²⁷. W omawianym kontekście autorzy wprost określili, iż z uwagi na sukcesywnie rosnącą konkurencję, według przewidywań okresem krytycznym na realizację planów dot. gospodarki wodorowej jest okres między 2019 a 2023 rokiem. W momencie opracowywania Planu rozwoju, tj. 2019 r., globalna gospodarka wodorowa wciąż była w stosunkowo wczesnej fazie zaawansowania, stąd podkreślana przez autorów dokumentu potrzeba dominacji w tym zakresie. Rząd Korei wskazał, iż jeśli Korea z powodzeniem zdemonstruje swoje światowej klasy możliwości i mocne strony, to kraj ma ogromny potencjał do rozwoju rynku wodoru oraz stania się liderem na skalę światową²⁸.

8.3. Instrumenty i narzędzia gospodarki wodorowej

Zastosowanie wodoru, będącego najobficiej występującym pierwiastkiem we wszechświecie, wymaga wdrożenia szeregu zaawansowanych technologii. Zakres korzyści mogących wynikać z jego zastosowania na szerszą skalę, zarówno w transporcie jak i – przede wszystkim – w energetyce sprawia, iż wdrażanie owych instrumentów i narzędzi jest z perspektywy współczesnych gospodarek niezwykle korzystne. Rząd Korei Południowej formułując plany dotyczące rozwoju

²⁵ *Ibidem*, s. 9.

²⁶ International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in Economy, *Mission&Purpose*, 2021, <https://www.iphe.net/about> (dostęp: 28.03.2022 r.); Government of Korea, *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*, 2019...

²⁷ *Ibidem*, s. 11.

²⁸ *Ibidem*, s. 11.

gospodarki przewidział zarówno środki w zakresie finansowania, importu oraz eksportu, środki prawne, a także współpracę instytucjonalną.

Odnosząc się do narzędzi finansowych należy wskazać na ustanowiony przez rząd Fundusz Gospodarki Wodorowej o wartości 34 milionów USD mający na celu zwiększenie wzrostu wytwarzania i stosowania paliw alternatywnych, w tym wodoru. Fundusz postrzegany jest jako stosunkowo mały. W konsekwencji może okazać się niewystarczający dla zaspokojenia ambitnych planów Korei Południowej, aby stać się liderem rynku wodoru na światową skalę²⁹. Niemniej jednak, istotna może okazać się prowadzona przez rząd Korei ścisła współpraca z głównymi konglomeratami i instytucjami finansowymi w państwie, zmierzająca do wsparcia sektora wodoru, m.in. inicjatywa Korea H2 Business Summit³⁰. W tym miejscu należy również wskazać na powstały pod koniec 2020 r. fundusz wspierania nowych przedsiębiorstw w zakresie gospodarki wodorowej „Hydrogen Economy and e-New Industry Start-up Fund”. Przewidywana ostateczna wielkość funduszu ma wynieść powyżej 31 mln USD. Istotny pozostaje również Fundusz Nowej Energii „New Energy Industry Found”, o przewidywanej wielkości 456 USD³¹. W wyniku zaangażowania sektora prywatnego, w Korei Południowej funkcjonuje również szereg funduszy sektora prywatnego³².

W zakresie instrumentów prawnych przewidzianych w celu rozwoju gospodarki wodorowej, kluczowe zdaje się przyjęcie wspomnianych w rozdziale pierwszym aktów prawnych. Jako główne narzędzie regulacyjne można wskazać ustawę o promocji gospodarki wodorowej i zarządzaniu bezpieczeństwem wodorowym (ang. *Hydrogen Economy Promotion and Hydrogen Safety Management Act*) (dalej: Ustawa wodorowa), obowiązującą od 5 lutego 2021 r. Warto wskazać również na ustawę o promocji rozwoju, wykorzystaniu i rozpowszechnianiu nowej i energii odnawialnej (ang. *Act on the Promotion of the Development, Use and Diffusion of New and Renewable Energy*), mającą z perspektywy Ustawy wodorowej znaczenie subsydiarne. Ustawa wodorowa stanowi obecnie centralny akt prawny w zakresie regulacji branży wodorowej, z kolei ustawa o promocji rozwoju, wykorzystaniu i rozpowszechnianiu nowej i odnawialnej energii, ma zastosowanie w zakresie nieobjętym regulacją Ustawy wodorowej³³.

Określając prawne narzędzia kształtowania gospodarki wodorowej Korei Południowej należy wskazać przede wszystkim na treść poniższych przepisów:

1. Art. 36 Ustawy wodorowej, zgodnie z którym firmy chcące produkować wodorowe ogniwa paliwowe lub komponenty związane z wodorem muszą uzyskać zgodę gminy. W szczególności wymóg ten odnosi się do firm

²⁹ Z. Song, *Hydrogen Law and Regulation in South Korea*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/south-korea> (dostęp: 27.03.2022 r.).

³⁰ *Ibidem*.

³¹ International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in Economy, *Republic of Korea*, 2021, <https://www.iphe.net/republic-of-korea> (dostęp: 27.03.2022 r.).

³² *Ibidem*.

³³ Z. Song, *Hydrogen Law...*

zagranicznych, które muszą zarejestrować swoją działalność w Ministerstwie Energii, zgodnie z art. 38 Ustawy³⁴.

2. Art. 50 Ustawy wodorowej, dotyczący wymogów w zakresie raportowania i ujawniania ceny sprzedaży wodoru dostarczanego do samochodów³⁵.
3. Art. 10 Ustawy o wodorze odnoszący się do finansowania rządowego projektów wodorowych. Aby uzyskać rządowe finansowanie projektu, przedsiębiorstwo musi być kwalifikowane jako firma specjalizująca się w działalności związanej z wodorem³⁶.
4. Art. 41 Ustawy wodorowej, a także część szósta Ustawy określające wymogi dot. bezpieczeństwa³⁷.

Kolejnym istotnym narzędziem kształtowania gospodarki wodorowej Korei Południowej jest współpraca instytucjonalna. Rząd przewidział utworzenie Rady Promocji Gospodarki Wodorowej (ang. *Hydrogen Economy Promotion Council*), w skład której wchodzi sześć różnych ministerstw oraz firmy prywatne. Radzie przewodniczy premier. Na dalszym etapie pracy Rady rząd Korei Południowej zbudować ma Klaster Przemysłu Wodorowego, celem współpracy badawczo-rozwojowej między instytutami naukowymi, firmami i organizacjami pozarządowymi. Ponadto, przewidziano wybór trzech tzw. wodorowych miast testowych. Miasta te mają stanowić modele miast, w których mieszkalnictwo, transport, przemysł itd. są obsługiwane przez energię wodorową³⁸.

8.4. Cele gospodarki wodorowej do 2040 roku

Plan rozwoju gospodarki wodorowej do 2040, przyjęty w 2019 r., w zakresie celów gospodarki wodorowej sięga do roku 2040. W zakresie ogólnych celów strategii można wskazać cztery następujące punkty, wyszczególnione w Planie rozwoju.

1. Ustanowienie wiodącego na świecie systemu wykorzystania wodoru.
2. Rozbudowa stabilnego i uniwersalnego systemu dostaw wodoru.
3. Utworzenie Przemysłowego Ekosystemu Gospodarki Wodorowej.
4. Zapewnienie bezpieczeństwa wodorowego.

Aby osiągnąć założony cel, rząd Korei przewidział w odniesieniu do transportu zwiększenie konkurencyjności cenowej i zwiększenie podaży pojazdów napędzanych wodorem (FCEV), rozszerzenie wykorzystania taksówek i autobusów wodorowych w transporcie publicznym, promowanie wykorzystania samochodów ciężarowych napędzanych wodorem w sektorze publicznym. Z kolei, w zakresie

³⁴ *Ibidem*.

³⁵ *Ibidem*.

³⁶ *Ibidem*.

³⁷ *Ibidem*.

