



Strategia Bezpieczeństwa Technologii Wodorowych w Polsce na lata 2023–2030

Strategia
Bezpieczeństwa
Technologii Wodorowych
w Polsce na lata
2023-2030

AUTORZY:

dr inż. Kamil Kulesza

dr inż. Renata Kulesza

prof. dr hab. inż. Piotr Wolański

dr inż. Antoni Migdał

dr hab. inż. Grzegorz Wojtasiewicz

dr inż. Piotr Wieczorek

Damian Wijatyk

dr hab. Michał Wróblewski

dr inż. Katarzyna Stec

Joanna Grudowska

dr Katarzyna Iwińska

REDAKCJA MERYTORYCZNA: dr inż. Kamil Kulesza

REDAKCJA: dr inż. Kamil Kulesza, dr Katarzyna Iwińska, Joanna Grudowska

WSPÓŁPRACA MERYTORYCZNA: prof. dr hab. Jakub Kupecki

KIEROWNICZKA PROJEKTU:

dr Katarzyna Iwińska

ZESPÓŁ PROJEKTU:

dr Katarzyna Iwińska

dr inż. Kamil Kulesza

dr hab. Michał Wróblewski

Joanna Grudowska

PROJEKT GRAFICZNY:

Justyna Wróblewska, BRANDFACE

Sugerowane cytowanie: Iwińska, K., Kulesza, K., Wróblewski, M., Grudowska, J., Kulesza, R., Wolański, P., Migdał, A., Wojtasiewicz, G., Wieczorek, P., Wijatyk, D., Stec, K. [2024].

Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2023–2030.

Sieć Badawcza Łukasiewicz – ITECH.

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa” nr projektu NdS 545480/2022/2022, kwota dofinansowania 1 410 152 zł, całkowita wartość projektu 1 410 152 zł.



**Bezpieczny
Wodór**



**NAUKA DLA
SPOŁECZEŃSTWA**

Sieć Badawcza Łukasiewicz – ITECH Instytut Innowacji i Technologii
ul. Żelazna 87, 00-879 Warszawa

ISBN 978-83-60561-19-5



Strategia Bezpieczeństwa Technologii Wodorowych w Polsce na lata 2023-2030

SPIS TREŚCI

STRATEGIA BEZPIECZEŃSTWA TECHNOLOGII WODOROWYCH W POLSCE NA LATA 2023–2030 – SŁOWO WSTĘPNE 7

Część I. ASPEKTY TECHNICZNE

9

1. WPROWADZENIE	11
2. TECHNOLOGIE WODOROWE W POLSCE	17
2.1. Wodór i jego porównanie do innych paliw	17
2.2. Analityka wodoru	18
2.3. Wytwarzanie wodoru	18
Konwersja z parą wodną	18
Procesy rafineryjne i petrochemiczne	19
Przetwarzanie biomasy	20
Elektroliza wody	20
Zapewnienie odpowiedniej jakości wody do elektrolizy	22
2.4. Oczyszczanie wodoru	23
2.5. Magazynowanie wodoru	24
Zbiorniki wodoru	25
Rurociągi	27
Inne sposoby magazynowania i transportu wodoru	30
Wytyczne dotyczące bezpiecznego magazynowania wodoru	30
Stacje regazyfikacji	31
Konwersja energii	32
2.6. Transport i dystrybucja wodoru	32
Wodór gazowy	32
Wodór ciekły	33
Związki chemiczne	33
Wytyczne bezpiecznego transportu wodoru za pomocą autocystern	33
3. BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH	34
3.1. Identyfikacja zagrożeń	34
Analiza podsystemów technicznych w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa	34
Przyczyny zdarzeń kryzysowych	35
Porównanie zagrożeń powodowanych przez ciekły wodór do zagrożeń powodowanych przez naftę lotniczą i olej napędowy	41
3.2. Metody minimalizacji zagrożeń w wybranych technologiach wodorowych	41
Analiza jakościowa w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa	43
Analiza jakościowa w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa w obszarze celów	46
Analiza ilościowa w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa	47

3.3. Zagrożenia związane ze zwiększoną zawartością tlenu w strumieniach technologicznych lub w atmosferze	48
Warunki stwarzające zagrożenie pożarem	48
Źródła zapytonu	49
4. RYZYKA ROZWOJU GOSPODARKI WODOROWEJ	52
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	58

Część II. ASPEKTY SPOŁECZNO-KOMUNIKACYJNE: ZARYS PLANU STRATEGII KOMUNIKACJI

65

1. WSTĘP	67
2. STRESZCZENIE	68
3. OPIS BADAŃ	69
4. NAJWAŻNIEJSZE WNIOSKI Z BADAŃ	71
4.1. Wiedza o wodorze	71
4.2. Podsumowanie i wskazówki: wiedza o wodorze	75
4.3. Wartości i postawy związane z technologiami wodorowymi	77
Wartości środowiskowo-ekologiczne	79
Wartości ekonomiczne	81
Wartości społeczne	83
Wartości technologiczne	85
Wartości dotyczące bezpieczeństwa	85
4.4. Podsumowanie i wskazówki: wartości i postawy	86
4.5. Narracje i komunikacja wodorowa	88
Nadawcy	89
Przekazy	90
Odbiorcy	91
Komunikaty i ich oceny	92
4.6. Podsumowanie i wskazówki: narracje i komunikacja wodorowa	93
5. REKOMENDACJE: STRATEGICZY PLAN DZIAŁAŃ SPOŁECZNO-KOMUNIKACYJNYCH	96
5.1. Budowanie społecznego trendu „zielonego wodoru” i kształtowanie postaw prośrodowiskowych [szkolenia i edukacja]	97
5.2. Prewencja dezinformacji (monitoring sfery publicznej/medialnej)	98
5.3. Włączenie interesariuszy społecznych i instytucjonalnych	100
6. PODSUMOWANIE I REKOMENDACJE	101

Strategia Bezpieczeństwa Technologii Wodorowych w Polsce na lata 2023-2030 – słowo wstępne

W czasach, kiedy troska o środowisko naturalne i zrównoważony rozwój stanowią fundament przyszłości naszej planety, technologie wodorowe wyrastają na kluczowy filar przemiany energetycznej. Wodór wskazywany jest jako kluczowy element transformacji energetyczno-klimatycznej [Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 19 maja 2021 r. w sprawie europejskiej strategii w zakresie wodoru], która jest głównym mechanizmem służącym osiągnięciu celów Porozumienia Paryskiego i Europejskiego Zielonego Ładu, takich jak: obniżanie ogólnego poziomu emisji (tzw. zeroemisyjność) oraz redukcja poziomu emisji gazów cieplarnianych.

Projekt „**Strategia Bezpieczeństwa Technologii Wodorowych w Polsce na lata 2022-2030**” jest odpowiedzią wynikającą z zaangażowania w rozwój i implementację technologii nisko- i zeroemisyjnego wodoru w polskim systemie energetycznym.

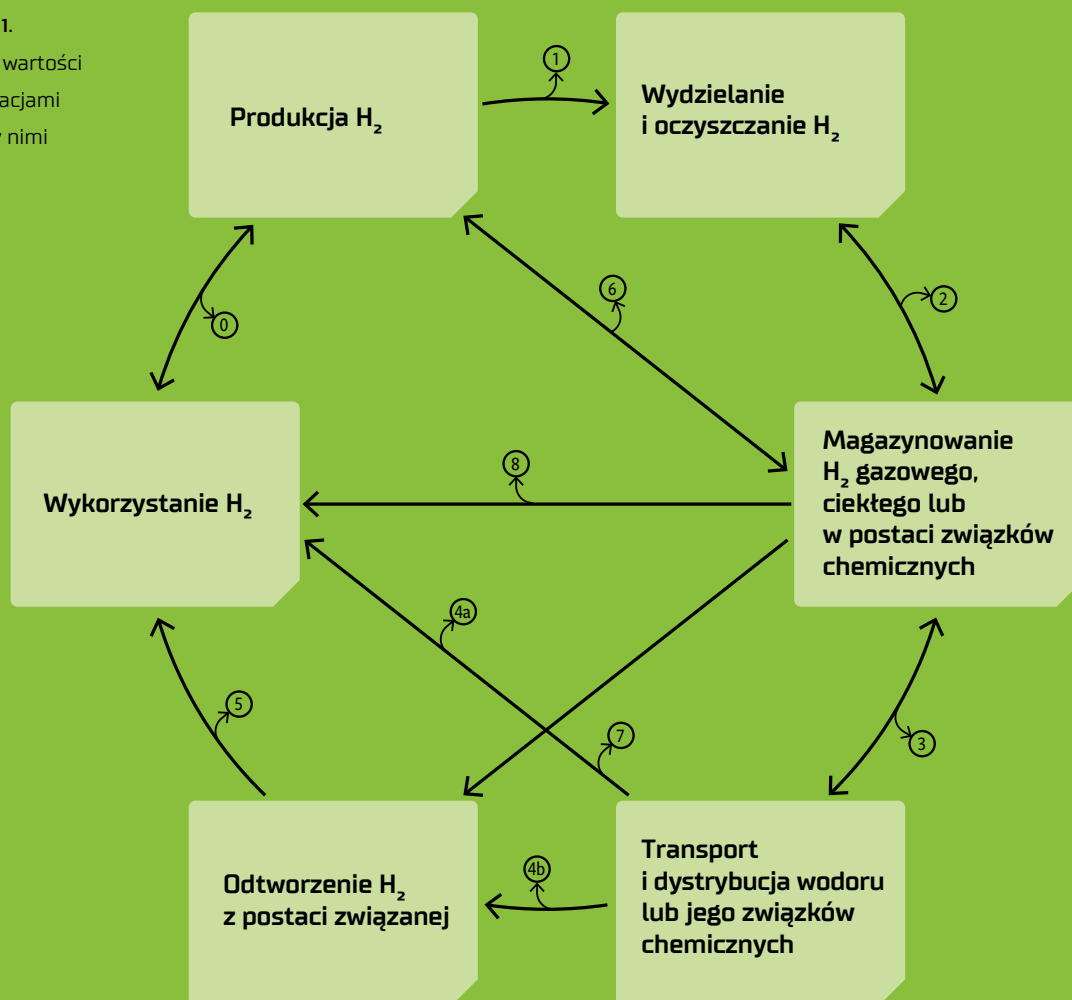
Wdrażanie technologii wodorowych to ambitna inicjatywa, która nie tylko wynika z wyzwań klimatycznych, ale również jest szansą na umocnienie Polski jako lidera innowacji technologicznej. Głównym efektem realizacji projektu jest ten dokument składający się z dwóch komplementarnych programów działania: **bezpieczeństwa technologii wodorowych w obszarze B+R (aspekty techniczne) oraz działań komunikacyjno-społecznych** dotyczących rozwoju technologii wodorowych w Polsce. Stworzona strategia stanowi punkt wyjścia dla ukierunkowanych prac badawczo-rozwojowych, analiz bezpieczeństwa technologii wodorowych oraz działań społeczno-komunikacyjnych, podejmowanych wspólnie przez przedsiębiorstwa i instytucje publiczne na rzecz zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa technologii wodorowych.

KATARZYNA IWIŃSKA

CZĘŚĆ I

ASPEKTY TECHNICZNE

RYSUNEK 1.
Pierścień wartości
wraz z relacjami
pomiędzy nimi



ROZDZIAŁ 1

WPROWADZENIE

Niniejsza część Strategii jest wynikiem pracy zespołu ekspertów Sieci Badawczej Łukasiewicz z wykorzystaniem ich autorskich opracowań¹, zleconych raportów dotyczących inżynierii bezpieczeństwa technologii wodorowych²⁻⁹ – oraz źródeł wskazanych w przypisach.

Wodór (H₂) ma szereg zalet jako nośnik energii i z tego powodu będzie w coraz większej skali wykorzystywany w gospodarce. Choć w Polsce jest używany w zakładach przemysłowych na dużą skalę od dawna, to rosnące zapotrzebowanie i produkcja wodoru oznaczają nowe wyzwania w zakresie regulacyjnym, bezpieczeństwa oraz czynników wpływających na ryzyko technologiczne.

Zagadnienia związane ze strategią bezpieczeństwa technologii wodorowych można opisać językiem wartości, np. wytwarzanie wodoru, jego otrzymywanie, wykorzystanie itp.¹⁰, relacji pomiędzy tymi wartościami, ich relacji z przyczynami ryzyka, jego skutkami, metodami minimalizacji lub maksymalizacji tego ryzyka (w zależności od tego, czy jest to ryzyko negatywne, czy szansa) oraz skutkami potencjalnie podjętych działań. W przypadku gospodarki wodorowej wartości tworzą pierścień (patrz rysunek 1).

Opis relacji pomiędzy wartościami przedstawionymi na rysunku 1 przedstawiono w tabeli 1.

Analiza relacji ww. wartości z czynnikami ryzyka pozwoliła na stworzenie mapy wartości i ryzyka, której opis został przedstawiony w rozdziale 4. Jej przegląd doprowadził do istotnych wniosków, które są opisane w podsumowaniu. Poniżej przedstawiono ich streszczenie:

- Wzrosnie zapotrzebowanie na odpowiednio wykwalifikowane kadry. O ile można próbować zwiększyć liczbę absolwentów o wykształceniu technicznym, o tyle nie będą one nadążały ze zdobyciem odpowiedniej wiedzy szczegółowej.

1. Praca zbiorowa, „Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna”, aneks, Warszawa 2023

2. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. I – Przegląd technologii wodorowych”, Warszawa 2023

3. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. II – Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – Ogólne zagadnienia inżynierskie”, Warszawa 2023

4. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. III – Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – Bezpieczeństwo w obszarze otrzymywania wodoru”, Warszawa 2023

5. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. IV – Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – Bezpieczeństwo w obszarze magazynowania wodoru”, Warszawa 2023

6. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. V – Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – Bezpieczeństwo w obszarze transportu i dystrybucji wodoru”, Warszawa 2023

7. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. VI – Zagadnienia bezpieczeństwa związane z wykorzystaniem wodoru”, Warszawa 2023

8. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. VII – Założenia techniczne i technologiczne oraz przegląd strategii wodorowych”, Warszawa 2023

9. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. VIII – Zagadnienia podsumowujące temat bezpieczeństwa w obszarze technologii wodorowych”, Warszawa 2023

10. Znaczenie terminu jest w tym wypadku podobne do występującego w tzw. łańcuchu wartości (ang. *value chain*)

TABELA 1.

Opis relacji pomiędzy wartościami występującymi w sześcioelementowym opisie gospodarki wodorowej

Nr relacji	Opis	Odniesienia w Strategii oraz w dokumentach z nią związanych
0	Wodór jest wykorzystywany w tym samym procesie, w którym powstaje. Przykładem jest rafineryjny proces krakingu katalitycznego. Relacja jest obustronna, gdyż proces wymaga pewnej ilości wodoru dla przeprowadzenia niektórych reakcji. Z drugiej strony w innych reakcjach, zachodzących w tym samym reaktorze, jest on wymagany.	Rozdział 2.3, podrozdział „Procesy rafineryjne i petrochemiczne”
1	W znacznej części tradycyjnych procesów otrzymywania wodoru, np. poprzez wykorzystanie reformingu parowego metanu, a także w uznawanych za obiecujące, procesach zgazowania biomasy, odpadów tworzyw sztucznych lub osadów ściekowych, powstający wodór wymaga oddzielenia np. od CO ₂ i CO, a następnie oczyszczenia, m.in. po to, aby mógł być zastosowany do syntezy amoniaku – w takim wypadku oczyszczany jest bezpośrednio po wytworzeniu.	Rozdział 2.4
2	Po wydzieleniu i (niekiedy wstępnym) oczyszczeniu wodór może być kierowany bezpośrednio do procesów, które go wykorzystują (relacja nr 8, dalej będą umieszczane jedynie liczby będące numerami relacji) lub też będzie magazynowany. Relacja jest dwukierunkowa, ponieważ zmagazynowany wodór może być dalej transportowany bezpośrednio, lub też jego część może zostać poddana dodatkowemu oczyszczaniu w celu wykorzystania do procesów mających ponadprzeciętne wymogi w zakresie pewnych rodzajów zanieczyszczeń wodoru (np. do zasilania ogniw paliwowych). Wodór przed zmagazynowaniem może zostać związany w związkach chemicznych, np. w metanolu lub amoniaku.	Rozdział 2.5
3	W kolejnym etapie wodór będzie transportowany za pomocą rurociągów (głównie wewnątrz danego zakładu lub w postaci niewielkiej domieszki do gazu ziemnego), w zbiornikach ciśnieniowych i butlach, lub w postaci związków chemicznych (metanol, amoniak). Relacja jest obustronna, ponieważ po dostarczeniu w miejsce docelowe wodór najczęściej będzie ponownie magazynowany przed jego użyciem.	Rozdział 2.6
4a	Relacja obrazująca wykorzystanie wodoru, który został przetransportowany w miejsce docelowe bez pośredniego przekształcania go w związki chemiczne.	Aneks ¹

Nr relacji	Opis	Odniesienia w Strategii oraz w dokumentach z nią związanych
4b	Związki chemiczne, w postaci których magazynowano lub transportowano wodór (np. metanol lub amoniak), mogą być wykorzystywane bezpośrednio, jednak w ujęciu niniejszej Strategii punkt ciężkości położony jest na odtworzenie z nich wodoru przed wykorzystaniem bezpośrednio po dostarczeniu tych związków na miejsce docelowe [5] lub też najczęściej z pośrednim etapem ich magazynowania [7]. Z niniejszym zagadnieniem związany jest m.in. problem wykorzystania membran polimerowych do oddzielania wodoru od azotu w przypadku przechowywania lub transportowania H ₂ w postaci amoniaku (ze względu na czynniki ekonomiczne wykorzystanie membran palladowych jest na dużą skalę nieoptyczne).	Aneks ¹ , Rozdział 2.5
5	Patrz opis pkt. 4b.	
6	Wodór po wytworzeniu często będzie również magazynowany bez wstępnego oczyszczania. Postępowanie to będzie stosowane zazwyczaj w przypadku wytwarzania wodoru metodą elektrolizy wody lub w innych tego typu procesach. Relacja jest obustronna, gdyż w części przypadków wodór może być wytwarzany i magazynowany w okresie, gdy istnieje nadmiar energii elektrycznej na rynku, a następnie zostać wykorzystany do wytworzenia tej energii (z nieuniknionymi stratami związanymi z kolejnymi etapami konwersji) w przypadku jej niedoboru.	Rozdział 2.6
7	Patrz opis pkt. 4b.	
8	Wykorzystanie wodoru zmagazynowanego w miejscu docelowym. Wodór jest wykorzystywany w wielu dziedzinach gospodarki w bardzo wielu procesach. Wybrane z nich zawarte są w niniejszej Strategii, aneksie technicznym oraz raportach, które zostały przygotowane w etapie wstępnym prac nad niniejszą Strategią. Przykłady obejmują m.in. bezpośrednie wykorzystanie wodoru zmagazynowanego w „baku” pojazdu do generowania energii elektrycznej w ogniwie paliwowym lub wykorzystanie zapasów wodoru w zakładach przemysłowych w stosujących procesy uwodornienia.	Raporty ^{2,5,6} , aneks ¹ , Rozdział 2.5

- Takie kadry nie będą w stanie opracować procedur i instrukcji o odpowiedniej jakości. Wypracowanie rozwiązania tego problemu może zostać osiągnięte poprzez ogłoszenie konkursu na projekt realizowany przez interdyscyplinarny zespół, który stworzyłby system zachęt dla zakładów wyspecjalizowanych w stosowaniu wodoru do dzielenia się swoją wiedzą i procedurami.

Koincydencja kwestii ekonomicznych z niewystarczającymi rozwiązaniami legislacyjnymi lub ich brakiem, może powodować następujące zagrożenia:

- Dążenie przedsiębiorców do prób wykorzystania wody o możliwie wysokiej klasie czystości. Wysoką klasę czystości mają wody gruntowe. W przypadku dużych projektów zagrożenie dla zasobów wód gruntowych będzie wynikało z dodatniego sprzężenia zjawiska suszy hydrologicznej oraz umiejętnie przeprowadzonego przez przemysł lobbingu. Lobbing ten będzie polegał na wykorzystaniu swojej pozycji negocjacyjnej do uzyskania sprzyjających interpretacji niewystarczająco precyzyjnych regulacji prawnych.
- Z drugiej strony braki w zakresie istnienia odpowiednich regulacji będą utrudniać uzyskanie odpowiednich pozwoleń małym i średnim przedsiębiorcom, które będą planowały realizować niewielkie projekty. Nawet w sytuacji, gdy skala projektów nie będzie zagrażała poziomowi lokalnych wód gruntowych, a ich realizacja będzie korzystna dla regionu, to brak odpowiednich regulacji prawnych będzie utrudniał uzyskanie potrzebnych pozwoleń. Podobnie jak we wcześniej opisanym przypadku wypracowanie dobrych przepisów można zrealizować poprzez konkurs na projekt realizowany przez odpowiednio dobrany interdyscyplinarny zespół.
- Wykorzystaniem kawern solnych do magazynowania wodoru będą zainteresowane głównie duże zakłady, o wieloletnim doświadczeniu w pracy z wodorem. Pomimo tego brak odpowiednich regulacji w zakresie prawa geologicznego i górniczego, w połączeniu z brakiem dojrzałości tego typu technologii, stwarza zagrożenia wynikające z palności wodoru oraz jego bardzo niskiej energii zapłonu.
- Wykorzystanie ww. kawern do składowania dwutlenku węgla może być atrakcyjnym z kosztowego punktu widzenia rozwiązaniem realizacji strategii wychwytu i składowania CO₂ (CCS), jednak i w tym wypadku dużym zagrożeniem jest brak regulacji w zakresie prawa geologicznego i górniczego. Brak tych regulacji stwarza ryzyko awaryjnego uwolnienia się dużych ilości CO₂ cieplarnianego w krótkim czasie, co może doprowadzić do uduszenia się fauny oraz ludzi przebywających na terenie nad kawerną. Ulatnianie się CO₂ w niewielkich ilościach nie powoduje takiego zagrożenia, ale może być nadmiernie tolerowane przez przedsiębiorców. Kawerny nie nadają się do długotrwałego składowania CO₂ na dużą skalę, gdyż ich pojemność jest ograniczona.

W Polsce wodór w największej skali otrzymywany jest metodą parowej konwersji metanu, w której obok H₂ powstają duże ilości dwutlenku węgla. Próby składowania CO₂ w postaci gazowej (CCS) zawiodą na dużą skalę

w przypadku prób długotrwałego jego przechowywania. Dlatego szczególnie cenne mogą okazać się metody wychwytu i wykorzystania CO₂ (CCU) oraz metody związane z jego wychwytem, wykorzystaniem i składowaniem (CCUS). Strategiczne bezpieczeństwo tej stosowanej w Polsce technologii reformingu parowego metanu może zostać osiągnięte poprzez sprostanie poniższym wyzwaniom o charakterze strategicznym:

- inwentaryzację polskich pokładów surowców mineralnych o charakterze zasadowym, mogących trwale wiązać CO₂;
- ustanowienie programu badawczego wykorzystania ww. surowców do utylizacji w działach gospodarki, mogących wykorzystywać bardzo duże masy uzyskanych produktów;
- stworzenie mechanizmów skutecznego wdrażania wyników rozwiązań opracowanych w ramach ww. programu.

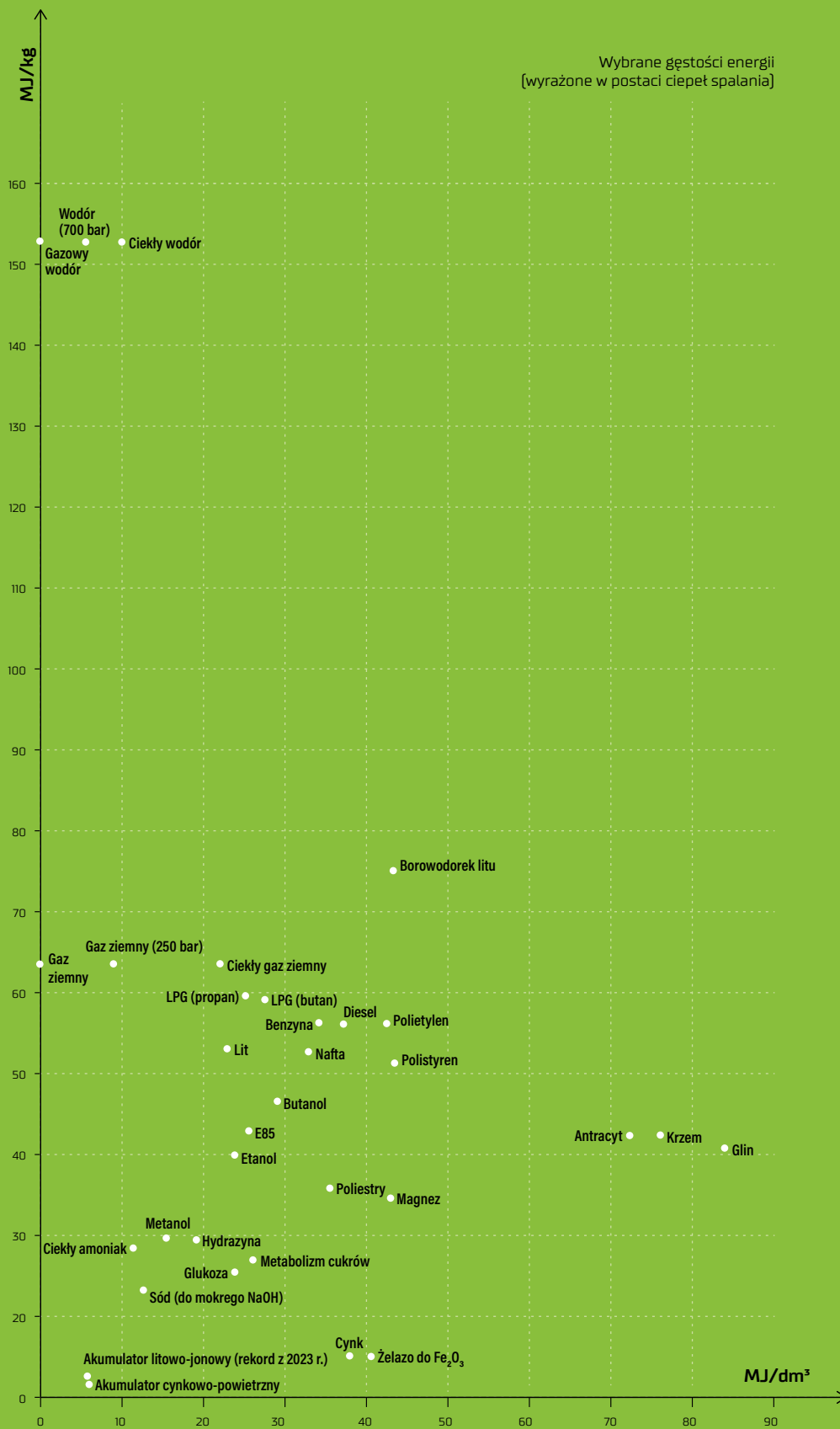
Bezpieczeństwo rozwoju technologii wodorowych związane jest również z zagrożeniami wynikającymi z niewystarczającej podaży dobrze rozpracowanych z technologicznego lub technicznego punktu widzenia rozwiązań pomocniczych wobec dynamiki rozwoju popytu, wynikającej z rozwoju wykorzystania wodoru.

Zwiększający się udział elektrolizy wody będzie skutkował zwiększoną podażą tlenu. Ten, kto lepiej niż konkurencja rozwiąże problem wykorzystania tlenu, uzyska przewagę konkurencyjną. Wiąże się to z trzema zagadnieniami:

- Zapewnienie bardzo korzystnych mechanizmów pozwalających na szybkie dopracowanie znanych procesów, w których tlen może poprawić parametry technologiczne po zastąpieniu stosowanego w nich powietrza. Należy zwrócić uwagę na stworzenie mechanizmów zapewniających prototypowe wdrożenie w gospodarce pozwalające uzyskać referencje.
- Zapewnienie dostępu do sprawdzonych procedur, instrukcji, know-how oraz dostępu do kadr o odpowiednim wyszkoleniu technicznym – podobnie jak w przypadku dotyczącym prac z wodorem.
- Procesy wytwarzania azotu na drodze rektyfikacji powietrza staną się mniej opłacalne. Spowoduje to problemy w przedsiębiorstwach uzyskujących tlen z powietrza, ale jest jednocześnie szansą dla spółek wytwarzających amoniak, poprzez dostosowanie procesów oczyszczania strumieni obiegowych do potrzeb otrzymywania czystego azotu w skali wymaganej przez gospodarkę.

Skuteczne działania będą wymagały działań legislacyjnych, zorganizowania adekwatnych programów badawczych i ścisłej współpracy pomiędzy instytucjami rządowymi, samorządowymi, akademickimi oraz badawczo-rozwojowymi z przedstawicielami przemysłowymi działającymi w zakresie transformacji energetycznej.

RYSUNEK 2.
Porównanie masowych i objętościowych gęstości energii wodoru, wybranych paliw oraz substancji o potencjalnym użyciu do magazynowania energii¹²



12. Opracowanie własne na podstawie: Goojin Jeong et al., „Nanotechnology enabled rechargeable Li-SO₂ batteries: Another approach towards post-lithium-ion battery systems”. *Energy & Environmental Science* 8 (11), s. 3173–3180, „Panasonic Develops New Higher-Capacity 18650 Li-Ion Cells.” *Green Car Congress*. N.p., 25 Dec. 2009. Web.; Enrico Stura, Claudio Nicolini (2006), „New nanomaterials for light weight lithium batteries”. *Analytica Chimica Acta*. 568 (1–2), s. 57–64. doi:10.1016/j.aca.2005.11.025; Julia Fisher (2003). Glenn Elert (ed.), „Energy density of coal”. *The Physics Factbook; Heat Values of Various Fuels – World Nuclear Association*. World Nuclear Association. N.p., Sept. 2016. Web.; „Overview of Storage Development DOE Hydrogen Program.” Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. N.p., May 2000. Web.; Kaufui Wong; Sarah Dia (2017), „Nanotechnology in Batteries”. *Journal of Energy Resources Technology*. 139. doi:10.1115/1.4034860; Isabelle Dumé, „Lithium-ion batteries break energy density record”. *Physics World*, 21 Apr 2023, <https://physicsworld.com/a/lithium-ion-batteries-break-energy-density-record/>

ROZDZIAŁ 2

TECHNOLOGIE WODOROWE W POLSCE

2.1. Wodór i jego porównanie do innych paliw

Wodór ma największą wartość opałową w stosunku do wszystkich pozostałych paliw w przeliczeniu na jednostkę masy i wynosi ona 120 MJ/kg, to samo dotyczy ciepła spalania, które przekracza 140 MJ/kg. Natomiast wartości te odniesione do objętości paliw są dla wodoru najniższe zarówno przy porównaniu gazów z gazami, jak i cieczy z cieciami. Dotyczy to również porównania ciepła spalania wysoko sprężonego gazowego wodoru do umiarkowanie sprężonego gazu ziemnego¹¹.

Ciepła spalania wybranych substancji energetycznych przedstawia rysunek 2.

Niska w przeliczeniu na jednostki objętości wartość opałowa (oraz ciepło spalania) wodoru stanowi poważny problem podczas jego przechowywania i dystrybucji. Dodatkowym problemem stanowi bardzo niska temperatura wrzenia ciekłego wodoru, która wynosi około 20 K. W tej temperaturze większość materiałów konstrukcyjnych nie zachowuje odpowiednich właściwości mechanicznych i wymagane jest stosowanie specjalnych materiałów na zbiorniki ciekłego wodoru. Problem ten został wprawdzie dawno rozwiązany w napędach kosmicznych, gdzie ciekły wodór jest wykorzystywany jako paliwo w rakietach już od połowy lat 60. XX wieku, jednak rozwiązania te często nie są akceptowalne w masowych zastosowaniach z ekonomicznego punktu widzenia. Dodatkowym problemem dotyczącym przechowywania i transportu wodoru jest korozja wodorowa, której skutkiem jest tzw. kruchość materiałów wywołana przez oddziaływanie wodoru z materiałem, co eliminuje wiele stosowanych obecnie materiałów z wykorzystaniem do konstrukcji zbiorników i rurociągów przesyłowych wodoru.

11. Piotr Wolański, „Porównanie właściwości wodoru do innych alternatywnych paliw”, Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna, aneks, Warszawa 2023, s. 7

13. Renata Kulesza, „Analityka wodoru”, Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna, aneks, Warszawa 2023, s. 22

2.2. Analityka wodoru¹³

Powstanie niezależnych od biznesu, spełniających wysokie standardy jakościowe laboratoriów analityki wodoru jest jednym z elementów bezpieczeństwa w technologiach wodorowych. Posiadanie kompetencji w zakresie analityki czystego wodoru jest także podstawowym elementem realizacji projektów badawczych z zakresu gospodarki wodorowej.

W wyniku rozwoju technologii wodorowych w Polsce, gazowy wodór stanie się produktem rynkowym w znacznie większej liczbie sektorów niż obecnie. Musi zostać zapewniona możliwość uzyskania wiarygodnego wyniku w zakresie oceny jego czystości i śladowych zawartości krytycznych zanieczyszczeń. Przykładowo wodór do ogniw paliwowych z membraną wymiany protonów, typu PEM (ang. *Proton Exchange Membrane*) wykorzystywanych w transporcie, musi spełniać wysokie standardy czystości (typu I Grade D H₂), które są określone w normie ISO 14678-2. Najbardziej kluczowe znaczenie ma tutaj analityka zanieczyszczeń, które mogą powodować kosztowne, nieodwracalne uszkodzenia ogniwa paliwowego wytwarzającego energię dla silnika elektrycznego: lotne związki siarki (VSC), tlenek węgla (CO), amoniak (NH₃) i lotne związki zawierające chlorowce (VXC).

Na świecie pracują obecnie tylko nieliczne akredytowane laboratoria w zakresie metodyk oznaczania zanieczyszczeń wodoru czystości typu I Grade D H₂. Jedno w Wielkiej Brytanii, a drugie w Stanach Zjednoczonych, natomiast w Unii Europejskiej pierwsze takie jednostki dopiero powstają.

2.3. Wytwarzanie wodoru

W drugiej dekadzie XXI wieku wodór był produkowany głównie z węglowodorów, pomimo że w skorupie ziemskiej znacznie większa ilość wodoru zawarta jest w wodzie¹⁴.

Metody termiczne pozyskiwania wodoru polegają na rozkładzie organicznych związków węgla na wodór oraz dwutlenek/tlenek węgla z dostarczeniem energii z zewnątrz, w przyszłości będą również obejmowały termiczną dysocjację wody z wykorzystaniem energii jądrowej. Metody te obejmują przetwarzanie bezpośrednio metanu (reforming parowy) oraz pośrednie metody przetwarzania paliw kopalnych oraz biomasy¹⁵.

KONWERSJA Z PARĄ WODNĄ¹⁵

Metodą pozyskiwania wodoru z gazowego metanu jest m.in. reforming parowy. Polega on na reakcji metanu z parą wodną w obecności katalizatora w podwyższonej temperaturze, zwykle powyżej 750°C, i pod ciśnieniem 3–35 bar. Zamiast metanu (gazu ziemnego) substratami mogą być także np. metanol lub propan-butan. Dla metanu reakcja ma postać: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$

14. Peter Häussinger, Reiner Lohmüller, Allan M. Watson, „Hydrogen, 2. Production”, w: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons, Inc. (2011), tom 18, s. 249, https://doi.org/10.1002/14356007.013_003

15. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. I - Przegląd technologii wodorowych”, Warszawa 2023, s. 27

Następnie z gazu syntezowego – złożonego z wodoru i tlenku węgla – w konwertorze uzyskuje się dalszy przyrost ilości wodoru w wyniku reakcji tlenku węgla z parą wodną. Obie substancje rozdzielane są metodami adsorpcyjnymi. Podczas reformingu powstaje CO₂ oraz palny gaz resztkowy, który może być stosowany do podgrzania materiałów wejściowych do reakcji. Podstawą do podobnego procesu może być również węgiel (tzw. zgazowanie węgla). Węgiel jest drobno rozpylany i mieszany z wodą. Mieszanka ta jest poddawana reakcji z tlenem, tworząc gaz zawierający wodór. Za pomocą reformingu parowego można wytwarzać wodór z wyższych węglowodorów, np. lekkich frakcji benzynowych. Głównymi surowcami wykorzystywanymi w tych metodach są paliwa kopalne. Ich przyszłość jest uzależniona od opracowania opłacalnych z ekonomicznego punktu widzenia – wielkoskalowych technologii związanych z wychwytem, a następnie składowaniem lub wykorzystaniem CO₂ (metody CCU, CCS)¹⁵.

