



Łukasiewicz

Instytut Organizacji i Zarządzania
w Przemysle ORGMASZ



BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH

VII - ZAŁOŻENIA TECHNICZNE I
TECHNOLOGICZNE ORAZ PRZEGLĄD
STRATEGII WODOROWYCH

BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH

VII

ZAŁOŻENIA TECHNICZNE I TECHNOLOGICZNE ORAZ PRZEGLĄD STRATEGII WODOROWYCH

Warszawa, czerwiec 2023 r.

Recenzenci: prof. dr. hab. inż. Piotr Wolański, dr inż. Katarzyna Stec, dr inż. Renata Kulesza, dr hab. inż. Grzegorz Wojtasiewicz, dr inż. Antoni Migdał, dr inż. Piotr Wieczorek, Damian Wijatyk, dr inż. Kamil Kulesza

Kierownik projektu: dr Katarzyna Iwińska

Zespół projektu: dr Katarzyna Iwińska, dr inż. Kamil Kulesza, dr hab. Michał Wróblewski, Joanna Grudowska

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



Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Organizacji i Zarządzania w Przemśle ORGMASZ
ul. Żelazna 87 00-879 Warszawa

SPIS TREŚCI

Spis treści	1
1. Wstęp	2
2. Analiza systemów zabezpieczeń dla technologii wodorowych	3
3. Strategie bezpieczeństwa wodorowego dla systemów przemysłowych i użytkowych .	5
3.1. Stacje tankowania detalicznego	5
3.2. Intermodalne rozwiązania transportowe drogowe, kolejowe, morskie	8
3.3. Systemy przemysłowe i przesyłowe	11
3.4. Systemy magazynowania i konwersji wodoru	15
3.5. Pozostałe kwestie	17
4. Strategie wodorowe dla systemów przemysłowych i użytkowych	18
4.1. Rozwiązania w obszarze detalicznym	18
4.2. Rozwiązania w obszarze samorządowym	20
4.3. Rozwiązania dla systemów przemysłowych	21
4.4. Pozostałe kwestie	23
5. Identyfikacja obszarów koniecznych do opracowania w istniejącym otoczeniu prawnym i technicznym	25
6. Scenariusze kryzysowe – cyberbezpieczeństwo i zapobieganie atakom terrorystycznym	26
7. Wnioski i rekomendacje	31
Bibliografia	36

1. WSTĘP

W niniejszym opracowaniu poddane analizie zostaną strategie wodorowe związane z bezpieczeństwem technologii wodorowych, oparte między innymi na wynikach wywiadów przeprowadzonych z przedstawicielami kluczowych gałęzi gospodarki wodorowej w Polsce.

Badanie polegało na przeprowadzeniu łącznie 24 wywiadów: 23 indywidualnych wywiadów pogłębionych (IDI, *Individual in-Depth Interview*) oraz jednego zogniskowanego wywiadu grupowego (FGI, *Focus Group Interview*) z ekspertami reprezentującymi instytucjonalnych interesariuszy gospodarki wodorowej. Badanie było realizowane od 31.01.2023 r. do 03.03.2023 r. w formule online. Wywiady były prowadzone techniką średnio-standaryzowaną (*semi-structured interview*). Badacz korzystał z opracowanego scenariusza wywiadu w zależności od grupy, jaką reprezentował respondent, lecz dysponował swobodą co do kolejności zadawania pytań, ich sformułowania oraz możliwości pogłębiania wątków, które w toku badania czy pojedynczych wywiadów zostały ocenione za wartę eksploracji ze względu na cele badania.

Badanie miało następujące cele:

- poznanie stanowiska ekspertów co do szans, ryzyk, zagrożeń i potrzeb wynikających z zapewnienia bezpiecznego i stabilnego funkcjonowania oraz wdrażania technologii wodorowych w polskiej gospodarce,
- określenie luk i deficytów, a także koniecznych i możliwych działań w obszarze szeroko pojętego bezpieczeństwa technologii wodorowych,
- porównanie perspektyw ekspertów wielu dyscyplin i branż gospodarki wodorowej w wymienionych aspektach,
- określenie aktualnego stanu polskiej gospodarki wodorowej i potencjalnych scenariuszy jej rozwoju na podstawie wiedzy eksperckiej.