³⁸ J. Eun Ha, *Hydrogen Economy Plan in Korea*, 2019, <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/03/Hydrogen-economy-plan-in-Korea.pdf> (dostęp: 20.03.2022 r.).

energii zwiększenie dostępności poprzez zwiększenie liczby stacji paliw wodorowych w całym kraju, znalezienie nowych zastosowań, (m.in. rozwój tzw. statków wodorowych), zapewnianie wodorowych ogniw paliwowych do wytwarzania energii, a także komercjalizację, celem umożliwienia ich eksportu, poszerzenie zastosowania wodorowych ogniw paliwowych w gospodarstwach domowych i budynkach. Ponadto, przewidziano opracowanie turbin wodorowych jako źródła energii komercyjnej³⁹.

W tym miejscu należy wskazać na rozwiązania mające na celu kształtowanie ceny w gospodarce wodorowej. Odnosząc się do ambicji w zakresie cen, na rok 2022 w Planie rozwoju przewidziano cenę 6.000 wonów południowokoreańskich/kg, do roku 2030 cena ma ulec redukcji do 4.000 wonów południowokoreańskich/kg, aby osiągnąć poziom 3.000 wonów południowokoreańskich w 2040 r.⁴⁰ Aby osiągnąć powyższe cele, w pierwszej kolejności wskazano na zmniejszenie kosztów produkcji wodoru stosując mechanizm korzyści skali poprzez produkcję ogromnych ilości wydobytego wodoru, poprawę mocy wytwarzania, a także negocjacje cen importowych wodoru⁴¹. W dalszej kolejności wskazano na potrzebę przygotowania ekonomicznie opłacalnego tzw. portfela produkcji wodoru poprzez dywersyfikację metod produkcji wodoru, takich jak m.in. biomasa i mikroorganizmy. Rząd Korei zaproponował również zmniejszanie kosztów transportu poprzez zwiększenie wydajności przechowywania, dzięki rozwojowi technologii ciekłego/skroplonego wodoru i transportu masowego z wykorzystaniem rurociągów wodorowych. Z kolei, w zakresie stacji paliw wodorowych, wskazano na możliwość utrzymania dopłat do montażu stacji, do momenty, w którym cena wodoru osiągnie poziom docelowy. Elementem finalnym na być ustabilizowanie ceny wodoru poprzez wprowadzenie odpowiedniej ceny bazowej wodoru i jej stabilizacji poprzez zarządzanie dostawami wodoru i systemem handlu⁴².

Niewątpliwie istotnym w zakresie kształtowania rynku wodoru pozostaje dążenie do rozpowszechnienia wodorowych ogniw paliwowych. Autorzy strategii wprowadzili w tym zakresie rozróżnienie na ogniwa paliwowe dla wytwarzania energii oraz ogniwa paliwowe dla budynków. W konsekwencji również cele w zakresie przewidywanych mocy znacząco się od siebie różnią. W momencie pisania Planu rozwoju gospodarki wodorowej do 2040 r., moc dla ogniw dla wytwarzania energii wynosiła 307.6 MW, podczas gdy w przypadku ogniw dla budynków było to 7 MW⁴³. Stosunkowo proporcjonalnie ukształtowano również cel na 2040 r. W zakresie ogniw paliwowych dla wytwarzania energii przewidziano 15 GW, przy czym w zakresie ogniw dla budynków 2.1 GW⁴⁴. W tym miejscu dla ukazania wielkości tworzonego rynku wodoru można odnieść się, dla przykładu

³⁹ Government of Korea, *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*, 2019...

⁴⁰ *Ibidem*, s. 32.

⁴¹ *Ibidem*, s. 32.

⁴² *Ibidem*, s. 32.

⁴³ *Ibidem*, s. 38.

⁴⁴ *Ibidem*, s. 38.

do Polskiej Strategii Wodorowej do 2030 r. W dokumencie przewidziano dążenie do osiągnięcia mocy zainstalowanej z niskoemisyjnych źródeł i procesów na poziomie 2 GW w 2030 r., która ma umożliwić produkcję 193 634,06 ton wodoru rocznie, co z kolei, ma stanowić 99,4% zapotrzebowania na wodór w gospodarce narodowej⁴⁵.

8.5. Struktura produkcji energii elektrycznej.

Określenie struktury produkcji energii elektrycznej Korei Południowej zdaje się z perspektywy przedmiotowych rozważań istotne, gdyż pozwala niejako na umiejscowienie rynku wodoru w szerszym kontekście. W zakresie wytwarzania energii elektrycznej, roczna, uśredniona wartość *per capita* wynosiła w Korei Południowej 10,000 kWh w 2020 r.⁴⁶. Z kolei, w zakresie rocznej krajowej konsumpcji energii elektrycznej jej wartość w 2020 r. wynosiła 500 TWh⁴⁷.

Odnosząc się do źródeł produkcji energii elektrycznej, jako naczelną można wyróżnić węgiel – stanowiący ok. 40%, gaz – stanowiący ok. 25% oraz energię jądrową – ok. 25%. Odnawialne źródła energii odpowiadają za ok. 5% produkcji energii elektrycznej w Korei Południowej. Najmniej istotnym źródłem pozostaje ropa naftowa, stanowiąca ok. 2,5%⁴⁸. W konsekwencji, w strukturze wytwarzania energii elektrycznej kraju, energia wytwarzana z paliw kopalnych stanowiła ok. 65%. Warto w tym miejscu wskazać na zanotowany w stosunku do roku 2018 spadek o około 5%, przy czym najniższą wartość wynosiła 45%, w konsekwencji gwałtownego spadku w latach 1985–1987⁴⁹.

8.6. Infrastruktura energetyczna.

Dostosowanie do potrzeb gospodarki wodorowej

Zgodnie ze strategią Korei Południowej oraz danymi Ministerstwa Handlu, Przemysłu i Energii kraju, w 2030 r. ma on dostarczać 3,9 mln ton wodoru rocznie, w tym 940 000 ton wodoru szarego, 750 000 ton wodoru niebieskiego i 250 000 ton wodoru ekologicznego produkowanego lokalnie, przy jednoczesnym imporcie 1,96 mln ton rocznie zielonego wodoru z zagranicy⁵⁰. Według Ministerstwa, w celu pobudzenia popytu i poprawy infrastruktury wodorowej, do 2050 r. w ca-

⁴⁵ Polska Strategia Wodorowa do 2030 r. z perspektywą do 2040 r. z dnia 7 grudnia 2021 r. (M.P. z 2021 r., poz. 1138).

⁴⁶ H. Ritchie, M. Roser, *South Korea: Energy Country Profile*, <https://ourworldindata.org/energy/country/south-korea> (dostęp: 25.03.2022 r.).

⁴⁷ *Ibidem*.

⁴⁸ *Ibidem*.

⁴⁹ *Ibidem*.

⁵⁰ A. Kondalamahanty, *Marker Movers Asia, March 28-April 1: COVID-19 lockdowns in China weigh on Asia's commodity markets*, 2022, <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/market-insights/videos/market-movers-asia/032822-china-covid-19-south-korea-oil-steel-lithium-nickel-ev-battery-usda-wheat-corn-energy-transition> (dostęp: 25.03.2022 r.).

łym kraju powstać ma ponad 2000 stacji ładowania, przy czym co najmniej jedna stacja ma powstać w 226 okręgach i powiatach w całym kraju⁵¹.

Korea Południowa mieści się obecnie w światowej czołówce pod względem stacji tankowania wodoru⁵². Mimo to, infrastruktura gospodarki wodorowej pozostaje obecnie na niedostatecznym poziomie z perspektywy koreańskiego Planu rozwoju, stanowiąc tym samym jeden z powodów niskiego poziomu korzystania z napędzanych wodorem środków transportu. W okresie opracowywania strategii liczba samochodów osobowych i autobusów wodorowych wynosiła odpowiednio 889 oraz 2⁵³.

Odnosząc się do głównych projektów w zakresie infrastruktury należy wskazać na plan rozbudowy czystej infrastruktury transportowej, w tym infrastruktury wodorowych samochodów osobowych, autobusów oraz taksówek, co jest związane ze znacznym zwiększeniem liczby stacji paliw wodorowych⁵⁴.