PROCESY RAFINERYJNE I PETROCHEMICZNE¹⁶

Procesem dedykowanym do wytwarzania wodoru w procesach rafineryjnych i petrochemicznych jest parowa konwersja węglowodorów, ale wodór jest także odzyskiwany z gazów wylotowych powstających w wyniku innych procesów. Gazy te w przeszłości były często stosowane jako źródło energii cieplnej uzyskiwanej z ich spalania. Do ww. procesów należą:

- **WSTĘPNY KRAKING**, łagodny kraking termiczny, Visbreaking, prowadzony w temperaturze 430–510°C^{17,18}, pod ciśnieniem 0,5–2 MPa¹⁹, oraz koksowanie pozostałości po destylacji ropy naftowej (koksowanie przeprowadza się w temperaturze 520–535°C pod ciśnieniem do 0,5 MPa¹⁷ lub, w przypadku gudronu, 430–550°C w zakresie ciśnienia 0,1–0,3 MPa¹⁸) – dzięki tym procesom w rafinerii z jednej baryłki ropy naftowej udaje się uzyskać więcej paliw, a produktem „ubocznym” jest wodór.
- **KRAKING KATALITYCZNY**, jest najważniejszym etapem technologii uzyskiwania lekkich produktów z oleju napędowego oraz w coraz większym stopniu z próżniowego oleju napędowego i pozostałości po destylacji próżniowej (gudronu). Proces jest zazwyczaj prowadzony w zakresie temperatury 450–540°C^{18,19}, pod ciśnieniem atmosferycznym lub nieznacznie podwyższonym do 0,2 MPa¹⁸. W ramach krakingu katalitycznego zachodzą reakcje, które wymagają wodoru, tj. skracające długość łańcucha węglowodorów parafinowych lub otwierające pierścienie nftenów²⁰ oraz reakcje dealkilacji związków monoaromatycznych²¹. W tym samym procesie wodór powstaje w wyniku dealkilacji oraz koksowania dwu- i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych – sumarycznie powstaje więcej wodoru, niż wymaga proces. Powoduje to zamknięcie łańcucha wartości (patrz rysunek 1).
- **REFORMING KATALITYCZNY**, w jego trakcie z lekkich frakcji powstałych w wyniku destylacji ropy naftowej (głównie z frakcji benzynowych) oraz z produktów krakingu katalitycznego otrzymane są paliwa o podwyższonej liczbie oktanowej. Podwyższenie liczby oktanowej wynika głównie z przebiegu reakcji odwodornienia cykloalkanów, przede wszystkim

16. Peter Häussinger, Reiner Lohmüller, Allan M. Watson, „Hydrogen, 2. Production”, w: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons, Inc. (2011), tom 18, s. 270-273, https://doi.org/10.1002/14356007.013_003

17. Procesy termiczne w przeróbce ropy naftowej. w: Edward Grzywa, Jacek Molenda, Technologia podstawowych syntez chemicznych, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, (2008) tom 1, s. 160-178

18. Praca zbiorowa, „kraking”, w: Encyklopedia PWN (on-line)

19. „Catalytic Cracking”, w: James H. Gary, Glenn E. Handwerk, Petroleum Refining Technology and Economics. Wyd. 4, Marcel Dekker (2001), s. 93-136

20. Węglowodory parafinowe to alkanany o długich łańcuchach, natomiast nfteny to zwyczajowa nazwa cykloalkanów (ich najbardziej znanym przedstawicielem jest cykloheksan) – w trakcie krakingu katalitycznego powstają z nich olefiny (alkeny) oraz alkanany o krótszych łańcuchach/zawierające mniej atomów węgla niż w surowcu poddanym krakowaniu

21. Związki monoaromatyczne to węglowodory zawierające jeden pierścień aromatyczny. W surowcu poddanym krakingowi zawierają one łańcuchy boczne i w trakcie tego procesu te łańcuchy są odłączane od pierścieni, tworząc alkanany i alkanany o niewielkiej liczbie węgli

cykloheksanu i jego pochodnych zawierających łańcuchy boczne, do węglowodorów aromatycznych – w wyniku tych reakcji również powstaje wodór. Proces jest prowadzony w zakresie temperatury 300–450°C i ciśnienia 1–3 MPa¹⁶.

W rafineriach niemal cały wytwarzany wodór zużywany jest na ich wewnętrzne potrzeby.

Podstawowymi procesami petrochemicznymi, w których powstaje wodór, są:

- **KRAKING PAROWY** – prowadzony jest w celu otrzymania olefin (nazywany także pirolizą olefinową¹⁷), głównie etylenu i propylenu. W procesie tym etan, frakcje benzynowe lub uwodorniony próżniowy olej napędowy¹⁶ ogrzewane są bez dostępu powietrza w obecności pary wodnej do temperatury 780–900°C²² (nawet do 1200°C¹⁸), pod nieznacznie podwyższonym ciśnieniem (do 0,2 MPa¹⁷). W wyniku tego obok ww. alkenów powstają jeszcze buteny, butadien, benzyna pirolityczna oraz znaczne ilości wodoru^{17, 23}.
- **PIROLIZA ACETYLENOWA**¹⁷ – to grupa technologii służących do otrzymywania acetyleny i wodoru z metanu oraz gazów bogatych w metan, etanu lub frakcji benzynowych albo naftowych^{16, 17, 22}. Proces jest prowadzony w wysokiej temperaturze, typowo 1300–1400°C²² pod obniżonym ciśnieniem 0,01–0,05 MPa¹⁷. Piroliza acetylenowa nie jest stosowana w Polsce.

PRZETWARZANIE BIOMASY²⁴

Wodór może być produkowany także z biomasy. Procesy przetwarzania biomasy w celu wytworzenia wodoru możemy podzielić na takie, w których energię uzyskuje się bezpośrednio (spalanie), oraz takie, w których biomasa jest wstępnie przetwarzana (zgazowanie, piroliza, upłynnianie, fermentacja), a następnie produkty tego przetworzenia są wykorzystywane do uzyskania energii bezpośrednio lub pośrednio poprzez wydzielenie z nich wodoru, jako nośnika energii¹⁵.

Przetwarzaniu na drodze zgazowania poddawane są materiały takie jak: trawa, słoma lub inne odpady biologiczne. Zgazowanie przeprowadza się w temperaturze niższej niż 950°C m.in. ze względu na wytrzymałość instalacji na temperaturę. Otrzymany gaz z procesu zgazowania biomasy jest mieszaniną pierwotnego gazu pirolitycznego z gazem wodnym²⁵, dzięki czemu wartość opałowa całości wzrasta o około 50% w porównaniu z wartością opałową samego gazu pirolitycznego. Proces zgazowania biomasy przeprowadza się w złożach fluidalnych lub zamkniętych reaktorach zwykłych (ze złożem stałym). Produktami są głównie dwutlenek węgla oraz wodór.

ELEKTROLIZA WODY¹⁵

Metodą elektrochemiczną pozyskania wodoru jest proces elektrolizy wody. Prąd elektryczny jest wykorzystywany do rozkładu wody na wodór i tlen. Kationy wodorowe przemieszczają się do bieguna naładowanego

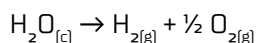
22. „Przemysłowe procesy pirolizy olefinowej”, w: Ewa Grzywa, Jacek Molenda: Technologia podstawowych syntez chemicznych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, (2008), tom 1, s. 178–227

23. W Polsce Grupa ORLEN realizuje duży projekt związany z rozbudową Kompleksu Olefin, w ramach którego głównym elementem inwestycyjnym jest nowy kraker parowy o mocach produkcyjnych obejmujących 740 tys. ton etylenu i 340 tys. ton propylenu rocznie

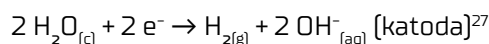
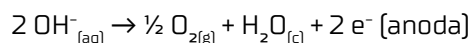
24. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. III - Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych - Bezpieczeństwo w obszarze otrzymywania wodoru”, Warszawa 2023, s. 9

25. Gaz wodny, to produkt reakcji wody z węglem drzewnym

ujemnie, a aniony wodorotlenkowe do bieguna naładowanego dodatnio, na którym powstaje z nich tlen. W procesie elektrolizy anoda jest naładowana dodatnio, a katoda ujemnie. Metoda ta pozwala na otrzymanie wodoru najwyższej czystości, przekraczającej 99,9%. Reakcja sumaryczna ma postać²⁶:



Reakcje jonowe²⁶:



Wodór wydziela się na katodzie, a tlen na anodzie. W tradycyjnym procesie w celu zwiększenia przewodności elektrycznej elektrolitu do wody dodaje się wodorotlenek potasu (lub sodu). Zużycie energii elektrycznej wynosi około 4,5 kWh/m³ wodoru. Opracowane są już konstrukcje ciśnieniowych, kompaktowych elektrolizerów, przydatnych do produkcji wodoru pod ciśnieniem 30 barów, do zastosowania w stacjach paliwowych.

Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie tzw. elektrolizerów parowych, w których elektrolit ma postać ceramicznego przewodnika jonów. Odnacza się wysoką wydajnością, ale dotąd nie jest dostępny komercyjnie. Wy różnić można m.in.:

- **ELEKTROLIZERY ALKALICZNE (AEL):** technologia ta jest wykorzystywana na skalę przemysłową od ponad 100 lat. Elektrolizery alkaliczne działają na zasadzie transportu jonów wodorotlenkowych (OH⁻) powstających w elektrolicie do anody, na której powierzchni powstaje tlen, natomiast wodór jest wytwarzany na powierzchni. Elektrolizery pracujące w temperaturze 100°C – 150°C wykorzystują jako elektrolit ciekły roztwór alkaliczny wodorotlenku sodu (NaOH) lub potasu (KOH). W tym procesie anoda i katoda są oddzielone za pomocą membrany. Metoda ta zapewnia stabilność przez długi czas. Wiąże się ona jednak z możliwością przedostawania się gazów, co może mieć negatywny wpływ na stopień czystości, a także wymaga stosowania korozyjnego elektrolitu ciekłego.
- **ELEKTROLIZERY Z MEMBRANAMI POLIMEROWO-ELEKTROLITOWYMI (PEM):** w elektrolizerze PEM elektrolit jest stałym, specjalistycznym tworzywem sztucznym. Elektrolizery te pracują w temperaturze 70°C – 90°C. W tym procesie woda reaguje na anodzie, tworząc tlen i dodatnio naładowane jony wodorowe (protony). Elektrony przepływają przez obwód zewnętrzny, a jony wodorowe selektywnie przemieszczają się przez PEM do katody. Na katodzie jony wodoru łączą się z elektronami z obwodu zewnętrznego, tworząc gazowy wodór. W porównaniu z elektrolizerami AEL, PEM mają kilka zalet: czystość otrzymywanego gazu jest wysoka przy pracy z częściowym obciążeniem, konstrukcja układu jest zwarta i charakteryzuje się szybką reakcją systemu na zmianę obciążenia. Jednak koszt podzespołów jest wysoki, a ich trwałość niska.
- **ELEKTROLIZERY PAROWE WYSOKOTEMPERATUROWE (HTPEM):** „elektrolitem” w tych elektrolizerach jest membrana ceramiczna przewodząca za pośrednictwem jonów tlenkowych. Zazwyczaj membrany te wykonane są

26. Peter Häussinger, Reiner Lohmüller, Allan M. Watson, „Hydrogen, 2. Production”, w: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons, Inc. (2011), tom 18, s 249, https://doi.org/10.1002/14356007.013_003

27. Informacje w indeksach mają następujące znaczenia: (g) – stan gazowy, (c) – stan ciekły, (aq) – jon solwatowany wodą

28. Reakcja redukcji przebiegająca na katodzie zachodzi na skutek pobrania przez substancję poddawaną redukcji elektronów z katody

29. Damian Wijatyk, „Zapewnienie odpowiedniej jakości wody do elektrolizy”, Strategia Bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna, aneks, Warszawa 2023, s. 9

30. <https://www.eurowater.com/pl/woda-do-produkcji-wodoru>, dostęp 19.07.2023

z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru. W wyniku reakcji elektro-redukcji²⁸ powstaje tlen atomowy, natomiast wodór w mieszaninie z parą wodną znajduje się w przedziale katodowym elektrolizera. Temperatura elektrolizy wynosi 850°C – 1200°C. Elektrolizery wysokotemperaturowe są obecnie bardzo drogie z uwagi na stosowane do ich budowy materiały, a sam proces elektrolizy wymaga dużych nakładów energetycznych.

ZAPEWNIENIE ODPOWIEDNIEJ JAKOŚCI WODY DO ELEKTROLIZY²⁹

Dla efektywności procesu produkcji niskoemisyjnego wodoru w procesie elektrolizy szczególnie istotne jest zagadnienie jakości wody. Wraz z wyborem elektrolizera należy wybrać system uzdatniania wody, odpowiedni do posiadanego jej źródła. W zależności od dostępnego rodzaju wody może ona mieć różne parametry i zanieczyszczenia³⁰:

- **WODA GRUNTOWA** – to stabilne źródło zasilania, jednakże zawiera ona duże ilości żelaza oraz mangan i amoniak;
- **WODA WODOCIĄGOWA** – pozwala na łatwy dostęp do zasilania mniejszych projektów, jednakże w zależności od sposobu jej pozyskiwania zawierać może chlor i chloroaminy;
- **UZDATNIONE ŚCIEKI** – charakteryzują się zmienną jakością i potencjalnie dużą zawartością związków organicznych;
- **WODA MORSKA** – stanowiłaby nieograniczone źródło zasilania, jednakże barierą w jej stosowaniu jest wysoka zawartość chlorków oraz zawartość jonów metali grup przejściowych.

Identyfikacja źródeł zanieczyszczenia wody oraz jej parametrów pozwala na dobranie właściwego systemu oczyszczania i/lub uzdatniania.

Produkcja niskoemisyjnego wodoru w procesie elektrolizy wymusza konieczność zapewnienia do tego procesu wody co najmniej demineralizowanej, a najlepiej wody ultraczystej. Oprócz produkcji wodoru woda ta jest niezbędna do chłodzenia układów pomocniczych elektrolizera. Wyprodukowanie 1 kg wodoru wymaga teoretycznie 9 litrów wody ultraczystej. Dodatkowo woda zużywana jest w układach pomocniczych do chłodzenia. Układ elektrolizera 1 MW potrzebuje aż 400 l/h wody do chłodzenia (chłodzenie przy użyciu standardowych chłodni kominowych)³⁰.

Woda ultraczysta o przewodności 0,006–0,2 µS/cm uzyskiwana jest poprzez elektrodejonizację lub technologię złoża mieszanego³¹. To zaawansowany proces usuwający pozostałości soli. Produkcja wody ultraczystej to złożony proces, wykorzystujący filtrację, zmiękczenie, demineralizację oraz odwróconą osmozę lub dejonizację wody³² klasy minimalnej czystości 2.

Podczas otrzymywania wody demineralizowanej zazwyczaj stosowane są tylko procesy wymiany jonowej, np. poprzez zastosowanie ww. złoża mieszanego, co skutkuje obniżeniem twardości wody i usunięciem niektórych zanieczyszczeń nieorganicznych.

Nie ma jednej konkretnej normy definiującej parametry wody ultraczystej i demineralizowanej. Zagadnienie to zostało przedstawione w aneksie²⁹.

31. Złoże mieszane to mieszanina ziaren żywic jonowymiennych, które posiadają zdolność wiązania jonów o ładunku dodatnich, np. kationów sodowych, potasowych, magnezowych, wapniowych, żelaza (II), żelaza (III) itd. – żywice te nazywane są kationitami, oraz jonów o ładunku ujemnym, np. anionów chlorkowych, siarczanowych, węglanowych i wodorowęglanowych, azotanowych, krzemianowych itd. – takie żywice nazywane są anionitami (przyp. red.)

32. „Woda ultraczysta”, <https://www.eurowater.com/pl/jakosc-wody/woda-ultraczysta>, Eurowater, dostęp 19.07.2023, <https://web.archive.org/web/20230602223552/https://www.eurowater.com/pl/jakosc-wody/woda-ultraczysta>, zarchiwizowano 2.06.2023

Kluczowe znaczenie będzie miało zagospodarowanie wód z uzdatniania ścieków i wód powierzchniowych, poprzez ich oczyszczenie, oraz produkcja wodoru z wody morskiej, której jest pod dostatkiem. Największą przeszkodą w stosowaniu wody morskiej jest chlor. Zaspokojenie światowego popytu na odnawialny wodór produkowany tą metodą spowodowałby trzy – lub nawet czterokrotną nadprodukcję tego toksycznego gazu rocznie.

Naukowcy z RMIT University z Melbourne w Australii opracowali tańszy i bardziej energooszczędny sposób wytwarzania wodoru bezpośrednio z wody morskiej. Innowacyjna metoda rozdziela wodę morską bezpośrednio na wodór i tlen. Dzięki temu, że proces pomija konieczność odsalania i związane z tym koszty, ograniczone zostają zużycie energii, emisja dwutlenku węgla oraz innych zanieczyszczeń. Australijskie katalizatory, w przeciwieństwie do innych prototypowych katalizatorów, mogą pracować w temperaturze pokojowej, a ponadto są relatywnie nieskomplikowane. Dzięki temu można je stosunkowo łatwo produkować na przemysłową skalę. Obecnie badacze zajmują się opracowaniem prototypu elektrolizera, który łączyłby szereg katalizatorów w celu wytworzenia dużych ilości wodoru. Nowa technologia daje szansę na znaczne obniżenie kosztów elektrolizerów tak, aby cena 1 kg wodoru wynosiła 2 USD. Wówczas jego produkcja będzie konkurencyjna w stosunku do wodoru pozyskiwanego z paliw kopalnych³³.

33. <https://forsal.pl/biznes/energetyka/artykuly/8707371,tani-i-ekologiczny-wodor-z-morskiej-wody-to-juz-mozliwe.html>, dostęp 19.07.2023

2.4. Oczyszczanie wodoru

W wielu przypadkach konieczne są procesy oczyszczania wodoru o czystości technicznej przy użyciu szeregu zróżnicowanych procesów. Ich wybór związany jest z docelowym zastosowaniem wodoru oraz metodą jego pozyskiwania, z uwzględnieniem ekonomicznych aspektów kosztów inwestycyjnych (CAPEX) oraz operacyjnych (OPEX) wykorzystania danego rozwiązania technologicznego. Zakres stosowanych rozwiązań obejmuje procesy, które (obok zagrożeń wynikających z występowaniem wodoru w procesie) są związane ze specyficznymi czynnikami ryzyka³⁴:

- niskotemperaturowe procesy zachodzące w bardzo niskich temperaturach, stwarzają zagrożenie dla personelu związane z poparzeniami będącymi wynikiem takiej temperatury medium;
- procesy adsorpcyjne mogą stwarzać zarówno zagrożenia związane ze stosowaniem podwyższonej temperatury, jak i podwyższonego ciśnienia;
- procesy oczyszczania wodoru z wykorzystaniem katalizatorów, które mają zróżnicowany charakter, powodują liczne zagrożenia omówione w dedykowanych do tego rozdziałach;
- procesy z wykorzystaniem skrubierów – w ich przypadku dodatkowe (obok stosowania wodoru) zagrożenia wynikają głównie ze stosowanych mediów absorpcyjnych;
- procesy wykorzystujące membrany, w przypadku których nie ma zagrożeń dla personelu innych niż nieznacznie podwyższone ciśnienie, fundu-

34. Kamil Kulesza, „Oczyszczanie wodoru”, w: Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna, aneks, Warszawa 2023, s. 34

ją jednak zagrożenia ekonomiczne, ograniczające użyteczność technologii, dotyczące membran metalowych, oraz ograniczenia technologiczne związane z wykorzystaniem membran polimerowych. Zagadnienia te zostały bardziej szczegółowo przedstawione w aneksie³⁴.

35. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. I – Przegląd technologii wodorowych”, Warszawa 2023, s. 36

2.5. Magazynowanie wodoru³⁵

Wodór wykorzystywany jest głównie w dwóch stanach skupienia: gazowym i ciekłym. Zależy to od źródła pozyskiwania i sposobu oddzielania cząsteczek wodoru od pozostałych cząsteczek. W zależności od wariantu pozyskanego paliwa przyjmuje się dwie różne techniki jego przechowywania. W przypadku wodoru w stanie gazowym jest on przechowywany pod ciśnieniem 200–350 barów, co wynika z uwarunkowań techniczno-ekonomicznych. W przypadku magazynowania wodoru ciekłego konieczne jest przeprowadzenie procesu jego skroplenia, tj. schłodzenia go temperatury poniżej $-240,18^{\circ}\text{C}$. Dodatkowo wodór może być transportowany oraz przechowywany w postaci mieszanin oraz związków usprawniających technicznie czy ekonomicznie ten proces. Poniżej przedstawiono główne formy transportu wodoru w łańcuchu dostaw oraz warianty, które obecnie są brane pod uwagę w tym procesie, czyli³⁶:

- **GAZOWY WODÓR SKOMPRESOWANY (CGH2):** jest to stan skupienia wodoru najbardziej przystosowany do transportu i przechowywania w infrastrukturze dedykowanej do metanu (sieć gazownicza etc.), obecnie główną formą transportu są zbiorniki ciśnieniowe, pojedyncze.
- **WODÓR SKROPLONY (LH2):** faza ciekła wymaga dedykowanych rozwiązań ze względu na kriotechniczny charakter tego rozwiązania. Wodór skroplony może być transportowany w termicznie izolowanych zbiornikach spełniających odpowiednie wymagania kriogeniczne lub dedykowaną siecią rurociągów. Wodór skroplony jest wysoce łatwo palny i wybuchowy.
- **PŁYNNY ORGANICZNY NOŚNIKI WODORU – LIQUID ORGANIC HYDROGEN CARRIER (LOHC):** nośniki absorbują wodór w obecności katalizatora, pod ciśnieniem od 30 do 50 barów w temperaturze od około 150 do 200°C. Uwodorniony nośnik ma porównywalne właściwości fizykochemiczne do oleju napędowego, w związku z czym może być przechowywany i transportowany w podobny sposób. Uwolnienie wodoru odbywa się przez odwodornienie, które wymaga doprowadzenia ciepła o temperaturze od 250 do 300°C [reakcja endotermiczna]. Uwolniony gaz ma ciśnienie poniżej 0,3 MPa. Odwodorniony płynny organiczny nośnik musi zostać przetransportowany z powrotem do miejsca wytwarzania wodoru, celem ponownego użycia.
- **AMONIAK (NH₃):** amoniak powstaje w wyniku katalitycznej reakcji azotu i wodoru w procesie Habera Boscha, jednakże w celu magazynowania i transportu amoniak jest skraplany pod ciśnieniem normalnym w temperaturze -33°C . W przypadku transportu i magazynowania na dużą skalę amoniak jest schładzany i transportowany w postaci gazowej, w transportowaniu na mniejszą skalę skrapla się go przez sprężanie.

36. Jakub Kupecki, „Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku” Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa 2021

W przypadku amoniaku ogromnym wyzwaniem jest wysoka toksyczność tego medium oraz duża wybuchowość. Na dużą skalę amoniak przechowywane jest w stanie skroplonym w zbiornikach stokażowych bezciśnieniowych. Może być również przechowywany w stanie skroplonym w zbiornikach stokażowych ciśnieniowych.

- **TECHNOLOGIA PALIW SYNTETYCZNYCH – POWER TO LIQUID:** technologia ta obejmuje wytwarzanie paliwa z wodoru oraz tlenu lub dwutlenku węgla, metodą Fischera-Tropscha. Gaz syntezowy jest konwertowany w mieszaninę różnych węglowodorów, które następnie podlegają procesom rafinacji do produktów paliwowych, takich jak olej napędowy, nafta lub benzyna. Metanol wytwarzany na drodze syntezy z wodoru i dwutlenku węgla można wykorzystywać do magazynowania i transportu energii lub przekształcać dalej w paliwa syntetyczne, np. olej napędowy czy nafta. Paliwa tego typu mogą być przechowywane i transportowane w taki sam sposób jak paliwa kopalne. Wyzwaniem tej technologii jest źródło pochodzenia tlenu węgla i dwutlenku węgla. Technologie power to liquid nie są bezpośrednio porównywalne z transportem wodoru w postaci gazowej, ciekłej lub związków LOHC, gdyż nie mają one na celu dostarczania czystego wodoru.

Przeгляд tych technologii został przedstawiony na rysunku 3.

ZBIORNIKI WODORU

Stosowane są zbiorniki do przechowywania i transportu wodoru w postaci sprężonej oraz w postaci ciekłej.

Rozpowszechnioną metodą przechowywania skompresowanego wodoru w warunkach przemysłowych są zbiorniki metalowe. Przykładem mogą tutaj być zbiorniki stalowe przechowyujące wodór dla szerokich zastosowań oraz butle stalowe na wodór gazowy pod ciśnieniem 15–20 MPa, wykorzystywane w laboratoriach lub małych stacjach elektrolizy wody.

Osobnym aspektem jest przechowywanie wodoru w środkach transportu, tj. zbiorniki do aut osobowych, ciężarowych, kolejnictwa, transportu morskiego etc. Wodór w tym przypadku może zostać wykorzystany jako paliwo lub jest medium transportowanym na określoną odległość. Bardzo ważną rolę w tym przypadku pełni niska gęstość energii wodoru w przeliczeniu na objętość – co się z tym wiąże – konieczność sprężania go do ciśnienia rzędu min. 30–35 MPa lub większego.

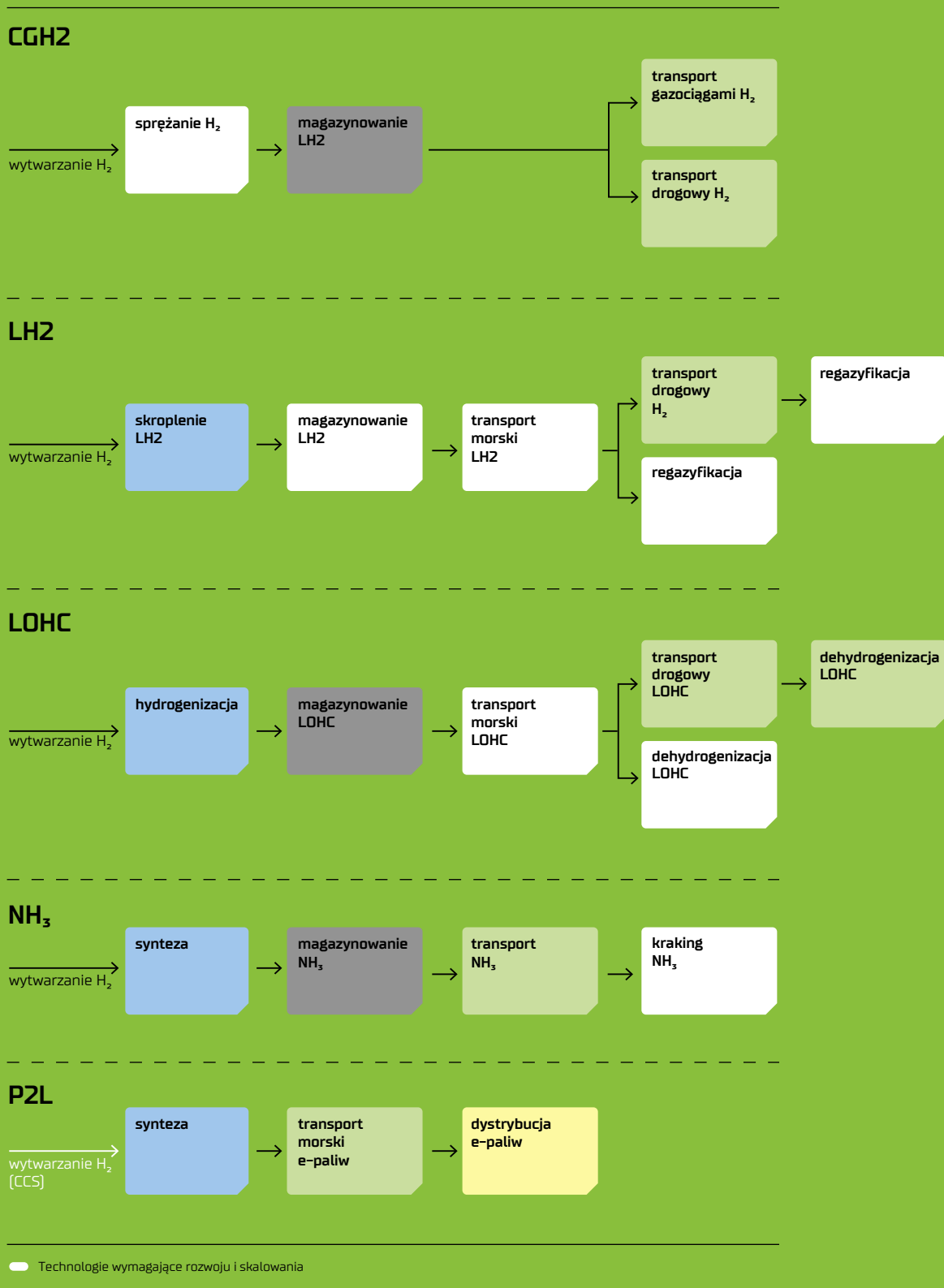
ZBIORNIKI CIEKŁEGO WODORU

Bezpieczeństwo magazynowania wodoru w postaci ciekłej wiąże się z licznymi zagadnieniami związanymi z wykorzystywanymi materiałami, niską energią zapłonu wodoru, temperaturą jego przechowywania i odparowywaniem wodoru w celu zachowania tej temperatury, zjawiskami hydrodynamicznymi występującymi w stanie skroplonym itd. Przedstawiono je poniżej:

- Najważniejszymi materiałami na zbiorniki mające kontakt z ciekłym wodorem są wybrane metale (stal austenityczna, aluminium, tytan oraz miedź) oraz wybrane materiały kompozytowe.

RYSUNEK 3.

Potencjał technologii magazynowania wodoru¹⁵



- Ze względu na bardzo niską energię zapłonu wodoru systemy (zbiorniki, rurociągi i konstrukcje z nimi związane) związane z przechowywaniem, przesyłaniem i transportem wodoru powinny być zabezpieczone przed zagrożeniami związanymi z prądem elektrycznym i elektrycznością statyczną zgodnie z krajowymi przepisami lub normami z rezystancją uziemienia mniejszą niż 25 omów³⁷.
- Kolejną istotną kwestią w przypadku zbiorników na ciekły wodór jest **izolacja**, która ma utrzymać niską temperaturę wodoru.
- W przypadku zbiorników kriogenicznych dla ciekłego wodoru znaczenie ma **współczynnik BOG** (*Boil of gas*). Pewien procent ciekłego wodoru w zbiorniku z upływem czasu przechodzi w fazę gazową. Ubytek ten zależy od konstrukcji zbiornika, rodzaju materiału, izolacji etc.
- Istotnym zjawiskiem związanym z transportem wodoru z wykorzystaniem zbiorników mobilnych jest tzw. falowanie cieczy w zbiorniku. Zjawisko to związane jest z ruchem środka transportującego zbiornik (ciężarówka, jednostka morska). W związku z występowaniem tego zjawiska w zbiornikach projektuje się specjalne przegrody, które mają na celu jego minimalizowanie.

37. EIGA, „Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen, DOC 06/02/E,” EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION, Bruksela, 2002

RUROCIĄGI¹⁵

Do transportu wodoru stosuje się rurociągi dedykowane lub wykorzystywane są istniejące sieci gazownicze przeznaczone do transportu gazu ziemnego.

Koncepcję przesyłania wodoru europejską siecią gazociągów w ramach projektu o nazwie European Hydrogen Backbone przedstawiło jedenastu operatorów systemów gazowych: Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Teréga, Snam oraz Swedegas. Inwestycja szacowana jest na około 30 mld euro. Przedstawiona przez nich koncepcja zakłada dostosowanie unijnej sieci gazowej do transportu wodoru poprzez umożliwienie przesyłu H₂ sieciami o długości 6,8 tys. km do roku 2030 oraz 23 tys. km dziesięć lat później, z czego około 75% mają stanowić już istniejące, zmodernizowane sieci gazowe³⁸.

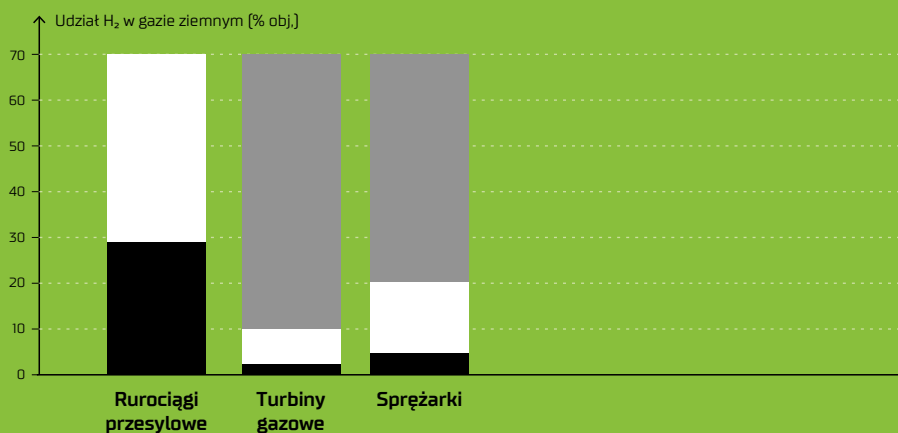
Należy dodać, że transport wodoru istniejącymi sieciami gazowniczymi może odbywać się w trojaki sposób: wodór może być transportowany jako mieszanina z metanem, za pomocą istniejącej sieci gazociągów dostosowanej do transportu czystego wodoru, oraz poprzez metanizację wodoru, czyli metodę, która budzi największe nadzieje na możliwość wykorzystania istniejącej sieci gazowniczej do transportu wodoru.

Zatłaczanie wodoru do istniejącej sieci gazowniczej może okazać się problematyczne ze względu na wrażliwość poszczególnych elementów systemu na udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym. Dlatego też bardzo ważne jest określenie maksymalnego udziału wodoru w mieszaninie z metanem. Wielkość ta powinna być określana indywidualnie, biorąc pod uwagę strukturę sieci skład gazu ziemnego strumień gazu oraz inne parametry infrastruktury gazowniczej. Akceptowalne stężenie wodoru w gazie ziemnym w Holandii wynosi 2% objętościowo, a dla sieci niemieck-

38. „Gram w zielone”, 20 lipca 2020. <https://www.gramwzielone.pl/trendy/103441/wodor-poplynie-gazociagami-unijny-regulator-widzi-wyzwania.> 28-03-2023

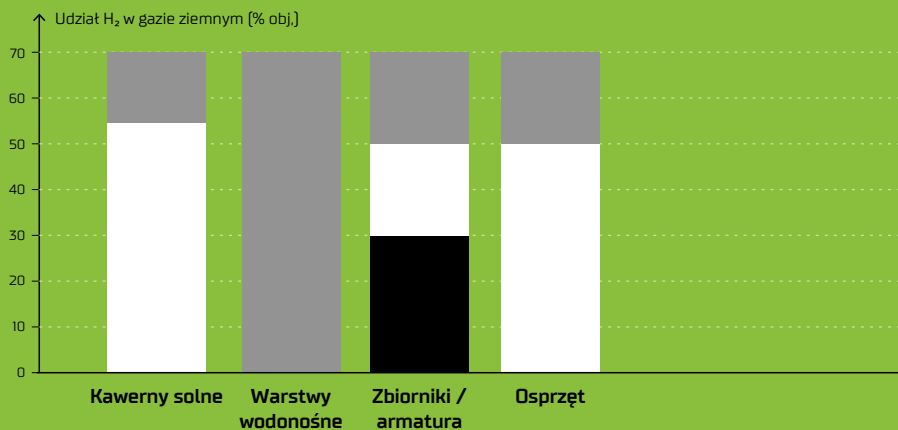
RYSUNEK 4

Wrażliwość elementów systemu przesyłowego gazu H₂ w gazie ziemnym⁴⁰



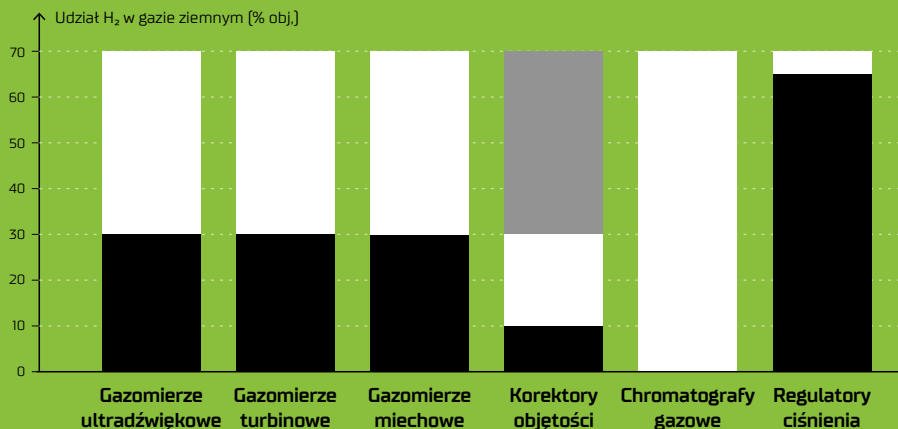
RYSUNEK 5

Wrażliwość elementów systemu magazynowania wodoru w gazie ziemnym⁴⁰



RYSUNEK 6

Wrażliwość urządzeń pomiarowych i regulacyjnych na zawartość H₂ w gazie ziemnym⁴⁰



■ Konieczne prace B+R
 ■ Wymagana adaptacja technologiczna lub standaryzacja
 ■ Zakres nieszkodliwy

kiej wynosi 5%. Wykresy (rysunki 4-6) przedstawiają wrażliwość elementów systemu gazowniczego na zawartość wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym.