Ekspertów, czyli uczestników wywiadów, do badania dobierano w sposób celowy. Główne kryteria jakie były brane pod uwagę to:

- reprezentowanie jednej z grup: przemysł, administracja publiczna, nauka,
- reprezentowanie poszczególnego ogniwa łańcucha wartości technologii wodorowych: wytwarzanie, transport, magazynowanie, użytkowanie i/lub istotnego otoczenia łańcucha,
- reprezentowanie instytucji o znacznym oddziaływaniu na rozwój gospodarki wodorowej i/lub specjalnych kompetencjach w zakresie gospodarki wodorowej.

Badani eksperci reprezentowali: przemysł, transport, publiczne instytucje naukowe i badawczo-rozwojowe, administrację publiczną oraz stowarzyszenia i instytucje branżowe. Badani często byli afiliowani jednocześnie przedsiębiorstwem, organizacjami branżowymi oraz innymi instytucjami związanymi z polską gospodarką wodorową. Taki dobór pozwala na opracowanie szerokiego spektrum możliwych problemów, widzianych z perspektyw różnych grup interesów. Uczestnicy badania pozostali zanonimizowani. Raport z wywiadów stanowi Załącznik nr 1 do niniejszego dokumentu.

2. ANALIZA SYSTEMÓW ZABEZPIECZEŃ DLA TECHNOLOGII WODOROWYCH

Dobór systemów zabezpieczeń w technologiach wodorowych podyktowany jest przede wszystkim wymogami legislacyjnymi oraz wytycznymi branżowymi w tym obszarze.

Do wyznaczenia takich zabezpieczeń konieczne jest przeprowadzanie wielopoziomowej analizy ryzyka dla danego produktu czy procesu związanego z technologią wodorową, zarówno w podejściu ilościowym, jak i jakościowym. W zależności od rozmiarów oraz charakterystyki projektu wodorowego wyznaczeniem rodzajów zabezpieczeń dla tej technologii zajmuje się interdyscyplinarny zespół złożony z członków organizacji na poziomie technicznym i organizacyjnym¹.

Wprowadzenie technologii wodorowych do organizacji musi implikować powstanie spójnej polityki bezpieczeństwa wodorowego. Poza kwestiami technicznymi, konieczne jest wyznaczenie obszarów odpowiedzialności oraz wyznaczenie jasnych procedur. Technologie wodorowe wymuszają na organizacji wypracowania tzw. kultury bezpieczeństwa, która łączy techniki informacyjne z identyfikacją zagrożeń oraz metodami zapobiegania scenariuszom kryzysowym. Ważne jest, aby obszar bezpieczeństwa wodorowego został włączony do programów jakościowych w organizacji oraz równie ważna jest edukacja obszaru zarządczego.

Głównymi obszarami koniecznymi do zabezpieczenia w technologiach wodorowych związanych z właściwościami wodoru, są m.in.²:

- możliwość tworzenia się mieszanin wybuchowych wodoru z innymi gazami,
- możliwość zapłonu wodoru oraz jego mieszanin,
- ekspozycja na niskie oraz wysokie temperatury.

Minimalizacja konsekwencji wynikających z zagrożeń związanych z technologiami wodorowymi obejmuje m.in.²:

- utrzymywanie zapasów wodoru na minimalnym, niezbędnym poziomie,
- minimalizacja technicznej możliwości tworzenia się mieszanin wodoru z tlenem,
- separacja możliwych źródeł zapłonu lub odpowiednie ich zabezpieczenie oraz dobór,
- kontakt z instalacją wodorową przez obsługę/użytkownika tylko w niezbędnym wymiarze,
- stosowanie odpowiednich technik usuwania wodoru,
- stosowanie specjalnych zabezpieczeń ochrony osobistej,
- wprowadzenie odpowiedniego systemu sygnalizacji zagrożeń oraz procedur i instrukcji postępowania.