Kolejny istotny element projektowanej infrastruktury wodorowej stanowi utworzenie centrów transferu kompozytów wodorowych mających oferować zarówno usługi paliwowe, jak i serwisowe w głównych węzłach komunikacyjnych w obszarach metropolitalnych. Ponadto, przewidziano wprowadzanie autobusów wodorowych na nowe trasy oraz zwiększanie liczby autobusów na istniejących trasach. Ważny element rozwoju infrastruktury ma stanowić instalacja stacji paliw wodorowych m.in. na postojach autostradowych oraz stacjach paliw CNG, czy też w garażach autobusowych, współpracując przy tym z samorządami i stowarzyszeniami transportowymi⁵⁵.

W zakresie infrastruktury, rząd Korei Południowej, celem wsparcia na początkowym etapie rozbudowy stacji paliw wodorowych przewidział również dotacje na instalacje. W związku z powyższym Ministerstwo Środowiska zaoferowało wsparcie w postaci pokrycia 50% kosztów instalacji na stację, ustanawiając przy tym limit w kwocie 1,5 mld wonów południowokoreańskich (KRW). Z kolei Ministerstwo Infrastruktury i Transportu ma zapewnić 750 mln KRW na stację paliw wodorowych położoną przy autostradzie⁵⁶.

⁵¹ *Ibidem*.

⁵² Air Liquide, *In Korea, the country of hydrogen mobility, Air Liquide is engaging in major projects*, 2022, <https://www.airliquide.com/stories/hydrogen/korea-country-hydrogen-mobility-air-liquide-engaging-major-projects> (dostęp: 25.03.2022 r.).

⁵³ Government of Korea, *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*, 2019...

⁵⁴ *Ibidem*, s. 20.

⁵⁵ *Ibidem*, s. 24.

⁵⁶ *Ibidem*, s. 27.

8.7. Wpływ gospodarki wodorowej Korei Południowej na bezpieczeństwo energetyczne państwa. Wnioski

Bezpieczeństwo stanowi jedną z podstawowych kategorii analizy w zakresie nauk politycznych i badań nad stosunkami międzynarodowymi⁵⁷. „W tradycyjnym ujęciu bezpieczeństwo energetyczne jest analizowane w kontekście zagrożeń i wiąże się ze stosowaniem siły i przymusu przez państwo. Takie podejście było charakterystyczne dla systemu westfalskiego. Współcześnie jednak następuje ewolucja pojmowania bezpieczeństwa zarówno w wymiarze podmiotowym, jak i przedmiotowym. Znaczenie pojęcia bezpieczeństwa nie wiąże się już tylko z działalnością państw w dziedzinie militarnej. Obecnie staje się ono zjawiskiem wielowymiarowym, uwzględniającym m.in. uwarunkowania polityczne, kulturowe i gospodarcze działalności państw i podmiotów niesuwerennych”⁵⁸. Współcześnie dążenie do zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego to jedno z kluczowych działań suwerennych państw. Bezpieczeństwo energetyczne jest kwestią o nadrzędnym znaczeniu dla rozmaitych grup podmiotów. W tym miejscu należy wskazać na decydentów politycznych, przedsiębiorstwa (w szczególności głównych konsumentów energii) oraz społeczności, których jakość życia zależy od nieprzerwanych dostaw energii⁵⁹.

Bezpieczeństwo energetyczne jest definiowane na wiele sposobów, co sprawia, iż obecnie w literaturze odwołuje się do co najmniej 83 definicji w tym zakresie⁶⁰. Opierając się na definicji Michaela T. Klare bezpieczeństwo energetyczne można określić jako „zagwarantowanie dostaw surowców energetycznych zapewniających podstawowe potrzeby państwa nawet w sytuacji kryzysu lub konfliktu międzynarodowego”⁶¹. Niemniej jednak, warto wskazać także na inne ujęcie tego pojęcia. Wśród badaczy popularna jest ogólna ocena, zgodnie z którą bezpieczeństwo energetyczne zapewnia płynne dostawy energii bez zakłóceń, a niekiedy także wiązanie pojęcia bezpieczeństwa energetycznego z przystępnością ceny⁶².

W kontekście bezpieczeństwa energetycznego Korei Południowej należy zaznaczyć, iż Plan rozwoju gospodarki wodorowej do 2040 r. nie odnosi się wprost do pojęcia bezpieczeństwa energetycznego. Dokument przewiduje jednak wzrost tzw. samowystarczalności energetycznej⁶³. Zgodnie z Planem rozwoju, krajowa produkcja wodoru za pomocą różnych środków, takich jak ekstrakcja wodoru

⁵⁷ M. Pietraś, J. Misiągiewicz, *Bezpieczeństwo energetyczne we współczesnych stosunkach międzynarodowych. Wyzwania, zagrożenia, perspektywy*, Lublin 2017, s. 9.

⁵⁸ *Ibidem*, s. 9.

⁵⁹ W.L. Choong, Energy security: *Definitions, dimensions and indexes*, “Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2015, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008892> (dostęp: 28.03.2022 r.).

⁶⁰ *Ibidem*.

⁶¹ M. Pietraś, J. Misiągiewicz, *Bezpieczeństwo energetyczne...*, s. 9.

⁶² *Ibidem*, s. 9

⁶³ Government of Korea, *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*, 2019...

i elektroliza wody, może zmniejszyć zależność od obcej energii, a tym samym promować niezależność energetyczną⁶⁴. W obliczu wspomnianej zależności Korei Południowej od paliw kopalnych, w 97% pozyskiwanych z importu, dążenie do rozwoju gospodarki wodorowej jest niezwykle celowe z perspektywy bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Rozwój rynku wodoru Korei Południowej niewątpliwie wiąże się z wysokim wzrostem dywersyfikacji źródeł energii tego państwa. Korzyści dla bezpieczeństwa energetycznego, wynikające z dywersyfikacji, występują zarówno w odniesieniu do różnicowania stosowanych technologii wytwarzania energii, jak i w zakresie korzystania z kilku niezależnych źródeł dla pozyskiwania surowców energetycznych⁶⁵. Już pierwszy z koreańskich dokumentów w zakresie rozwoju rynku wodoru, jakkolwiek nie odniósł znacznego sukcesu, określał korzystny z perspektywy bezpieczeństwa energetycznego kierunek zmian⁶⁶. Z kolei narzędzia przewidziane w Planie rozwoju z 2019 r. (m.in. rozwój statków i pociągów wodorowych, ogniw paliwowych dla budynków oraz dronów) zdają się wzmacniać szanse Korei Południowej na realizację ambitnych planów rozwoju rynku wodoru.

Urzeczywistnienie celów strategii gospodarki wodorowej niewątpliwie korzystnie wpłynie na wzrost dywersyfikacji źródeł energii. Z kolei dywersyfikacja, rozumiana w duchu przytoczonej tzw. samowystarczalności energetycznej, z pewnością przyczyni się do wzrostu bezpieczeństwa Korei Południowej.

Bibliografia

1. Air Liquide, *In Korea, the country of hydrogen mobility, Air Liquide is engaging in major projects*, 2022, <https://www.airliquide.com/stories/hydrogen/korea-country-hydrogen-mobility-air-liquide-engaging-major-projects> (dostęp: 25.03.2022 r.).
2. Choong W.L., *Energy security: Definitions, dimensions and indexes*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 2015, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008892> (dostęp: 28.03.2022 r.).
3. Ciecchanowicz W., Szczukowski S., *Transformacja Europy z Ery Ognia do Ekonomii Wodoru Przyszłość ogniw paliwowych spalających metanol. Czy Polska wykorzysta szansę?*, 2009, http://elektroenergetyka.pl/upload/file/2009/4/elektroenergetyka_nr_09_04_e1.pdf (dostęp: 19.04.2022 r.).
4. Cire.pl, *Wodór – nowe cudowne rozwiązanie wszystkich problemów energetycznych?*, 2020, <https://www.cire.pl/artykuly/opinie/154847-wodor-nowe-cudowne-rozwiazanie-wszystkich-problemow-energetycznych> (dostęp: 19.04.2022 r.).
5. Climate Change Laws of the World, *London School of Economics*, <https://www.climate-laws.org/geographies/south-korea> (dostęp: 20.03.2022 r.).