Jak widać z wykresu przedstawionego na rysunku 4, zakres bezpiecznej mieszaniny z gazem ziemnym w infrastrukturze gazowniczej waha się od prawie 30% dla rurociągów przesyłowych do około 5% dla sprężarek. Sieci są zróżnicowane, dlatego też potrzebna jest, zawsze dedykowana dla danego systemu, analiza pod względem najbardziej wrażliwych na obecność wodoru urządzeń w systemie³⁹.

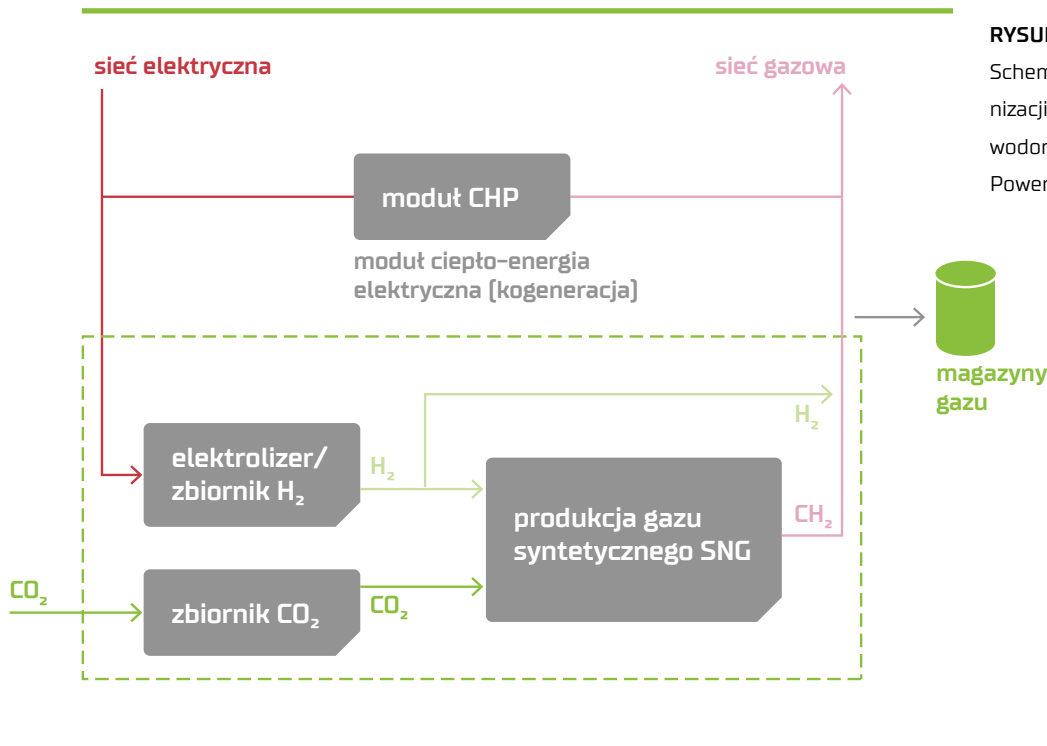
Infrastruktura gazownicza to również zbiorniki do przechowywania gazu ziemnego. Także w tym przypadku mamy do czynienia z wrażliwością tej infrastruktury na domieszki wodoru.

Metanizacja wodoru polega na produkcji metanu z wodoru oraz związków węgla i tlenu, czyli tlenku węgla lub dwutlenku węgla, które to stanowią odpad w spalinach silników tłokowych lub turbin gazowych pracujących w układach kogeneracyjnych w energetyce. Jednocześnie zwiększając się ilość układów kogeneracyjnych CHP, które współpracują z siecią ciepłowniczą może mieć wpływ na znaczne obniżenie emisyjności w sektorze ciepłowniczym. Jednakże duże kontrowersje budzi tutaj konieczność magazynowania dwutlenku węgla, wychwytywanego z procesu, czyli technologii CCS⁴⁰. Schemat procesu metanizacji dwutlenku węgla w technologii Power-To-Gas został przedstawiony na rysunku 7.

Obecnie, w związku z planami transportu wodoru rurociągami gazowymi, głównymi wyzwaniami są: potrzeba modernizacji tej sieci oraz jej przystosowania do transportu gazu zawierającego wodór.

39. Zdaniem autorów opracowania

40. Maciej Chaczykowski, „Technologie Power-to-gas w aspekcie współpracy z systemami gazowniczymi”, w: VI Konferencja Naukowo-Techniczna Energetyka Gazowa, Zawiercie 2016



RYСУNEK 7

Schemat procesu metanizacji dwutlenku węgla wodoru w technologii Power-To-Gas⁴⁰

41. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. I - Przegląd technologii wodorowych”, Warszawa 2023, s. 45

42. Piotr Szymak, „Metody magazynowania wodoru w platformach podwodnych,” Logistyka - Nauka, (2011), tom 3, s. 2694-2702

43. Damian Wijatyk, „Wytyczne dotyczące bezpiecznego magazynowania wodoru”, Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 - część techniczna, aneks, Warszawa 2023, s. 15

44. EIGA, Doc 06/19, Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen

INNE SPOSOBY MAGAZYNOWANIA I TRANSPORTU WODORU⁴¹

Obok magazynowania wodoru w postaci gazu, cieczy czy tzw. błota wodorowego (mieszaniny fazy ciekłej ze stałą) rozwijane są obecnie techniki magazynowania wodoru w postaci związanej. Może on być w tym przypadku związany z metalami w postaci wodorków lub w związkach chemicznych np. amoniaku, metanolu czy metanie⁴².

Wodorki metali, ze względu na mało złożony skład chemiczny (duży udział wodoru w objętości), mogą stanowić dobrą alternatywę w obszarze magazynowania wodoru. Najbardziej bogaty w wodór w tej grupie związków jest LiH, który zawiera ponad 12% masowych wodoru.

Wodorki metali oferują wyższą gęstość objętościową energii niż ciekły wodór. Stopy metali absorbują wodór w swojej strukturze tak, że cząsteczki gazu są ściśle upakowane. Ładowanie wodoru wyzwala ciepło, a do uwolnienia wodoru jest potrzebne dostarczenie ciepła. Główne wady to duży ciężar i cena materiału. Dodatkowym problemem jest powolne napełnianie. Ta metoda jest dobra do zastosowań, gdzie istotna jest objętość, a nie waga, jak np. w niektórych urządzeniach przenośnych i specjalnych zastosowaniach, takich jak wózki widtowe lub okręty podwodne.

WYTYCZNE DOTYCZĄCE BEZPIECZNEGO MAGAZYNOWANIA WODORU^{43,44}

Ze względu na właściwości fizykochemiczne wodoru szczególnego znaczenia przy magazynowaniu wodoru, czy to w postaci gazowej, czy ciekłej, nabiera **zagadnienie bezpiecznych odległości**. Przede wszystkim instalacja powinna być zlokalizowana w taki sposób, aby zminimalizować ryzyko dla personelu, miejscowej ludności i mienia. Należy wziąć również pod uwagę lokalizację w pobliżu wszelkich potencjalnie niebezpiecznych procesów, które mogłyby zagrozić integralności instalacji magazynowej. Powyższe kwestie muszą być ujęte w przeprowadzonej analizie oceny zagrożeń i ryzyka już na etapie projektowym.

Bezpieczne odległości nie mogą być mniejsze niż mające zastosowanie przepisy i kodeksy krajowe oraz powinny uwzględniać różne podstawowe potrzeby, w tym:

- zapewnienie ochrony osobom znajdującym się w pobliżu w przypadku zdarzeń awaryjnych;
- zapewnienie integralności otaczającego wyposażenia technicznego w przypadku tych samych zdarzeń losowych;
- umożliwienie dostępu służbom ratunkowym w razie potrzeby.

Bezpieczne odległości należy określić na podstawie doświadczenia i oceny ryzyka z uwzględnieniem:

- właściwości ciekłego wodoru, w tym gęstości, ciśnienia i temperatury;
- konstrukcji zbiornika ciśnieniowego i układu rurociągów;
- obliczeń niewielkich uwolnień z rurociągów fazy ciekłej;

- efektów pogodowych;
- położenia i wysokości kominów wentylacyjnych;
- efektów strumienia ciepła płomienia wodorowego;
- efektów lokalnego nadciśnienia spowodowanego samozapłonem.

Bezpieczne odległości wyznacza się od:

- tych punktów, w których w trakcie eksploatacji może wystąpić uwolnienie wodoru, w tym kominów wentylacyjnych, połączeń napędzających, kotłowni lub połączeń mechanicznych;
- płaszcza zewnętrznego zbiornika.

Wszystkie instalacje do magazynowania ciekłego lub gazowego wodoru muszą znajdować się na zewnątrz pomieszczeń. Instalacje ciekłego wodoru nie mogą być zlokalizowane wewnątrz budynków. Zbiorniki magazynowe muszą być umieszczone w taki sposób, aby były łatwo dostępne nie tylko dla personelu obsługi, ale również dla służb ratowniczych.

Zbiornik wodoru oraz instalacja wodorowa nie mogą być umieszczone w pobliżu linii elektroenergetycznych, rurociągów zawierających wszystkie klasy cieczy lub gazów łatwopalnych, rurociągów zawierających substancje utleniające ani pod nimi.

Szczegóły tych zagadnień zostały omówione w aneksie⁴³.

STACJE REGAZYFIKACJI¹⁵

Stacja regazyfikacji wodoru, czyli przekształcania wodoru ciekłego w wodór gazowy do dystrybucji, obejmuje proces odwrotny do skraplania wodoru.

Wskazane wydaje się tutaj wykorzystanie istniejących stacji regazyfikacji dla ciekłego gazu ziemnego (LNG). Dużym wyzwaniem jest znaczna różnica temperatur skraplania obu mediów (metanu i wodoru). Wykorzystanie tej technologii wymaga stosowania specjalnych układów aparaturowych, dostosowanych do różnic we właściwościach ortowodoru i parawodoru. Aby uniknąć tego utrudnienia, istniejąca infrastruktura do regazyfikacji LNG może być z powodzeniem wykorzystywana w połączeniu z technologią LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers).

Etapy procesu magazynowania wodoru typu LOHC:

- reakcja nasycenia LOHC: silnie egzotermiczna poprzez przyłączenie wodoru do wiązań podwójnych występującej w nienasyconych cząsteczkach LOHC;
- reakcja odwodornienia LOHC: gdy jest to pożądane (silnie endotermiczna);
- po znacznej liczbie cykli reakcji wskazana jest wymiana całości lub części LOHC stosowanego w systemie, aby zapobiec kumulowaniu się produktów niepożądanych, ubocznych reakcji chemicznych.

Ideą budowy hybrydowych terminali LNG/LOHC jest wykorzystanie energii dostarczonej z egzotermicznej reakcji uwodornienia LOHC m.in. do odparowania LNG.

KONWERSJA ENERGII¹⁵

Prowadzone są prace nad przechowywaniem energii elektrycznej w postaci wodoru, czyli z wykorzystaniem zjawiska konwersji dwustronnej. Do zalet tego typu rozwiązań można zaliczyć regulację wahań dostaw energii z technologii OZE.

Obecnie największym wyzwaniem w obszarze magazynowania energii w postaci wodoru są luki legislacyjne, poza tym:

- najbardziej uzasadnione ekonomicznie są „brudne” technologie produkcji wodoru (generujące CO₂, CO), tymczasem należy rozwijać technologie OZE w celu uzyskania niskoemisyjnego wodoru;
- konieczny jest rozwój technologii elektrolizerów, w tym poprawa sprawności i wydłużenia czasu eksploatacji;
- konieczny jest dalszy rozwój technologii ogni w paliwowych w obszarze kogeneracji (wytworzenie energii elektrycznej i ciepła).

2.6. Transport i dystrybucja wodoru⁴⁵⁻⁴⁸

Sposoby transportu i dystrybucji wodoru można podzielić ze względu na odległość do przebycia lub stan skupienia. Ze względu na niską gęstość energetyczną gazowego wodoru musi być on transportowany lub przesyłany po wcześniejszym sprężeniu, skropleniu lub w postaci związków chemicznych.

WODÓR GAZOWY

Na krótkich dystansach i tam, gdzie wymagane są umiarkowane ilości energii, wodór transportuje się w formie sprężonego gazu. Do przewożenia wodoru najczęściej wykorzystywane są zestawy samochodowe z naczepami, wyposażonymi w kontenery z wiązkami butli, tzw. butlowozy lub zbiorniki rurowe, tzw. rurowozy. Zazwyczaj do rurowozy można załadować 300–500 kg sprężonego wodoru gazowego (ciśnienie 200–250 bar). Nowoczesne butlowozy umożliwiają załadunek do 900 kg sprężonego wodoru gazowego (ciśnienie 500 bar).

Na dłuższych dystansach, do 1500 km, optymalną metodą przesyłu gazowego wodoru jest stosowanie dedykowanych do tego celu rurociągów. Możliwa jest również adaptacja istniejących gazociągów do przesyłu wodoru. Jednak wdrażanie tych metod dystrybucji wodoru jest dopiero w fazie początkowej. Najszybszym możliwym do wdrożenia rozwiązaniem jest zatlaczanie gazowego wodoru do istniejącej sieci gazowniczej i przesył mieszanki wodoru i gazu ziemnego w istniejących gazociągach. W testowanych w tym zakresie rozwiązaniach zawartość wodoru w mieszaninie nie przekracza 10–15%.

45. Grzegorz Wojtasiewicz, „Transport i dystrybucja wodoru – wodór gazowy i ciekły”, Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna, aneks, Warszawa 2023, s. 17

46. „Suiso Frontier odbył swój pierwszy rejs – przetransportował ciekły wodór”, <https://www.gospodarkamorska.pl/suiso-frontier-odbyl-swoj-pierwszy-rejs-prze-transportowal-ciekly-wodor-63761>, 2021, GospodarkaMorska.pl, dostęp 15.08.2023, archiwum: <https://archive.is/wip/6MXGd>, zarchiwizowano 15.08.2023

47. „Hydrogen (H₂), The cleanest burning and most efficient fuel”, Hydrogen Gas Supplier | Liquid Hydrogen | Air Products, Air Products and Chemicals, Inc., dostęp 15.08.2023, archiwum: archive.is/wip/dwUZc, zarchiwizowano 15.08.2023

48. „Rurą, tirem czy zamrożony? Jak transportować wodór”, Portal wodorowy (h2poland.eu), Agencja Rozwoju Przemysłu S.A., dostęp 15.08.2023, archiwum: archive.is/wip/l5ZhE, zarchiwizowano 15.08.2023

WODÓR CIEKŁY

W przypadku transportu ciekłego wodoru rozważany jest, podobnie jak w przypadku transportu innych cieczy kriogenicznych (ciekły azot, tlen, LNG), jedynie transport kołowy oraz morski. Nie istnieją i raczej nie powstaną rurociągi do przesyłania cieczy kriogenicznych na długie dystanse. Rurociąg taki musiałby być na całej długości (dziesiątki lub setki kilometrów) izolowany termicznie, co jest ekonomicznie nieuzasadnione.

W przypadku transportu kołowego na krótkich dystansach, zarówno drogowego, jak i kolejowego, do przewozu ciekłego wodoru wykorzystywane będą cysterny, które de facto są cylindrycznymi zbiornikami stacjonarnymi, posadowionymi na platformie jezdnej. Co do zasady nie różnią się one niczym od eksploatowanych obecnie cystern przeznaczonych do przewozu innych cieczy kriogenicznych, np. ciekłego azotu.

Z kolei transport morski przewidziany jest do przewozu większej ilości ciekłego wodoru na dłuższych dystansach, zwłaszcza na trasach międzykontynentalnych, jak ma to obecnie miejsce w przypadku transportu LNG. Taka forma transportu skroplonego wodoru jest dopiero rozwijana. W 2023 r. w czynnej służbie pływa jeden statek, oddany do eksploatacji w 2022 roku, ze zbiornikami o pojemności 1200 m³.

ZWIĄZKI CHEMICZNE

Alternatywą dla transportu wodoru skroplonego na najdłuższych, międzykontynentalnych trasach jest transport wodoru w postaci związków chemicznych.

Największe nadzieje wiązane są z amoniakiem i płynnymi, organicznymi nośnikami wodoru (LOHC). Obydwie opcje pociągają jednak za sobą straty energii związane z konwersją, są niezbyt efektywne i kosztowne. Mogą być jednak uzasadnione na trasach powyżej 1500 km, zwłaszcza w transporcie morskim.

WYTYCZNE BEZPIECZNEGO TRANSPORTU WODORU ZA POMOCĄ AUTOCYSTERN^{44,49}

Od momentu opuszczenia przez pojazd stacji ładowania wodoru do momentu zakończenia wszystkich dostaw podanych w planie trasy i dotarcia do miejsca przeznaczenia, w odniesieniu do transportu drogowego zastosowanie mają przepisy ADR (Umowa europejska dotycząca międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych).

Przed rozpoczęciem każdego transportu wyznacza się trasę, wskazując, którymi drogami powinna jechać cysterna lub kontener-cysterna. Bezpieczny transport powinien obejmować szereg aspektów związanych z odpowiednim oznakowaniem, przeszkoleniem kierowców, wytycznymi dotyczącymi postępowania w przypadku awarii itd., które zostały szczegółowo wskazane w aneksie⁴⁹.

49. Damian Wijatyk, „Wytyczne bezpiecznego transportu wodoru za pomocą autocystern”, Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna, aneks, Warszawa 2023, s. 20

ROZDZIAŁ 3

BEZPIECZEŃSTWO
W TECHNOLOGIACH
WODOROWYCH

Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych obejmuje dwa zasadnicze aspekty: aspekt inżynieryjno-techniczny oraz aspekt ekonomiczno-społeczny. W tej części strategii omówiony został aspekt inżynieryjno-techniczny.

3.1. Identyfikacja zagrożeń

Identyfikacja zagrożeń jest elementem analizy ryzyka, który jest konieczny do zainicjowania łańcucha czynności umożliwiających zarządzanie poszczególnymi aspektami ryzyka. Zarządzanie ryzykiem umożliwia zaplanowanie uzasadnionych z ekonomicznego i społecznego punktu widzenia czynności, które pozwolą zapobiec wystąpieniu zdarzeń niepożądanych albo – gdy zapobieganie nie jest uzasadnione – ograniczenia skutków wystąpienia takiego zdarzenia. Identyfikacja zagrożeń odbywa się za pomocą oczywistych rozwiązań, typu burza mózgów, oraz bardziej złożonych metod, opisanych w kolejnych podrozdziałach.

ANALIZA PODSYSTEMÓW TECHNICZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWYM DLA WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA⁵⁰

Wydzielanie z systemu technicznego podsystemów w celu analiz bezpieczeństwa (ang. *Technical Sub-System*⁵¹ TSS) jest kluczowym krokiem w projektowaniu inżynierskim, również systemów wodorowych. Ma ono na celu uprościć ocenę przyjętych założeń bezpieczeństwa:

50. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. II - Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – Ogólne zagadnienia inżynieryjne”, Warszawa 2023, s. 13

51. Vladimir Molkov, Jean-Bernard Saffers, Introduction to „Hydrogen Safety Engineering”, Hydrogen Safety Engineering and Research Centre (HySAFER), rozdz. 3.2 University of Ulster, Shore Road, Building 27, Newtownabbey, BT37 0QB, UK 2011, ICHS2011 paper 233.doc (h2tools.org), dostęp 21.08.2023, archiwum: archive.is/wip/9AYfm, zarchiwizowano: 21.08.2023

- TSS powinien obejmować, w miarę możliwości, wszystkie aspekty wodoro-
wej inżynierii bezpieczeństwa;
- TSS powinien zachować balans pomiędzy komplementarnością w syste-
mie, a swoją indywidualną funkcją;
- TSS powinien być określany z wykorzystaniem najnowszych osiągnięć
techniki inżynierskiej, w tym narzędzi, korelacji empirycznych, półempi-
rycznych, numerycznych etc.;
- TSS powinien być określany w sposób elastyczny, tak aby można było
łatwo adaptować go do nowych wytycznych i metod określających bez-
pieczeństwo wodorowe.

Jako przykład podsystemów technicznych sugerowanych w literaturze⁵¹ można wyróżnić: inicjację uwolnienia oraz dyspersji, zapłon, deflagrację i detonację, pożary, wpływ na ludzi, infrastrukturę oraz środowisko, techniki zapobiegania zdarzeniom kryzysowym, interwencja służb bezpieczeństwa.

PRZYCZYNY ZDARZEŃ KRYZYSOWYCH⁵⁰

Podstawową przyczyną zagrożeń związanych z jakąkolwiek formą wodoru jest fakt, że wodór jest materiałem łatwopalnym i detonującym, bo tworzy mieszaniny prowadzące do pożaru lub detonacji. Wodór z powietrzem tworzy mieszaninę wybuchową przy stężeniu w zakresie od 4% do 75% zawartości wodoru w tej mieszaninie⁵², wykazując tendencję wzrostową wraz ze wzrostem stężenia tlenu od 4% do 94% zawartości wodoru w czystym tlenie.

Energia wystarczająca do zainicjowania wybuchu mieszaniny wodoru i powietrza jest bardzo mała. Bezpieczeństwo zostanie zwiększone, jeżeli projektanci oraz personel operacyjny i użytkownicy będą tego świadomi.

Właściwości fizykochemiczne wodoru to podstawowa przyczyna zdarzeń kryzysowych z jego udziałem, obok niezachowania standardów projektowych, awarii systemów zabezpieczeń czy niewłaściwej eksploatacji systemów wodorowych.

DYSPERSJA I DYFUZJA⁵⁰

Rozpraszanie się wodoru w innym ośrodku (zjawisko szeroko zwane w inżynierii dyspersją) jest zależnie nie tylko od ilości wodoru, ale również od jego temperatury i ciśnienia z uwzględnieniem parametrów otoczenia. W przypadku wodoru, który formując chmury gazu w wyniku dyspersji, może osiągać stężenia wybuchowe, rzetelna wiedza dotycząca procesu tworzenia chmury, jej migracji oraz procesów z tym związanych (w czasie oraz w przestrzeni) jest krytyczna z punktu widzenia inżynierii bezpieczeństwa.

Tworzenie się łatwopalnej mieszaniny jest głównym problemem związanym z bezpieczeństwem stosowania wodoru, zarówno w pomieszczeniach, jak i w ogniwach paliwowych. Jednym z istotnych pytań jest to, jak niebezpieczne jest przenikanie wodoru ze zbiornika i jego rozproszenie w zamkniętym pomieszczeniu, np. garażu. Ważnym jest określenie maksymalnego dopuszczalnego przenikania dla pojazdów napędzanych wo-

⁵² International Labour Organization
ICSC 0001 - HYDROGEN,
EC Number: 215-605-7

53. Shen Yahao et al., „Numerical Simulation of Hydrogen Leakage from Fuel Cell Vehicle in an Outdoor Parking Garage”. *World Electr. Veh. J.* 2021, 12, 118. <https://doi.org/10.3390/wevj12030118>, s. 2

54. Muhammad Aziz, „Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety”. *Energies* 2021, 14, 5917. <https://doi.org/10.3390/en14185917>, s. 22

55. Piotr Wolański, „Identyfikacja wybranych zagrożeń związanych z wodorem”, *Strategia Bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna, aneks*, Warszawa 2023, s. 23

56. Levin V.A., Chernyi G.G., Teodorczyk A., Wolański P., Wojcicki S.: „The initiation of a detonation process in H₂ – Cl₂ mixture”, *Archiwum termodynamiki i spalania*, 1978, 9, s. 613-622

57. Stanisław Wójcicki, „Spalanie”, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa 1969

58. Włodzimierz Kordylewski, „Spalanie i paliwa”, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 1999

59. Piotr Wolański, Stanisław Wojcicki, „Mechanizm powstawania wybuchu przy nadkrytycznym wypływie paliwa gazowego do atmosfery”, *Archiwum procesów spalania*, 1971, vol. 2, nr 3, s. 141-155

60. Piotr Wolański, „Mechanizm powstawania wybuchu gazu syntezowego przy wypływie z instalacji ciśnieniowej”, *CHEMIK*, 1972, nr 1, s. 23-27

61. Piotr Wolański, Stanisław Wojcicki, „Investigation into the Mechanism of Diffusion Ignition of a Combustible Gas Flowing into Oxidizing Atmosphere, Fourteenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh 1973”, s. 1217-1223

62. Paweł Oleszczak, Piotr Wolański, „Ignition during hydrogen release from high pressure into the atmosphere”, *Shock Wave* 2010, vol. 20, issue 6, s. 539-550

63. Piotr Wolański, „Forty years of investigation of diffusion ignition”, *Explosion Dynamics and Hazards*, TORUSS PRESS 2010, s. 3-10

64. Elżbieta Bulewicz, Piotr Wolański, Stanisław Wójcicki, „Analysis of the Ignition of a Hydrogen-Oxygen Mixture by a Hot Surface”, *Deuxieme Symposium European Sur La Combustion, Orléans, The Combustion Institute*, 1975, tom 1, s. 126-131

65. Elżbieta Bulewicz et al., „Zapłon mieszaniny wodorowo-tlenowej od gorącej powierzchni”, *Archiwum termodynamiki i spalania*, 1977, vol. 8, nr 1, s. 85-93

dorowymi ogniwami paliwowymi wyposażonych w zbiorniki na sprężony wodór. Unikalną cechą wodoru jest zjawisko szczytowego ciśnienia⁵³.

Wyciek i dyspersja ciekłego wodoru oraz błota wodorowego może mieć, poprzez ekstremalnie niską temperaturę, wpływ na niszczenie infrastruktury instalacji oraz zestalania się powietrza atmosferycznego⁵⁴.

Istotna jest również dyfuzja, która zachodzi w każdym ośrodku pod wpływem ruchów cieplnych lub dążenia do wyrównania stężeń. Dyfuzja w przypadku wodoru wiąże się ze zjawiskiem przenikania cząstek wodoru przez struktury metalu np. w zbiornikach lub ściankach innych elementów instalacji, mających kontakt z wodorem. Dyfuzja może być przyczyną tzw. kruchości wodorowej, która występuje w przypadku, gdy wodór dyfunduje w struktury metalu, niszcząc jego sieć krystaliczną, co w konsekwencji może doprowadzić do poważnych zdarzeń kryzysowych.

ZAPŁON⁵⁵

Istnieje wiele możliwości zapłonu mieszanin wodorowo-powietrznych czy wodorowo-tlenowych (inne mieszaniny też mogą ulec zapłonowi, np. wodór w mieszaninie z chlorem⁵⁶, jednak nie zostały tutaj omówione ze względu na to, że produkcja wodoru z jednoczesnym wydzielaniem m.in. chloru nie jest uwzględniona w Polskiej Strategii Wodorowej). Najczęściej występujące rodzaje zapłonu to:

- zapłon od iskry (np. elektrycznej, mechanicznej, wyładowania elektrostatycznego) – energia zapłonu mieszanin wodorowo-powietrznych jest bardzo mała, rzędu mJ, zmienia się ze zmianą składu, a najniższa jest w pobliżu składu stechiometrycznego mieszaniny. Mieszaniny wodorowo-powietrzne mogą być łatwo zapalone przez iskry elektrostatyczne czy mechaniczne oraz iskrzenia niesprawnych urządzeń elektrycznych^{57,58};
- samozapłon, temperatura samozapłonu mieszaniny wodorowo-powietrznej jest stosunkowo wysoka i wynosi około 850 K. Z tego powodu prawdopodobieństwo samozapłonu takiej mieszaniny jest niewielkie⁵⁷;
- zapłon dyfuzyjny (podczas mieszania zimnego gazowego wodoru z utleniaczem, najczęściej z powietrzem czy mieszaniną gorącego gazowego wodoru z zimnym gazowym utleniaczem). Taki zapłon może być spowodowany przez wyptyw wysoko sprężonego gazu do atmosfery. W tym przypadku wyptywający wodór wytwarza w powietrzu silną falę uderzeniową, za którą powietrze ogrzewa się do wysokiej temperatury. Podczas mieszania się czynników – dyfuzji, powstaje mieszanina palna o wystarczająco wysokiej temperaturze inicjującej zapłon. Pionierskie w skali światowej badania w tej dziedzinie wykonano w Politechnice Warszawskiej na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia⁵⁹⁻⁶³;
- zapłon od gorącej powierzchni – powierzchnie urządzeń nagrzanych do wysokiej temperatury mogą być źródłem zapłonu mieszanin wodorowo-powietrznych/tlenowych. Mogą to być np. niesprawne łożyska czy trące o siebie elementy urządzeń lub maszyn. Badania nad tego rodzaju zapłonem przeprowadzono na Politechnice Warszawskiej w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku^{64,65};
- zapłon od płomienia.

Wszystkie powyższe stwierdzenia odnoszą się nawet w większym stopniu do mieszanin wodorowo-tlenowych, które znacznie łatwiej będą ulegały zapłonowi.

GRANICE PALNOŚCI / WYBUCHOWOŚCI⁵⁵

W warunkach normalnych (przy ciśnieniu otoczenia i temperaturze 293 K) granice palności wodoru wynoszą od 4 do 75%, a granice wybuchowości od 18 do 70%. W zakresie granic wybuchowości mieszaniny gazowego wodoru z powietrzem mogą detonować nawet w otwartej przestrzeni, jeśli zostaną odpowiednio pobudzone, lub przyspieszyć ze spalania deflagacyjnego do detonacji w kanałach/rurach/przewodach przesytowych^{66,67}.

SPALANIE I WYBUCH WODORU⁵⁵

Spalanie mieszanin zawierających wodór może odbywać się zgodnie z dwoma modelami: jako spalanie deflagacyjne oraz detonacyjne. W obu przypadkach podczas spalania rośnie temperatura spalin, natomiast w warunkach spalania deflagacyjnego ciśnienie i gęstość spalin za frontem płomienia maleje. Tymczasem podczas spalania detonacyjnego ciśnienie i gęstość produktów spalania są znacznie wyższe od ciśnienia i gęstości mieszaniny palnej. Spalanie deflagacyjne może być laminarne lub turbulentne. Podczas spalania laminarnego prędkość rozprzestrzeniania się płomienia w mieszaninach wodorowo-powietrznych może wynosić, dla mieszanki stechiometrycznej, nawet ponad 2,7 m/s, co przekracza 5–7 razy prędkości spalania dla mieszanin paliw węglowodorowych z powietrzem. Przy spalaniu turbulentnym prędkości te mogą wynosić nawet kilkaset m/s. Podczas spalania detonacyjnego prędkości rozprzestrzeniania się fali detonacyjnej przekraczają najczęściej wartość 1,5 km/s, a w przypadku mieszanin wodorowo-tlenowych dochodzą nawet do wartości ponad 3 km/s. Spalaniu detonacyjnemu towarzyszy zawsze znaczny przyrost ciśnienia, co w przypadku niekontrolowanej detonacji prowadzi do znacznych zniszczeń. Aby zainicjować detonację, konieczna jest jednak duża energia inicjacji lub proces znacznego przyspieszenia płomienia w kanale/rurze od warunków spalania deflagacyjnego aż do zainicjowania detonacji. Ten proces nazywa się przejściem z deflagacji do detonacji (Deflagration Transition into Detonation – DDT)^{57,66, 68–74}.

Spalanie może mieć również charakter dyfuzyjny. Zachodzi ono podczas mieszania paliwa z utleniaczem. Występuje podczas pożarów, oraz w przemysłowych palnikach dyfuzyjnych. Spalanie dyfuzyjne jest kontrolowane szybkością napływu obu składników palnych, wielkością palnika, a w przypadku pożaru obszaru dootywu obu składników – paliwa i utleniacza^{57,58}.

POŻAR⁵⁵

Podczas pożaru z udziałem wodoru należy rozpatrzyć dwa przypadki. Pierwszy to pożar zbiornika ciśnieniowego albo przewodu, w którym przesyłany jest gazowy lub ciekły wodór. Drugi to pożar zbiornika z ciekłym wodorem.

66. Piotr Wolański (red.), „Research on detonative propulsion in Poland”, Institute of Aviation Scientific Publication No. 60, Łukasiewicz Research Network – Institute of Aviation, Warszawa 2021

67. Anatol Vasil'ev, „Cellular Structures of a Multifront Detonation Wave and Initiation: Review.” Translated from Russian. *Combustion, Explosion and Shock Waves* 2015, 1, s. 9–30. <https://doi.org/10.1134/S0010508215010013>

68. Piotr Wolański, Stanisław Wojcicki, „On the mechanism of influence of obstacles on the flame propagation”, Sixth International Colloquia on the Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems Stockholm 1977, s. 69–74, również w *Archivum Combustionis*, 1981, vol. 1, nr 1/2

69. Paul Urtiew, Antoni K. Oppenheim, „Experimental observations of the transition to detonation in an explosive gas”, *Proc. Royal Soc. Lond.* 1966, vol. A295, s. 13–28

70. Antoni K. Oppenheim, „Introduction to Gasdynamics of Explosions”. Vol. VI 1970, Springer-Verlag, Vienna-New York 2nd ed., s. 220

71. Allen Kuhl, Antoni Kayashi, Piotr Wolański, „The Contribution of A.K. Oppenheim to Explaining the Nature of the Initiation of Gaseous Detonation in Tubes”, *Transactions on Aerospace Research* eISSN 2545-2835, vol. 267, No. 2/2022, s. 1-12, DOI: 10.2478/tar-2022-0007

72. V.F. Klimkin, Rem Soloukhin, Piotr Wolański, „Initial Stages of a Spherical Detonation Directly Initiated by a Laser Spark”, *Combustion and Flame* 1973, 21, s. 111-117

73. Piotr Wolański, „Theory of Detonation”, in *Proceedings of the First National School on Explosibility of Industrial Dusts*, published for the U.S. Grain Marketing Research Laboratory, SEA-AR-United States Department of Agriculture, Manhattan, Kansas 1979, s. 10-19

74. Piotr Wolański et al., „Detonation of Methane-Air Mixtures”, Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1981, s. 1651-1660

W przypadku pożaru zbiornika wysokociśnieniowego gazowego wodoru (o ciśnieniu dochodzącym nawet do 1000 bar) może nastąpić osłabienie konstrukcji zbiornika, nagły wypływ uwolnionego wodoru i podczas mieszania się uwolnionego wodoru z powietrzem następuje katastrofalny w skutkach wybuch. Pożary instalacji przesyłowej gazowego lub ciekłego wodoru będą łatwiejsze do opanowania, gdyż można będzie je zgasić poprzez odcięcie dopływu gazowego/ciekłego paliwa w instalacji przesyłowej.

Pożar dużego zbiornika ciekłego wodoru będzie bardzo trudny do opanowania i stanowić będzie bardzo poważne zagrożenie dla zespołów ratowniczych. Podczas pożaru będzie następowało podgrzewanie ciekłego wodoru w zbiorniku, co w krótkim czasie doprowadzi do jego wrzenia, a w efekcie do wzrostu ciśnienia i rozerwania zbiornika, wyrzucenia całej zawartości wrzącego wodoru do otaczającej przestrzeni i jego wybuchowego spalania podczas mieszania się z otaczającym powietrzem. Będzie temu towarzyszyć bardzo duży wzrost ciśnienia i bardzo duża intensywność promieniowania. Do gaszenia takiego pożaru będzie konieczne zastosowanie automatycznych, sterowanych zdalnie, systemów gaszących, a w okolicy pożaru należy ustanowić strefę bezpieczną dla ludzi biorących udział w akcji gaszenia. Strefa ta będzie zależała od wielkości zbiornika objętego pożarem.

KOROZJA WODOROWA

Korozja wodorowa to termin używany w odniesieniu do skutków oddziaływania wodoru z materiałami, z którymi ma on styczność, w szczególności dotyczy to stopów żelaza (stali) oraz materiałów ceramicznych.

KOROZJA WYNIKAJĄCA Z ODDZIAŁYWANIA WODORU ZE STOPAMI ŻELAZA³⁵

Na interakcje wodoru z metalami mają wpływ reakcje chemiczne i efekty fizyczne, takie jak:

- korozja⁷⁵: korozja sucha (występująca wysokich temperaturach); mokra korozja (głównie spowodowana wilgocią); korozja spowodowana zanieczyszczeniami w gazie;
- kruchość wodorowa⁷⁵;
- kruchość w niskich temperaturach⁷⁶ („kruchość na zimno”);
- gwałtowne reakcje np. zapłon.