Zabezpieczenia oraz technologie optymalizacyjne powinny być wprowadzone do cyklu życia technologii wodorowych już na etapie projektowym.

W przypadku minimalizacji możliwości tworzenia się niebezpiecznych mieszanin wodoru z tlenem stosuje się następujące zabezpieczenia:

- zabezpieczenia zbiorników oraz instalacji wodorowej przed wyciekiem czynnika, tj. zastosowanie odpowiednich urządzeń i aparatów,
- zabezpieczenia przed możliwością kontaktu wodoru z powietrzem,
- przeprowadzanie prób ciśnieniowych w etapie produkcyjnym urządzeń związanych z magazynowaniem, przesyłem i dystrybucją wodoru,
- stosowanie odpowiednich systemów wentylacyjnych, odprowadzających niebezpieczne mieszaniny wodoru z tlenem (rodzaj, lokalizacja)
- stosowanie odpowiedniego systemu detekcji wodoru (rodzaj, lokalizacja),
- system przedmuchowy oraz inne systemy usuwania wodoru z instalacji.

W przypadku minimalizacji możliwości wystąpienia reakcji zapłonu i/lub wybuchu mieszanin wodoru z tlenem stosuje się następujące zabezpieczenia:

- wszystkie związane z niekontrolowanym wyciekiem wodoru z instalacji przedstawione powyżej,
- odpowiednie zabezpieczenie przed ekspozycją wodoru i jego mieszanin na źródła zapłonu, tj. źródła elektryczne, termiczne oraz mechaniczne.

Poza odpowiednim zaprojektowaniem, produkcją oraz eksploatacją systemów wodorowych bardzo istotnym obszarem jest stosowanie odpowiednich systemów detekcji, w celu minimalizacji prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń kryzysowych.

Lokalizację czujników detekcji wodoru wyznacza się zgodnie z wytycznymi branżowymi oraz doświadczeniem personelu. Niezwykle efektywną metodą rozmieszczenia tych czujników jest przeprowadzenie symulacji numerycznych dyspersji^a wodoru, ponieważ istotną rolę w tym obszarze ogrywa również infrastruktura, otoczenie oraz lokalizacja (warunki pogodowe, obciążenie wiatrem i śniegiem, lokalizacja stacji tankowania w infrastrukturze miejskiej etc.).

Podstawowe rekomendacje normatywne dla rozmieszczenia czujników detekcji wodoru, to² :

- obszar możliwego gromadzenia się wodoru,
- systemy wentylacyjne doprowadzające i odprowadzające,
- obszar wynikający z możliwości dyspersji wodoru,
- inne wynikające z przeprowadzenia analiz numerycznych oraz doświadczenia.

Innym bardzo ważnym zastosowaniem czujników jest detekcja pożaru. Wszystkie czujniki powinny być wzorcowane tak, aby wykrywały odpowiedni poziom zagrożenia, pozwalając na odpowiednią reakcję systemu automatyki, człowieka, jak i dając czas na ewentualną, bezpieczną ewakuację personelu. W przypadku wykrywania pożaru stosuje się też kamery termowizyjne, gdyż płomień, jakim pali się wodór jest trudny do wykrycia bez specjalnych przyrządów.

Reasumując podstawowe systemy zabezpieczeń w technologiach wodorowych, to:

- właściwa polityka techniczno-organizacyjna w obszarze bezpieczeństwa,
- stosowanie odpowiednich aparatów detekcji związanych ze zdarzeniami niekontrolowanymi (dyspersja wodoru, pożar etc.),
- stosowanie odpowiednich systemów ostrzegawczych,
- stosowanie odpowiedniej automatyki przemysłowej, minimalizującej ryzyka,
- stosowanie odpowiednich zabezpieczeń infrastruktury, tj. np. przegród,
- stała kontrola człowieka nad systemem, korzystanie z doświadczenia.

^aDyspersja – z technicznego punktu widzenia (PWN), stan rozproszenia substancji w roztworze koloidalnym, zwyczajowo, stosowane poprzez ekspertów z zakresu bezpieczeństwa technologii określenie do opisywania zjawiska ruchu makroskopowego cząstek.