⁶⁴ *Ibidem*, s. 4.

⁶⁵ J. Popławska, *Dywersyfikacja źródeł energii jako metoda uniezależnienia energetycznego państwa*, „Studia de Securitate” 2018, 8, <https://studiadesecuritate.up.krakow.pl/wp-content/uploads/sites/43/2018/12/8.pdf> s. 113 (dostęp: 21.03.2022 r.).

⁶⁶ C.R. Mowbray, *South Korean Energy Security*, 2020, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1127027.pdf> (dostęp: 28.03.2022 r.).

6. Climate Change Laws of the World, *London School of Economics*, <https://www.climate-laws.org/geographies/south-korea/policies/korea-hydrogen-economy-roadmap-2040> (dostęp: 26.03.2022 r.).
7. Eun Ha J., *Hydrogen Economy Plan in Korea*, 2019, <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/03/Hydrogen-economy-plan-in-Korea.pdf> (dostęp: 20.03.2022 r.).
8. European Commission, *Questions and answers: A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe*, 2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/qanda_20_1257/QANDA_20_1257_EN.pdf (dostęp: 19.04.2022 r.).
9. Government of Korea, *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*, 2019, https://docs.wixstatic.com/ugd/45185a_551e67dca75340569e68e37eea18f28e.pdf (dostęp: 27.03.2022 r.).
10. Hoon Chu K., Lim J., *Strategies for the expansion of green hydrogen production in South Korea*, "International journal of hydrogen energy" 2022, 47.
11. International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in Economy, *Mission&Purpose*, 2021, <https://www.iphe.net/about> (dostęp: 28.03.2022 r.).
12. International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in Economy, *Republic of Korea*, 2021, <https://www.iphe.net/republic-of-korea> (dostęp: 27.03.2022 r.).
13. IRENA, *Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up electrolyzers to meet the 1.5 C climate goal*, 2020, https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf (dostęp: 19.04.2022 r.).
14. Kondalamahanty A., *Marker Movers Asia, March 28-April 1: COVID-19 lockdowns in China weigh on Asia's commodity markets*, 2022, <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/market-insights/videos/market-movers-asia/032822-china-covid-19-south-korea-oil-steel-lithium-nickel-ev-battery-usda-wheat-corn-energy-transition> (dostęp: 25.03.2022 r.).
15. Mik C., *Związanie Unii Europejskiej prawem międzynarodowym zmiany klimatycznej [w:] Zmiany klimatu w świetle prawa Unii Europejskiej i prawa polskiego na tle porównawczym*, Warszawa 2021, <https://ios.edu.pl/wp-content/uploads/2021/12/Zmiany-klimatu-w-swietle-prawa-Unii-Europejskiej-i-prawa-polskiego-na-tle-porownawczym.pdf> (dostęp: 26.03.2022r.).
16. Mowbray C.R., *South Korean Energy Security*, 2020, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1127027.pdf> (dostęp: 28.03.2022 r.).
17. Pietraś M., Misiągiewicz J., *Bezpieczeństwo energetyczne we współczesnych stosunkach międzynarodowych. Wyzwania, zagrożenia, perspektywy*, Lublin 2017.
18. Popławska J., *Dywersyfikacja źródeł energii jako metoda niezależnienia energetycznego państwa*, „Studia de Securitate” 2018, 8, <https://studiadesecuritate.up.krakow.pl/wp-content/uploads/sites/43/2018/12/8.pdf> (dostęp: 21.03.2022 r.).
19. Ritchie H., Roser M., *South Korea: Energy Country Profile*, <https://ourworldindata.org/energy/country/south-korea> (dostęp: 25.03.2022 r.).
20. Song Z., *Hydrogen Law and Regulation in South Korea*, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/south-korea> (dostęp: 27.03.2022 r.).
21. Polska Strategia Wodorowa do 2030 r. z perspektywą do 2040 r. z dnia 7 grudnia 2021 r. (M.P. z 2021 r., poz. 1138).
22. Uchwała nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. w sprawie przyjęcia „Polskiej strategii wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.” (M.P. z 2021 r., poz. 1138).

ZAKOŃCZENIE

Istotnym wyzwaniem w skali światowej jest zaspokajanie bieżących i przyszłych potrzeb energetycznych w taki sposób, aby energia dostarczana była po akceptowanej cenie w sposób zrównoważony środowiskowo. O ile z jednej strony pojawiają się informacje o wyczerpywaniu surowców kopalnych, o tyle dostrzega się, że udokumentowane rezerwy gazu ziemnego w ostatnich latach zwiększyły się o blisko 50%. Paradoksalnie okazuje się, że wraz z pojawianiem się nowych technologii poszukiwania nośników energii ich zasoby w skali globalnej są duże. Niemniej jednak rośnie presja po stronie konsumenta w zakresie zwiększenia udziału energetyki odnawialnej w światowej strukturze bilansu energetycznego. Obywatele chcą żyć i mieszkać w czystym środowisku, a także nie akceptują wojen i konfliktów, których podłożem jest rywalizacja o dostęp do surowców kopalnych. Jest to widoczne szczególnie teraz w obliczu wojny w Ukrainie rozpoczętej w 2022 roku. Państwa doświadczają skutków ekonomicznych oraz zakładają realne ryzyko przerw w dostawie surowców energetycznych. Nabiera to szczególnego znaczenia w kontekście rosnącego zapotrzebowania na energię w skali globalnej, która w perspektywie 2050 r. wzrośnie o blisko 50%¹. Tym bardziej zwiększy to presję w zakresie przyspieszenia procesów transformacji energetycznej, która ma prowadzić do zwiększenia samowystarczalności energetycznej oraz zmniejszenia zależności importowej. Dotychczas dynamika rozwoju energetyki odnawialnej była wstrzymywana przez brak magazynów na energię elektryczną. Wskazuje się, że ze względu na swoją wszechstronność największy potencjał do przyspieszenia procesów transformacji energetycznej posiada wodór, a dokładniej wodór niskoemisyjny, który może być surowcem, paliwem ale też nośnikiem energii i magazynem. Jego zastosowanie wpisuje się w aktualne strategie polityki energetyczno-klimatycznej oraz zobowiązania podejmowane w skali globalnej w zakresie ochrony klimatu i celu, jakim jest neutralność klimatyczna.

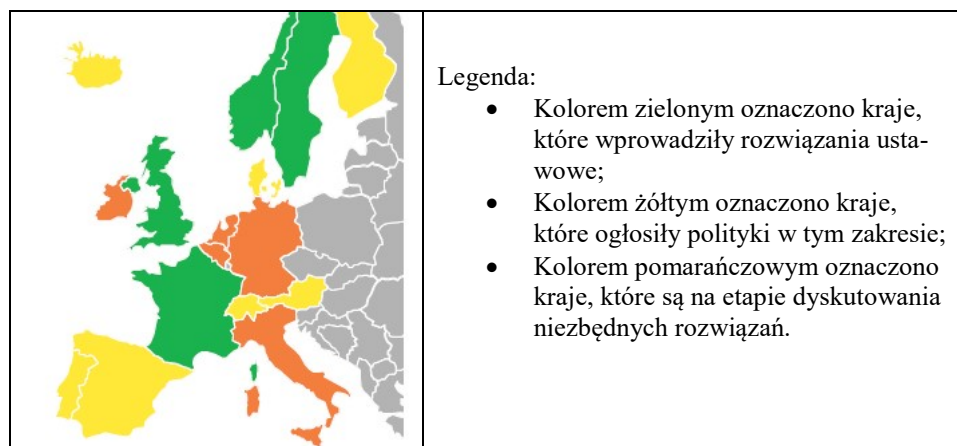
Jak potwierdzają poniższe analizy, do krajów wiodących w tym podejściu możemy zaliczyć kraje nordyckie, które wprowadzają coraz więcej rozwiązań umożliwiających osiągnięcie zeroemisyjności do roku 2050 (zob. rys. 1.).