Korozja sucha to zjawisko powstałe w wyniku reakcji chemicznej pomiędzy pozbawionym wilgoci gazem a metalem, która ostatecznie może doprowadzić do zmniejszenia grubości ścianki zbiornika⁷⁷. Ten rodzaj korozji nie jest bardzo powszechny, ponieważ postępuje bardzo powoli w temperaturze otoczenia. Jednak w wysokich temperaturach wodór może reagować z niektórymi metalami, np. tworząc wodorki. Korozja mokra może wystąpić w zbiorniku po dostaniu się wilgoci lub wody do jego wnętrza w przypadku niewystarczającej czystości wtłaczanego wodoru. Należy pamiętać, że wodór jest gazem niekorozyjnym i nie może nawet w mokrych warunkach powodować tego rodzaju korozji. W niskich temperaturach niektóre metale mogą stać się bardziej kruche. Jest to spowodowane przejściem materiału

75. Barbara Surowska, „Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją”, Politechnika Lubelska, Lublin 2002, s. 20-45

76. Saraev Yu N et al, „Influence of low temperature on structure and impact strength of structural steels welded joints” 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1546 012068

77. Hervé Barthélémy, „Hydrogen storage technologies, compatibility of materials with hydrogen. Joint European Summer School for fuel cell and hydrogen technology”, 06 2021 <https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2021/06/Lecture-4-slides.pdf>, dostęp 28.03.2023

ze stanu ciągliwego do kruchego, gdy temperatura jest niższa niż temperatura „zerowej plastyczności”. Temperatura ta czasem jest znacznie wyższa niż temperatura cieczy kriogenicznej⁷⁸. Stanowi to problem dla instalacji narażonych na okresowe działanie niskiej temperatury.

Kruchość wodorowa⁷⁵ to proces, w wyniku którego różne metale, głównie stałe, stają się kruche tj. tracą plastyczność i pękają po wystawieniu na działanie wodoru. Jest to spowodowane wnikaniem wodoru cząsteczkowego lub atomowego do sieci krystalicznej metalu. Występuje przy stosunkowo wysokich temperaturach.

Stale o wysokiej wytrzymałości są najbardziej wrażliwe na kruchość wodorową. Zjawiska kruchości wodorowej obejmują:

- niektóre operacje podczas produkcji, takie jak spawanie, galwanizacja, wytrawianie itp.;
- wodór powstający jako produkt uboczny mokrej korozji metalu;
- obróbka powierzchni metalowych, np. ochrona katodowa metalu przed korozją;
- instalacje produkcji amoniaku, gdzie gaz syntezowy (wodór + azot) występuje pod ciśnieniem ponad 100 bar oraz temperaturze powyżej 300°C;
- adsorpcja na powierzchni metalu.

Kruchość wodorowa jest klasyfikowana w następujący sposób⁷⁹:

- środowiskowa kruchość wodorowa – występuje, gdy materiał jest wystawiony na działanie atmosfery wodorowej np. w zbiornikach magazynowych;
- wewnętrzna odwracalna kruchość wodorowa – występuje, gdy wodór dostaje się do metalu podczas jego przetwarzania. Ten typ kruchości może prowadzić do strukturalnego uszkodzenia materiału, który później nie zostanie już narażony na działanie wodoru;
- reakcja chemiczna prowadząca do kruchości wodorowej – występuje w wyższych temperaturach, gdy wodór reaguje chemicznie ze składnikiem metalu, tworząc nowy element mikrostrukturalny lub fazy, takiej jak wodorek, albo podczas generowania pęcherzyków gazu.

ZAGROŻENIA ZWIĄZANE Z KOROZJĄ WODOROWĄ MATERIAŁÓW CERAMICZNYCH⁸⁰

Ceramika techniczna, w tym ceramika ogniotrwała, stosowana jest w przemyśle jako wyłożenie chroniące stalowe części konstrukcyjne przed korozją i/lub wysoką temperaturą. Własności ceramiki wysokotemperaturowej pozwalają na zastosowanie jej jako kształtki palnikowe, wyłożenia i obmurza ogniotrwałe. Ceramikę wysokotemperaturową dzielimy na gatunki krzemionkowe, szamotowe, wysokoglinowe, korundowe i zasadowe. Dobierając ją do konkretnej instalacji, należy uwzględnić temperaturę procesów oraz warunki pracy instalacji⁸¹.

Najczęściej i najszersze stosowane w różnych gałęziach przemysłu są materiały wysokoglinowe ze względu na ich odporność na korozję, erozję i nagłe zmiany temperatury. Materiały te w swoim składzie oprócz tlenku glinu występującego w różnych związkach mają również takie tlenki jak tlenek krzemu, wapnia, żelaza, tytanu, magnezu, sodu i potasu. Dane

78. Kriogenika – technika wytwarzania i utrzymywania bardzo niskich temperatur, za umowną granicę temperatur kriogenicznych przyjmuje się temp. 120 K

79. Hugh R. et al, „Potential Structural Material Problems In A Hydrogen Energy System”, Nasa Technical Memorandum, 1955, s. 7

80. Katarzyna Stec, „Zagrożenia związane z wodorową korozją ceramiki”, Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna, aneks, Warszawa 2023, s. 33

81. Franciszek Nadachowski, „Zarys technologii materiałów ogniotrwałych”, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1972

82. Thomas P. Herbell, David R. Hull, Anita Garg, „Hot Hydrogen Exposure Degradation of the Strength of Mullite”, NASA Technical Memorandum 1071537, NRTS 1996, dostęp 21.08.2023, archiwum: <https://archive.is/wip/QCF1n>, zarchiwizowano 21.08.2023

83. Katarzyna Stec, prace własne

literaturowe⁸² oraz badania prowadzone na instalacjach⁸³ pokazują, że najczęstszymi przyczynami przedwczesnego zużycia się wyłożenia ceramicznego w instalacjach, gdzie obecny jest wodór lub stosowane jest paliwo wodorowe, są:

- przenikanie wodoru przez pory materiału powodujące zmęczenie lub uszkodzenie struktury materiału;
- zmiany stanu naprężeń wywołane przemianami fazowymi i reakcjami chemicznymi oraz korozją i gradientem temperatury;
- utrata masy ceramiki na skutek reakcji z wodorem.

Zjawiska opisane powyżej zachodzą z różną intensywnością w zależności od ilości obecnego w atmosferze wodoru, temperatury pracy, czasu ekspozycji materiału ceramicznego na działanie wodoru. Jednakże zaznaczyć należy, że kluczowym czynnikiem decydującym o odporności materiału ceramicznego na działanie wodoru jest skład chemiczny zastosowanego materiału⁸⁴.

84. Jette Rank, et al., „Behaviour of refractories in hydrogenous atmospheres”, Interceram - International Ceramic Review 2008, 57(5), s. 319-323

ZAGROŻENIA FIZYKO-CHEMICZNE W MATERIAŁACH CERAMICZNYCH⁸⁰

Ceramika traci zarówno masę, jak i wytrzymałość mechaniczną. Utrata masy spowodowana jest reakcją wodoru z krzemionką⁸⁵, skutkując parowaniem powstającego tlenku krzemu (SiO). Dotyczy to również ceramiki ogniotrwałej, zawierającej krzemionkę lub fazy z wbudowaną krzemionką poddaną działaniu wodoru w temperaturze powyżej 1000°C i normalnym ciśnieniu atmosferycznym.

85. M.S. Crowley, „Hydrogen - Silica Reactions in Refractories”, Bull. Amer. Ceram. Soc, 1967, vol. 46 (7), s. 679-682

Utrata masy materiałów ceramicznych zawierających dwutlenek krzemu na skutek reakcji z wodorem zależy od szybkości przepływu wodoru i temperatury. Procesy prowadzące do niszczenia wyłożenia ogniotrwałego wg danych literaturowych zaczynają się w temperaturze około 925°C⁸⁵.

NADZÓR NAD INSTALACJĄ

W celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji instalacji wykorzystującej wodór jako paliwo lub zawierającej wodór w atmosferze konieczne jest wprowadzenie systemu monitorowania stanu obmurza ceramicznego podczas pracy instalacji.

Aby zapewnić bezpieczną eksploatację instalacji, należy dobrze dobrać system monitorowania – musi on być dostosowany do konkretnej instalacji technologicznej. Nie ma jednego uniwersalnego sposobu monitorowania stanu obmurza ceramicznego podczas pracy instalacji⁸³.

Dla instalacji przemysłowych, w których procesy prowadzone są w wysokich temperaturach, musi być prowadzony pomiar temperatury kamerą termowizyjną na pancierzach poszczególnych elementów instalacji. Systematycznie prowadzone pomiary pokazują miejsca przegrzewów, co jest jednoznaczne z uszkodzeniami obmurza ceramicznego. Z obliczeń przepływu strumienia ciepła, znając wymiary początkowe, można wyliczyć grubość pozostałego w instalacji wyłożenia ceramicznego i na tej podstawie podejmować decyzję o dalszej bezpiecznej eksploatacji lub wyłączeniu instalacji i przeprowadzeniu remontu⁸³.

ODDZIAŁYWANIE NA OTOCZENIE⁵⁰

Oddziaływanie na otoczenie sprężonego gazowego wodoru oraz wodoru w postaci ciekłej (skroplony H₂, LH₂) lub zestalonej (SH₂) w przypadku zdarzeń kryzysowych ma bardzo duży wpływ zarówno na infrastrukturę, człowieka, jak i środowisko naturalne. W tym obszarze należy wziąć pod uwagę⁵¹:

- życie i zdrowie człowieka;
- życie i zdrowie istot żywych;
- wpływ na środowisko naturalne;
- bezpieczeństwo infrastruktury (budynki, budowle, instalacje etc.).

Skutki zdarzeń kryzysowych obejmują:

- promieniowanie cieplne, w tym bardzo niskie i bardzo wysokie temperatury;
- ciśnienie eksplozji;
- bezpośrednie i pośrednie skutki eksplozji;
- ubytek tlenu w otoczeniu.

PORÓWNANIE ZAGROZEŃ POWODOWANYCH PRZEZ CIEKŁY WODÓR DO ZAGROZEŃ POWODOWANYCH PRZEZ NAFTĘ LOTNICZĄ I OLEJ NAPĘDOWY⁵⁵

W tabeli 2 przedstawione jest zestawienie zagrożeń powodowanych przez ciekły wodór w porównaniu do typowego paliwa lotniczego czy oleju napędowego, które to paliwa są eksploatacyjnie zbliżone do siebie. Rozważane tu są zagrożenia występujące przy przechowywaniu ciekłego wodoru spowodowane drobnymi nieszczelnościami w porównaniu do drobnych wycieków porównywanych paliw. W tym aspekcie bezpieczniejszy okazuje się wodór, podczas gdy przy wzroście temperatury mniejsze problemy występują przy przechowywaniu paliw klasycznych.

Poważniejsze zagrożenia występują w przypadku pożaru zbiorników ciekłego wodoru, zostały one omówione w rozdziale dotyczącym pożarów.

3.2. Metody minimalizacji zagrożeń w wybranych technologiach wodorowych

Po zidentyfikowaniu zagrożeń należy ograniczyć prawdopodobieństwo ich wystąpienia oraz zminimalizować skutki ich wystąpienia. Wybrane sposoby postępowania w tym zakresie przedstawiono na następnych stronach.

ANALIZA JAKOŚCIOWA W PROCESIE PROJEKTOWYM DLA WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA⁵⁰

Wodorowa inżynieria bezpieczeństwa w odniesieniu do m.in. normy British Standard BS 7974⁸⁶, oraz do dokumentów na niej bazujących, opisuje podejście do procedur projektowych oraz właściwe narzędzia inżynierskie

86. BSI (2001) - British standard BS7974:2001 „Application of fire safety engineering to the design of buildings - Code of Practice”, Published Document PD 7974-0:2002 (2002)

TABELA 2.

Porównanie niebezpieczeństw wynikających z pracy z ciekłym wodorem (LH2) w relacji do zagrożeń wynikających z używania klasycznego paliwa lotniczego (A-1) i oleju napędowego

Powiązane niebezpieczeństwo	Oddziaływanie na różne paliwa		Spośród wymienionych w tytule tabeli mniejsze zagrożenie stwarza:
	Ciekły wodór (LH2)	Paliwo lotnicze (A-1)/ olej napędowy	
Mały wyciek	Ciekły wodór jest cięższy od powietrza, ale odparowuje bardzo szybko, a jego pary (gazowy wodór) są lżejsze od powietrza i szybko się ulatniają. Niewielkie zagrożenie wytworzenia mieszaniny palnej w otwartej przestrzeni.	Może tworzyć lokalne wycieki, a pary paliwa mogą tworzyć lokalne koncentracje wybuchowej mieszaniny paliwowo-powietrznej.	LH2
Niebezpieczeństwo wybuchu	Bardzo szeroki zakres koncentracji palnych/wybuchowych w powietrzu, ale stosunkowo niskie zagrożenie utworzenia mieszanin w otwartej przestrzeni, palnych/wybuchowych z powodu wysokiego unoszenia (małej gęstości par/gazu).	Pary paliwa nad wyciekami tworzą lokalne koncentracje palne/wybuchowe, łatwe do zainicjowania.	LH2
Samoczynna inicjacja detonacji	Żadne	Żadne	Żadne
Oddziaływanie na człowieka	Małe ilości ciekłego wodoru w kontakcie ze skórą szybko odparowują bez uszkodzenia tkanki. Kontakt z dużą ilością ciekłego wodoru powoduje poważne oparzenia. Gazowy wodór jest bezbarwny, bez zapachu oraz nietoksyczny.	Paliwo lotnicze, olej napędowy, powoduje podrażnienie skóry, a pary o koncentracji powyżej 500 ppm są toksyczne dla człowieka.	LH2
Wpływ temperatury	Ciekły wodór wrze w temperaturze około 20K. Wzrost temperatury wymaga wentylacji par wodoru lub ich ponowne skraplanie.	Wzrost temperatury powoduje tylko nieznaczny wzrost objętości składowanego paliwa.	A-1, olej napędowy
Zanieczyszczenia	Z powodu niskiej temperatury wrzenia wodór może być zanieczyszczony tylko helem. Pozostałe mechaniczne zanieczyszczenia mogą być łatwo usunięte.	Paliwo lotnicze/oleje napędowe, mogą być zanieczyszczone mechanicznymi oraz organicznymi składnikami, w tym wodą, których usunięcie nastręcza wiele problemów.	LH2

obejmujące inżynierię bezpieczeństwa pożarowego w odniesieniu do projektowania budynków. Wodorowa inżynieria bezpieczeństwa (HSE⁸⁷) powinna w tym przypadku obejmować przynajmniej⁵¹:

87. HSE - Hydrogen Safety Engineering

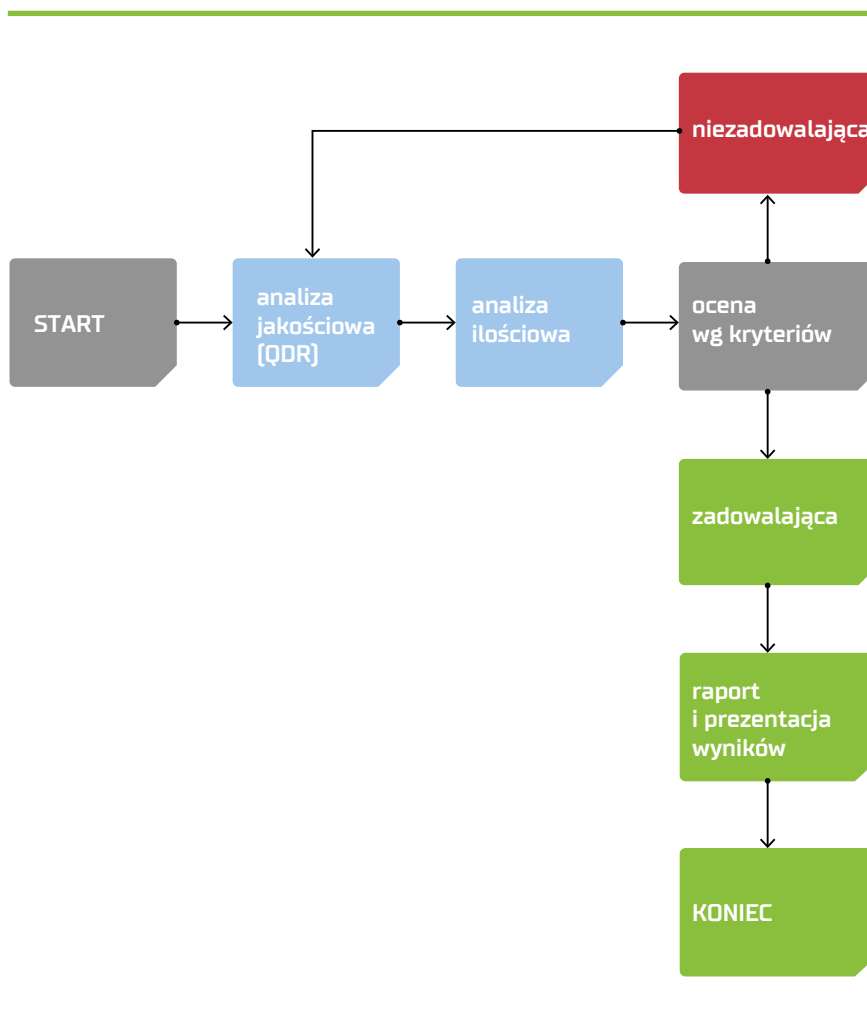
- przyjęte zasady dotyczące wodorowej inżynierii bezpieczeństwa,
- kryteria oceny oraz akceptowalne poziomy ryzyka w różnych obszarach,
- niezbędne wytyczne projektowe, również w obszarze środków zapobiegania zdarzeniom kryzysowym,
- strategię bezpieczeństwa do zastosowania w danym przypadku,
- identyfikacja obszarów do dalszych opracowań.

Główne elementy wodorowej inżynierii bezpieczeństwa (HSE) to:

88. QDR - Qualitative Design Review

- analiza jakościowa (QDR⁸⁸),
- analiza ilościowa,
- ocena zgodnie z przyjętymi kryteriami.

Rysunek 8 przedstawia schemat procedur wodorowej inżynierii bezpieczeństwa.



RYСУNEK 8.
Elementy wodorowej inżynierii bezpieczeństwa, algorytm ogólny⁵¹

PERSONEL

Personel odpowiedzialny za eksploatację systemu odgrywa znaczącą rolę w procesie identyfikacji ryzyka, ustalaniu metod zapobiegania zdarzeniom kryzysowym i w realizacji polityki bezpieczeństwa.

Często dobór technologii wodorowej opiera się również na dostępie do personelu spełniającego określone wymagania. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wysokiej złożoności obsługi czy montażu.

Bezpieczeństwo personelu zaangażowanego w obsługę systemów wodorowych powinno być priorytetem już na etapie koncepcji projektu, a następnie rozwijane i dostosowywane w miarę postępu prac projektowych. Dokumentacja związana z bezpieczeństwem winna obejmować identyfikację potencjalnych obszarów ryzyka, strategię ich zapobiegania, prognozowane skutki oraz metody łagodzenia lub minimalizowania ewentualnych negatywnych konsekwencji.

Instrukcje dotyczące bezpieczeństwa powinny być przygotowane z odpowiednią szczegółowością, obejmującą plany regularnych inspekcji, przeprowadzania szkoleń oraz szczegółowe wytyczne dotyczące komunikacji nie tylko w zakresie sytuacji awaryjnych, ale obejmujące również identyfikację potencjalnych nowych zagrożeń związanych ze zmianami w otoczeniu instalacji stosujących wodór oraz ich analizę zgodnie z ww. wytycznymi.

UŻYTKOWNIK

Użytkownik systemu wodorowego to osoba/instytucja, która z założenia nie musi mieć odpowiedniego przygotowania i wiedzy do eksploataowania systemów wodorowych, chociażby w pojazdach.

W przypadku użytkownika systemów wodorowych niezwykle ważne jest dostarczenie szczegółowej i wyczerpującej instrukcji obsługi, pozwalającej na zapoznanie się użytkownika z zagrożeniami oraz metodami zapobiegania zdarzeniom kryzysowym, a co najważniejsze, z właściwym postępowaniem w przypadku awarii.

OGÓLNE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE SYSTEMÓW TECHNICZNYCH

W celu przeprowadzenia analizy jakościowej system techniczny w pierwszej kolejności jest poddawany podziałowi na tzw. podobszary techniczne, co ułatwia poszerzenie szczegółowości/zakresu analizy. Należy zachować korelację pomiędzy podsystemami technicznymi, aby informacje wychodzące z jednego systemu mogły być danymi wejściowymi do innego podsystemu.

Zwykle systemy techniczne są opisywane za pomocą schematu P&D [Piping and Instrumentation diagram]. Jest to schemat charakteryzujący, za pomocą znormalizowanych symboli, takie cechy systemu technicznego, jak: wymiary, materiały, warunki [ciśnienia, temperaturę, stężenia, natężenia przepływów itd.]. Zawiera też umiejscowienie oraz parametry urządzeń oraz aparatów, takich jak: zawory, wyciągi, aparatura związana z wykrywaniem zagrożeń [detektory, zraszacze, systemy wentylacyjne] wraz z charakterystykami technicznymi poszczególnych elementów.

Istotną kwestią w zarządzaniu operacyjnym systemami technicznymi jest odpowiednia komunikacja zespołów projektowych, w zakresie takich czynników jak: parametry ilościowe i jakościowe wodoru, konieczność magazynowania, wraz z wymaganym poziomem zapasów, itd. Jest to niezwykle ważne w procesie otrzymywania pozwoleń na budowę i eksploatację systemów wodorowych. Ma to ścisły związek z rentownością inwestycji, a w konsekwencji budowaniem strategii biznesowych. Tabela 3 przedstawia potencjalne powiązania podsystemów technicznych z elementami jakościowej analizy bezpieczeństwa.

	Ocena jakościowa	Inicjacja wycieku i dyspersji	Zapłon	Deflagracja i detonacja	Pożary	Wpływ na ludzi i otoczenie	Metody łagodzenia	Działania służb bezpieczeństwa
Plan zagospodarowania terenu	●	●	●	●	●	●	●	●
Charakterystyka infrastruktury otoczenia	●	●	●	●	●	●	●	●
Charakterystyka systemu wodorowego	●	●	●	●	●		●	
Parametry wycieku	●	●	●		●		●	
Parametry strumienia wyływu	●	●		●	●			
Dynamika uwalniania wodoru (blow-down)		●			●	●	●	
Dynamika ciśnienia uwalniania wodoru w pomieszczeniu zamkniętym		●				●	●	
Nagromadzenie		●	●	●		●	●	
Podatność na zapłon		●	●				●	
Początkowa propagacja płomienia		●	●				●	
Wybuch strumieniowy (JET)		●	●	●		●	●	
Deflagracja						●	●	
Detonacja						●	●	
Fizyczna eksplozja magazynu				●		●	●	
Długość płomienia strumieniowego (JET)		●			●	●	●	
Strumień ciepła przenoszony przez promieniowanie					●	●	●	
Strumień ciepła przenoszony przez konwekcję					●	●	●	
Wpływ procesy życiowe	●			●	●	●	●	
Wpływ na majątek	●			●	●	●	●	
Wpływ na otoczenie	●			●	●	●	●	
Strategia ewakuacji						●	●	
System wentylacyjny		●					●	
Wpływ ograniczeń/przeszkód		●		●	●		●	
Odprowadzenie produktów deflagracji				●			●	
Czas detekcji		●	●				●	
Czas reakcji jednostek ratunkowych							●	●
Strategia działania interwencyjnego						●		●
Wyposażenie obiektu związane ze zdarzeniami kryzysowymi						●	●	

● Prawdopodobne interakcje
 □ Potencjalne interakcje

TABELA 3. Ilustracja potencjalnych powiązań podsystemów technicznych (TSS) z elementami jakościowej analizy bezpieczeństwa⁵¹

INFRASTRUKTURA I OTOCZENIE

Dokumentacja techniczna, będąca podstawą do projektowania w obszarze inżynierii bezpieczeństwa, powinna zawierać informacje na temat bezpośredniego otoczenia instalacji wodorowej, najlepiej w postaci schematycznie naniesionych odpowiedników na rozrys lub model instalacji – dotyczy to budynków, budowli oraz pozostałej infrastruktury otoczenia. W procesie projektowym instalacji wodorowej powinna być wzięta pod uwagę minimalna wymagana odległość od tych obiektów oraz przewidziane pozostałe środki minimalizowania zagrożeń.

ZARZĄDZANIE

Zarządzanie jest bardzo istotnym elementem w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa. W tym obszarze istotne czynniki to struktura właścicielska, personel, system szkoleń, ochrona życia i mienia, systemy i instalacje, instrukcje, plan pracy i remontów, plan utrzymania i testowania, zarządzanie ryzykiem – w tym zarządzanie kryzysowe – BHP oraz współpraca ze służbami pożarniczymi⁵¹.

ANALIZA JAKOŚCIOWA W PROCESIE PROJEKTOWYM DLA WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA W OBSZARZE CELÓW

PARAMETRYZACJA ORAZ KRYTERIA AKCEPTACJI

Jakościowa analiza w procesie projektowym może korzystać z następujących rodzajów metod:

- deterministycznych (życie i zdrowie, zapobieganie stratom oraz ochrona otoczenia);
- studiów porównawczych;
- probabilistycznych (przeprowadzenie analiz, czy poziom ryzyka jest akceptowalny w danym obszarze).

Poniżej opisano wybrane kryteria:

- ochrona życia i zdrowia – podstawowym zadaniem wodorowej inżynierii bezpieczeństwa jest dostarczenie metod i wytycznych dotyczących zabezpieczenia życia i zdrowia człowieka oraz innych istot żywych; główne cele w tym obszarze to:
 - zapewnienie czasu ewakuacji, tak aby ludzie mogli opuścić strefę zagrożenia w odpowiednim czasie;
 - zapewnienie odpowiedniego wyposażenia oraz czasu reakcji służbom bezpieczeństwa;
 - zapewnienie dostępu służbom bezpieczeństwa, tak aby nie angażować personelu w usuwanie skutków zdarzeń kryzysowych.

Cele te są szczególnie ważne, może bowiem wystąpić oprócz wysokiej temperatury brak tlenu w powietrzu, niewyczuwalny dla człowieka. Realizację tych celów ułatwiają analizy takich zagadnień, jak:

- minimalizacja strat – można ją przeprowadzać poprzez minimalizację wpływu zdarzeń kryzysowych na otoczenie, zgodnie z polityką bezpieczeństwa, oraz poprzez odpowiednie zabezpieczenia techniczne;

- analiza wrażliwości – można ją przeprowadzać na podstawie danych historycznych, doświadczalnie lub za pomocą numerycznych metod CFD. Ta ostatnia metoda jest najbardziej efektywna ze względu na bezpieczeństwo oraz możliwość generowania danych wejściowych do kolejnych obszarów analiz (versus trudno dostępne dane historyczne).

Minimalizacja zagrożeń: w procedurach projektowych wodorowej inżynierii bezpieczeństwa należy uwzględnić metody oraz techniki zapobiegania zdarzeniom kryzysowym. Mogą do nich należeć:

- usuwanie wodoru gazowego z zaworów upustowych oraz bezpieczeństwa;
- wentylacja pomieszczeń;
- eliminacja źródeł zapłonu, również stosowanie aparatury dopuszczonej do użytkowania w strefach zagrożenia wybuchem;
- eliminacja źródeł zapłonu statycznego;
- odpowiednia detekcja wycieków wodoru;
- odpowiednie wykrywanie pożarów wodoru.

Istotne jest właściwe przygotowanie procesu gaszenia ewentualnego pożaru. W pomieszczeniach zamkniętych stosuje się gazowe systemy gaśnicze na dwutlenek węgla (zgodnie z wytycznymi NFPA⁸⁹ dla stałej instalacji gaśniczej na dwutlenek węgla stężenie gaśnicze CO₂, powinno wynosić co najmniej 75% objętości brutto chronionego pomieszczenia), natomiast na otwartej przestrzeni stosuje się proszkowe instalacje gaśnicze⁹⁰.

89. NFPA – National Fire Protection Association

90. Bezpieczne wykorzystanie wodoru jako paliwa w komercyjnych zastosowaniach przemysłowych, Publikacje I (Informacyjne) wydawane przez Polski Rejestr Statków S.A. czerwiec 2021, s. 42

ANALIZA ILOŚCIOWA W WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

Metody ilościowe w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa stosuje się po analizie jakościowej procesu. Mogą one opierać się na metodach deterministycznych, probabilistycznych oraz studiach porównawczych (w tym analizach CFD). Zespół ekspertów wybiera metody stosownie do rozpatrywanego przypadku oraz wytycznych⁵¹.

Ilościowa analiza zastosowana do rozwiązywania zagadnień bezpieczeństwa pozwala m.in. na wyznaczenie tzw. stref bezpieczeństwa. Strefa bezpieczeństwa jest to obszar wokół instalacji wodorowej o podwyższonym ryzyku wystąpienia zdarzeń kryzysowych. Instalacje, aparatura oraz personel podlegają w tym przypadku specjalnym uregulowaniom.

Obecnie szacowanie stref bezpieczeństwa jest zdefiniowane przez kilka norm i wytycznych, a podział wynika z uwagi na możliwe oddziaływania na otoczenie. Główne czynniki decydujące o przyjętych strefach bezpieczeństwa obejmują m.in. ekspozycję systemu wodorowego na życie i infrastrukturę publiczną, personel, infrastrukturę przemysłową, łatwopalne materiały, instalacje wylotowe substancji łatwopalnych czy możliwe źródła zapłonu.

Dla oszacowania rozmiarów bezpiecznych stref wokół instalacji wodorowej duże znaczenie mają również m.in. następujące czynniki: wielkość instalacji, bariery ognioodporne, zastosowanie urządzeń takich, jak zawory odcinające, zawory bezpieczeństwa, detektory, zraszacze etc., stopień

91. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. II – Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – Ogólne zagadnienia inżynierskie”, Warszawa 2023, s. 6

92. Jeffrey LaChance, „Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards”, Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States) 2009, s. 6

93. EIGA, Doc. 04/18 Fire hazards of oxygen and oxygen-enriched atmospheres

94. Damian Wijatyk, „Zagrożenia związane ze zwiększoną zawartością tlenu w strumieniach technologicznych lub w atmosferze”, Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce na lata 2022-2030 – część techniczna, aneks, Warszawa 2023, s. 29

zabudowania/zamieszkania otoczenia, etc. Zagadnienia te zostały szerzej opisane w raporcie⁹¹ oraz publikacji⁹².

3.3. Zagrożenia związane ze zwiększoną zawartością tlenu w strumieniach technologicznych lub w atmosferze^{93,94}

Ubočnym produktem produkcji odnawialnego wodoru w procesie elektrolizy jest tlen, który jest uwalniany do atmosfery. Tlen, występując tutaj w obecności czystego wodoru, zwiększa dodatkowo zagrożenie wybuchowe i pożarowe wodoru.

WARUNKI STWARZAJĄCE ZAGROŻENIE POŻAREM

Aby doszło do pożaru lub wybuchu, wymagane są trzy elementy: materiał palny, tlen i źródło zapłonu, określane są one mianem „trójkąta ognia”.

Cechą charakterystyczną tlenu jest to, że reaguje z większością materiałów. Im wyższe stężenie i ciśnienie tlenu w atmosferze lub w układzie tlenowym, tym:

- reakcja spalania lub pożar **będą bardziej energiczne;**
- temperatura zapłonu i energia zapłonu sprzyjające reakcji spalania **będą znacznie niższe;**
- temperatura płomienia będzie wyższa, a co za tym idzie, niszczylińska zdolność płomienia **będzie większa.**

Większość przyczyn pożarów związanych z tlenem można sklasyfikować w następujący sposób:

- wzbogacenie atmosfery w tlen;
- niewłaściwe wykorzystanie tlenu;
- nieprawidłowe projektowanie systemów tlenowych;
- nieprawidłowa obsługa i konserwacja systemów tlenowych;
- stosowanie materiałów niekompatybilnych z tlenem.

Wzbogacenie atmosfery w tlen może być wynikiem:

- nieszczelności na połączeniach rur lub kotłowniach – może to być szczególnie niebezpieczne w obszarach, w których nie ma wystarczającej wentylacji, co powoduje wzrost stężenia tlenu;
- **otwarcia się systemów tlenowych** pod ciśnieniem (pęknięcie rurociągu, awaryjne otwarcie się automatycznych zaworów zrzutowych tlenu i do atmosfery, otwarcie się zaworów PSV na skutek wzrostu ciśnienia) – nagłe uwolnienie tlenu pod ciśnieniem może spowodować stosunkowo duży strumień wyciekającego tlenu, czego efektem może być **płomień strumieniowy i projekcja stopionego materiału;**
- skraplania powietrza – w przypadku stosowania gazów kriogenicznych o temperaturze wrzenia niższej niż tlen (np. azotu, wodoru i helu) może

również wystąpić wzbogacanie tlenem, powietrze otoczenia skrapla się na nieizolowanych urządzeniach, w których temperatura jest niższa niż temperatura skraplania powietrza (około -193°C);

- desorpcji – tlen może być uwalniany w znacznych ilościach, gdy zimne materiały, które wchłonęły tlen, takie jak absorbenty (sito molekularne, żel krzemionkowy itp.) lub materiały izolacyjne, są ogrzewane do temperatury pokojowej.

Materiały, które nie palą się w powietrzu, w tym materiały ognioodporne, mogą palić się energicznie w powietrzu wzbogaconym tlenem lub czystym tlenie.

W atmosferach wzbogaconych w tlen powszechnym materiałem palnym, który najbardziej bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo personelu, jest odzież. Wszystkie materiały odzieżowe będą się gwałtownie palić w atmosferze wzbogaconej w tlen. To samo dotyczy tworzyw sztucznych i elastomerów.

Przykład tej zwiększonej reaktywności pokazano w aneksie⁹⁴.

Wszystkie materiały organiczne będą spalać się w tlenie, podobnie jak większość metali i stopów metali.

Olej i smar są szczególnie niebezpieczne w obecności tlenu, ponieważ mogą bardzo łatwo się zapalić i gwałtownie spalać się. W urządzeniach tlenowych zapłon oleju i smaru często powoduje reakcję łańcuchową, która ostatecznie powoduje spalanie i/lub topienie się metalu. W takich przypadkach stopiona lub spalona pozostałość metalu jest wyrzucana z dala od urządzenia, co w następstwie może uwolnić tlen. To z kolei może doprowadzić do gwałtownego i szybkiego rozprzestrzeniania się płomieni w kontakcie z dowolnym sąsiednim zewnętrznym materiałem palnym. Oleju i smaru nigdy nie należy używać do smarowania urządzeń, które będą miały kontakt z tlenem, a jeżeli istnieje taka konieczność, to wszelkie smary lub oleje muszą być zatwierdzone do danego zastosowania dla instalacji tlenowych.

ŹRÓDŁA ZAPŁONU⁹⁴

Źródła zapłonu w atmosferze wzbogaconej w tlen oraz w systemach wykorzystujących tlen z zamkniętych układach, w których tlen lub gaz o zawartości tlenu przekraczającej jego zawartość w atmosferze, mają często odmienny charakter.

W ATMOSFERACH WZBOGACONYCH W TLEN

Źródła zapłonu w warunkach wzbogaconych w tlen obejmują:

- użycie otwartego ognia, np. papierosy, spawanie lub inne prace gorące, silniki;
- papierosy elektroniczne;
- iskry elektryczne i iskry szlifujące lub cierne.

W TLENOWYCH SYSTEMACH CIŚNIENIOWYCH

W systemach zawierających tlen pod ciśnieniem potencjalne źródła zapłonu nie są tak oczywiste jak otwarty ogień i gorące powierzchnie.

Analiza zaistniałych awarii pozwala wymienić źródła zapłonu, które spowodowały pożary w systemach tlenowych:

- ogrzewanie przez sprężanie adiabatyczne;
- tarcie;
- uderzenie mechaniczne;
- iskry elektryczne;
- wysoka prędkość gazu z obecnością cząstek.

Podsumowując powyższe zagadnienie, należy stwierdzić, że dla bezpieczeństwa instalacji tlenowych kluczowe są poniższe kwestie:

- Urządzenia tlenowe smaruje się wyłącznie smarami specyficznymi dla danego zastosowania i obsługi. Zawsze zasięga się specjalistycznej porady, np. u dostawcy lub podmiotu przeprowadzającego testy.
- Instalacje tlenowe muszą być zaprojektowane w taki sposób, aby prędkość przepływu była jak najmniejsza. Jeśli prędkość zostanie podwojona, energia cząstki w strumieniu gazu wzrośnie czterokrotnie.
- Systemy tlenowe powinny być umieszczone w dobrze wentylowanych pomieszczeniach, z dala od potencjalnych źródeł zapłonu.
- Jedną z podstawowych procedur bezpieczeństwa w zapobieganiu pożarom tlenu jest zapewnienie, że wszystkie urządzenia są czyszczone przed oddaniem lub przywróceniem do pracy z tlenem. Konieczne jest zachowanie „czystości tlenowej”, która wyklucza m.in. obecność jakichkolwiek substancji organicznych w systemach tlenowych.
- Metoda wybrana do wykrywania tlenu musi zapewniać wysoki stopień niezawodności działania i być wystarczająco czuła, aby ostrzegać przed osiągnięciem niebezpiecznego stężenia tlenu.
- Sama ochronna odzież robocza nie wystarczy, aby uniknąć niebezpieczeństwa spowodowanego pożarem tlenowym. Wiele materiałów tekstylnych, które mają potwierdzone atesty niepalności, palą się gwałtownie w środowisku wzbogaconym w tlen. W obszarach, w których wymagana jest odzież ognioodporna, należy nosić wyłącznie odzież wewnętrzną lub bieliznę z włókien ognioodpornych i z włókien naturalnych. Inne materiały syntetyczne, nawet noszone jako odzież wewnętrzną lub bielizna, mogą stopić się i przykleić do skóry po wystawieniu na działanie ognia. Odzież powinna dobrze pasować, a jednocześnie być łatwa do usunięcia i wolna od oleju i tłuszczu.
- Osoby, które były narażone na działanie atmosfery wzbogaconej tlenem, nie mogą palić tytoniu ani zbliżać się do otwartego ognia, gorących punktów lub iskier, dopóki nie przewietrzą odpowiednio swoich ubrań w normalnej atmosferze.
- Zanim osoby wejdą do pomieszczenia, które może być wzbogacone tlenem, należy wykonać analizę atmosfery pod kątem tlenu poprzez wia-rygodny i dokładny analizator. Wstęp nie jest dozwolony, jeżeli stężenie tlenu jest większe niż 23,5%. Stężenie tlenu większe niż 23,5% jest potencjalnie niebezpieczne. Jako ostrzeżenie przed możliwymi zmianami stężenia przestrzeń powinna być monitorowana za pomocą ciągłego automatycznego analizatora tlenu, który uruchamia alarm dźwiękowy,

wizualny i/lub dotykowy (wibracyjny), gdy stężenie tlenu w atmosferze może przekroczyć 23,5% lub być mniejsze niż 19,5%.