Istotne znaczenie w dekarbonizacji zarówno przemysłu, jak i energetyki odgrywają technologie wodorowe². W opublikowanym w 2020 roku komunikacie Komisji Europejskiej „Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu” podkreślone zostało znaczenie wodoru, uwzględniające perspektywy rozwoju technologii i obejmujące cały łańcuch wartości oraz aspekty rynkowe, prze-

¹ *International Energy Outlook 2021*, U.S. Energy Information Administration 2021.

² UNIDO, *Towards Hydrogen Societies: Expert Group Meeting, Current advancements in hydrogen technology and pathways to deep decarbonisation*, www.unido.org/sites/default/files/files/2019-04/REPORT_Towards_Hydro-gen_Societies.pdf (dostęp: 13.04.2022 r.).

mysłowe i infrastrukturalne. Dokument ten podkreśla również znaczenie „zielonego” wodoru we wsparciu zrównoważonego wzrostu gospodarczego³.



Rys. 1. Status zerowych celów emisji netto w Europie

Fig. 1. Status of national net-zero emission targets in Europe

Źródło: opracowanie na podstawie: Bloomberg NEF, *Sector coupling in Europe: powering decarbonisation. Potential and policy implications of electrifying the economy*, 2020, s. 11.

Analiza przypadków przeprowadzona w niniejszej publikacji wskazuje, że najbardziej zaawansowane w zakresie budowy gospodarki wodorowej są państwa nordyckie ze względu na wprowadzone instrumenty wsparcia finansowego oraz odpowiednie plany wykonawcze do przyjętych strategii wodorowych. Z przeprowadzonych analiz wynikają następujące wnioski w odniesieniu do poszczególnych państw.

W obliczu trwającego na terenie Ukrainy konfliktu, Norwegia postrzegana jest jako najważniejszy gwarant dostaw gazu do Unii Europejskiej. Obecne zużycie gazu ziemnego w Polsce wynosi niecałe 20 mld m³ rocznie. Projekt Baltic Pipe (system gazociągów łączący Norwegię, Danie i Polskę) ma docelowo osiągnąć przepustowość 10 mld m³. Wobec tego, Norwegia jest w stanie zapewnić w 50% polskie zapotrzebowanie na gaz ziemny. Analiza norweskiego rynku energii w zakresie projektowania sieci łańcucha dostaw i ich możliwości eksportowych jest nieodzownym elementem dzisiejszej dyskusji w kontekście globalnego bezpieczeństwa energetycznego. Norwegia zakłada oczywiście pierwszoplanowo zapewnienie własnych potrzeb energetycznych. Rozwój technologii wodorowej jest jedyną szansą na osiągnięcie redukcji emisji gazów cieplarnianych o 90–95% w porównaniu z poziomem z 1990 r. do 2050 r., o czym stanowi między innymi rozbudowana norweska strategia wodorowa. Niski wskaźnik zużycia surowców

³ COM(2020) 301 final.

pierwotnych w bilansie energetycznym Norwegii oznacza, że znaczna część wyprodukowanego wodoru może zostać wyeksportowana. Rozwój gospodarki wodorowej opiera się głównie o produkcję niebieskiego wodoru, za pomocą procesu SMR zintegrowanego z instalacją CCS, co w rezultacie generuje niskoemisyjny wodór, ponieważ liczba emitowanego dwutlenku węgla do atmosfery dzięki sekwestracji obniżona zostaje do poziomu 3,4 kg CO₂ na 1 kg H₂. Wydaje się, że przesył niebieskiego wodoru jest dużo prostszy niż zielonego wytworzonego z odnawialnych źródeł energii, ponieważ może być transportowany za pośrednictwem już istniejącej, dobrze rozbudowanej infrastruktury przesyłowej gazu ziemnego poprzez jej odpowiednie przystosowanie lub konwersję (*retrofitting, repurposing*). Szybki rozwój norweskiego rynku wodoru jest w dużej mierze wynikiem sprawnie funkcjonujących instrumentów państwowych, wysokiej świadomości konsumentekiej, która napędza popyt, ale i duży wpływ miała od dawna zgromadzona wiedza i dostęp do sprawdzonej technologii energetycznej paliw kopalnych.

Równie wysokie zaawansowanie w zakresie budowy gospodarki wodorowej występuje w Szwecji. Głównym celem szwedzkiej polityki energetycznej jest stworzenie zrównoważonego systemu energetycznego (opartego na energii odnawialnej), który będzie skoncentrowany na poprawie (i tak już wysokiej) efektywności energetycznej. Szwedzkie instrumenty państwowe wdrożyły szereg mechanizmów prawno-finansowych na rzecz ochrony klimatu i walki z marnotrawstwem energii. Stosowany od dawna podatek energetyczny i podatek od dwutlenku węgla, stymuluje efektywne zużycie energii i jest powszechnie uważany za odpowiedni mechanizm w dążeniu do osiągnięcia założonego celu, jakim jest pokrycie całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną z odnawialnych źródeł do 2045 roku. Dlatego istotnym elementem dla szwedzkiego przemysłu energetycznego jest rozwój gospodarki wodorowej opartej na produkcji wodoru w procesie elektrolizy, gdzie woda jest rozkładana na wodór i tlen za pomocą energii elektrycznej wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii. Sprawne działania na rynku wodoru, w naturalny sposób przyczynią się do osiągnięcia niskoemisyjności państwowej. Można powiedzieć, że Szwecja już aktualnie sprostała wyzwaniom klimatycznym, ponieważ wytwarza energię elektryczną w 40% z energii wodnej i jądrowej oraz dodatkowo wykorzystuje energię wiatrową w 11% i bioenergię w 8%. Istnieją jednak sektory, w których dekarbonizacja przebiega bardzo wolno, szczególnie w przemyśle, a wykorzystanie wodoru i nośników wodorowych może być dla szwedzkiej transformacji brakującym ogniwem, który umożliwi realizację celów polityki energetyczno-klimatycznej⁴.

⁴ IRENA, *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*, https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf (dostęp: 11.04.2022 r.).

Jednym z państw, które jako pierwsze opracowały strategię wprowadzenia wodoru do gospodarki jest niewątpliwie Finlandia – w 2013 roku⁵. Zakres tego dokumentu nie zawiera wielu informacji dotyczących produkcji, infrastruktury ładowania, przesyłu czy też magazynowania, a zakładane cele w prawie dziesięcioletnim akcie prawnym mogą być już osiągnięte przez szybki rozwój technologii i badań w zakresie całego cyklu życia wodoru. Głównym celem fińskiej strategii wodorowej jest przede wszystkim dążenie do dywersyfikacji źródeł energii w krajowym systemie elektroenergetycznym. Drugorzędnym celem jest wyeliminowanie szarego wodoru produkowanego przy wykorzystaniu surowców kopalnych i zastąpienie go zielonym wodorem produkowanym z odnawialnych źródeł energii, głównie z farm fotowoltaicznych i wiatrowych. Największy potencjał do wykorzystania wodoru i jego nośników energii posiada przemysł oraz sektor ciepłownictwa. Ze względu na to, iż fińska strategia wodorowa nie wyszczególnia mechanizmów wsparcia finansowego na rozwój gospodarki wodorowej, badania pilotażowe i demonstracyjne przeprowadzają zazwyczaj prywatnej przedsiębiorstwa, lecz często współfinansowane przez rząd. Przykładem takiego badania jest między innymi analiza *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans*, która została przygotowana przez Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU) w ścisłej współpracy z Komisją Europejską. Analiza ta stanowi, że rozwój fińskiej gospodarki wodorowej może być środkiem wykorzystywanym do dekarbonizacji poszczególnych sektorów, ale nie jest jednym i nadrzędnym rozwiązaniem w dążeniu do osiągnięcia zakładanych celów klimatycznych – neutralności do 2035 roku i zerowej emisji dwutlenku węgla do 2050 roku. Ponadto analiza ta stanowi, że do produkcji wodoru mogą zostać wykorzystane nadwyżki energii wyprodukowane z niestabilnych, odnawialnych źródeł energii w okresach szczytowej produkcji, ale główna część produkcji powinna być pokrywana ze źródeł „dedykowanych” do wytwarzania wodoru. Taki sposób produkcji wodoru niewątpliwie przyczyni się do stabilizacji krajowego systemu elektroenergetycznego, zapewniając tym samym państwowe bezpieczeństwo energetyczne. Ciekawym rozwiązaniem w fińskiej gospodarce wodorowej jest sposób magazynowania wodoru za pomocą Lined Rock Cavern (LRC) – kriogenicznych jaskiń skalnych. Żadna z przeprowadzonych analiz nie zakłada takiego sposobu magazynowania. Dlatego też, temat ten powinien być obszarem kolejnych badań.

Analiza francuskiej gospodarki wodorowej wykazała, że obecnie staje się ona konkurencyjna w skali globalnej. Możliwość produkcji wodoru w procesie elektrolizy wykorzystującej przede wszystkim energię nuklearną, która stanowi około 80% produkowanej energii elektrycznej, czyni Francję ważnym partnerem w tworzeniu globalnej gospodarki wodorowej. Szybki rozwój francuskiego rynku wodorowego jest wynikiem postawionych celów w strategicznych dokumentach

⁵ TCH Europe, *Opportunities for Hydrogen Energy Technologies Considering the National Energy & Climate Plans*, https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Brochure%20FCH%20Finland%20%28ID%209473037%29.pdf (dostęp: 11.04.2022 r.).

regulujących prowadzenie polityki energetyczno-klimatycznej tego państwa oraz wyznaczonych narzędzi do ich osiągnięcia. Francuski rząd zobowiązuje się do przeznaczenia funduszy z budżetu państwa na projekty pilotażowe i demonstracyjne, które w sposób naturalny przyczynią się do rozwoju energetyki wodorowej w tym państwie. Francja, będąca drugim największym państwem w Unii Europejskiej, niewątpliwie jest na dobrej drodze w dążeniu do osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku. Rozwijająca się energetyka jądrowa w połączeniu z rozwojem rynku wodoru w znaczącym stopniu przyczyni się do zmniejszenia zależności od importu ropy naftowej i gazu, co przełoży się na poprawę bezpieczeństwa energetycznego Francji.

Wypełnienie hiszpańskich zobowiązań wynikających ze stanowienia Strategii Wodorowej jest bardzo ambitnym zadaniem, przed jakim stoi to państwo. Do 2030 roku Hiszpania planuje zainstalowanie elektrolizerów o łącznej mocy 4 GW, potrzebnych do wytworzenia wodoru w procesie elektrolizy przy udziale odnawialnych źródeł energii. Taki cel jest również istotny z punktu widzenia realizacji założeń zawartych w Strategii Wodorowej Unii Europejskiej, ponieważ planowana moc wytwórcza elektrolizerów w Hiszpanii stanowi 10% planowanej instalacji w całym bloku energetycznym UE. Ambitny cel hiszpańskiego rządu jest przed wszystkim wynikiem wysokiego zużycia szarego, emisyjnego wodoru w ogniowach paliwowych w sektorze przemysłu. Szary wodór jest wytwarzany z gazu ziemnego w procesie reformingu parowo-metanowego. Cena tego nośnika jest zależna nie tylko od ceny gazu, ale również od ceny emisji dwutlenku węgla. Proces ten powoduje wysoką emisję gazów cieplarnianych, stąd też objęty jest unijnym systemem handlu uprawnieniami do emisji (EU ETS).

Wdrożenie takiego mechanizmu rynkowego powoduje, że stosunek ceny zielonego wodoru do szarego powoli się obniża, co zmniejsza również znaczną przewagę konkurencyjną szarego wodoru na europejskim rynku energii. Rozwój technologii wodorowej w Hiszpanii ma również istotne znaczenie ze względu na wysoki udział produkcji energii elektrycznej z niestabilnych, odnawialnych źródeł energii w bilansie energetycznym tego państwa. Nośniki wodorowe, będące również magazynami energii, mogą ułatwić integrację nieciągłych źródeł energii z krajowym systemem energetycznym, przyczyniając się również do zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego. Tak jak w każdym z analizowanych przypadków, rozwój gospodarki wodorowej będzie wymagał dużego nakładu finansowego. Państwowy mechanizm wsparcia finansowego obecnie skoncentrowany jest na inwestycjach, które przyczynią się do osiągnięcia dojrzałości technologicznej, poprzez dofinansowanie eksperymentalnych prac rozwojowych, czy też badań przemysłowych. Działania te jednak będą wymagały dużego wkładu finansowego. Należy wspomnieć, że wyprodukowany wodór byłby jedynie produktem przeznaczonym na potrzeby własnego rynku. Dopiero po 2030 r. cena wodoru i jego ilość miałyby być korzystne w celu handlu tym surowcem dla Hiszpanii. W celu rozwoju krajowego rynku wodorowego, hiszpański rząd i instytucje stowarzyszone kierują szeregiem działań o charakterze edukacyjnym w stronę samego społeczeństwa. Liczne

debaty społeczne mające na celu podniesienie świadomości konsumenckiej w zakresie eliminacji barier wobec wykorzystania wodoru i jego nośników w sektorze prywatnym, w naturalny sposób wpłyną na wzrost popytu.

Uzależnienie wielu gospodarek, w tym słowackiej, od rosyjskich surowców kopalnych wzbudza niepewność związaną ze stabilnością dostaw. Słowacja jest jednym z największych importerów gazu ziemnego od Federacji Rosyjskiej, stąd obawa o bezpieczeństwo energetyczne tego państwa jest uzasadniona. Obecna sytuacja na świecie pokazała, że głównym celem jednostronnie uzależnionych gospodarek od surowców energetycznych powinno być dążenie do zapewnienia samowystarczalności energetycznej poprzez dywersyfikację źródeł pozyskania energii. Stąd też, rozwój gospodarki wodorowej wydaje się być na chwilę obecną jedną, obok rozwoju energetyki jądrowej alternatywą na poprawę bezpieczeństwa energetycznego państw uzależnionych od importu paliw kopalnych. Ponadto wdrożenie i rozwój technologii wodorowych jest niezbędnym elementem do osiągnięcia założonych celów w zakresie dekarbonizacji do 2050 r., który przewiduje optymistyczny poziom redukcji emisji o 90% w stosunku do 1990 roku.

W celu realizacji zobowiązań, zawartych w Strategii Wodorowej Słowacji, założono produkcję głównie zielonego wodoru powstałego w procesie elektrolizy wody za pomocą elektrolizera zasilanego energią elektryczną z odnawialnych źródeł energii oraz jego wykorzystanie, a także niebieskiego wodoru, który z kolei produkowany w taki sam sposób jak szary wodór, ale dwutlenek węgla, który powstaje podczas produkcji, jest bezpiecznie składowany w podziemnych złożach (tzw. proces CCS) lub wykorzystywany do produkcji użytecznych produktów chemicznych (tzw. proces CCU). Jednocześnie w omawianym dokumencie nie wykluczono wykorzystania szarego wodoru, wytwarzanego w procesach wykorzystujących jako surowiec paliwa kopalne, zwłaszcza gaz ziemny i węgiel. Analiza studium przypadku: Republiki Słowacji wykazała, że posiada ona znaczny potencjał w zakresie rozwoju technologii wodorowej szczególnie w sektorze transportu. Ponadto posiada również infrastrukturę energetyczną magazynową i przesyłową gazu ziemnego, którą można wykorzystać na potrzeby przesyłu i magazynowania wodoru. Mając na uwadze jej położenie geopolityczne oraz posiadaną i planowaną infrastrukturę przesyłową, Słowacja może wzmocnić swoją pozycję w ramach przynależności do Grupy Wyszehradzkiej oraz członkostwa w Unii Europejskiej.