- Jedynym skutecznym sposobem radzenia sobie z pożarami spowodowanymi przez tlen jest odcięcie tlenu. W warunkach bogatych w tlen odpowiednie środki gaśnicze obejmują wodę, suchą substancję chemiczną (proszek) lub dwutlenek węgla. Wybór musi uwzględniać charakter pożaru, np. w przypadku pożaru instalacji elektrycznej użycie wody jest wykluczone. Płonąca odzież powinna być gaszona wodą, ponieważ przykrycie odzieży kocem przeciwpożarowym nadal umożliwi spalanie odzieży wzbogaconej tlenem.

ROZDZIAŁ 4

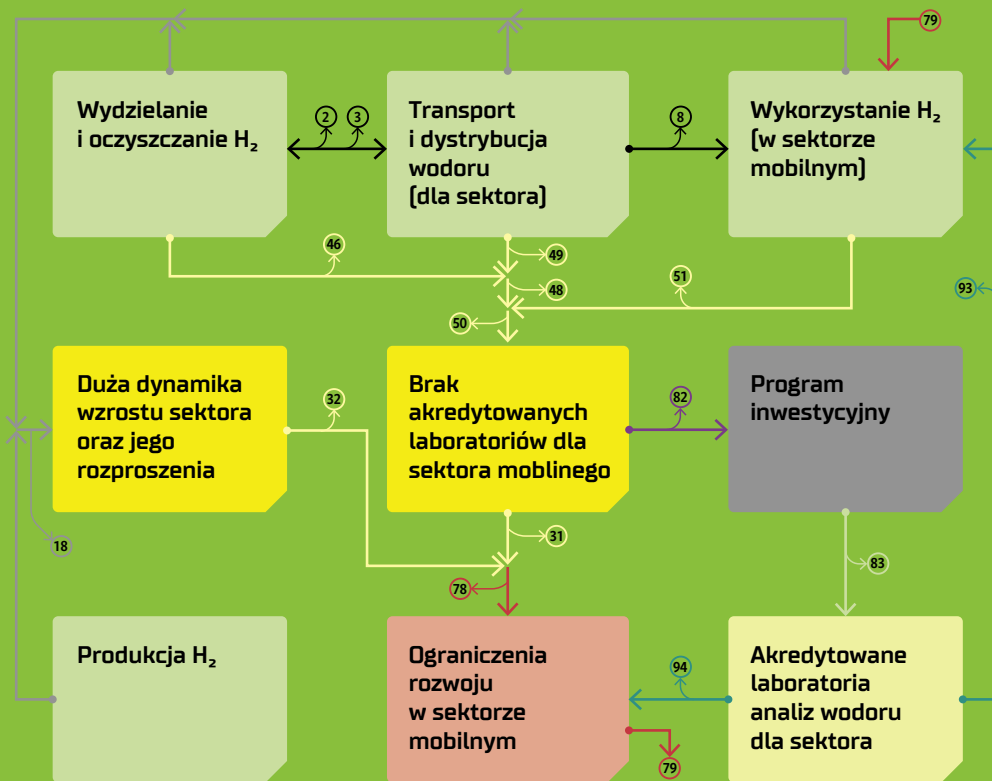
RYZYKA ROZWOJU GOSPODARKI WODOROWEJ

W zakresie gospodarki wodorowej działania związane z jej wartościami, np. wytworzeniem wodoru, jego magazynowaniem lub wykorzystaniem (patrz rysunek 1) implikują czynniki wyzwalające ryzyko, które dzielą się na:

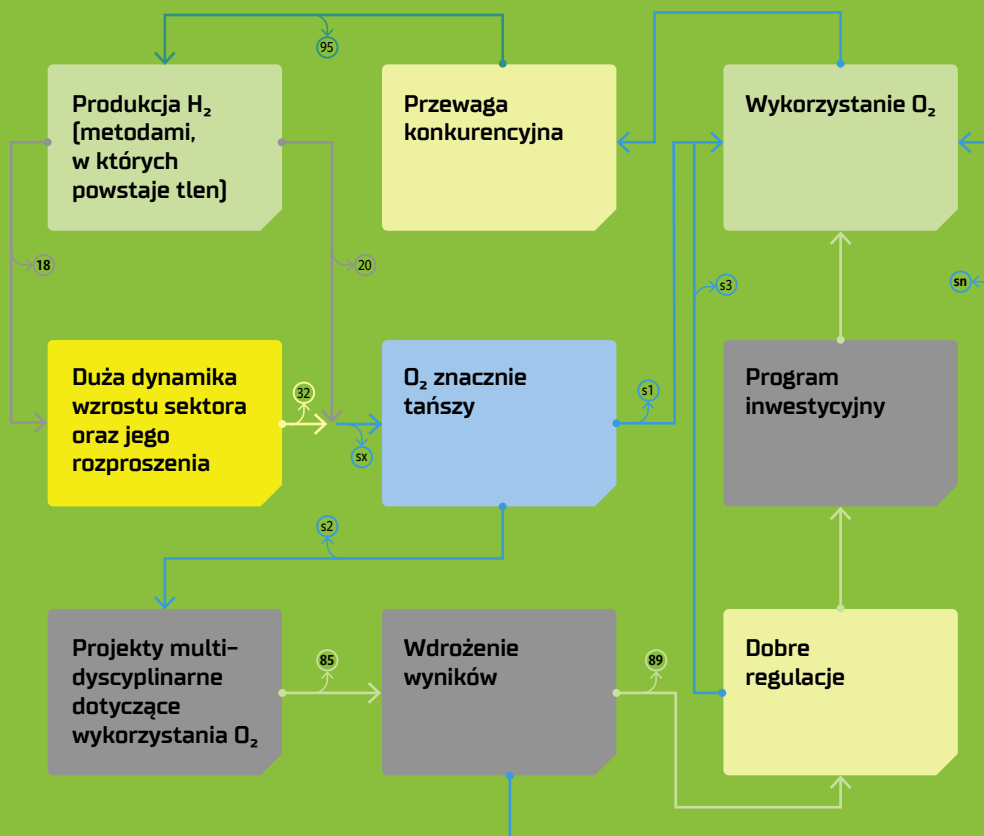
- bezpośrednio związane z procesami służącymi uzyskaniu danej wartości, bez opóźnienia czasowego (należą do nich np. wysoka lub niska temperatura albo ciśnienie, duże ciepło reakcji i występowanie agresywnych czynników w procesie związanym z wykorzystaniem wodoru);
- czynniki, które przebiegają z pewnym opóźnieniem, często są związane także z uwarunkowaniami zewnętrznymi (pozaprocesowymi), takie jak duża dynamika wzrostu gospodarki wodorowej, niewystarczająca podaż kadr posiadających odpowiednie przygotowanie techniczne i doświadczenie lub nienadążanie potrzebnych regulacji i rozporządzeń prawnych za poszerzaniem się skali wykorzystania części technologii związanych z wodorem.

Ponadto ryzyko wykazuje dwoistość, wynikające z tego, że można je podzielić na potencjalne zagrożenia (ryzyko negatywne) oraz potencjalne korzyści (szanse)⁹⁵. Aby ograniczyć ryzyka negatywne lub wykorzystać pojawiające się szanse, należy podjąć działania ograniczające zagrożenia oraz zwiększające prawdopodobieństwo wdrożenia rozwiązań maksymalizujących możliwość wykorzystania szans. Jest to związane z podjęciem działań wspierających poszukiwanie rozwiązania, które wspiera efektywność ograniczania zagrożeń i wykorzystania szans. Rozwiązania te powinny być propagowane i doprowadzić do oczekiwanych skutków, które mogą być zaznaczone zarówno jako relacje pomiędzy rozwiązaniami i przyczynami niebezpośrednimi ryzyka, jak i danym ryzykiem. Udana wdrożenie opracowanego rozwiązania będzie miało pozytywne oddzia-

95. Janusz R. Rak, Jakub Żywiec, „Pojęcie ryzyka – zagrożenie i szansa”, Instal 2020, 8, s. 33-36



RYSUNEK 9. Przykład pętli pojedynczego zagadnienia z mapy wartości i ryzyka, zgodnie z legendą oraz numeracją przedstawioną na rysunku 11



RYSUNEK 10. Schemat szans związanych wykorzystania tlenu w przypadku poszerzenia skali wdrożonych technologii pozyskiwania wodoru metodą elektrolizy lub fotolizy wody

tywania na niektóre przyczyny ryzyka, ich skutki oraz wartości. Wybrane przykłady przedstawiono poniżej.

W przypadku dynamicznego rozwoju gospodarki wodorowej brak akredytowanych laboratoriów do oznaczania czystości wodoru dla sektora mobilnego może być znaczącym czynnikiem ograniczającym rozwój tego sektora. Jest to ryzyko, którego znaczenie jest niedocenione, a może być zniwelowane, np. poprzez relatywnie niewielką inwestycję (w stosunku do wartości całego działu gospodarki). Dobrym przykładem potencjalnego negatywnego ryzyka jest brak na terenie Polski akredytowanych laboratoriów badania czystości wodoru. Bardzo czystego wodoru wymagają ogniwa wodorowe, stosowane do wytworzenia energii elektrycznej z wodoru. Energia ta zasila silniki pojazdów. Aby podmioty wytwarzające, oczyszczające i transportujące wodór mogły współpracować rynkowo z podmiotami wykorzystującymi go w ogniwach, potrzebne są akredytowane laboratoria, które będą dostępne w skali dostosowanej do tempa wzrostu rynku, gdyż będą one rozstrzygały potencjalne spory. Utworzenie takich laboratoriów wymaga znaczących nakładów inwestycyjnych, ale również zachowania spójności metrologicznej oraz spełnienia jakościowych parametrów walidacyjnych metod analitycznych, co przy oznaczanych bardzo niskich poziomach zanieczyszczeń stanowi poważny problem.

Problem ten może mieć proste rozwiązanie, które przedstawiono na rysunku 9.

Za zależności pomiędzy wartościami odpowiadają relacje 2, 3 i 8, to z nich wynika potrzeba używania akredytowanych laboratoriów (poprzez relacje 46, 49, 48, 51 i 50). Jak już wspomniano, sam brak tych laboratoriów w krajach UE nie stanowi problemu w przypadku niedużego rynku. Jednak, licząc się ze znaczącą dynamiką wzrostu sektora, stanowi realne zagrożenie ograniczenia rozwoju w sektorze mobilnym. Wybudowanie i wyposażenie takiego laboratorium leży w zasięgu finansowym koncernów i grup kapitałowych, ale biorąc pod uwagę konieczność zachowania wysokich wymogów akredytacyjnych oraz zachowania wiarygodności i niezależności wyników badań, konieczne jest wsparcie stworzenia takich laboratoriów przez jednostki, które będą świadczyły również usługi bez preferowania interesu danego koncernu.

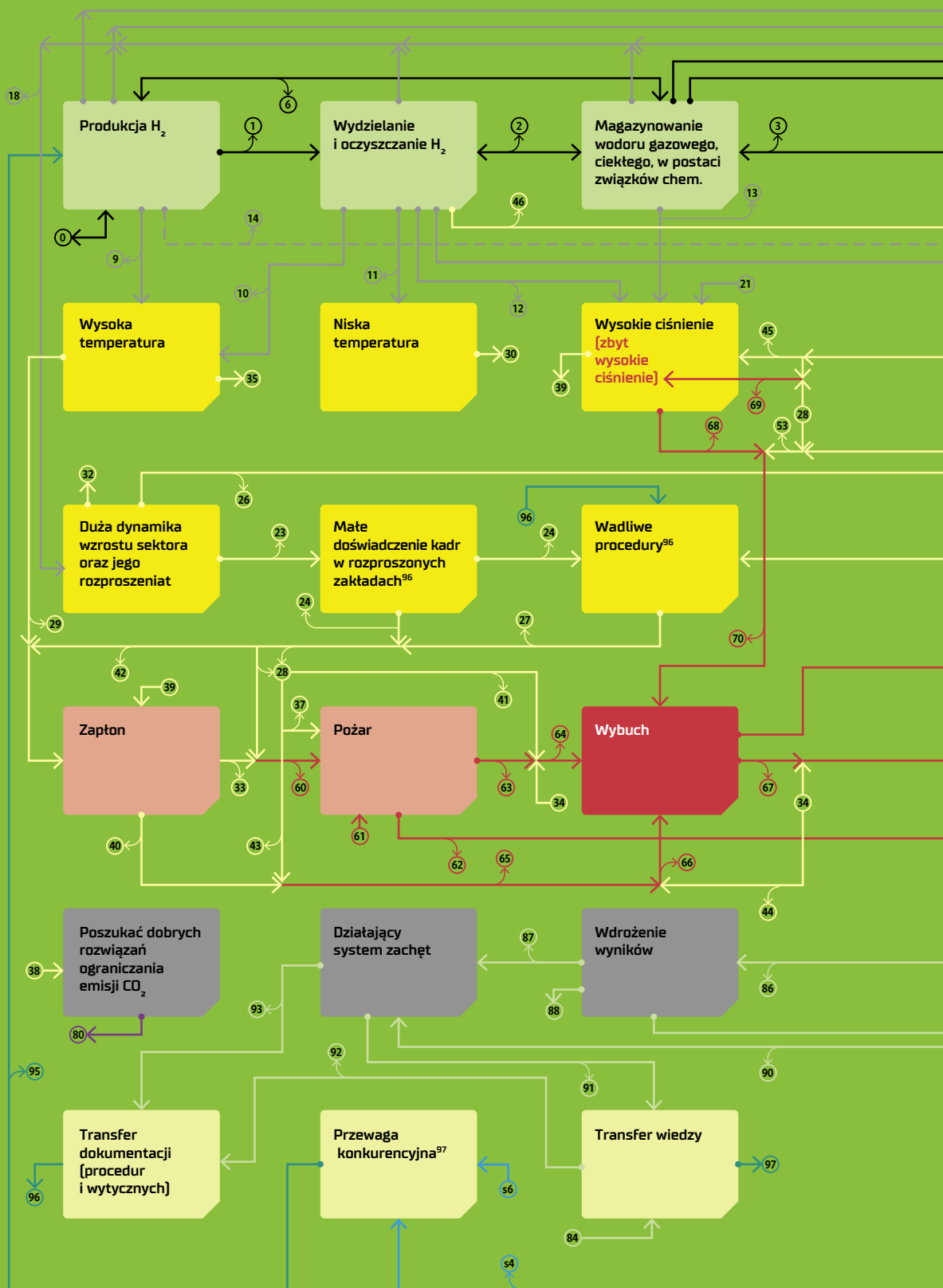
Jednym z wymagających szczególnej uwagi aspektów wykorzystania technologii związanych z wykorzystaniem wodoru jest jego wytwarzaniem. Ze względu na czynniki związane z ochroną środowiska naturalnego istotne jest ograniczenie „ślądu węglowego”, który jest generowany przez stosowane lub planowane do stosowania metody wytwarzania wodoru. W uproszczeniu wymagane jest zmniejszenie związanych z produkcją wodoru emisji dwutlenku i tlenku węgla do atmosfery. Największe możliwości ograniczenia wspomnianych emisji upatrywane są w procesach elektrolizy wody z wykorzystaniem energii elektrycznej uzyskanej z odnawialnych źródeł energii oraz, w przyszłości, w procesach fotolizy wody, które polegają na wytworzeniu wodoru z wody poprzez bezpośrednie wykorzystanie energii słonecznej. W obu przypadkach jako „produkt uboczny” powstaje tlen. Relacje związane z tym zagadnieniem przedstawiono na rysunku 10.

Wynika z niego, że uboczne powstawanie tlenu, obok zagrożeń, stwarza też szansę, trzeba tylko podjąć odpowiednie kroki w celu maksymalizacji prawdopodobieństwa wykorzystania tej szansy.

Całą mapę ryzyka przedstawiono na rysunku 11, pełen opis relacji tej mapy znajduje się w załączniku 1 do aneksu technicznego niniejszej Strategii¹. W trakcie analizy tej mapy zwrócono szczególną uwagę na liczne relacje związane z trudnościami w zakresie pozyskania kadr o odpowiednich kwalifikacjach, co jest związane z przewidywanym modelem rozwoju sektora wodorowego w Polsce. Wnioski z tej analizy zawarto w podsumowaniu.

RYSUNEK 11.

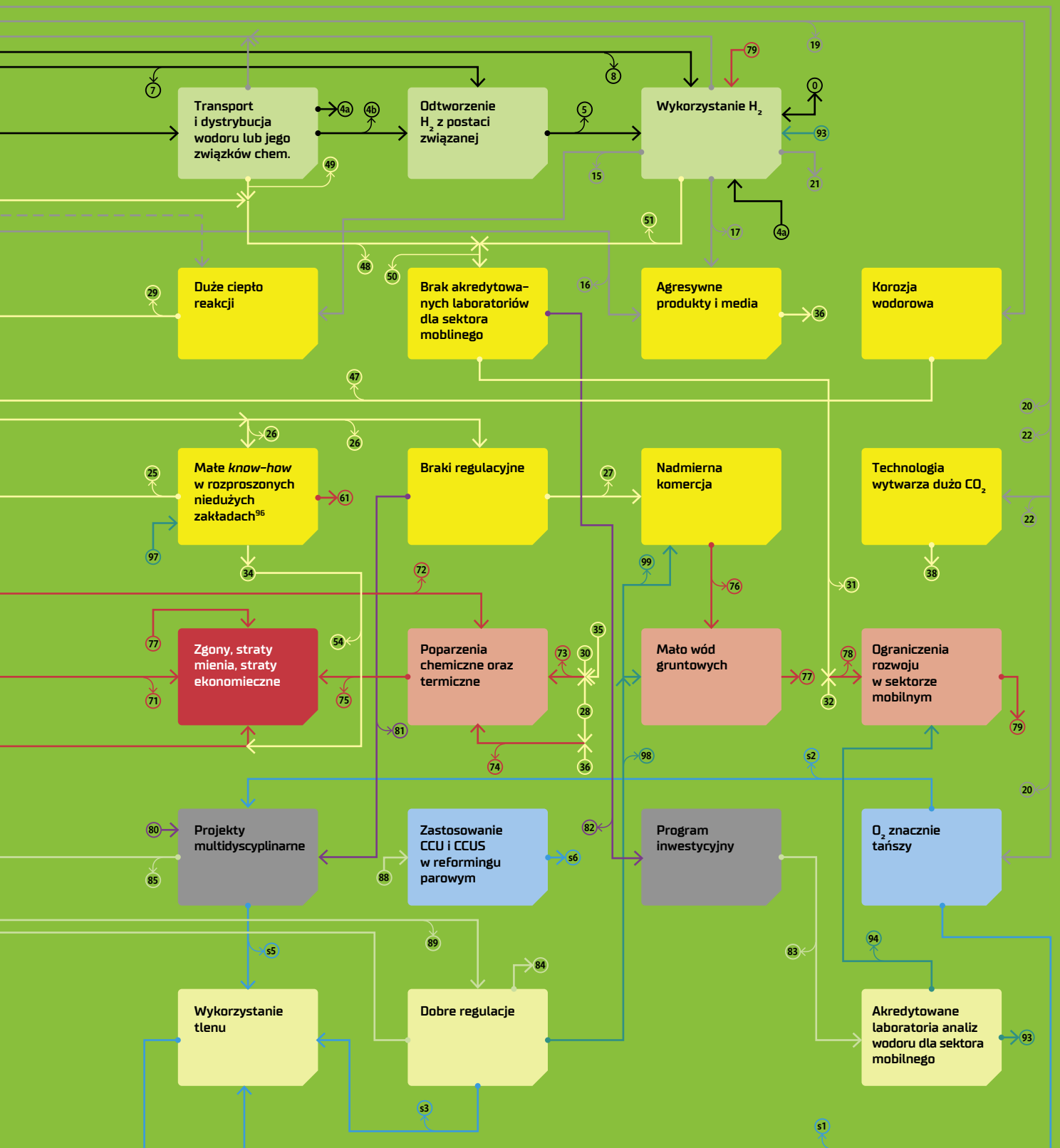
Mapa wartości i ryzyka



96. Ze względu na rozproszoną działalność w licznych niedużych podmiotach i wchodzenie na rynek podmiotów o niedużym doświadczeniu w zakresie technologii wodorowych

97. Wykorzystanie tlenu na dużą skalę pozwoliłoby dywersyfikować koszty elektrolizy, natomiast możliwe szybkie opracowanie adekwatnych do polskich warunków procesów CCU i CCUS pozwoliłoby na zachowanie pozycji Polski w zakresie produkcji wodoru w procesach stosowanych obecnie

- Wartość
- Materializacja ryzyka
- Ograniczanie ryzyka negatywnego
- Szansa
- Ryzyko negatywne
- Skutki krytyczne
- Rozwiązanie lub pozytywny rezultat



- Relacje pomiędzy wartościami
- Propagacja immanentnej cechy wartości
- Propagacja ryzyka
- Propagacja bezpośredniego zagrożenia
- Relacja wskazujące (miękkie) działania wspierające poszukiwanie rozwiązania
- Kierunki propagacji działań, które po wdrożeniu mogą dać pozytywne skutki
- Pozytywne oddziaływanie wdrożenia opracowanego rozwiązania
- Propagacja działań związanych z szansami
- ↔³⁵ Równoznaczne z →³⁵ (gdzie 35, to numer relacji)

ROZDZIAŁ 5

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W tej części przedstawiono najważniejsze wyniki analizy technicznej dotyczącej strategii bezpieczeństwa technologii, wsparte o elementy związane z regulacjami prawnymi, strategicznymi etc. na poziomie krajowym oraz UE.

W zakresie problematyki technicznej przedstawiono zagadnienia związane z pierścieniem wartości, który lepiej oddaje złożoność zagadnienia niż tradycyjnie stosowany łańcuch wartości.

Opracowano tzw. mapę wartości i ryzyka, która ilustruje, najbardziej istotną według autorów Strategii, część zagadnień związanych z bezpieczeństwem technologii wodorowych w Polsce do 2030 roku. Prowadzi to do szeregu rekomendacji.

W przypadku modelu scentralizowanego, w wyspecjalizowanych do zajmowania się wodorem dużych zakładach przemysłowych wdrożone są zaawansowane procedury oraz zatrudniony jest wykwalifikowany personel, który zdobywa doświadczenie także poprzez przekazywanie wiedzy pomiędzy pracownikami na przestrzeni wielu lat. Jeżeli ten model ulegnie zmianie, to wygenerowane zostaną następujące zagrożenia:

- Wodór będzie produkowany, magazynowany, transportowany i wykorzystywany na coraz większą skalę oraz w coraz bardziej rozproszony sposób. Spowoduje to wzrost zapotrzebowania na odpowiednio wykwalifikowane kadry. O ile można próbować zwiększyć liczbę absolwentów o wykształceniu technicznym, to propagacja zdobytych doświadczeń przebiegała będzie z ograniczoną szybkością i może nie nadążyć za potrzebami związanymi z coraz szerszym masowym stosowaniem wodoru.
- Zagrożeniem będzie również brak procedur i instrukcji o odpowiedniej jakości – nawet najbardziej staranne próby opracowania takiej doku-

mentacji od podstaw nie zastąpią udoskonalanych przez dziesięciolecia pod wpływem rzeczywistych zdarzeń awaryjnych i kryzysowych wersji, posiadanych przez duże zakłady przemysłowe.

- Próba narzucenia odpowiednimi przepisami, np. na spółki skarbu państwa, obowiązku udostępniania tego typu dokumentacji jest ryzykownym rozwiązaniem, gdyż będzie to budziło naturalny opór i próby udostępniania tylko tego, co byłoby absolutnie konieczne ze względów legislacyjnych. Lepszym rozwiązaniem będzie stworzenie odpowiednio przemyślanego systemu zachęt do dzielenia się procedurami, instrukcjami oraz know-how dotyczącymi bezpieczeństwa stosowania technologii wodorowych.
- Dobrym sposobem jest zorganizowanie konkursu na projekt dotyczący ww. tematyki, który byłby realizowany przez konsorcjum złożone z przedstawicieli zakładów o wieloletnim doświadczeniu w zakresie stosowania technologii związanych z wodorem, przedstawicieli zakładów oraz jednostek samorządu terytorialnego zainteresowanych wdrażaniem technologii wodorowych oraz naukowców dysponujących niezbędną wiedzą ekonomiczną, społeczną i techniczną, a także praktyków doświadczonych w zakresie tworzenia rekomendacji legislacyjnych.

Koincydencja kwestii ekonomicznych, związanych z dążeniem do najbardziej opłacalnych rozwiązań biznesowych, z niewystarczającymi rozwiązaniami legislacyjnymi lub ich brakiem może powodować m.in. następujące zagrożenia:

- Czystość i zasoby wody [regulacje prawa wodnego].
- Typowe procesy elektrolizy stosowane do otrzymywania wodoru zakładają użycie wody o restrykcyjnych wymaganiach w zakresie jej czystości. Taką wodę można uzyskać za pomocą szeregu procesów z praktycznie każdej klasy czystości wody dostępnej w przyrodzie, jednak jest to związane z kosztami oczyszczania, które są tym wyższe, im bardziej zanieczyszczona jest woda. Będzie to skłaniało przedsiębiorców do prób wykorzystania wody o możliwie wysokiej klasie czystości. Do tej grupy należą wody gruntowe. Brak jasnych i dobrze przemyślanych regulacji w zakresie prawa wodnego⁹⁸ może powodować zagrożenie dla zasobów wodnych oraz powodować ograniczenia w realizacji niedużych projektów.
- W przypadku dużych projektów zagrożenie dla zasobów wód gruntowych będzie wynikało z dodatniego sprzężenia zjawiska suszy hydrologicznej oraz umiejętnie przeprowadzonego lobbingu, bazującego na ww. brakach. Może także utrudnić uzyskanie odpowiednich pozwoleń niewielkim przedsiębiorcom, którzy będą planowali realizację mniejszych projektów. Nawet gdy ich skala nie będzie zagrażała poziomowi lokalnych wód gruntowych, a będą potrzebne np. ze względu na lokalne uwarunkowania hydrologiczne (brak rzek i jezior w pobliżu), brak jasnych procedur weryfikacji tego zagrożenia będzie powodował opóźnienia. Wypracowanie dobrych przepisów również można zrealizować poprzez konkurs na projekt realizowany przez przedstawicieli dużych, małych i średnich przedsiębiorstw oraz przedstawicieli jednostek posiadających potrzebną wiedzę w zakresie gospodarki wodnej, ekonomii, prawa i stosowanych technologii.

98. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne, Dz. U. z 2021 r. poz. 2233 z późn. zm.

99. Kawerna krasowo-sulfozyjna - pusta przestrzeń w skałach, powstała w wyniku procesów naturalnych ługowania, czyli rozpuszczania składników skalnych, przy równoczesnym odprowadzaniu do systemu krasowego materiałów klastycznych (skał okruchowych i osadowych, złożonych z minerałów i skał, które uległy erozji)

100. J. Bażyński, S. Turek, „Słownik hydrogeologii i geologii inżynierskiej, Warszawa”, Wydawnictwa Geologiczne, 1969, s. 190

101. Tadeusz Chmielniak, „Stopień rozwoju technologicznego. Produkcja, składowanie, dystrybucja”, Ocena dojrzałości technologicznej modułów i urządzeń instalacji wodorowych w gospodarce, II Konferencja „Wodór w Gospodarce”, Warszawa, 13.06.2023

102. Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze, Dz. U. z 2021 r. poz. 1420 z późn. zm.

103. Dyskusja po prezentacji „Ocena dojrzałości technologicznej modułów i urządzeń instalacji wodorowych w gospodarce”, II Konferencja „Wodór w Gospodarce”, Warszawa, 13.06.2023

- Wykorzystaniem kawern krasowo-sulfozyjnych^{99,100} do magazynowania wodoru będą zainteresowane głównie duże zakłady, o wieloletnim doświadczeniu w pracy z wodorem. Istnieją (głównie w USA) wdrożone rozwiązania wykorzystania kawern solnych, ale nie są one jeszcze w pełni dojrzałe¹⁰¹. Wobec braku odpowiednich regulacji w zakresie prawa geologicznego i górniczego¹⁰² (np. w zakresie niezbędnego monitoringu powierzchni nad tymi kawernami w przypadku wykorzystania ich do magazynowania wodoru), i w połączeniu z brakiem dojrzałości tego typu technologii, stwarza to zagrożenia wynikające z palności wodoru oraz jego bardzo niskiej energii zapłonu. Zagrożenia te będą jednak ograniczone ze względu na bardzo niską gęstość wodoru, co jest naturalnym czynnikiem napędowym jego ulatniania się do wyższych warstw atmosfery oraz dbałością przedsiębiorcy w zakresie maksymalnego zapobiegania tego typu zdarzeniom ze względów ekonomicznych.
- Wykorzystanie ww. kawern do składowania dwutlenku węgla może być atrakcyjnym z kosztowego punktu widzenia rozwiązaniem realizacji strategii wychwytu i składowania CO₂ (CCS), jednak w tym wypadku dużym zagrożeniem jest brak regulacji w zakresie prawa geologicznego i górniczego¹⁰², które minimalizowałyby szanse wystąpienia oraz skutki awaryjnego uwolnienia się dużych ilości omawianego gazu cieplarnianego w krótkim czasie, gdyż mogą one doprowadzić do uduszenia się fauny oraz ludzi przebywających na terenie nad kawerną [CO₂ ma gęstość około 1,6 razy wyższą od gęstości powietrza, jego zawartość na poziomie 10% obj. powietrza powoduje u ludzi omdlenia i skurcze, a wyższe stężenia paraliż, a nawet śmierć]. Ulatnianie się CO₂ w niedużych ilościach nie powoduje takiego zagrożenia, ale może być nadmiernie tolerowane przez przedsiębiorców ze względu na korzyści biznesowe wynikające z możliwości składowania większej ilości CO₂, niż wynika to z nominalnej pojemności stosowanych kawern. Należy również pamiętać, że pojemność kawern jest istotnie ograniczona, więc nie ma sensu ich stosowanie w charakterze „wiecznych” składowisk wodoru, mogą być natomiast stosowane w charakterze krótko- i średniookresowych magazynów CO₂, który będzie wykorzystywany w pętlach technologicznych.

W Polsce, obok procesów rafineryjnych i petrochemicznych, wodór w największej skali otrzymywany jest metodą parowej konwersji metanu. Obok wodoru powstają duże ilości dwutlenku węgla – udział tej metody w sumarycznej produkcji wodoru nie ulegnie istotnej zmianie do 2030 roku nawet w przypadku zakończonych pełnym sukcesem realizacji celów PSW. Ponieważ, z wymienionych powyżej powodów, próby składowania CO₂ w postaci gazowej (CCS) zawiodą na dużą skalę w przypadku prób długotrwałego jego przechowywania, szczególnie cenne mogą okazać się metody wychwytu i wykorzystania CO₂ (CCU) oraz metody związane z jego wychwytem, wykorzystaniem i składowaniem (CCUS). Ponieważ stopień rozeznania polskich możliwości w tym zakresie oraz stopień zaawansowania rozwiązań technologicznych łatwo dostępnym w Polsce jest daleki od ideału¹⁰³, to bezpieczeństwo polskiej technologii reformingu parowego metanu stawia wyzwania o charakterze strategicznym:

- Inwentaryzacja polskich pokładów surowców mineralnych o charakterze zasadowym, mogących trwale wiązać CO₂, pod względem kosztów ekonomicznych oraz LCA¹⁰⁴ (ze szczególnym uwzględnieniem śladu węglowego), w zależności od różnych prawdopodobnych scenariuszy udziału niskoemisyjnych źródeł energii w miksie energetycznym Polski.
- Ustanowienie programu badawczego wykorzystania surowców, które w ww. etapie uzyskały pozytywną ocenę do wykorzystania w wielkoskalowych działach gospodarki, mogących wykorzystywać bardzo duże masy uzyskanych produktów, np. do budowy dróg i autostrad, w budownictwie, do niwelacji terenów.
- Stworzenie mechanizmów skutecznego wdrażania wyników rozwiązań opracowanych w ramach ww. programu, które uzyskają pozytywną ocenę ekonomiczną oraz LCA.

104. LCA – środowiskowa ocena/ analiza cyklu życia z j.ang. *life cycle assessment*

Bezpieczeństwo rozwoju technologii wodorowych związane jest również z zagrożeniami wynikającymi z niewystarczającej podaży dobrze rozpracowanych z technologicznego lub technicznego punktu widzenia rozwiązań pomocniczych wykorzystywanych w sektorach gospodarki, których dynamika transformacji na wykorzystanie wodoru w charakterze nośnika energii nie została w porę wystarczająco oszacowana przez podmioty rynkowe. Problem ten jest jednocześnie związany z niewystarczającym udziałem polskich przedsiębiorstw w postępującej transformacji gospodarczej. Półśród przykładów można wymienić takie zagadnienia, jak:

- Już obecnie występujące braki w podaży elektrolizerów, który ogranicza potencjał wzrostu produkcji wodoru z wody, dotyczący nawet duże polskie koncerny – czas realizacji kontraktów najczęściej przekracza dwa lata¹⁰⁵. Wraz z upływem czasu i tworzeniem coraz bardziej ambitnych programów transformacji energetycznej na świecie i w Polsce problem będzie się pogłębiał. Rozwiązaniem jest stworzenie przedsiębiorstw, które będą produkowały elektrolizery o parametrach wymaganych przez polski przemysł, dedykowane w pierwszej kolejności dla polskiej gospodarki.
- Rozwój wykorzystania wodoru w sektorze mobilnym będzie wymagał nie tylko produkcji wodoru o bardzo wygórowanych wymaganiach w zakresie jego czystości, pozwalających na wykorzystanie go do zasilania ogniw paliwowych, ale także akredytowanych laboratoriów potrafiących w sprawny sposób oznaczać niebezpieczne dla ww. ogniw zanieczyszczenia na ekstremalnie niskim poziomie. Obecnie nie ma takich laboratoriów w Polsce. Laboratoria, które mogłyby uzyskać taką akredytację, są przygotowywane przez Orlen i Grupę Azoty. Potrzebne będą również laboratoria dostępne dla bardziej rozproszonych podmiotów gospodarczych: ze względu na zapewnienie odpowiedniej podaży tego typu usług, jak i na możliwość wzajemnej między-laboratoryjnej analizy wyników oznaczeń, ułatwiającej m.in. uzyskanie akredytacji. Stworzenie takich laboratoriów przez mniejsze podmioty będzie wymagało stworzenia konkursu zapewniającego dofinansowanie tych działań.
- Polskie spółki z udziałem Skarbu Państwa starają się zapewnić udział polskich przedsiębiorstw w realizacji planowanych projektów transfor-

105. Dyskusje pomiędzy wygłaszanymi prezentacjami, II Konferencja „Wodór w Gospodarce”, Warszawa, 13.06.2023

macji energetycznej, w tym związanych z wykorzystaniem technologii wodorowych. Bariera komercjalizacyjna polega na tym, że nawet akceptacja nieco wyższej ceny oferowanych rozwiązań nie pozwoliłaby często na osiągnięcie zadawalającego rezultatu ze względu na brak wystarczających referencji polskich rozwiązań, nawet jeżeli istnieją lub są opracowywane. Ponieważ Polska jest jednym ze światowych liderów w zakresie produkcji wodoru od bardzo wielu lat, a część potrzebnych rozwiązań, np. w zakresie transportu wodoru, opanowanego obecnie na polskim rynku przez podmioty o kapitale zagranicznym, nie wymaga innowacji i często może być oparta o stan techniki, to przyczyna tego zjawiska może mieć podłoże systemowe i konieczna jest szczególna analiza przyczyn tego zjawiska. Prawdopodobnie jedną z przyczyn jest brak kapitału inwestycyjnego wymaganego do wdrażania takich rozwiązań.