Rozwój rynku wodoru Korei Południowej bez wątpienia ma istotne przełożenie na wzrost dywersyfikacji źródeł energii. Warto przy tym wskazać na korzyści dla bezpieczeństwa energetycznego kraju wynikają nie tylko z wykorzystania kilku niezależnych źródeł, lecz również ze zróżnicowania stosowanych technologii wytwarzania energii. Jakkolwiek Plan rozwoju gospodarki wodorowej do 2040 r. nie odnosi się wprost do pojęcia bezpieczeństwa energetycznego, to przewiduje on wzrost tzw. samowystarczalności energetycznej. W obliczu wysokiej zależności Korei Południowej od paliw kopalnych, które w 97% Korea pozyskuje

z importu, dążenie do rozwoju gospodarki wodorowej jest niezwykle ważne z perspektywy bezpieczeństwa energetycznego kraju. Rozwój przyjaznych środowisku źródeł energii w perspektywie planu rozwoju gospodarki wodorowej Korei Południowej ma stanowić narzędzie w dążeniu do energetycznej niezależności. Krajowa produkcja wodoru ma się odbywać przy zastosowaniu metod takich jak ekstrakcja wodoru i elektroliza wody, a w konsekwencji prowadzić do zastąpienia paliw kopalne wodorem⁶. Rząd koreański oraz badacze krajowi i zagraniczni podkreślają, że kraj ten ma ogromny potencjał do rozwoju rynku wodoru oraz stania się liderem na skalę światową⁷. Zastosowanie wodoru, będącego najobficiej występującym pierwiastkiem we wszechświecie, wymaga wdrożenia szeregu zaawansowanych technologii, które natomiast wymagają mechanizmów wsparcia finansowego. W celu sprawnego przeprowadzenia analiz oraz badań dotyczących całego cyklu życia wodoru, koreański rząd ustanowił Fundusz Gospodarki Wodorowej o wartości 34 milionów USD, mający na celu zwiększenie wzrostu wytwarzania i stosowania paliw alternatywnych, w tym wodoru. Ponadto, odnosząc się do działań zawartych w Strategii Wodorowej Korei wskazano, że poza produkcją krajową możliwe będzie importowanie wodoru produkowanego za granicą, wpływając na dywersyfikację importu⁸. Dlatego też, w analizowanym dokumencie odnaleźć można odwołanie do zagranicznych rynków wodoru: Japonii, Stanów Zjednoczonych, Niemiec, Australii oraz Chin.

Pomimo faktu, że strategie przygotowane przez rządy poszczególnych państw stanowią bardzo ważny krok w kierunku opracowania rozwiązań opartych na wodorze, to powinny zawierać konkretne wskazania i zobowiązania prawne, aby wzrosła efektywność wdrażania gospodarek wodorowych. Założenie Komisji Europejskiej o zwiększonej produkcji zrównoważonego wodoru na dużą skalę w dążeniu do realizacji celów klimatycznych na lata 2030 i 2050 jest bardzo ambitne, dlatego strategie krajowe będą musiały wypracować stabilne warunki ramowe oraz skuteczne metody finansowania dla podmiotów gospodarczych. Rywalizacja o dostęp do tanich metod wydobywania paliw kopalnych się zaostrza, a także rośnie konkurencja pomiędzy eksporterami surowców energetycznych, zaś rozwój odnawialnych źródeł energii, takich jak energia wodna, słoneczna, wiatrowa pozbawiony jest ryzyka geopolitycznego. Z dużą nadzieją spogląda się na technologie wodorowe, które stanowią szansę na zachowanie rentowności infrastruktury dotychczas wykorzystywanej do przesyłu paliw kopalnych, tj. gazociągów. Upowszechnienie technologii wodorowych oraz jego wykorzystanie w gospodarce zwiększać będzie samowystarczalność energetyczną poszczególnych państw, redukując ich zależność importową od paliw kopalnych. Istotne jest, aby poszczególne rządy wprowadziły odpowiednie przepisy zachęcające przedsiębiorstwa do produkcji i wykorzystywania „zielonego” wodoru. Kluczowe jest również rozwijanie kompetencji w tym zakresie, które umożliwią rozwój wiedzy,

⁶ *Ibidem*, s. 4.

⁷ *Ibidem*, s. 11.

⁸ *Ibidem*, s. 4.

a przede wszystkim wytworzenie zapotrzebowania rynkowego na wodór. Osiągnięcie tego celu wymaga konsekwentnego działania w zakresie rozbudowy infrastruktury energetycznej oraz doprowadzenia do sytuacji, w której fundusze kapitałowe inwestujące dotychczas w aktywa surowców energetycznych zmieniają swój cel inwestycyjny na wodór.

NOTY O AUTORACH

Dr hab. Mariusz RUSZEL, prof. PRz – politolog, profesor uczelni w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych w Zakładzie Ekonomii Wydziału Zarządzania Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. Prezes Instytutu Polityki Energetycznej im. Ignacego Łukasiewicza. Redaktor naczelny czasopisma naukowego „Energy Policy Studies”. Pomysłodawca i przewodniczący komitetu organizacyjnego cyklicznej Konferencji Naukowej „Bezpieczeństwo energetyczne – filary i perspektywa rozwoju”. Laureat stypendium ministra nauki i szkolnictwa wyższego dla wybitnego młodego naukowca (2017). Członek Niezależnej Grupy ds. Oceny Naukowej (Independent Scientific Evaluation Group, ISEG) programu „Nauka dla Pokoju i Bezpieczeństwa” NATO (2022–2024). Recenzent wielu międzynarodowych i krajowych czasopism naukowych. Specjalizuje się w bezpieczeństwie energetycznym oraz polityce energetycznej państwa.

ORCID: 0000-0003-1546-6754.

Dr Ewa MATACZYŃSKA – ekspert w Instytucie Polityki Energetycznej im. Ignacego Łukasiewicza. Od 1993 roku związana z sektorem energii elektrycznej. Wiceprzewodnicząca jednej z grup roboczych ETIP SNET (Europejska Platforma Technologii i Innowacji). Ekspert w grupie roboczej DSF (Demand Side Flexibility) stworzonej przez ACER. Zawodowo zajmuje się między innymi nowymi regulacjami z zakresu sektora energii na poziomie europejskim. Autorka publikacji o tematyce związanej z rozproszonymi źródłami energii, nowymi technologiami oraz transformacją sektora.

ORCID: 0000-0002-8367-9914.

Dr Sławomir WOLSKI – fizyk, adiunkt w Katedrze Fizyki i Inżynierii Medycznej Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się badaniami w zakresie fizyki ciała stałego: własności mechanicznych i kryształów, w tym komputerowym modelowaniem heterostruktur półprzewodnikowych dla fotowoltaiki. Popularyzator nauki – brał udział w wielu wykładach otwartych i pokazach z fizyki dla dzieci i młodzieży. Zaangażowany w prace nad Porozumieniem Wodorowym z ramienia Politechniki Rzeszowskiej w obszarze Ludzie: kształcenia kadr technicznych oraz budowy świadomości społecznej w obrębie łańcucha gospodarki wodorowej. Zainteresowania naukowe w obszarze wodoru: niskowymiarowe układy dla przechowywania i produkcji wodoru, edukacja w zakresie technologii wodorowych.

ORCID: 0000-0002-8968-0959.