- Niewystarczające tempo wzrostu podaży wskazanych rozwiązań za wzrostem popytu, wynikającym z dynamiki rozwoju rozproszonego wykorzystania technologii związanych z wodorem, będzie miało swój negatywny wpływ na zapewnienie bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce nawet w tak prozaicznych zagadnieniach, jak wykrywanie zagrożeń pożarowych będących skutkiem niekontrolowanego uwalniania się wodoru, co wymaga czujników wykrywających podwyższone jego stężenie w otoczeniu instalacji, trudne do zaobserwowania mikroplamienie etc. Rozwiązania takie są znane¹⁰⁶ i oferowane¹⁰⁷, jednak przypuszczalnie w niedługim czasie ich podaż może być niewystarczająca.

Zwiększający się udział elektrolizy (a w przyszłości być może nawet fotolizy) wody będzie skutkował zwiększoną podażą tlenu, spadkiem jego cen i możliwością wykorzystania w procesach, w których jego zastosowanie było przed rokiem 2023 nieopłacalne. Ten, kto lepiej niż konkurencja rozwiąże problem wykorzystania tlenu, ten uzyska przewagę konkurencyjną¹⁰⁸. Problematyka ta związana jest z trzema zagadnieniami:

- Zapewnienie bardzo korzystnych mechanizmów pozwalających na szybkie dopracowanie znanych procesów, w których tlen może poprawić parametry technologiczne po zastąpieniu nim powietrza stosowanego w danym procesie, opcjonalne opracowanie nowych technologii lub procesów wykorzystujących tlen, a następnie zapewniających prototypowe wdrożenie w gospodarce pozwalające uzyskać referencje. Raz wdrożona technologia/proces uzyskuje referencje, dzięki czemu łatwiej może być później z powodzeniem wdrażany w kraju i za granicą na zasadach komercyjnych pod warunkiem przewidzenia w mechanizmach wsparcia finansowego zabezpieczeń przed żądaniem przez podmioty wdrażające wyłączności na opracowane rozwiązania.
- Zapewnienie dostępu do sprawdzonych procedur, instrukcji, know-how oraz dostępu do kadr o odpowiednim wykształceniu technicznym – podobnie jak w przypadku dotyczącym prac z wodorem. Pewna różnica w tym zakresie dotyczy tego, że wieloletnie doświadczenie związane z pracą z tlenem lub atmosferami o wysokiej zawartości tlenu niekoniecznie jest skoncentrowane w dużych zakładach przemysłowych.

106. Katarzyna Więckiewicz-Dominiczak, Przemysław Dominiczak, Raport „Bezpieczeństwo w technologiach wodorowych. VI - Zagadnienia bezpieczeństwa związane z wykorzystaniem wodoru”, Warszawa 2023, s. 16

107. Sebastian Ziemian, „Wykrywanie wodoru i nieszczelne instalacje H₂”, ASE ATEX, <https://aseatex.pl/pl/kilka-faktow-o-nas>, dostęp 29.08.2023, archiwum: <https://web.archive.org/web/20230829183352/https://aseatex.pl/pl/wykrywanie-wodoru-i-nieszczelne-instalacje-h2>, zarchiwizowano 29.08.2023

108. Kamil Kulesza, „Strategia bezpieczeństwa technologii wodorowych jako wsparcie dla polskiej gospodarki H₂” – dyskusja po prezentacji, II Konferencja „Wodór w Gospodarce”, Warszawa, 13.06.2023

- Procesy wytwarzania azotu na drodze rektyfikacji powietrza staną się mniej opłacalne ze względu na obniżenie możliwości dywersyfikacji kosztów pokrywanych dotychczas zarówno z zysków wynikających ze sprzedaży azotu, jak i tlenu. Związane jest to ze znacznym przewidywanym spadkiem cen tlenu. Spowoduje to problemy w przedsiębiorstwach uzyskujących tlen z powietrza, ale jest jednocześnie szansą dla spółek wytwarzających amoniak, poprzez dostosowanie procesów oczyszczania strumieni obiegowych do potrzeb otrzymywania czystego azotu w skali wymaganej przez gospodarkę.

Projekt dotyczący bezpieczeństwa technologii wodorowych w Polsce jest niezwykle ważny z uwagi na nadmierny efekt cieplarniany i konieczność redukcji emisji gazów cieplarnianych. Analiza pierścienia wartości od produkcji wodoru, poprzez wszystkie elementy związanych z jego wykorzystaniem, ukazuje kompleksowość wyzwania. Wymaga to zaangażowania znaczących środków w badania, rozwój technologii oraz inwestycje.

Po pierwsze, produkcja wodoru musi opierać się na źródłach energii odnawialnej, takich jak energia słoneczna lub wiatrowa, albo z wykorzystaniem uzasadnionych ekonomicznie metod związanych z wykorzystaniem CO₂ (CCU, CCUS), aby zminimalizować negatywny wpływ na środowisko. To wymaga inwestycji w rozwijanie infrastruktury odnawialnych źródeł energii oraz nowe technologie CCU i CCUS.

Oczyszczanie wodoru i jego magazynowanie również stanowi wyzwanie związane z bezpieczeństwem. Konieczne jest inwestowanie w nowe technologie oczyszczania, np. w przypadku wykorzystania zgazowania biomasy lub odpadów, i bezpieczne metody magazynowania wodoru oraz substancji z nim związanych, takich jak amoniak, zakładające rozdrobnienie skali procesu.

Transport wodoru i jego nośników, np. amoniaku, wymaga rozbudowy infrastruktury, co wiąże się z kosztami. Inwestycje w bezpieczne i efektywne środki transportu oraz sieci dystrybucyjne są niezbędne.

Odtworzenie wodoru z jego nośników chemicznych i wykorzystanie go w różnych sektorach gospodarki to kolejny etap, który wymaga badań i rozwoju technologii.

Wszystkie te kroki muszą być objęte badaniami naukowymi, testami bezpieczeństwa oraz inwestycjami w rozwój technologii wodorowych. Wspieranie takich projektów jest kluczowe dla osiągnięcia celów redukcji emisji i stworzenia zrównoważonego systemu energetycznego, co przyniesie korzyści zarówno dla środowiska, jak i gospodarki Polski. Dlatego istnieje pilna potrzeba zaangażowania znaczących środków finansowych w ten obszar.

CZĘŚĆ II

**ASPEKTY SPOŁECZNO-
-KOMUNIKACYJNE:
ZARYS PLANU STRATEGII
KOMUNIKACJI**

ROZDZIAŁ 1 WSTĘP

W ramach projektu „Strategia Bezpieczeństwa Technologii Wodorowych w Polsce na lata 2022–2030” powstał również zarys planu komunikacji, który w oparciu o wyniki ekspertyz i analiz społecznych, ma stanowić rekomendacje do wdrażania technologii oraz realizacji Polskiej Strategii Wodorowej (PSW¹⁰⁹) z uwzględnieniem szerokiej partycypacji społecznej. Dokument ten to również wskazówki dotyczące prowadzenia debaty wokół tematów wodorowych, które będą sprzyjać rozwojowi technologii, również poprzez zapewnienie ich akceptacji w społeczeństwie. Brak społecznego sprzeciwu oraz rozwój wiedzy dotyczących technologii wodorowych to kluczowy element wsparcia dla procesów innowacyjnych zaprojektowanych w ramach PSW. Polska Strategia jest oczywiście spójna z Europejską Strategią w zakresie wodoru (2021¹¹⁰), która podkreśla, że dla sukcesu wdrażania gospodarki wodorowej niezbędna jest akceptacja ogółu społeczeństwa. Dlatego celem głównym powstania części komunikacyjnej w ramach Strategii jest dążenie do zwiększenia świadomości społeczeństwa polskiego na temat technologii wodorowych, ich zastosowań oraz przeciwdziałanie dezinformacji dot. rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce.

Wierzimy, że otwarta, skuteczna i zrozumiała komunikacja będzie wspierać nasze wysiłki na drodze do zrównoważonej przyszłości opartej na czystej energii wodorowej.

109. <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030>, dostęp 14.11.2023

110. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0241_PL.html, dostęp 14.11.2023

ROZDZIAŁ 2

STRESZCZENIE

„Część komunikacyjna” to dokument z rekomendacjami działań społeczno-komunikacyjnych na rzecz rozwoju technologii wodorowych w Polsce w latach 2023–2030. Wnioski spisane w 10 punktach wynikają z szerokich badań społecznych (CAWI, FGI, analiza dyskursu i narracji) przeprowadzonych od lutego do sierpnia 2023 roku. Ich celem jest dążenie do zwiększenia świadomości społecznej na temat technologii wodorowych wśród Polaków i promocja ich rozwoju w sposób zrównoważony i odpowiedzialny. Główne wnioski to:

- Niska świadomość Polaków na temat technologii wodorowych stanowić może istotny problem dla rozwoju tej technologii w Polsce.
- Pozytywny stosunek Polaków do ekologii i pozyskiwania energii z Odnawialnych Źródeł Energii będzie sprzyjać rozwojowi technologii wodorowych.
- Wodór jest postrzegany przez Polaków neutralnie lub pozytywnie, co może przyczynić się do zwiększenia jego popularności.
- Aby zwiększyć świadomość Polaków na temat technologii wodorowych, należy prowadzić działania edukacyjne i promocyjne o charakterze kompleksowym i długoterminowym. Działania te powinny być skierowane do różnych grup społecznych, w tym do osób dorosłych.
- Ważne jest, aby działania edukacyjne i promocyjne były prowadzone w sposób jasny, zrozumiały i atrakcyjny dla odbiorców. Należy podkreślać rzetelność źródeł naukowych, na których bazują poszczególne przekazy.
- Komunikacja ze społeczeństwem powinna również obejmować negatywne aspekty rozwoju i wdrażania technologii wodorowych oraz być zrównoważona pod względem ryzyk i zagrożeń oraz pozytywów.
- Współpraca z ekspertami jest niezbędna do zapewnienia rzetelnych i aktualnych informacji o technologiach wodorowych.
- Należy monitorować dyskurs wokół wodoru, aby przeciwdziałać dezinformacji.
- Włączenie różnych grup interesariuszy i tworzenie skoordynowanej platformy współpracy do działań na rzecz rozwoju technologii wodorowych jest kluczowe dla osiągnięcia sukcesu.
- Podejmując temat bezpieczeństwa w kontekście technologii wodorowych, należy odwoływać się przede wszystkim do: 1) bezpieczeństwa dla życia i zdrowia oraz 2) bezpieczeństwa energetycznego kraju.

ROZDZIAŁ 3 OPIS BADAŃ

W ramach przygotowania i diagnozy sytuacji przed opracowaniem Strategii, zrealizowaliśmy serię badań społecznych, wykorzystując tzw. podejście triangulacji metod i danych (*mix-method approach*). Cały proces badawczy trwał 8 miesięcy: od stycznia do sierpnia 2023 roku.

Badanie społecznych aspektów bezpieczeństwa technologii wodorowych rozpoczęło się od przeprowadzenia badania internetowego (CAWI) na próbie respondentów w wieku 18–65 lat, N=2008. Próba badania sondażowego została starannie dobrana tak, aby odzwierciedlała strukturę społeczną pod względem płci, miejsce zamieszkania (w podziale na wieś, miasto do 100 tys., miasto powyżej 100 tys. mieszkańców) i wykształcenia. Uzupełniono również próbę ze względu na podział makroregionalny (NUTS). Realizacja sondażu online odbyła się w pierwszej połowie lutego 2023 roku. Przed przeprowadzeniem samego badania zorganizowano wywiady kognitywne w celu zweryfikowania pytań i narzędzia badawczego. Ten etap był potrzebny szczególnie ze względu na specyfikę tematu, jakim są technologie wodorowe, które nie są przedmiotem potocznych rozmów ani nie istnieją w powszechnej świadomości społecznej w Polsce. Wywiady kognitywne miały zatem na celu upewnienie się, że pytania są jasne, zrozumiałe i nie wprowadzają w błąd respondentów.

Kolejnym krokiem w procesie badawczym było przeprowadzenie ośmiu zogniskowanych wywiadów grupowych (*focus group interview*, FGI). Etap ten pozwolił pogłębić informacje na temat opinii i przekonań uczestników na temat bezpieczeństwa technologii wodorowych. Wywiady fokusowe są jakościową metodą badawczą i pozwalają na bardziej dogłębną analizę tego, co ludzie myślą na wybrane tematy. Dzięki procesowi grupowemu, w ramach którego przeprowadza się wywiad, można lepiej zrozumieć perspektywy oraz doświadczenia uczestników, które tworzą się dzięki uspołecznionemu procesowi badania. FGI zrealizowano w lipcu i sierpniu 2023 roku. Łącznie w badaniu wzięło udział 56 osób. Do badania zaproszono osoby, które nie miały specjalistycznej wiedzy na temat wodoru lub technologii wodorowych. Dobór badanych do grup fokusowych był uwarunkowany trzema głównymi zmiennymi, które były wzajemnie modulowane: płeć, miejsce zamieszkania i wykształcenie. Wywiady przebiegały według wcześniej przygotowanego scenariusza i trwały od 94 do 110 minut.

111. Fakt, Super Express, Gazeta Wyborcza, Rzeczpospolita, Dziennik Gazeta Prawna, Gazeta Podatkowa, Puls Biznesu, Gazeta Polska Codziennie

112. Polityka, Newsweek Polska, Sieci, Tygodnik Do Rzeczy, Tygodnik Powszechny, Gazeta Polska, Przegląd

113. wp.pl, onet.pl, interia.pl, gazeta.pl, o2.pl, se.pl, medonet.pl, naszemiasto.pl, radiozet.pl, fakt.pl

114. TVP1, TVP2, TVP Info, Polsat, TVN, TVN24, Polsat News

Równocześnie realizowane były analizy dyskursu internetowego i komunikacji w tzw. mediach tradycyjnych. Badania treści obejmowały prasę (w tym dzienniki¹¹¹ i tygodniki opinii¹¹²), portale internetowe¹¹³ oraz stacje telewizyjne¹¹⁴ z siedmiu lat (2016–2022).

Zakwalifikowanie danego tekstu do bazy następowało poprzez odszukanie w nim przynajmniej jednokrotnego wystąpienia słowa kluczowego – „wodór”.

Ponadto badaniem treści dotyczącym technologii wodorowych objęte zostały wpisy pobrane z mediów społecznościowych takich jak Twitter, Facebook, TikTok (komentarze pod filmikami), YouTube (komentarze pod filmami) oraz dyskusje na forach umieszczone pod artykułami na portalach horyzontalnych lub tematycznych. W sumie zebrano 35 tys. wpisów. Baza danych była nieproporcjonalna pod względem mediów, z których zebrano wpisy. Największy udział stanowił materiał z Twittera (72%) i YouTube'a (26%). Do analizy treści z całej puli zebranego materiału empirycznego została wybrana kwotowo liczba 5595 wpisów, która została poddana analizie w oparciu o klucz kodowy.

Złożony proces badawczy – od badania CAWI, badań dyskursów i treści w Internecie oraz mediach tradycyjnych, aż do grupowych wywiadów fokusowych – miał na celu zebranie jak najpełniejszych danych na temat społecznych aspektów związanych z postrzeganiem i rozumieniem bezpieczeństwa technologii wodorowych. Dzięki różnorodności metod badawczych oraz zastosowanym różnym formom analiz i interpretacji, uzyskane informacje dają kompleksową perspektywę i rzetelny materiał pozwalający na sformułowanie wytycznych do dalszych działań społeczno-komunikacyjnych. Celem jest przekazanie wskazówek jak bezpiecznie wdrażać technologie wodorowe uwzględniając społeczno-kulturowe uwarunkowania w Polsce.

NAJWAŻNIEJSZE WNIOSKI Z BADAŃ

Sekwencja zrealizowanych badań społecznych i komunikacyjnych pozwoliła na triangulację danych, które opracowaliśmy w formie syntetycznych wniosków przedstawionych poniżej w podziale na kluczowe aspekty wpływające na akceptację i postawy wobec tematu bezpieczeństwa gospodarki wodorowej. Wyniki badań opracowane są według następujących kwestii: wiedza, postawy i wartości społeczeństwa polskiego oraz narracja o wodorze w mediach (wg triady: nadawcy-przekazy-odbiorcy) w Polsce.

4.1. Wiedza o wodorze

Projektowanie skutecznej komunikacji społecznej musi zakładać rozpoznanie poziomu wiedzy u potencjalnych odbiorców. Przykład wodoru jest tutaj specyficzny z dwóch powodów. Po pierwsze, wodór jest terminem technicznym, wprost odnoszącym się do wiedzy eksperckiej z dziedziny nauk ścisłych, która nie jest składnikiem wiedzy potocznej. Po drugie, wodór jako nośnik energii to element technologii, które dopiero będą wdrażane na szerszą skalę, dlatego można zakładać, że istnieje niski poziom świadomości społecznej na ten temat.

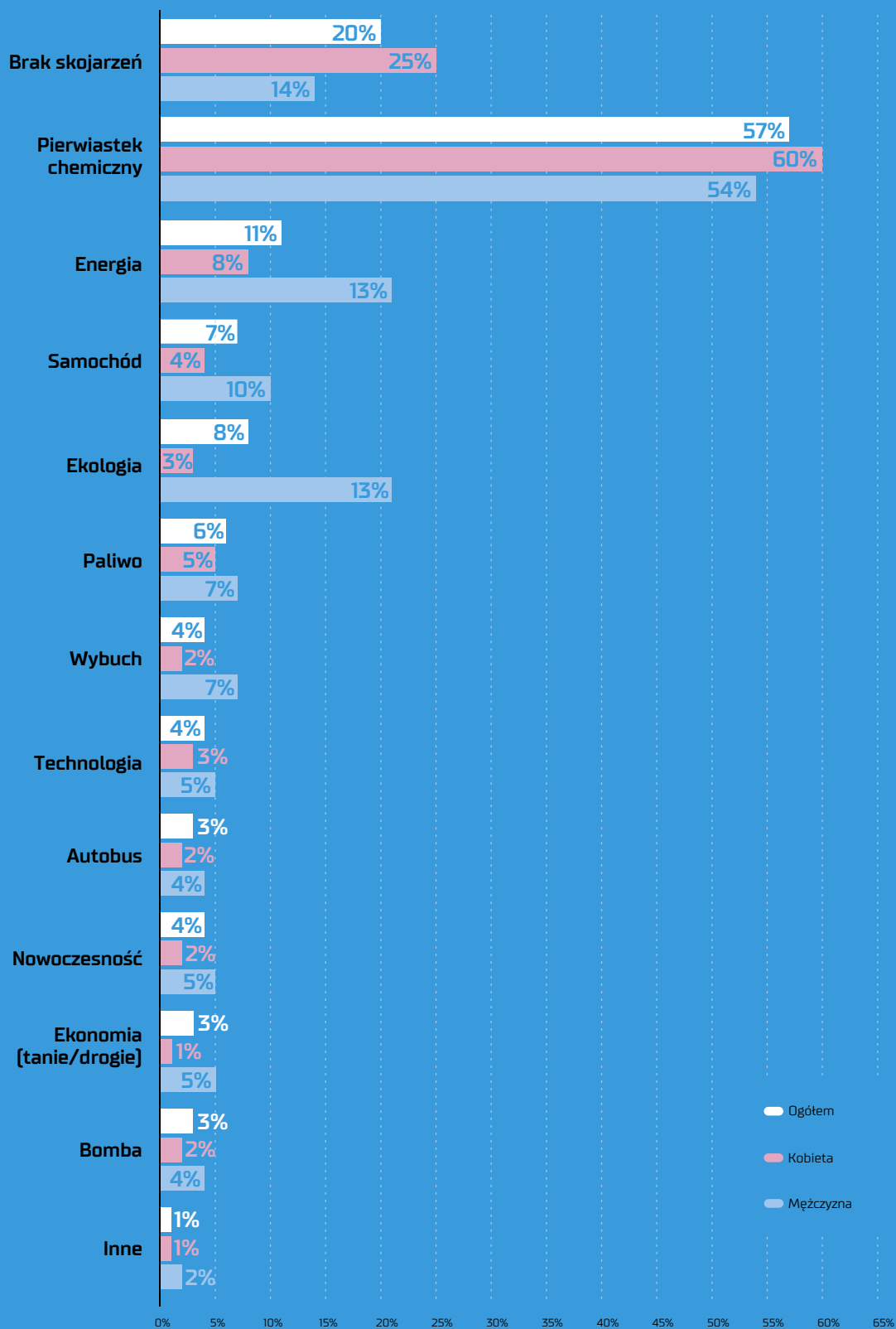
Z badań CAWI wynika, że **wodór kojarzy się Polakom przede wszystkim z pierwiastkiem chemicznym [57%]**. Jednocześnie aż **20% respondentów nie ma żadnych skojarzeń z wodorem**. Większość skojarzeń ma charakter neutralny, to znaczy nie są one związane z niebezpieczeństwem. Kobiety wyraźnie częściej nie mają skojarzeń z wodorem lub są to skojarzenia dotyczące właściwości fizyko-chemicznych.

Skojarzenia dotyczące zastosowań wodoru wyraźnie częściej wymieniają mężczyźni oraz osoby z wyższym wykształceniem.

Również badania jakościowe (FGI) potwierdzają, że Polacy mają bardzo małą wiedzę na temat wodoru jako nośnika energii oraz nie potrafią spontanicznie wskazać skojarzeń z technologiami wodorowymi. Wśród uczestników FGI to mężczyźni wyrażali więcej wątpliwości w związku z bezpieczeństwem technologii wodorowych. Z FGI wynika ponadto, że osoby w przedziale wiekowym 30–50 lat mogą stać się w przyszłości kluczowymi

RYSUNEK 12.

Skojarzenia związane z wodorem



odbiorcami technologii wodorowych, zwłaszcza w dziedzinie motoryzacji. Uczestnicy badania wskazali również, że przeciwnikami samochodów wodorowych mogą być przede wszystkim osoby powyżej 50. roku życia.

Wodór jest ponadto najmniej rozpoznawalny wśród innych nośników i źródeł energii (takich jak węgiel, energia słoneczna, gaz ziemny, energia wiatrowa, biomasa). Jedynie 38% respondentów wskazało wodór jako znany im nośnik energii. Dodatkowo, po zadaniu kolejnego pytania o wykorzystanie wodoru w energetyce, jeszcze 13% odpowiedziało twierdząco. Wynika z tego, że jedynie nieco ponad połowa respondentów może kojarzyć wodór z energetyką.

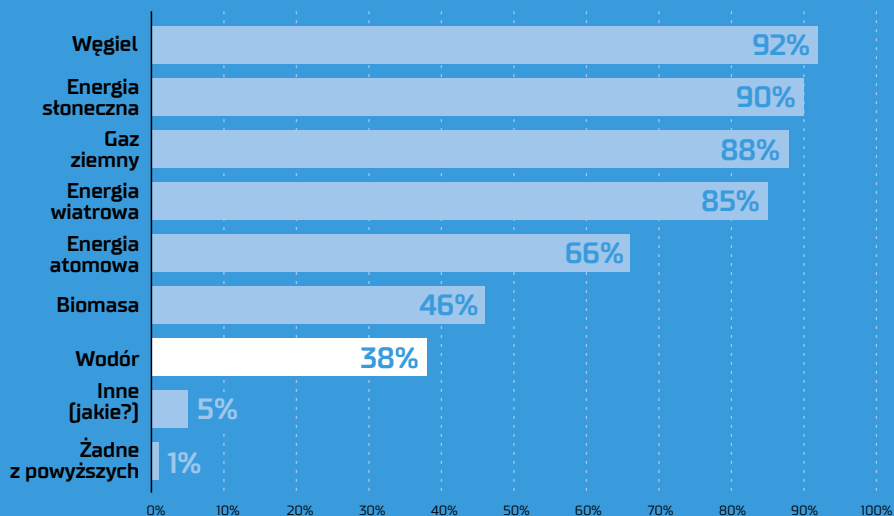
Jednocześnie ci, którzy kojarzą wodór z energetyką (w sumie 51% respondentów w badaniu ilościowym), najczęściej spotykali się w mediach z informacjami na temat samochodów z napędem wodorowym (19% wskazujących na odpowiedź raczej często i bardzo często) oraz z autobusami z napędem wodorowym (21%) a najrzadziej natomiast z informacjami na temat wykorzystania wodoru do ogrzewania domów (5%). Wyniki te sugerują, że do świadomości potocznej w pewnym zakresie przebiły się przede wszystkim technologie wodorowe związane z motoryzacją i transportem publicznym. Może się to wiązać z obecnością samochodów i autobusów z napędem wodorowym w polskiej przestrzeni publicznej (autobusy wodorowe kursują m.in. na ulicach Lublina czy Warszawy). Jednocześnie percepcja medialna informacji na temat wodoru jest powiązana (istotnie statystycznie) z osobistymi doświadczeniami respondentów. Wśród osób, do których dotarły doniesienia medialne na temat wykorzystywania wodoru do ogrzewania domu, jest więcej respondentów deklarujących wysokie koszty ogrzewania gospodarstwa domowego. Z kolei osoby, które spotkały się w mediach z informacjami na temat autobusów wodorowych, częściej niż inni badani deklarują korzystanie z transportu publicznego. Co nie powinno dziwić, mężczyźni generalnie w większym stopniu słyszeli o autobusach i samochodach z napędem wodorowym. Z kolei wśród kobiet jest statystycznie mniej osób, które wcale nie słyszały o wykorzystywaniu wodoru do ogrzewania domów.

Respondentów w badaniach ilościowych pytano ponadto o chęć uzyskania nowej wiedzy oraz o pożądane źródła informacji. W polskim społeczeństwie istnieje silna potrzeba wiedzy o nowych sposobach pozyskiwania energii. **Aż 70% respondentów w badaniu ilościowym wyraziło chęć uzyskania nowej wiedzy.** Stosunkowo częściej są to osoby z wykształceniem wyższym, zarabiające powyżej mediany, zwolennicy Zjednoczonej Prawicy i Koalicji Obywatelskiej, używające częściej roweru i transportu publicznego oraz deklarujące zaufanie do ludzi i instytucji.

Tak duży odsetek respondentów zainteresowanych informacjami na temat energetyki wskazuje na dużą potrzebę społeczną. Wynikać to może z kryzysu energetycznego, skutkującego poważnymi podwyżkami cen prądu, który wymusił na obywatelach oszczędności i poszukiwanie nowych alternatyw dla drogiego węgla (czego wyrazem jest gwałtowny wzrost zainteresowania pompami ciepła). Nasze wyniki wskazują również na potencjalnie wysoką chłonność kampanii informacyjnych dotyczący zastosowania wodoru w energetyce.

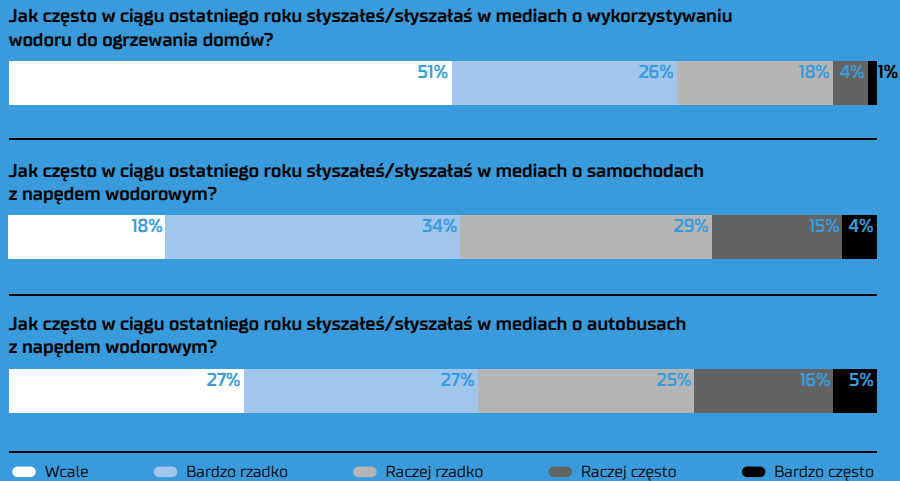
RYSUNEK 13.

Znajomość źródeł i nośników energii



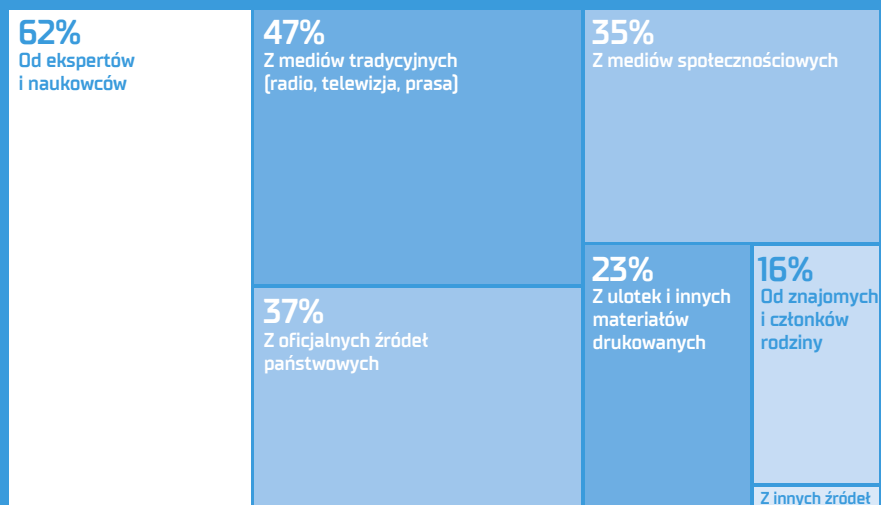
RYSUNEK 14.

Percepcja informacji medialnych o wodorze



RYSUNEK 15.

Pożądane źródła wiedzy na temat nowych rozwiązań energetycznych



Badani wskazali również, z jakich źródeł najbardziej chcieliby czerpać wiedzę na temat nowych rozwiązań energetycznych (Rysunek 15). Trzy najczęściej wskazywane źródła to: eksperci i naukowcy, media tradycyjne, oficjalne źródła państwowe. Na poziomie ogólnym widać, że w kontekście zapotrzebowania na informację ważną rolę w komunikacji społecznej związanej z transformacją energetyczną powinni odgrywać w pierwszej kolejności eksperci. Drugie miejsce takich mediów jak prasa i telewizja pokazuje ponadto, że kampanie informacyjne nie mogą zlekceważyć tradycyjnych kanałów przekazywania informacji oraz skupiać się wyłącznie na nowych mediach. Ważną rolę będą odgrywały z pewnością podmioty publiczne związane z administracją państwową, gdyż wydaje się, że temat energetyki kojarzy się przede wszystkim z państwem i jego organami.

Ekspertów i naukowców częściej wskazują mężczyźni, osoby z wykształceniem wyższym lub średnim oraz lepiej zarabiające i będące zwolennikami Koalicji Obywatelskiej. Wybór mediów tradycyjnych jest niezależny od jakichkolwiek cech społeczno-demograficznych. Media społecznościowe wskazują osoby w wieku do 39 lat, z wykształceniem średnim lub niższym, uczniowie i studenci, osoby zarabiające poniżej mediany, zwolennicy Konfederacji, nieufający obcokrajowcom. Oficjalne źródła państwowe to preferowany wybór osób do 29. roku życia, zwolenników partii rządzącej, korzystających często z roweru lub komunikacji międzymiastowej, ufających rządowi, policji, ale nieufających osobom innej religii. Materiały drukowane to wybór osób około 40. roku życia, korzystających często z roweru oraz ufających policji i rządowi. Najbliższy krąg osób wskazują osoby do 40. roku życia, aktywne rowerowo i mieszkające w domach jednorodzinnych.

Przedstawione wyżej zróżnicowanie wskazuje na konieczność segmentacyjnego projektowania komunikacji społecznej, to znaczy takiej, która będzie korzystała z różnych zasobów w zależności od grupy docelowej. Jedną z kluczowych różnic wydają się być poglądy polityczne – osoby głoszące na największą partię opozycyjną¹¹⁵ częściej zgłaszają zapotrzebowanie na wiedzę ekspercką (być może traktowaną jako bardziej obiektywną), z kolei osoby głoszące na partię rządzącą¹¹⁶ wyrażają większą ufność wobec oficjalnych, państwowych źródeł. W badaniach FGI badani również wyrazili chęć uzyskania bardziej szczegółowej wiedzy na temat wodoru. Zdaniem badanych przekaz powinien skupić się przede wszystkim na procesie produkcji wodoru oraz jego bezpieczeństwie i zawierać wizualizacje i obrazy z fabryk lub zakładów przemysłowych.

115. W 2023 r. to była Platforma Obywatelska – przyp. red.

116. Prawo i Sprawiedliwość – przyp. red.

4.2. Podsumowanie i wskazówki: wiedza o wodorze

W zakresie spontanicznej wiedzy o wodorze świadomość Polaków to tabula rasa. Większość z nich nie ma wyrobionych skojarzeń wodoru ani z zastosowaniami w energetyce, ani z potencjalnym niebezpieczeństwem. Taka sytuacja jest zarówno szansą, jak i wyzwaniem. Szansą, ponieważ brak

jednoznacznych (a jednocześnie związanych z niebezpieczeństwem) skojarzeń daje możliwość łatwiejszego kształtowania pożądaných wyobrażeń na temat wodoru (przewaga braku negatywnych uprzedzeń). Wyzwaniem, ponieważ rodzi ryzyko wpływu dezinformacji na wiedzę społeczną na temat wodoru (ryzyko braku pozytywnych skojarzeń). Choć wódór nie jest elementem wiedzy potocznej, to **wątek motoryzacyjny wydaje się bardziej wyraźnie zaznaczać w świadomości społecznej** niż inne skojarzenia związane z wykorzystaniem wodoru.

1. W celu zwiększenia poziomu wiedzy na temat wodoru komunikacja powinna być zaadresowana w pierwszej kolejności do kobiet, osób młodszych i osób z niższym wykształceniem, pochodzących z mniejszych miast i wsi. Są to grupy, które, zgodnie z naszymi badaniami, w najmniejszym stopniu kojarzą wódór z energetyką.
2. W celu zmięgowania lęków społecznych i obaw związanych z bezpieczeństwem technologii wodoru komunikacja powinna być zaadresowana w pierwszej kolejności do mężczyzn, którzy wyrażają więcej wątpliwości i częściej kojarzą wódór z wybuchami.
3. Komunikacja społeczna na temat zastosowania wodoru powinna odnosić się do praktyk życia codziennego.
4. Wiedza na temat technologii wodorowych przekazywana w ramach komunikacji społecznej powinna adresować w pierwszej kolejności dwa elementy: kryzys energetyczny (wódór jako narzędzie przeciwdziałania kryzysowi) oraz transformację energetyczną (wódór jako kluczowy element transformacji).
5. Głównymi aktorami kampanii promocyjnych powinny być eksperci, przede wszystkim naukowcy. 62% respondentów wskazało, że chciałoby uzyskać wiedzę na temat nowych rozwiązań energetycznych.
6. Kluczowym elementem kampanii powinien być przekaz informujący o bezpieczeństwie wodoru i procesie jego produkcji. Taki przekaz powinien zawierać wizualizacje i obrazy z fabryk i zakładów przemysłowych, skupiać się na zastosowaniach wodoru w codziennym życiu oraz być skierowany przede wszystkim do osób dorosłych. Badani wyrażali również potrzebę zbalansowania w komunikacji na temat wodoru, która miałaby poruszać kwestie zarówno zalet, jak i wad.
7. W komunikacji na temat wodoru należy podkreślać rzetelność źródeł naukowych, na których bazują poszczególne przekazy.

4.3. Wartości i postawy związane z technologiami wodorowymi

Wartości i postawy są elementarnymi funkcjami, które kształtują życie społeczne. Wartości można rozumieć jako materialne i pozamaterialne. „Z socjologicznego punktu widzenia można mówić, że wartości są społecznie uznanymi, zinstytucjonalizowanymi miernikami orientacji dla działań społecznych” (Mariański 2019: 16). Kategorie aksjologiczne, jakimi są wartości, są wyznacznikami zachowań, działań i aktywności jednostkowych oraz grupowych. Na ich podstawie jednostki i grupy społeczne – świadomie bądź nie – identyfikują ważne dla siebie i innych fenomeny, na które w dalszej kolejności nakierowują swoje działanie i warunkują nimi zachowania oraz postawy¹¹⁷. Postawa jest natomiast rozumiana jako gotowość jednostki do określonego zachowania się względem danego przedmiotu postawy, definicja sytuacji, względne dyspozycje i sentyment do przedmiotu postaw oraz względnie trwałe przekonania o naturze i własnościach przedmiotu postawy¹¹⁸.

Określenie wartości i postaw wobec technologii wodorowych w społeczeństwie pozwala na:

- rozumienie podstaw społecznej akceptacji, która jest kluczowa przy wdrażaniu technologii;
- poznawanie sposobów formowania i kształtowania opinii publicznej dotyczącej technologii;
- identyfikowanie potencjalnych konfliktów związanych z wdrażaniem technologii;
- skuteczniejsze i bardziej odpowiedzialne wdrażanie technologii.

Analizowane konglomeraty wartości i postaw, można podzielić na pięć głównych kategorii: **[1] środowisko-ekologiczne, [2] ekonomiczne, [3] społeczne, [4] technologiczne i [5] dotyczące bezpieczeństwa**. Kategorie te są jednak płynne, ponieważ na poziomie aksjologicznym bezpieczeństwo technologii związane jest np. ze zdrowiem i życiem, a poprawa jakości powietrza jest związana z indywidualnymi troskami o zdrowie. W badaniu CAWI deklarowano wartości związane z technologiami wodorowymi.

Bezpieczeństwo dla zdrowia i życia jest najważniejszym czynnikiem, mającym wpływ na te postawy, z udziałem wynoszącym 58%. Wpływ na środowisko naturalne jest drugim co do ważności czynnikiem (43%), a następnie pojawiają się kwestie bezpieczeństwa energetycznego kraju (32%), kwestie finansowe (30%) i kwestie technologiczne (13%). Z analizy dyskursu mediów tradycyjnych wynika, że wodór jest traktowany jako jeden z elementów „zielonej transformacji”, odejścia od paliw kopalnych i aktywnego reagowania na kryzys klimatyczny. To również odniesienia do efektywnej

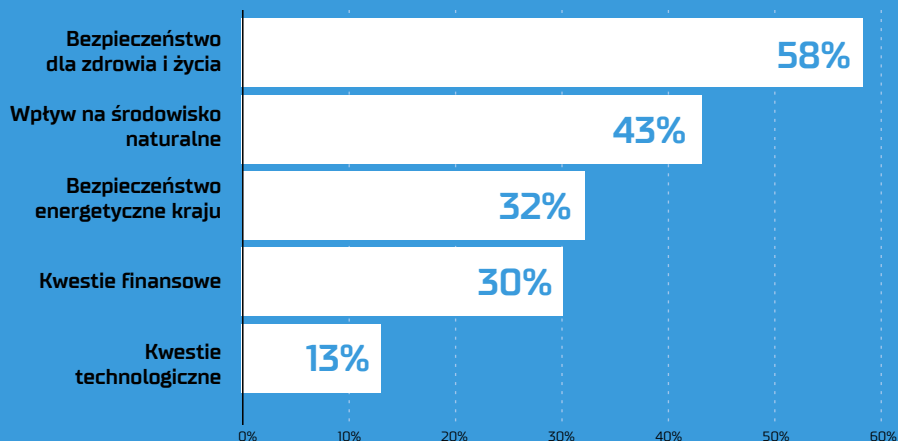
117. Jan Szymczyk, „Socjologiczne rozumienie wartości w aspekcie relacji społecznych”, *Zeszyty Naukowe KUL* 2019, 62, 3 (247), s. 35-54.
DOI: 10.31743/zn.2019.62.3.03; Janusz Mariański, „Wartości codzienne, sensotwórcze i ostateczne w świadomości maturzystów puławskich”, w: Marcin Zemło (red.), *Małe miasta: codzienność*. Białystok-Głogów Małopolski-Supraśl 2019, s. 15-17, <https://repozytorium.uwb.edu.pl/jspui/handle/11320/11183>, dostęp 10.02.2024

118. Magdalena Piłat-Borcuc, „Pomiędzy tożsamością osobową a postawą społeczną”, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, 2013, 65, s. 317-327, <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element/baztech-30fb4e6a-ea41-4381-a351-b-024b4d37499>, dostęp: 10.02.2024

RYSUNEK 16.

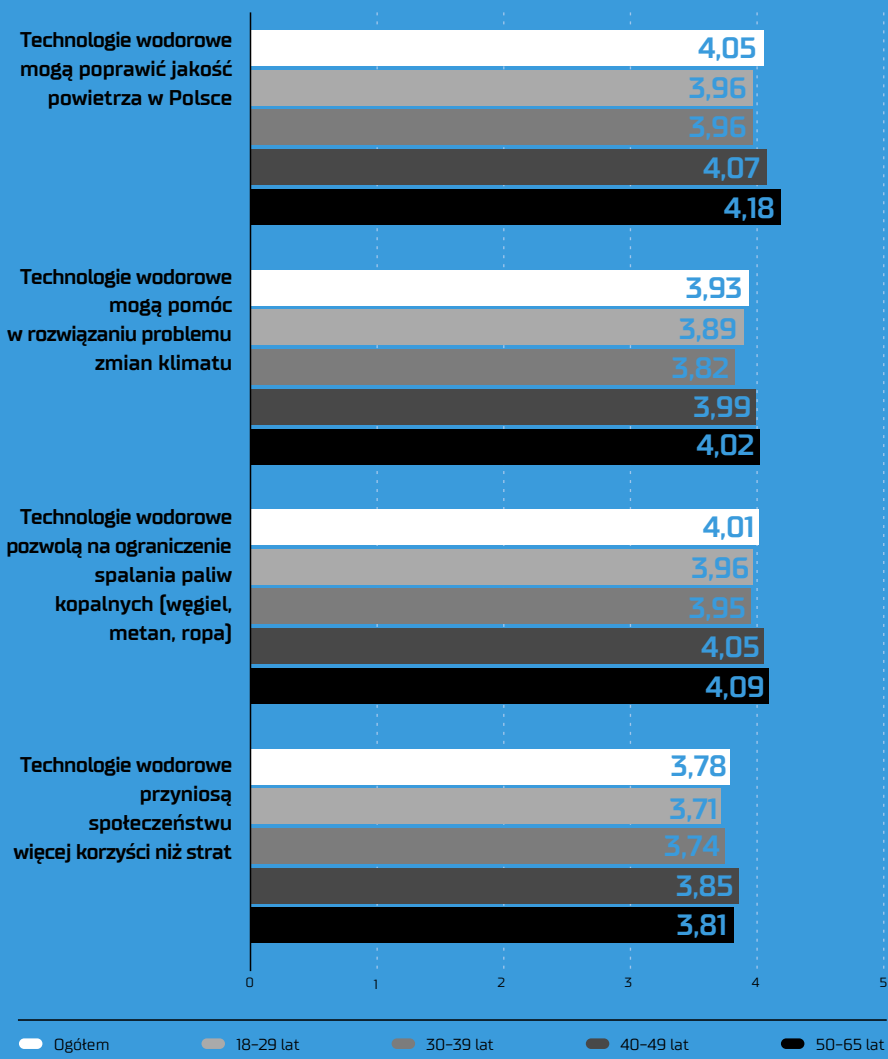
Wartości dot. technologii wodorowych w polskim społeczeństwie¹¹⁹

¹¹⁹. Badanie CAWI przeprowadzone na reprezentatywnej próbie mieszkańców Polski pod względem płci, wykształcenia i miejsca zamieszkania (N=2008) wśród osób w wieku 18-65 lat



RYSUNEK 17.

Optymizm technologiczny względem wodoru



energetyki, dbałości o środowisko naturalne. Jednocześnie kolokacja „zielony wodór” używana w dyskursie ma jednoznacznie pozytywny wydźwięk i jest zestawiana z takimi kategoriami jak: ekologiczność, czysta energia.

WARTOŚCI ŚRODOWISKOWO-EKOLOGICZNE

Wartości środowiskowe – dotyczące zarówno poziomu indywidualnych praktyk, jak i zbiorowego życia – we wszystkich badaniach zajmowały najwięcej przestrzeni.

Dla Polek i Polaków ważny jest pozytywny wpływ technologii wodorowych na środowisko naturalne (43%). Jest to druga w kolejności najważniejsza wartość dla respondentów w kontekście funkcjonowania technologii wodorowych. Wpływ na środowisko naturalne częściej wskazywały kobiety, osoby starsze, zwolennicy Koalicji Obywatelskiej, Lewicy i Polski 2050, korzystające często z roweru lub komunikacji zbiorowej, nieufające rządowi, ale ufające organizacjom pozarządowym.

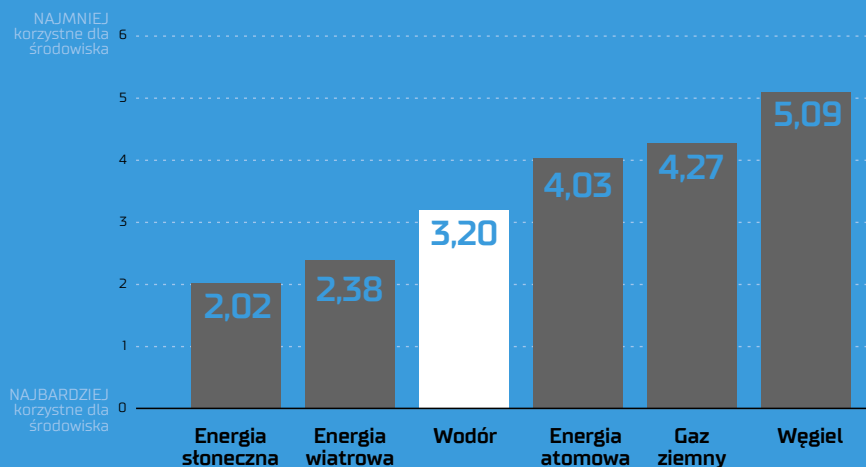
Rozwój technologii wodorowych jest dla badanych ważnym elementem transformacji energetycznej (średnia 3,89). W badaniu FGI badani spontanicznie wskazywali wyzwania społeczne związane z energią. Zaraz po wyartykułowaniu obaw związanych z (wysokimi) cenami energii wskazano na niewystarczające wykorzystanie OZE w porównaniu do paliw tradycyjnych, które generują emisję zanieczyszczeń i przyczyniają się do degradacji środowiska.

Omawiając optymizm technologiczny związany z wodorem, badani oceniali technologie wodorowe m.in. pod kątem poprawy jakości powietrza w Polsce, rozwiązywania problemu zmian klimatycznych czy ograniczania spalania paliw kopalnych. Z badań CAWI wiemy, że im młodszy respondent, tym bardziej pozytywnie jest nastawiony do technologii wodorowych. Respondenci w wieku 50–65 lat najbardziej entuzjastycznie ocenili możliwość poprawy jakości powietrza w Polsce dzięki technologiom wodorowym. Kwestie dotyczące poprawy jakości powietrza zostały również sumarycznie najlepiej ocenione przez wszystkich respondentów, co wynika zapewne z lokalnego usytuowania problemu, związku jakości powietrza z indywidualnymi praktykami i zdrowiem. Sumarycznie najniżej oceniono możliwość rozwiązania problemu zmian klimatu.

Jednak uczestnicy badania FGI wskazywali, że efektywność pozyskiwania energii, zwłaszcza ze źródeł odnawialnych, zarówno dla pojedynczych gospodarstw, jak i całego systemu energetycznego kraju, jest istotna w kontekście walki ze zmianami klimatycznymi. Możliwość ograniczania spalania paliw kopalnych została oceniona wysoko, co może wynikać z ekonomicznych reperkusji dotyczących cen energii i paliwa dotykających jednostki oraz gospodarstwa domowa, a dodatkowo z aspektów politycznych związanych z bezpieczeństwem energetycznym, które stało się pilną potrzebą szczególnie w kontekście agresji Rosji na Ukrainę i jej gospodarczych konsekwencji. W badaniu CAWI respondenci zostali poproszeni o uszeregowanie sześciu technologii energetycznych według kolejności od najbardziej korzystnych dla środowiska do najmniej. Wodór jest postrzegany w takim rankingu jako

RYSUNEK 17.

Ranking postrzegania technologii jako korzystnych dla środowiska



RYSUNEK 18.

Przekonania lokalne (dot. respondenta bezpośrednio) odnoszące się do aspektów środowiskowo-ekologicznych



trzecia najbardziej ekologiczna technologia po energii słonecznej i wiatrowej, a przed energią atomową, gazem ziemnym i węglem. Takie miejsce w rankingu jest niezależne od płci, wieku, wykształcenia miejsca zamieszkania, regionu i dochodu.

Mężczyźni przypisują wodorowi i energii atomowej statystycznie lepszą rolę dla środowiska naturalnego i gorszą dla węgla oraz gazu ziemnego. Postrzeganie wodoru jako korzystnego rozwiązania dla środowiska naturalnego rośnie wraz z poziomem wykształcenia. Podobnie rzecz ma się z energią atomową i słoneczną. Natomiast wraz ze wzrostem wykształcenia spada postrzeganie gazu ziemnego i węgla jako korzystnych dla środowiska.

Mimo jednoznacznie negatywnych ocen paliw kopalnych Polki i Polacy podchodzą zdroworozsądkowo również do potencjalnych negatywnych konsekwencji środowiskowych związanych z rozwojem OZE i technologii wodorowych. Spontanicznie w badaniu FGI badani wskazali na problem związany z utylizacją baterii i innej infrastruktury energetycznej.

Badani ocenili poszczególne wartości dotyczące środowiska odnoszące się do respondentów indywidualnie. Wynika z tych danych, że polskie społeczeństwo ma coraz większą świadomość środowiskową i klimatyczną, a co za tym idzie – problemy globalne związane ze źródłami energii i zmianami klimatycznymi zaczynają funkcjonować w świadomości jako lokalne i indywidualne. Technologie wodorowe powinny wpisywać się – w warstwie symbolicznej, ale przede wszystkim materialnej oraz społecznej – w pewien nurt globalnych wyzwań klimatycznych i energetycznych, aby mogły być z powodzeniem wdrażane i absorbowane w tkance społecznej.

WARTOŚCI EKONOMICZNE

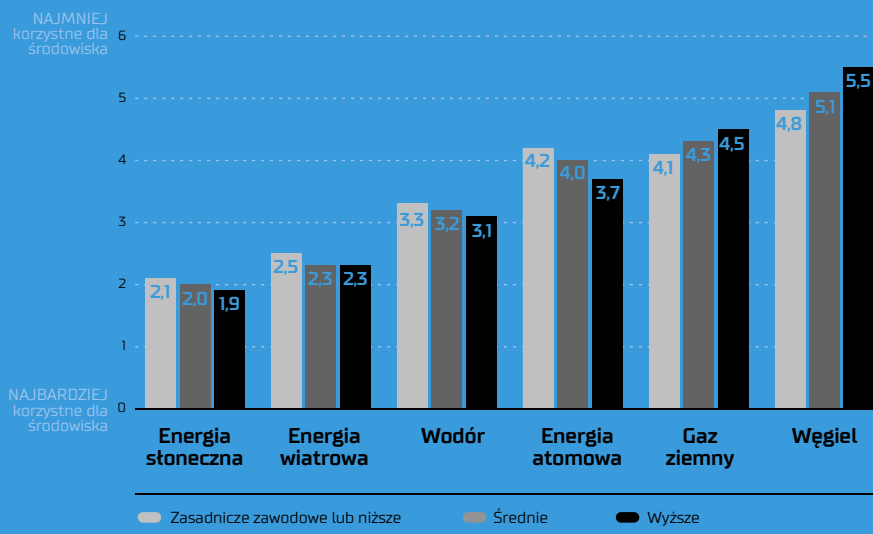
Mimo optymizmu związanego z OZE i deklarowanej troski o środowisko ekologia musi być ekonomiczna. To znaczy, że ekonomiczne aspekty są dla badanych szczególnie istotne. Zgodnie z wynikami badania CAWI wódór jawi się jako jedno z najdroższych źródeł energii. Jako droższa postrzegana jest tylko energia atomowa. Wraz ze wzrostem wykształcenia rośnie traktowanie wodoru jako droższego źródła energii dla gospodarstw domowych.

Mężczyźni uważają wódór za droższe źródło energii dla gospodarstw domowych częściej niż kobiety, natomiast w przypadku postrzegania kosztów energii wiatrowej jest odwrotnie – to kobiety częściej wskazują na energię wiatrową jako droższą. Kwestie finansowe stosunkowo częściej są ważne dla mieszkańców domów jednorodzinnych i dla osób w wieku 30–39 lat.

Z drugiej strony według respondentów alternatywne źródła energii początkowo wymagają większych inwestycji, ale w ostatecznym rozrachunku mogą okazać się nie tylko bardziej korzystne dla środowiska, ale również tańsze, dlatego warto w nie inwestować. Uczestnicy badania intuicyjnie zauważali, że zmiana źródła energii na wodorowe musi wiązać się z początkowymi dużymi kosztami, podobnie jak każda nowa technologia. Jednocześnie dostrzegali sens takich inwestycji mimo opóźnionego zwrotu. W badaniu CAWI wskazywano, że technologie wodorowe powinny być fi-

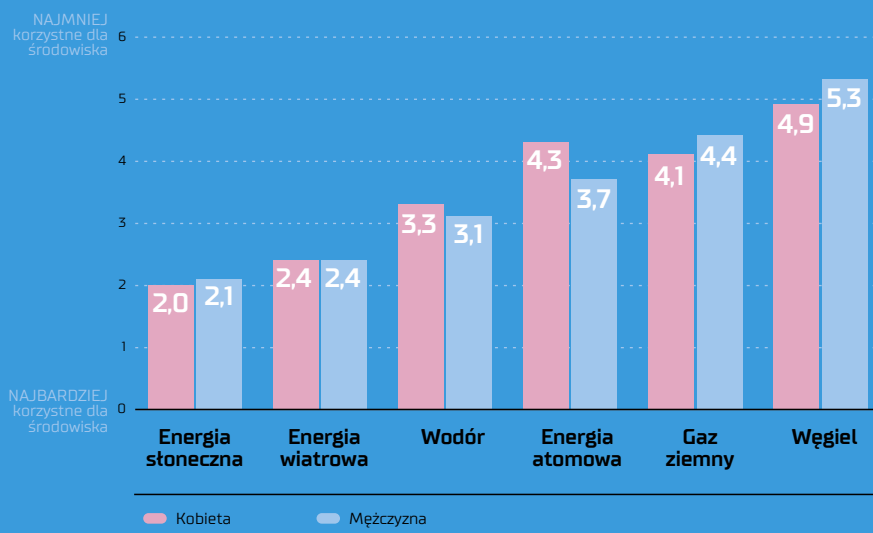
RYSUNEK 20.

Ranking postrzegania kosztów wodoru jako źródła energii dla gospodarstwa domowego ze względu na poziom wykształcenia



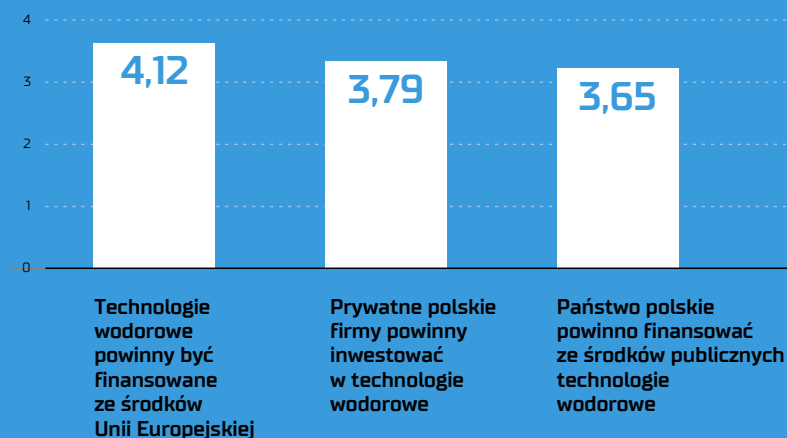
RYSUNEK 21.

Ranking postrzegania kosztów wodoru jako źródła energii dla gospodarstwa domowego wśród kobiet i mężczyzn



RYSUNEK 22.

Przekonania dotyczące finansowania technologii wodorowych



nansowane kolejno przez: Unię Europejską, prywatne polskie firmy oraz państwo polskie.

Polki i Polacy obawiają się o ceny energii w przyszłości, co ocenili najwyżej spośród przekonań dotyczących respondentów indywidualnie (średnia 4,41). Respondenci wskazywali również spontanicznie w badaniu FGI na to samo wyzwanie: wysokie ceny energii są dużym obciążeniem dla budżetów gospodarstw domowych i wymagają poszukiwania bardziej ekonomicznych rozwiązań. Rozwiązaniem optymalizującym konsumpcję energii jest oszczędzanie energii i dbałość o efektywność energetyczną, co pozwoli mniej płacić za energię. Utrzymanie takiego trendu – nawet w przypadku spadku cen energii i poprawy koniunktury na rynku energii – w połączeniu z tym, jak wodór jest postrzegany w kategoriach środowiskowych, może być trwałe, a przede wszystkim pozytywnie wpływać na postrzeganie technologii wodorowych. Jednym z czynników akceptacji dla technologii wodorowych jest ich ekonomiczna opłacalność.

Argument ekonomiczny byłby przekonujący, gdyby okazało się, że korzystanie z energii pochodzącej z wodoru jest tańsze niż energia z innych źródeł. Według badanych kwestie finansowe w niektórych przypadkach są głównym ograniczeniem. Badani zapytani w kontekście samochodów napędzanych na wodór, odpowiedzieli, że ich cena jest przeszkodą w zakupie. Natomiast w dłuższej perspektywie oszczędności finansowe wynikające z korzystania z wodoru mogą skłonić niektóre osoby do zmiany samochodu.

WARTOŚCI SPOŁECZNE

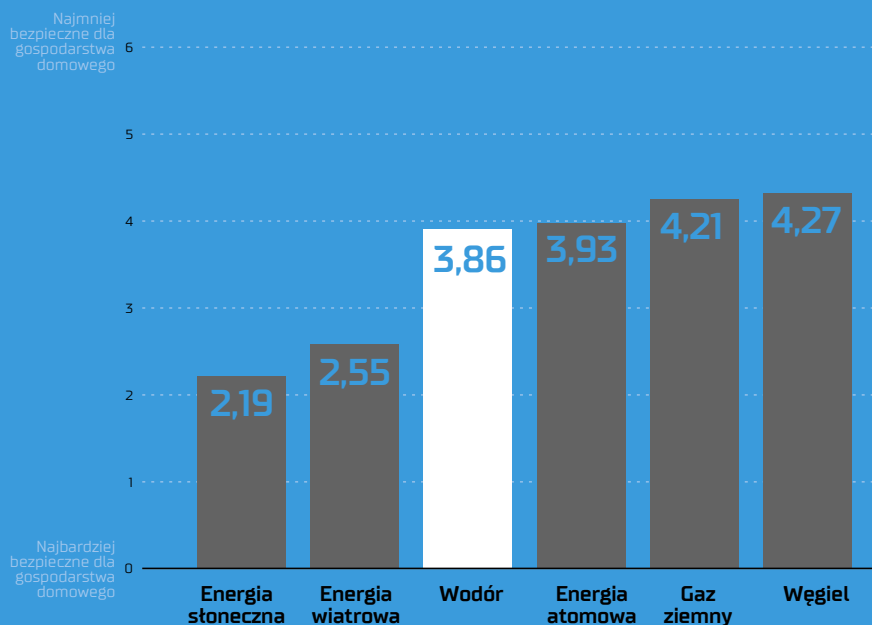
Respondenci wskazywali, że zakup samochodu wodorowego wiąże się z posiadaniem odpowiednio wysokiego statusu społeczno-ekonomicznego. Taki samochód może pełnić funkcję markera statusowego. W kontrze do autobusów wodorowych wykorzystywanych w komunikacji publicznej, gdzie technologie wodorowe stają się zdecydowanie bardziej inkluzywne i masowe, samochód wodorowy jest technologią postrzeganą jako ekskluzywna i ekstrawagancka. Może dojść do sytuacji, w której technologie transportowe wykorzystujące wodór będą społecznie oceniane w sposób zróżnicowany na niekorzyść samochodów wodorowych. W fazie, w której auta i autobusy wodorowe nie są mocno upowszechnione, należy zadbać o postrzeganie samochodu wodorowego jako zasobu dostępnego w przyszłości przede wszystkim przedstawicielom klasy średniej. Wizerunek samochodu wodorowego może być kształtowany w kierunku prestiżowego dobra społecznego, co jest dodatkowym czynnikiem motywującym, lecz powinien być osiągalny dla tej największej grupy potencjalnych nabywców i użytkowników.

W kontekście wartości społecznych badani wskazywali również w badaniu FGI na:

- zaangażowanie społeczne w działania na rzecz ochrony środowiska, czym również chcą dawać przykład innym;
- myślenie o przyszłych pokoleniach i długoterminowych korzyściach z korzystania z OZE, co ma pomóc w tym, aby nie utracić przyszłości;

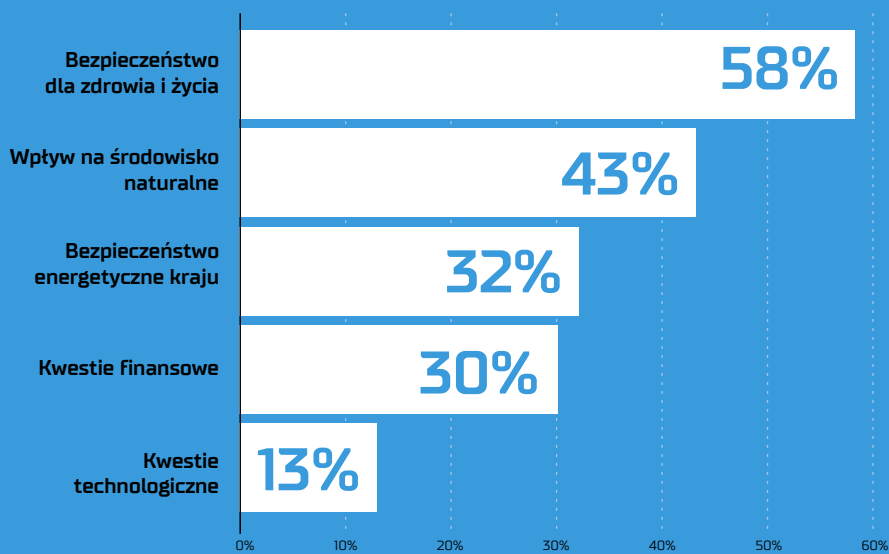
RYSUNEK 23.

Ranking postrzegania technologii jako bezpiecznej dla gospodarstwa domowego¹⁷



RYSUNEK 24.

Najważniejsze wartości, których należy przestrzegać przy tworzeniu nowych technologii w energetyce¹⁷



- wpływ otoczenia i opinii na decyzje i postawy związane z technologiami wodorowymi oraz obecność technologii wodorowych lub doświadczeń z nimi związanych w społeczności lokalnej lub bliskim otoczeniu;
- modę i trendy społeczne, gdzie z jednej strony część społeczeństwa chce być na bieżąco z tym, co modne i popularne (należy pamiętać, że cechą mód jest to, że są przejściowe, dlatego w odniesieniu do technologii wodorowych korzystniejsze jest ich promowanie jako trendu rozwojowego, a nie mody);
- część konsumentów i obywateli może być przywiązania bardziej do tradycyjnych niż progresywnych wartości i stylu życia (dla tej grupy odwołanie do nowoczesności i postępowości technologii wodorowych nie będzie istotnie oddziałującym czynnikiem akceptacji lub zmiany przekonań – szczególnie w przypadku starszych pokoleń);
- rozwój młodszych pokoleń wraz z innowacjami energetycznymi, które mogą stać się dla nich normą technologiczną. Młodzi aktualnie mogą nie być największą siłą sprawczą pod względem nabywczym, ale w przyszłości ta sytuacja ulegnie przecież zmianie.

WARTOŚCI TECHNOLOGICZNE

Technologie wodorowe kojarzą się przede wszystkim z nowoczesnością, postępem, co wykazały zarówno badania FGI, jak i analiza dyskursu w mediach tradycyjnych. Najczęściej pojawiające się skojarzenia z technologiami wodorowymi dotyczyły nowoczesności, przyszłości, innowacji, nowych technologii. Wszystkie te skojarzenia były pozytywne i wywoływały takie same emocje. Według badanych nowoczesne technologie przynoszą postęp, który jest z definicji korzystny. Wskazuje to na wysoki poziom technooptymizmu, który jednak błędnie, gdy jest zderzony z ekonomicznymi realiami funkcjonowania technologii wodorowych.

Otwartość na nowe technologie oraz zaufanie do nich stanowią dwie bardzo ważne wartości przy wdrażaniu technologii wodorowych. Jednym z nich jest brak otwartości na nowe technologie, która związana jest również z niechęcią do zmiany nawyków i przyzwyczajzeń związanych z korzystaniem z tradycyjnych źródeł energii. Drugim jest brak zaufania do nowych technologii, w tym technologii wodorowych, co może wynikać z dostępności infrastruktury, braku wiedzy co do zalet i wad wynikających z korzystania z niej czy braku umiejętności korzystania z niej. Badania CAWI wskazują, że kwestie technologiczne jako ważne częściej wskazują mężczyźni i osoby w wieku do 39 lat oraz korzystający często z różnych środków transportu, w tym samochodu, komunikacji międzymiastowej, osoby ufające sąsiadom i innym ludziom (nieznajomym, innej religii, z innego kraju) oraz władzom lokalnym, ale nieufające policji.

WARTOŚCI DOTYCZĄCE BEZPIECZEŃSTWA

Wartości te funkcjonują zarówno jako wyznaczniki nastawienia, zachowań i działań jednostek oraz grup społecznych. Są wielowymiarowe i przekrojowe pod względem społecznego usytuowania. Postrzegają się je jako bezpie-

czeństwo energetyczne na poziomie narodowym oraz technologiczne na poziomie jednostkowym i makrospołecznym.

Zgodnie z wynikami badania CAWI wodór jest postrzegany jako czwarta najbezpieczniejsza technologia dla gospodarstwa domowego (po węglu, energii atomowej, gazie ziemnym, a przed energią wiatrową i energią słoneczną). Ranking ten nie jest istotnie statystycznie różny dla grup płci, wieku, wykształcenia, wielkości miejscowości zamieszkania i dochodu.

Według badanych przy tworzeniu nowych technologii w energetyce należy kierować się 1) bezpieczeństwem dla życia i zdrowia oraz 2) bezpieczeństwem energetycznym kraju. Z pierwszą wartością częściej identyfikowały się kobiety, osoby najstarsze, z wykształceniem zawodowym lub niższym, zarabiające poniżej mediany, nie ufające instytucjom innym niż policja i organizacje pozarządowe. Drugą wartość częściej wskazywali mężczyźni [32%], zwolennicy PiS oraz ufający rządowi tej partii.

Respondenci pytani o swoje przekonania, wskazali w trzeciej kolejności, że rozwój technologii wodorowych przyczynia się do niezależności energetycznej Polsce (średnia 3,86).

Natomiast badania mediów nowoczesnych pokazały, że w dyskursie obecnym w infosferze cyfrowej, wodór jest jednocześnie lepiej oceniany niż ropa naftowa i gaz ziemny. Wynika to z tego, że internauci wskazują go jako szansę na uniezależnienie energetyczne od Rosji czy ochronę środowiska.

4.4. Podsumowanie i wskazówki: wartości i postawy

Wodór dla Polek i Polaków jest trzecią najbardziej ekologiczną technologią energetyczną (po energii słonecznej i wiatrowej, przed energią atomową, gazem ziemnym i węglem). Im bardziej wykształcony badany, tym lepiej ocenia wodór jako korzystne rozwiązanie dla środowiska. Rozwój technologii wodorowych jest dla badanych ważnym elementem transformacji energetycznej (szczególnie pod względem obniżenia kosztów energii). Dla Polek i Polaków ważny jest pozytywny wpływ technologii wodorowych na środowisko naturalne. Mimo wielu pozytywów związanych z rozwojem OZE i zielonych technologii energetycznych dostrzegają potencjalne negatywne konsekwencje związane z rozwojem OZE i technologii wodorowych. Badani najlepiej oceniają w kolejności: możliwość poprawy jakości powietrza dzięki technologiom wodorowym, ograniczenie spalania paliw kopalnych i rozwiązanie problemu zmian klimatu.

Technologie wodorowe kojarzą się przede wszystkim z nowoczesnością, postępem. Najczęściej pojawiające się skojarzenia z technologiami wodorowymi dotyczyły nowoczesności, przyszłości, innowacji i nowych technologii. Wszystkie były więc pozytywne i wywoływały takie same emocje. Według badanych nowoczesne technologie przynoszą postęp, który jest z definicji korzystny. Wskazuje to na wysoki poziom techno optymizmu, który jednak błędnie, gdy jest zderzony z ekonomicznymi realiami funk-

cjonowania technologii wodorowych. Otwartość na nowe technologie oraz zaufanie do nich stanowią dwie bardzo ważne wartości przy wdrażaniu technologii wodorowych. Otwartość na nowe technologie związana jest z podatnością do zmiany nawyków i przyzwyczajeń związanych z korzystaniem z tradycyjnych źródeł energii. Zaufanie do nowych technologii, zależy np. od dostępności infrastruktury, wiedzy co do zalet i wad wynikających z korzystania z niej czy umiejętności korzystania z niej.

Ekologia i technologie wodorowe muszą być ekonomicznie opłacalne – to właśnie ekonomiczne aspekty technologii wodorowych są dla badanych szczególnie istotne. Aktualnie wodór jest postrzegany jako jedno z najdroższych źródeł energii, a wraz ze wzrostem wykształcenia nasila się postrzeganie wodoru jako najdroższego źródła energii dla gospodarstwa domowego. Mężczyźni częściej niż kobiety oceniają wodór jako droższy. Kwestie finansowe są ważne dla mieszkańców domów jednorodzinnych i osób w wieku 30–39 lat. Według badanych kwestie finansowe w niektórych przypadkach są głównym ograniczeniem. Respondenci dostrzegają, że zmiana źródła energii na wodorowe musi wiązać się z początkowymi dużymi kosztami, podobnie jak każda nowa technologia. Jednocześnie dostrzegali sens takich inwestycji mimo opóźnionego zwrotu.

Samochód wodorowy może pełnić funkcję markera statusowego (jest dostępny osobom o wysokim statusie społeczno-ekonomicznym). W kontrze do autobusów wodorowych wykorzystywanych w komunikacji publicznej, gdzie technologie wodorowe stają się zdecydowanie bardziej inkluzywne i masowe, samochód wodorowy jest technologią postrzeganą jako ekskluzywna i ekstrawagancka.

Wodór jawi się jako czwarta najbezpieczniejsza technologia dla gospodarstwa domowego (po węglu, energii atomowej, gazie ziemnym, a przed energią wiatrową i energią słoneczną). Według badanych przy tworzeniu nowych technologii w energetyce należy kierować się 1) bezpieczeństwem dla życia i zdrowia oraz 2) bezpieczeństwem energetycznym kraju.

Wskazówki:

- Im młodszy respondent, tym lepiej nastawiony do technologii wodorowych. Budowanie grupy odbiorców i konsumentów w młodszych grupach będzie bardziej perspektywiczne niż przekonywanie starszych i najstarszych, dlatego w pierwszej kolejności warto skupić uwagę i komunikację na osobach młodszych.
- Zorganizowanie demonstracji lub wystaw prezentujących technologie wodorowe w lokalnych społecznościach, w szczególności na etapach przedinwestycyjnych, może podnieść poziom akceptacji i zaufania.
- Możliwość rozwiązania problemu zmian klimatu nie może być głównym argumentem w komunikacji ze społeczeństwem na temat technologii wodorowych – może być towarzyszącym. Argument ten występujący autonomicznie nie jest przekonujący. Natomiast **paradygmat środowiskowo-ekologiczny będzie skuteczniejszy, jeżeli zostanie połączony z kwestiami: efektywności energetycznej.** Ograniczania wykorzystywania paliw kopalnych jest istotne z perspektywy ekonomii i bezpieczeń-

stwa energetycznego dla jednostek i gospodarstw domowych oraz na poziomie państwa oraz będzie odpowiednio kierowany do odbiorców, czyli z uwzględnieniem ich wykształcenia.

- Technologie wodorowe powinny wpisywać się – zarówno w warstwie symbolicznej, ale przede wszystkim materialnej oraz społecznej – w **nurt globalności wyzwań klimatycznych i energetycznych**, aby mogły być z powodzeniem wdrażane. Dodatkowo lokalne sytuowanie technologii wodorowych sprzyjałoby ich absorpcji, np. kampanie dopasowane do lokalnych warunków społeczno-kulturowych.
- **„Ekonomia, głupcze”**: wykorzystywanie argumentów ekonomicznych będzie przekonujące, gdyby okazało się, że korzystanie z energii pochodzącej z wodoru jest tańsze niż z innych źródeł.
- Polki i Polacy obawiają się o ceny energii w przyszłości. Aby technologie wodorowe były społecznie akceptowalne, powinny być ekonomicznie opłacalne. **Komunikacja oraz inwestycje będą skuteczne, gdy zaadresują kwestię obaw społecznych o wysokie ceny energii budżetów gospodarstw domowych**. Rozwiązaniem optymalizującym konsumpcję energii jest oszczędzanie energii i dbałość o efektywność energetyczną, co pozwoli mniej płacić za energię. Pozytywnemu kształtowaniu społecznego postrzegania technologii wodorowych będzie sprzyjać utrzymanie trendu oszczędzania energii i dbałość o wykorzystanie źródeł energii z poszanowaniem środowiska.
- Wizerunek samochodu wodorowego może być kształtowany w kierunku prestiżowego dobra społecznego, co jest dodatkowym czynnikiem motywującym, lecz powinien być osiągalny dla tej największej grupy potencjalnych nabywców i użytkowników. **Natomiast wizerunek wodorowej zbiorowej komunikacji publicznej powinien być kształtowany w kierunku inkluzyjności oraz prestiżu**.
- **Trend rozwojowy, a nie moda**. W odniesieniu do technologii wodorowych korzystniejsze jest ich promowanie i komunikowanie jako trendu rozwojowego, a nie mody. Mody (również na technologie energetyczne) są przejściowe, przez co technologie wodorowe mogą być postrzegane jako temporalne, co może być czynnikiem wpływającym na obniżanie poziomu akceptacji.
- Mówiąc o bezpieczeństwie w kontekście technologii wodorowych, należy odwoływać się przede wszystkim do: **1) bezpieczeństwa dla życia i zdrowia oraz 2) bezpieczeństwa energetycznego kraju**. Z pierwszą wartością częściej identyfikowały się kobiety, osoby najstarsze, z wykształceniem zawodowym lub niższym, zarabiające poniżej mediany, nieufające instytucjom innym niż policja i organizacje pozarządowe. Drugą wartość częściej wskazywali mężczyźni (32%), zwolennicy PiS.