Dr Jolanta STEC-RUSIECKA – doktor nauk ekonomicznych w dyscyplinie nauk o zarządzaniu (Wydział Nauk Ekonomicznych UE we Wrocławiu). Obecnie adiunkt

w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych w Zakładzie Zarządzania Przedsiębiorstwem na Wydziale Zarządzania Politechniki Rzeszowskiej. Doświadczenie w ramach realizacji projektów badawczych i dydaktycznych, m.in. dotyczącego wdrażania Regionalnej Strategii Innowacji w województwie podkarpackim, staży dla studentów oraz wsparcia przedsiębiorczości akademickiej. Współpraca w ramach projektów obejmująca doradztwo indywidualne dla przedsiębiorstw. Jej główne zainteresowania naukowe obejmują problematykę zarządzania projektami, zrównoważonego rozwoju, gospodarki o obiegu zamkniętym oraz społecznej odpowiedzialności organizacji.

ORCID: 0000-0003-4273-8743.

Dr Justyna TRUBALSKA – doktor nauk społecznych w zakresie nauk o polityce (2013). Adiunkt w Katedrze Stosunków Międzynarodowych, Wydział Politologii i Dziennikarstwa, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Autorka i współautorka monografii i kilkunastu artykułów naukowych z zakresu polityki energetycznej, zarządzania kryzysowego oraz wczesnego ostrzegania. Jej zainteresowania badawcze są skoncentrowane na kilku obszarach: bezpieczeństwo energetyczne (polityka energetyczna), zarządzanie kryzysowe oraz systemy wczesnego ostrzegania.

ORCID: 0000-0001-6508-0580.

Dr Maciej PASZYN – historyk i politolog, adiunkt w Katedrze Teorii i Historii Stosunków Międzynarodowych UŁ. Zainteresowania badawcze to funkcjonowanie rynków paliwowych, działalność OPEC, relacje krajów naftowych z innymi krajami i instytucjami, bezpieczeństwo energetyczne.

ORCID: 0000-0002-5684-5876.

Mgr Paweł JAKUBOWSKI – prezes Zarządu Naftoserwis sp. z o.o. Absolwent Politechniki Warszawskiej, Wydziału Administracji Publicznej. Ukończył studia podyplomowe w zakresie zarządzania projektami, organizowane przez Szkołę Główną Handlową w Warszawie. Posiada dyplom Executive MBA oraz certyfikat TenStep Project Management nr 10147. Uczestnik High Potentials Leadership Program na Harvard Business School w Bostonie (USA).

ORCID: 0000-0002-0592-0469.

Tomoho UMEDA – przewodniczący Komitetu Technologii Wodorowych przy Krajowej Izbie Gospodarczej. Założyciel spółki Hynfra oraz spółki Hynfra Energy Storage. Jest przedsiębiorcą i doradcą strategicznym. Specjalizuje się w promowaniu i badaniu nowych zielonych technologii. Doradzał zarządom spółek z różnych branż, m.in. chemicznej, energetycznej, gospodarki odpadami, teleinformatyki i farmaceutycznej. Specjalizuje się w komunikacji społecznej, zarządzaniu kryzysowym, relacjach inwestorskich oraz B2B, B2G, B2E. Jest ekspertem i promotorem z zakresu technologii wodorowych i wielkoskalowych rozwiązań w zakresie energii odnawialnej. Koncentruje się na przyspieszaniu postępu rynkowego i technologicznego w kierunku neutralności klimatycznej. Jest członkiem Hydrogen Europe, European Clean Hydrogen Alliance, współzałożycielem i członkiem zarządu polskiego stowarzyszenia

Hydrogen Poland oraz wykładowcą na Master of Business Administration (MBA) – Zarządzanie Technologiami Wodorowymi na uczelni Collegium Humanum.

Mgr Alicja WIĄCEK – studentka Szkoły Doktorskiej Nauk Inżyniersko-Technicznych na Politechnice Rzeszowskiej w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Absolwentka międzynarodowej wymiany studenckiej ERASMUS na Uniwersytecie NTNU w Norwegii. Obszar Jej zainteresowań naukowych obejmuje politykę działalności instrumentów państwowych na rzecz rozwoju budownictwa pasywnego ze szczególnym uwzględnieniem państw skandynawskich.

ORCID: 0000-0002-5122-6961.

Mgr inż. Marek SIKORA – absolwent Politechniki Łódzkiej, Wydziału Elektrotechniki i Elektroniki oraz studiów podyplomowych „Rynki Energii Elektrycznej”. Ekspert w branży energetycznej z wieloletnim doświadczeniem zawodowym, które zdobywał w przedsiębiorstwach energetycznych oraz u Operatora Systemu Dystrybucyjnego. Zawodowo zajmuje się energetyką rozproszoną, transformacją energetyczną, problemami bilansowania systemu elektroenergetycznego oraz koncepcjami energetyki obywatelskiej. Autor i współautor opracowań, koncepcji, projektów dot. wykorzystania Odnawialnych Źródeł Energii w budownictwie, w prowadzeniu działalności przedsiębiorstw i jednostek samorządu terytorialnego. Wieloletni popularyzator technologii OZE, systemów wsparcia oraz koncepcji Smart City i inteligentnych sieci.

ORCID: 0000-0001-8328-4042.

Daria PAJDOWSKA – studentka Międzyobszarowych Indywidualnych Studiów Humanistycznych i Społecznych na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, w ramach których jako kierunek wiodący studiuje prawo. Uczestnicząc w wymianach międzynarodowych studiowała na Universté de Nantes oraz Université Paris-Saclay. Trzykrotnie wyróżniona Stypendium Rektora UAM dla najlepszych studentów.

Piotr LESZCZYŃSKI – student II stopnia bezpieczeństwa wewnętrznego na Wydziale Zarządzania Politechniki Rzeszowskiej. Prezes Studenckiego Koła Naukowego „Eurointegracja”. Laureat Nagrody Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza za działania podejmowane na rzecz rozwoju i budowania pozytywnego wizerunku uczelni. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół bezpieczeństwa energetycznego, geopolityki, geostrategii, astropolityki i cyberbezpieczeństwa.

ORCID: 0000-0003-3452-2993.

Daria RZEMIENIAK – studentka II stopnia bezpieczeństwa wewnętrznego na Wydziale Zarządzania Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. Zastępca prezesa Studenckiego Koła Naukowego „Eurointegracja”. Obszar Jej zainteresowań naukowych: bezpieczeństwo energetyczne, znaczenie ropy naftowej w gospodarce, wpływ węgla kamiennego na bezpieczeństwo ekologiczne.

ORCID: 0000-0003-4575-3316.

Lidia MURIAS – studentka II stopnia na kierunku bezpieczeństwo wewnętrzne na Wydziale Zarządzania Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. Członek Studenckiego Koła Naukowego „Eurointegracja”. Jej zainteresowania naukowe koncentrują się wokół tematyki energetyki jądrowej, bezpieczeństwa międzynarodowego oraz bezpieczeństwa energetycznego państw Europy Środkowo-Wschodniej i Federacji Rosyjskiej.

ORCID: 0000-0002-2856-6685.

Jagoda SIWIEC – studentka Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza na kierunku bezpieczeństwo wewnętrzne, Wydział Zarządzania. Członek Studenckiego Koła Naukowego „Eurointegracja”. Obszar Jej zainteresowań naukowych obejmuje szeroko pojęte bezpieczeństwo oraz rozwój państwa w obszarze energetyki, odnawialnych źródeł energii, pomocy humanitarnej oraz ochrony środowiska.

ORCID: 0000-0003-4533-8913

DOCUMENT
CREATED
WITH



PDF
COMBINER

PDF Combiner is a free application that you can use to combine multiple PDF documents into one.

Three simple steps are needed to merge several PDF documents. First, we must add files to the program. This can be done using the Add files button or by dragging files to the list via the Drag and Drop mechanism. Then you need to adjust the order of files if list order is not suitable. The last step is joining files. To do this, click button Combine PDFs.

Main features:

secure PDF merging - everything is done on your computer and documents are not sent anywhere

simplicity - you need to follow three steps to merge documents

possibility to rearrange document - change the order of merged documents and page selection

reliability - application is not modifying a content of merged documents.

Visit the homepage to download the application:

www.jankowskimichal.pl/pdf-combiner

To remove this page from your document, please donate a project.