4.5. Narracje i komunikacja wodorowa

Analiza komunikacji to badania narracji i dyskursu, które skupiają się na tym, jak ludzie konstruują i przekazują znaczenia za pomocą języka. Bada-

nie narracji oznacza także analizę oddziaływania treści, interakcji oraz wymiany znaczeń między ludźmi, ponieważ komunikacja jest funkcją społecznego postrzegania, odczuwania, wartości i postaw¹²⁰. W badaniu sposobów komunikowania analizuje się nadawane komunikaty zbudowane z elementów, które nadawcy przekazują świadomie bądź nieświadomie, a odbiorca odczytuje je zależnie od kontekstu osobistego, sytuacyjnego i kulturowego. Przyjmując klasyczną triadę komunikacji: nadawca – przekaz – odbiorca, należy pamiętać, że narracje i treści są produktem przekazu oraz wynikiem możliwości i chęci ich odbioru przez odbiorców. Poza analizowaniem samych komunikatów trzeba brać pod uwagę również nadawców i odbiorców przekazu. W tej części wykorzystano analizę dyskursu, Co oznacza, że analizowano, jak język służy do konstruowania znaczeń i współtworzenia społecznych i kulturowych norm. A także zastosowano krytyczną analizę dyskursu, aby zbadać, jak różne grupy są reprezentowane lub marginalizowane w dyskursie. Przedstawione w raportach badania są analizowane pod kątem nadawców przekazów, treści komunikatów w Internecie i mediach tradycyjnych oraz odbiorców przekazów o wodorze w badaniach FGI i CAWI.

120. Tomasz Goban-Klas, „Polskie społeczeństwo informacyjne a integracja Europejska”, w: Teresa Sasińska-Klas et al. (red.), Państwa Europy Środkowo-wschodniej w drodze do Unii Europejskiej: rola mediów, Rzeszów 2002, s. 7-16

NADAWCY

Rozważania na temat dyskursu dotyczącego wodoru w mediach tradycyjnych ukazują głównych nadawców, reprezentujących ekspertów, których można podzielić na cztery kategorie:

- reprezentanci wielkiego biznesu;
- przedstawiciele nauki;
- przedstawiciele samorządów;
- przedstawiciele trzeciego sektora.

Nadawcy wodorowi pochodzą z wielu obszarów społeczno-gospodarczych i reprezentują różne pola ekspertyzy, ale największy wpływ – zwłaszcza w prasie – ma reprezentacja biznesowa. W analizowanych artykułach eksperci naukowcy są mniej reprezentowani, najczęściej są zapraszani do roli komentatorów wypowiedzi liderów biznesu.

Ważnym nadawcą informacji jest prasa. Jej rola w kształtowaniu dyskursu wodorowego jest niezaprzeczalna, mimo najmniejszego zasięgu w porównaniu z innymi mediami. Prasa odgrywa funkcję opiniotwórczą, wyznaczając trendy dyskusji (tzw. *agenda setting*). To właśnie na łamach gazet narzucane są tematy, które stanowią punkt odniesienia dla debat prowadzonych w innych mediach.

Drugim ważnym nadawcą treści są portale internetowe. Na ich łamach spotykają się głosy ekspertów, których opinie często pojawiają się pierwotnie w prasie, a następnie są ponownie publikowane w przestrzeni online. Tutaj również dominuje tematyka „zielonego wodoru”, którego znaczenie jest wielowymiarowe, obejmuje aspekty ekologiczne, technologiczne oraz energetyczne.

Kolejną sferą oddziaływania jest telewizja, która pełni funkcję polityczną. Węższy kontekst polityki, rozumianej jako rywalizacja partii o władzę,

uwypatnia podziały między „nami a nimi”. Dyskurs wodorowy w telewizji jest silnie skoncentrowany na tym aspekcie, oddając głos politycznym liderom i ich perspektywom na polaryzację polityczną względem rozwiązań wodorowych i transformacji energetycznej w ogóle.

PRZEKAZY

Kluczowym elementem tego dyskursu jest kolokacja „zielony wodór”, która niesie ze sobą pozytywne konotacje: nowoczesność, zaawansowanie technologiczne, ekologiczność oraz czysta energia.

Najczęściej występujące pola znaczeniowe wodoru w przekazach odnoszą się do:

- wykorzystania wodoru w transporcie, opis sposobów promocji i wdrażania „transportu wodorowego”;
- wodoru jako symbolu zaawansowanych technologii, nowoczesności, rozwoju cywilizacyjnego;
- wodoru jako jednego z elementów systemowej zmiany, odejścia od paliw kopalnych, aktywnego reagowania na kryzys klimatyczny: „zielona transformacja” to również odniesienia do efektywnej energetyki, dbałości o środowisko naturalne;
- wykorzystania wodoru jako sposobu magazynowania energii, w tym energii z OZE: „magazyn energii”; szczególnie widoczna w dyskursie jest produkcja energii i plany jej magazynowania z wykorzystaniem wodoru dla farm wiatrowych na Morzu Bałtyckim: „morska energetyka”, „morska farma”.

Analiza przekazów ukazuje dynamiczny charakter dyskursu wodorowego, ewoluującego od abstrakcyjnego symbolu nowoczesnych technologii ku konkretnym inicjatywom i działaniom podjętym przez firmy i samorządy. Kluczowym momentem w tym procesie okazał się rok 2020, kiedy kolokacja „zielony wodór” pojawiła się na łamach prasy (wodór funkcjonuje w internecie w tym kontekście od 2019 roku). Ponadto polityka Unii Europejskiej (UE) w zakresie rozwoju gospodarki wodorowej stanowi istotny element treści dyskursu wokół wodoru. Wzmianki o presji wywieranej przez Komisję Europejską, działaniach promujących energetykę wodorową oraz zobowiązaniach krajów członkowskich wpisują się w kompleksową debatę o transformacji energetycznej. Jednym z kluczowych tematów jest również kwestia cen i opłacalności wytwarzania wodoru. W szczególności dla „zielonego wodoru” omawiane są prognozy opłacalności produkcji tego surowca oraz kontekst polityki UE w tym obszarze.

Ostatecznie analiza wskazuje na istotne wyzwania związane z politycznym uwikłaniem dyskursu, które szczególnie nasila się w programach telewizyjnych. Zamiast koncentrować się na aspektach merytorycznych, porusza kwestie polityczne, takie jak wsparcie poszczególnych partii dla energetyki wodorowej, co przystania kluczowe zagadnienia technologiczne i ekologiczne związane z wodorem.

W internetowych dyskusjach dotyczących wykorzystania wodoru w energetyce pojawiają się najczęściej jako wątki poboczne debat dotyczących innych – czasami powiązanych – zagadnień. Można wyodrębnić trzy dominujące konteksty, w których przywoływane są wątki wodorowe:

- szeroko rozumiany dyskurs ekologiczny związany z ociepleniem klimatu i emisją CO₂, planowaną europejską zieloną transformacją czy pakietem Fit for 55;
- procesy i zagadnienia o charakterze geopolitycznym ze szczególnym uwzględnieniem przepływów surowców strategicznych, uzależnienia/suwerenności energetycznej oraz wojny w Ukrainie;
- problemy z funkcjonowaniem oraz promocją elektromobilności¹²¹.

Jakościowa analiza dyskursu ujawniła jako zasadniczą cechę dotychczasowych debat o wodrze silne – choć różnie artykułowane – przekonanie, iż transformacja wodorowa nie jest, nie będzie i zapewne nie może być procesem o charakterze spontanicznej oddolnej innowacji. Oznacza to, że przekazy dotyczące wodoru, które pojawiają się często w kontekście rządowych, europejskich i państwowych inwestycji albo w ramach spiskowych interpretacji w kategoriach lobbystycznych i blokujących grup interesów, najprawdopodobniej nie będą miały entuzjastycznego społecznego odbioru w debacie publicznej.

Komunikaty na forach internetowych pod artykułami na portalach są niezwykle skromne, co wynika z tego, że debata społecznościowa w kontekście technologii nie jest powszechna i odbywa się głównie w ramach postów na platformie X (dawniej: Twitter). Z kolei niewielka liczba dyskusji o technologiach wodorowych na Facebooku¹²² koresponduje z obecnie dominującym ludycznym charakterem tej platformy, która przeważnie służy celom rozrywkowym, społecznym oraz rekreacyjnym. Natomiast w większym stopniu dialog na temat wodoru jest spotykany na platformie YouTube, gdzie filmy poruszające zagadnienia technologii wodorowej generują liczną reakcję komentujących, jednakże również prowokują dygresje i różne spontaniczne komentarze, które odchodzą od omawianego tematu. Analogicznie do platformy YouTube także TikTok pełni funkcję przestrzeni dyskursywnej w kontekście technologii wodorowej, z tą różnicą, iż obecnie obserwuje się tam zarówno mniej filmików, jak i komentarzy do nich w porównaniu do YouTube'a.

ODBIORCY

Odbiorcami przekazów dotyczących technologii wodorowych w Internecie i mediach tradycyjnych są różnorodne grupy społeczne, w tym:

- **NAUKOWCY I EKSPERCI:** zainteresowani badaniami i postępami w dziedzinie technologii wodorowej, szukający aktualnych informacji i analiz.
- **PRZEDSIĘBIORCY I INWESTORZY:** szukający możliwości inwestycji lub rozwoju biznesu w branży technologii wodorowej.
- **POLITYCY I DECYDENCI:** poszukujący informacji na temat potencjalnych korzyści i wyzwań związanych z implementacją technologii wodorowych na szczeblu krajowym lub międzynarodowym.

121. Ogólnie dyskurs wodorowy w ramach debat geostrategicznych na podstawie oceny eksperckiej jest przeważająco pozytywny, ale nie tak pozytywny jak dyskurs o elektromobilności – 64% wpisów pozytywnych i 14% negatywnych (Raport z badań internetowych 2023)

122. Wartością diagnostyczną tego nieadekwatnego dopasowania obecnej fazy rozwoju dyskursu wokół technologii wodorowej do specyfiki Facebooka jest fakt, iż w trakcie przeprowadzania analizy empirycznej napotymano na znaczną liczbę postów, które pozostawały bez odpowiedzi, co sugeruje brak inicjatywy w podejmowaniu dyskusji

- **PRACOWNICY BRANŻY ENERGETYCZNEJ:** poszukujący wiedzy na temat zmian w sektorze energetycznym związanych z technologią wodorową.
- **AKTYWISCI I ORGANIZACJE POZARZĄDOWE:** zainteresowani wpływem technologii wodorowej na ochronę środowiska i zrównoważony rozwój.
- **KONSUMENTY:** zainteresowani, np. korzyściami dla środowiska lub innowacjami w sektorze transportu związanych z technologią wodorową.
- **SPOŁECZNOŚCI LOKALNE:** zainteresowane wpływem technologii wodorowej na ich region, np. w kontekście rozwoju miejscowych rynków pracy.

Dlatego też informacje dotyczące technologii wodorowej muszą być przekazywane w sposób zrozumiały i dostosowany do różnych grup odbiorców, uwzględniając ich różnorodne zainteresowania, potrzeby i poziomy wiedzy. W mediach pojawia się cała gama perspektyw dotyczących wodoru: począwszy od pozytywnych, takich jak ekologiczność, a skończywszy na negatywnych, np. kontrowersjach politycznych i spiskach grup interesów. Ponadto zagrożenia ekologiczne wiążące się z gospodarką wodorową stosunkowo często podnoszone są w kontekstach geopolitycznych, w szczególności zaś jako element gry strategicznej o dominację w Europie.

Z kolei analiza ilościowa materiału empirycznego z badań internetowych ukazała, iż dyskurs dotyczący technologii wodorowych koncentruje się raczej na tych przestrzeniach mediów społecznościowych, które są zdominowane przez profesjonalistów i do nich przede wszystkim kierowane (w szczególności na platformie X, d. Twitter). Zatem również internetowy dyskurs dotyczący wodoru zdominowany jest przez charakterystyczne dla eksperckiego stylu komunikowania problemy i argumenty. Przyczynia się to do jego hermetyczności i sprawia, iż kwestie wodorowe pozostają zamknięte dla szerszej publiczności.

KOMUNIKATY I ICH OCENY

W Badaniu FGI podjęto próbę testowania wybranych komunikatów dotyczących rozwoju gospodarki wodorowej. Wyniki tej analizy wskazują, że zdecydowana większość przekazów wzbudzała nieufność i kojarzyła się uczestnikom z treściami propagandowymi.

Uczestnicy zwracali uwagę na reklamową formę komunikatów i brak konkretnych informacji, które mogłyby zwiększyć wiarygodność, np. danych statystycznych, opinii ekspertów naukowych. Uczestnikom nie podobał się, ich zdaniem, propagandowy wydźwięk niektórych komunikatów – wyrażony takimi sformułowaniami, jak „polski wodór”, „kolejne pokolenia Polek i Polaków”, „zaufanie do polskiego rządu”. Zmniejszyło to ich zaufanie do danego komunikatu, mieli poczucie, że ktoś chce ich na siłę do czegoś przekonać. Najlepiej został oceniony komunikat: „Polska plasuje się obecnie na trzeciej pozycji wśród europejskich producentów wodorów, tuż za Niemcami i Holandią. Już dawno wykorzystywaliśmy wodór w procesach przemysłowych, a teraz mamy szansę, żeby rozszerzyć to zastosowanie i dzięki temu zminimalizować zależność Polski od paliw kopalnych i przyczynić się do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych do środowiska”.

Szczegółowe opinie uczestników o poszczególnych komunikatach:

- Uczestnicy badań FGI wyrazili wątpliwości, co do wiarygodności komunikatów przede wszystkim ze względu na brak konkretów. Badani zwracali uwagę na to, że niezależność energetyczna jest kluczowa w obecnych czasach. Nie podobało im się określenie „polski wodór” ani „zielony wodór”, jeśli nie było dalszego wyjaśnienia terminu.
- Ogólnie uczestnicy wydają się być zainteresowani informacją o pozycji Polski jako producenta wodoru, ale mają także wiele pytań i wątpliwości dotyczących tego tematu, w tym kwestii polityki energetycznej kraju oraz prawdziwości komunikatu.

NAJLEPIEJ OCENIONY KOMUNIKAT:

„Polska plasuje się obecnie na trzeciej pozycji wśród europejskich producentów wodorów, tuż za Niemcami i Holandią. Już dawno wykorzystywaliśmy wodór w procesach przemysłowych, a teraz mamy szansę, żeby rozszerzyć to zastosowanie i dzięki temu zminimalizować zależność Polski od paliw kopalnych i przyczynić się do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych do środowiska”.

NAJGORZEJ OCENIONY KOMUNIKAT:

„Korzystanie z samochodów na wodór jest równie bezpieczne co korzystanie z pojazdów na inne paliwa. Zapytajcie pana Maćka kierowcę autobusu miejskiego z Lublina, czy czuje się mniej bezpiecznie, odkąd przesiadł się do autobusu wodorowego”.

4.6. Podsumowanie i wskazówki: narracje i komunikacja wodorowa

Eksperti są głównymi nadawcami i twórcami komunikatów wodorowych w mediach. Co za tym idzie, zwykli Polacy nie prowadzą powszechnie narracji o tej tematyce, a wodór nie istnieje w ich życiu codziennym. Narracje wodorowe są w Polsce hermetyczne i ekskluzywne.

Badanie pokazuje, że Polacy doceniają rolę ekspertów naukowych, a nie nadawców z sektora biznesu czy polityki. Testowanie ośmiu komunikatów w grupach fokusowych pokazało, że większość z nich została oceniona przez uczestników jako mało wiarygodna. Co więcej, **jakiegokolwiek** upolitycznienie narracji wodorowych w mediach może dodatkowo budować sprzeciw wobec tej technologii. W tym kontekście istotne jest tworzenie przekazów o wodorze jako konkurencji dla węgla przede wszystkim w aspekcie pozytywnym (ekologiczność i więcej miejsc pracy).

- **Dyskurs ekspercki** – należy wzmocnić rolę nauki (uniwersytety, instytuty badawcze) w kształtowaniu narracji o wodorze. Warto, by nadawcami byli częściej naukowcy, którzy tłumaczą korzyści i zagrożenia wynikające z wdrażania technologii wodorowych.
- Warto wykorzystać to, co już obecne w dyskursie medialnym, ale **trzeba odejść od eksperckiego, systemowego, bezosobowego sposobu mówienia** o technologiach wodorowych (prezes firmy X ogłosił, że do roku 2030, łączna produkcja wodoru wyniesie...). Warto włączyć w te działania dziennikarzy naukowych.
- Należy **wskazywać na możliwości wykorzystania technologii wodorowych** w codziennym użytkowaniu, aby nie były traktowane jako abstrakcyjny „pierwiastek chemiczny” czy niskoemisyjny nośnik energii.
- Komunikacja na temat technologii wodorowych odwołująca się do poprawy jakości powietrza powinna być przede wszystkim kierowana do grupy wiekowej 50–65. Niezależnie od wieku odbiorców **poprawa jakości powietrza może być najbardziej skutecznym komunikatem**.
- W dyskursie wyraźnie **brakuje objaśnienia podstawowych pojęć z perspektywy czytelnika/widza**. Należy zatem dążyć do wypełnienia tych luk w wiedzy:
 - należy jasno i zrozumiale, z jak największym zasięgiem (dotarciem do odbiorców) objaśniać różnice pomiędzy rodzajami wodoru, sposobami produkcji wodoru;
 - należy jasno i zrozumiale dla odbiorcy, z jak największym zasięgiem, objaśniać zasady działania pojazdów napędzanych wodorem, np. autobusów na wodór, warto publikować zestawienia ich wad i zalet, realne koszty użytkowania itp;
 - należy odwoływać się do efektywności ekonomicznej technologii wodorowych, wskazywać opłacalność zmiany, także z perspektywy użytkownika.
- W komunikacji dotyczącej energetyki wodorowej w Polsce warto wykorzystać terminy już funkcjonujące w debacie publicznej, takie jak: zielony wodór, czysty transport, strefa czystego transportu, paliwo przyszłości, magazyn energii, zielona transformacja, rozwój elektromobilności.
- Kategorią wywołującą **pozytywne konotacje jest „zielony wodór”** i na tej frazie warto skoncentrować działania promocyjne (bo ma ona jednoznacznie pozytywny wydźwięk, jest już obecna w dyskursie i umożliwia nawiązania do innych pól znaczeniowych, związanych z „zielonością”/proekologicznością).
- Należy **zneutralizować negatywny kontekst wprowadzania nowych technologii (w szczególności z inspiracji Unii Europejskiej)**, jako niszcze-

nia starego (racjonalnego) porządku (upadek branż – kopalnie), pozabawienie pracy, wzrost kosztów energii.

- Warto postarać się zbudować szeroką koalicję polityczną wokół technologii wodorowych, przynajmniej na poziomie dyskursu (jednoznaczne poparcie wprowadzanych zmian). Istotne wydaje się **przeciwdziałanie politycznemu zawłaszczaniu tematyki wodoru** przez poszczególne partie polityczne.
- Warto odwołać się do koncepcji globalizacji, **pokazując szanse dla polskiej gospodarki na rynku globalnym**, a jednocześnie promować konkretne korzyści z perspektywy lokalnej (np. autobusy wodorowe w transporcie publicznym)¹²³.

123. Opracowane punkty na podstawie raportu dr Troszyńskiego, pt. „Technologie wodorowe w polskich mediach w latach 2016 -2022. Analiza dyskursu” oraz syntez z pozostałych badań

ROZDZIAŁ 5

REKOMENDACJE: WSKAZÓWKI DLA STRATEGICZNYCH DZIAŁAŃ SPOŁECZNO- KOMUNIKACYJNYCH

124. CBOS, „Polacy o źródłach energii, polityce energetycznej i stanie środowiska”, red. Magdalena Gwiazda i Paweł Ruskowski, Warszawa 2016, <https://www.cbos.pl/PL/publikacje/diagnozy/034.pdf>, dostęp 02.02.2024
IBRIS, „Zielony potencjał społeczny - Polska i Europa Środkowo-Wschodnia”, Warszawa 2020

Polacy są pozytywnie nastawieni do ekologii oraz pozyskiwania energii z OZE¹²⁴, a wodór jest kojarzony neutralnie lub pozytywnie także ze względu na jego naturalne pochodzenie. Warto zatem w Polsce w większym stopniu budować świadomość ekologiczną i energetyczną, w szczególności stawiać nacisk na „zielone trendy” oraz ekologiczne i niskoemisyjne (dobre dla środowiska) rozwiązania, jakim jest „zielony wodór”.

W tym celu najważniejsze społeczno-komunikacyjne działania to:

- 1.** Budowanie społecznego trendu zielonego wodoru poprzez działania edukacyjne i promocyjne.
- 2.** Realizowanie stałego monitoringu mediów oraz wczesna prewencja wobec materiałów dezinformacyjnych i tzw. fake-newsów w mediach.
- 3.** Włączanie różnych grup interesariuszy do działań informacyjnych (w tym koordynacja strategii komunikacyjnych grup branżowych oraz stworzenie platformy współpracy Dolin wodorowych i Porozumienia Wodorowego w Polsce).

5.1. Budowanie społecznego trendu „zielonego wodoru” i kształtowanie postaw prośrodowiskowych (szkolenia i edukacja)

Rozwój technologii wodorowych powinien uwzględniać aspekty ekologiczne, społeczne i ekonomiczne. Zgodnie z badaniami opinii publicznej zrównoważenie tych trzech aspektów jest głównym oczekiwaniem Polaków, dlatego przede wszystkim istotne jest przekazywanie wielu informacji oraz materiałów edukacyjnych dla różnych grup odbiorców. Ważne jest kształtowanie społecznego postrzegania wodoru jako trendu rozwojowego i nowoczesnego, w duchu postępowej transformacji energetycznej, a nie przejściowej mody. Aby ten cel zrealizować, należy systemowo i strategicznie wprowadzać następujące działania:

KSZTAŁTOWANIE POSTAW „ZIELONYCH” I PROEKOLOGICZNYCH

Promowanie pozytywnych postaw wobec technologii wodorowych, które uwzględniają aspekty bezpieczeństwa i zrównoważonego rozwoju.

Oszczędzanie energii i dbałość o efektywność energetyczną, co pozwoli mniej płacić za energię – nawet w przypadku spadku cen energii i poprawy koniunktury na rynku energii – w połączeniu z tym jak wodór jest postrzegany w kategoriach środowiskowych, może być trwałe, a przede wszystkim pozytywnie wpływać na postrzeganie technologii wodorowych. Jednym z czynników akceptacji dla technologii wodorowych jest ich ekonomiczna opłacalność.

BUDOWANIE SPOŁECZNEGO ZAUFANIA I POPARCIA DLA WIEDZY NAUKOWEJ POPRZEZ UCZLIWE PRZEDSTAWIANIE KOMUNIKATÓW I MATERIAŁÓW EDUKACYJNYCH.

W szczególności należy w przystępny sposób wyjaśniać różnice pomiędzy rodzajami wodoru i sposobami jego produkcji. Komunikaty powinny być skierowane do różnych grup społecznych, w tym do osób dorosłych. Należy unikać skomplikowanego języka technicznego i skupić się na najważniejszych informacjach. Podobnie trzeba jasno i zrozumiale przedstawiać zasady działania pojazdów napędzanych wodorem. Warto publikować zestawienia ich wad i zalet, realne koszty użytkowania itp. Komunikaty powinny być atrakcyjne dla odbiorców i przedstawiać informacje w sposób przystępny. Należy podkreślać długoterminowe korzyści ekonomiczne wynikające z zastosowania technologii wodorowych. Komunikaty powinny wskazywać na opłacalność zmiany, także z perspektywy użytkownika.

EDUKACJA SPOŁECZEŃSTWA:

Tworzenie programów edukacyjnych i kampanii społecznych, które pomogą społeczeństwu zrozumieć znaczenie technologii wodorowych w kontekście zrównoważonego rozwoju i tego, jakie korzyści mogą przynosić.

Zapewnienie dostępu do materiałów edukacyjnych, publikacji, raportów i źródeł informacji, które pomogą w procesie nauki na temat technologii wodorowych.

Wiedza na temat technologii wodorowych przekazywana w ramach komunikacji społecznej powinna dwa elementy: kryzys energetyczny (wodór jako narzędzie przeciwdziałania kryzysowi) oraz transformację energetyczną (wodór jako kluczowy element transformacji). Komunikacja społeczna na temat zastosowania wodoru musi odnosić się do praktyk życia codziennego.

ZWIĘKSZENIE ŚWIADOMOŚCI SPOŁECZEŃSTWA NA TEMAT TECHNOLOGII WODOROWYCH ORAZ ZWIĄZANYCH Z NIMI ZAGROŻEŃ I KORZYŚCI (BALANS MIĘDZY TYMI DWOMA ASPEKTAMI) POPRZEZ:

- dostęp do informacji: zapewnienie dostępu do wiarygodnych źródeł informacji o technologiach wodorowych, ich bezpieczeństwie i wpływie na środowisko, aby społeczeństwo mogło podejmować świadome decyzje;
- tworzenie kampanii społecznych i informacyjnych, które pomogą zmienić postawy społeczeństwa wobec technologii wodorowych i zwiększyć akceptację dla nich;
- promowanie przykładów udanych zastosowań technologii wodorowych, które pokazują, że technologia ta może być stosowana bezpiecznie i korzystnie, a także zwiększy poziom otwartości i zaufania. Przekaz powinien zawierać wizualizacje i obrazy z fabryk i zakładów przemysłowych, skupiać się na zastosowaniach wodoru w codziennym życiu oraz być skierowany przede wszystkim do osób dorosłych.

ZAANGAŻOWANIE LOKALNYCH AMBASADORÓW I WYKORZYSTANIE DEMONSTRATORÓW TECHNOLOGII WODOROWYCH.

Ważny jest wpływ otoczenia i opinii na decyzje i postawy związane z technologiami wodorowymi oraz obecność technologii wodorowych lub doświadczeń z nimi związanych w społeczności lokalnej lub bliskim otoczeniu.

5.2. Prewencja dezinformacji (monitoring sfery publicznej/medialnej)

W komunikacji na temat wodoru należy podkreślać rzetelność źródeł naukowych, na których bazują poszczególne przekazy. Kluczowymi aktorami kampanii promocyjnych powinni być eksperci, przede wszystkim naukowcy. 62% respondentów wskazało, że chciałoby uzyskać wiedzę na temat nowych rozwiązań energetycznych. Działania powinny obejmować:

■ **KONSULTACJE Z EKSPERTAMI**

Współpraca z naukowcami, badaczami i ekspertami ds. technologii wodorowych w celu uzyskania wsparcia w dostarczaniu rzetelnych informacji i przeciwdziałaniu dezinformacji.

■ **PROMOWANIE FAKTÓW I DOWODÓW**

Dążenie do promowania rzetelnych źródeł informacji, opartych na faktach i naukowych dowodach, które mogą obalić dezinformację. Tworzenie treści, które są dostępne i zrozumiałe dla różnych grup społecznych.

■ **WSPÓŁPRACA Z MEDIAMI**

Nawiązywanie współpracy z mediami, aby promować rzetelne informacje i dostarczać im wiarygodne źródła danych. Dbanie o to, aby dziennikarze mieli dostęp do ekspertów ds. technologii wodorowych.

■ **TRANSPARENTNOŚĆ**

Zapewnienie przejrzystości w działaniach i komunikatach dotyczących technologii wodorowych, aby budować zaufanie społeczeństwa i wykaazywać zaangażowanie w walkę z dezinformacją.

W celu ograniczenia lęków społecznych i obaw związanych z bezpieczeństwem technologii wodoru należy opracować specjalne komunikaty i rzetelnie dane, które mogą być dystrybuowane dla różnych grup społecznych (więcej mężczyzn wyrażało wątpliwości i częściej kojarzyło wodór z wybuchami).

Warto wprowadzić dwustopniowy monitoring dyskursu wokół wodoru. Priorytetem powinno być ilościowe analizowanie dyskursu, tak by wychwycić moment jego ewentualnej autonomizacji. W tym celu wybrane media społecznościowe powinny być monitorowane przy użyciu słów kluczowych pod kątem występowania materiałów i dyskusji związanych z wodorem. Losowe próbki tych materiałów powinny być poddawane rutynowej analizie jakościowej w celu ewentualnego wychwycenia wątków, które do tej pory w debacie nie zostały zidentyfikowane.

W przypadku zarejestrowania wzmożonego zainteresowania wodorem dyskurs powinien być monitorowany pod kątem wychwycenia kluczowych słów i wątków związanych z „ramą spiskową”, czyli wszelkimi wątkami sugerującymi sterowany, odgórny i zakulisowy charakter transformacji wodorowej, obawami o bezpieczeństwo oraz słownictwem okółomedycznym [szkodliwy, zaraźliwy, choroba, diagnoza itp.].

Należałoby skoncentrować się na identyfikacji wyrażen opisujących doświadczenia koercyjne (przemoc, przymus, szantaż itp.), a także korupcję (np. układ, złodziejstwo, nepotyzm). Biorąc pod uwagę zebrany materiał, proponujemy, by monitoringiem w pierwszej kolejności objąć serwisy X [dawny Twitter] oraz YouTube.

KONIECZNE JEST POWSZECHNE ORGANIZOWANIE DZIAŁAŃ EDUKACYJNYCH NA RZECZ PREWENCJI DEZINFORMACJI.

W obecnych czasach potrzebna jest organizacja szkoleń (offline i online) w celu zwiększenia świadomości na temat potencjalnych zagrożeń związanych z dezinformacją oraz w zakresie skutecznych strategii wykrywania dezinformacji i korzystania z wiarygodnych źródeł informacji.

W przypadku technologii wodorowych należy opracować mechanizmy reagowania na dezinformację, w tym szybkie wycofywanie fałszywych informacji i dostarczania prawdziwych danych. Warto również przygotować warsztaty oparte na analizach przypadków, pozwalających na skuteczne rozpoznawanie dezinformacji i fałszywych informacji.

5.3. Włączenie interesariuszy społecznych i instytucjonalnych

Aby zrealizować cele PSW oraz skutecznie działać na rzecz wdrażania Strategii bezpieczeństwa technologii wodorowych, konieczne jest włączenie różnych grup i poszerzanie liczby interesariuszy. To zadanie powinno być realizowane poprzez:

- **ORGANIZACJĘ WSPÓŁPRACY Z INSTYTUCJAMI BADAWCZYMI**

Należy nawiązać aktywne partnerstwa z uniwersytetami i instytucjami badawczymi, aby promować badania nad bezpieczeństwem technologii wodorowych.

- **WYKORZYSTANIE MEDIÓW**

Należy odejść od eksperckiej terminologii.

Należy włączyć dziennikarzy naukowych, aby szerzyć zrozumiałe informacje o technologiach wodorowych.

- **STWORZENIE I INTEGRACJĘ SPOŁECZNOŚCI WODOROWYCH W NURCIE SPOŁECZNOŚCI ENERGETYCZNYCH**

Należy zainicjować wspólne inicjatywy i wydarzenia, aby budować silne społeczności zainteresowanych technologią wodorową.

Należy rozwijać zintegrowane sieci i zespoły branżowe wokół Dolin Wodorowych, jako platformy dla rozwoju technologii wodorowych.

Należy ustanowić lidera lub instytucję, która będzie koordynować działania w Dolinach Wodorowych i inicjować współpracę między regionami.

Należy zapewnić systemową komunikację oraz skuteczną współpracę między różnymi Dolinami Wodorowymi.

- **STWORZENIE SPOŁECZNOŚCI/PLATFORMY ONLINE**

Należy stworzyć żywą i atrakcyjną platformę online do wymiany wiarygodnych informacji i zwalczania dezinformacji o technologiach wodorowych.

- **ZAANGAŻOWANIE SPOŁECZEŃSTWA W BADANIA W NURCIE NAUKI OBYWATELSKIEJ (CITIZEN SCIENCE)**

Należy wprowadzić mechanizmy citizen science do procesów badawczych dotyczących technologii wodorowych.

Należy angażować zespoły badaczy i akademików w rozwijanie innowacyjnych rozwiązań technologicznych oraz w procesy testowania nowych technologii.

Należy inicjować spotkania w lokalnych społecznościach, aby dostarczać rzetelne informacje na temat technologii wodorowych i aktywnie angażować społeczność lokalną.

ROZDZIAŁ 6 PODSUMOWANIE I REKOMENDACJE

Z uwagi na znikomą wiedzę w przestrzeni publicznej dotyczącą wodoru oraz jego potencjalnych zastosowań konieczne jest wdrożenie skutecznej strategii komunikacyjnej. Istnieje wyraźna potrzeba zwiększenia dostępności informacji na ten temat, aby Polki i Polacy mogli poznać możliwości oraz korzyści płynące z wykorzystania technologii wodorowych.

Badania diagnostyczne wykazały, że uczestnicy, niezależnie od lokalizacji, wieku i płci, mają niewielką wiedzę na temat technologii wodorowych. Wykazują deficyt informacji dotyczących zastosowań wodoru w życiu publicznym. W związku z tym kluczowym celem strategii komunikacyjnej będzie dostarczenie rzetelnych i zrozumiałych informacji na temat różnorodnych aspektów związanych z wykorzystaniem wodoru. Wraz z rozwojem świadomości energetycznej i wyzwań kryzysu klimatycznego technologie wodorowe warto przedstawiać jako rozwiązanie możliwe do wdrażania lokalnie, regionalnie i globalnie. Budowanie świadomości energetycznej poprzez przedstawianie rozwiązań technologii wodorowych będzie wzmacniało także ekologiczne („zielone”) postawy społeczne.

Technologie wodorowe powinny wpisywać się – zarówno w warstwie symbolicznej, ale przede wszystkim materialnej oraz społecznej – w pewien nurt globalności wyzwań klimatycznych i energetycznych, aby mogły być z powodzeniem wdrażane w społeczeństwie polskim. Ponadto lokalne sytuowanie technologii wodorowych sprzyjałoby ich absorpcji (np. kampanie dopasowane do lokalnych warunków społeczno-kulturowych).

Należy zdawać sobie sprawę, że informacje o już istniejących zastosowaniach wodoru w różnych gałęziach gospodarki oraz o wysokiej pozycji Polski jako producenta wodoru mogą wzbudzać w społeczeństwie podejrzliwość. Dlatego też kluczowym elementem strategii będzie nie tylko przekazywanie faktów, ale również budowanie zaufania do tych informacji poprzez transpa-

rentność, edukację oraz dobór odpowiednich nadawców, którzy również gotowi są na otwarty dialog z różnymi grupami społecznymi.

Należy również skupić się na wyjaśnieniu powodów, dla których dotychczasowa wiedza na ten temat nie była szeroko rozpowszechniana. W ramach strategii komunikacyjnej konieczne będzie uwzględnienie kanałów dystrybucji informacji, tak aby dotrzeć do jak najszerszego grona odbiorców.

Podsumowując, strategia komunikacyjna powinna opierać się na dostarczaniu rzetelnych informacji, budowaniu zaufania i otwartym dialogu z społeczeństwem. Kluczowe będzie również zidentyfikowanie optymalnych kanałów komunikacji, które umożliwią skuteczne dotarcie do społeczeństwa oraz zwiększenie świadomości na temat technologii wodorowych.

Rekomendowane dalsze działania:

- **Opracowanie kompleksowego i długoterminowego planu komunikacyjnego dla technologii wodorowych.** Plan ten powinien opierać się na wynikach badań i uwzględniać potrzeby różnych grup społecznych.
- Tworzenie **pozytywnego trendu w kierunku zielonej energii/** zielonego wodoru w oparciu o jasne, zrozumiałe i atrakcyjne materiały edukacyjne. Materiały powinny opierać się na badaniach naukowych i powinny być przedstawiane w zrównoważony sposób, uwzględniając zarówno pozytywne, jak i negatywne aspekty technologii wodorowych.
- Monitorowanie dyskursu wokół wodoru w celu przeciwdziałania dezinformacji. Można to osiągnąć poprzez współpracę z mediami i platformami społecznościowymi w celu zapewnienia rozpowszechniania rzetelnych informacji.
- Zaangażowanie różnych grup interesariuszy w opracowywanie i wdrażanie planu współpracy. Pomoże to zapewnić skuteczność planu i spełnienie potrzeb wszystkich zainteresowanych stron.