3. STRATEGIE BEZPIECZEŃSTWA WODOROWEGO DLA SYSTEMÓW PRZEMYSŁOWYCH I UŻYTKOWYCH

Celem stawianym zarówno przed przedsiębiorstwami, jak i użytkownikami detalicznymi jest między innymi minimalizacja emisji CO₂ oraz innych szkodliwych substancji, związanych z szeroko rozumianym wpływem działalności człowieka na środowisko naturalne. Drogowskazem w dekarbonizacji jest budowanie strategii osiągania celów związanych z ograniczeniem emisyjności. Jednym z podstawowych paliw alternatywnych, które obecnie są brane pod uwagę jest wodór. Jednakże przy rozpatrywaniu efektu środowiskowego związanego z wykorzystaniem wodoru należy też brać pod uwagę sposób produkcji, przechowywania oraz transportu wodoru. Obecnie ok 95%³ wodoru produkowanego w Unii Europejskiej pochodzi z procesu reformingu gazu ziemnego, któremu towarzyszy emisja CO₂. Strategicznym zatem wydaje się kierunek rozwoju ekologicznych metod produkcji wodoru, niestety kierunek ten wiąże się z dużymi wyzwaniami, również w obszarze bezpieczeństwa.

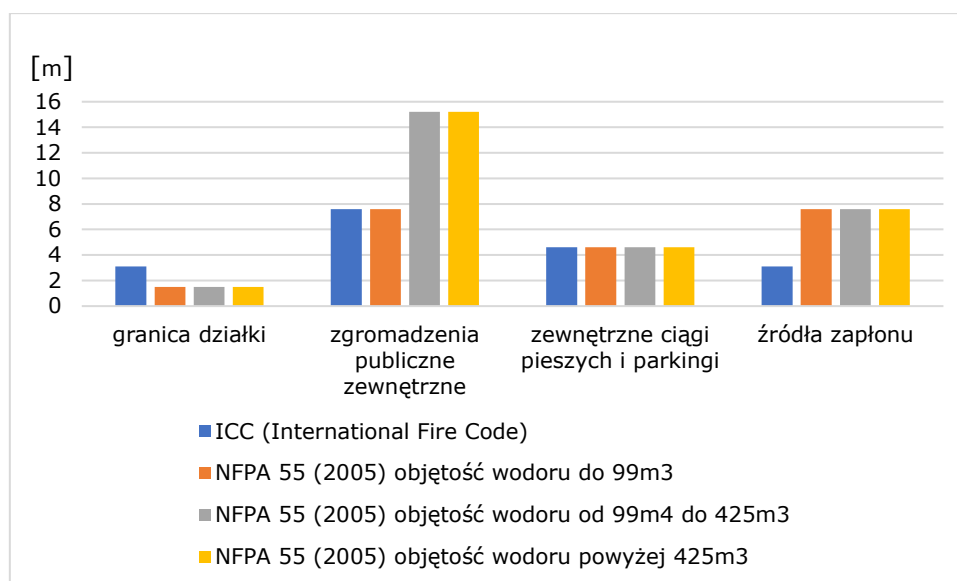
Proces reformingu jest procesem dobrze rozpoznanym pod względem bezpieczeństwa, największe wyzwanie w tym obszarze stanowią metody obecnie najbardziej rozwijane jako kierunki dekarbonizacji, tj. wytwarzanie wodoru metodą elektrolizy, transport i przesył wodoru oraz jego użytkowanie, w tym w obszarze detalicznym.

Kwestie bezpieczeństwa wodorowego są niezwykle istotnym elementem strategii związanych z dekarbonizacją.

3.1. STACJE TANKOWANIA DETALICZNEGO

Strategia bezpieczeństwa wodorowego dla stacji tankowania wodorem powinna obejmować zarówno obszary dostaw wodoru, jego przechowywania i przesyłu oraz z dystrybucji z uwzględnieniem dostępu do infrastruktury osób trzecich. Możemy wyróżnić stacje tankowania wodorem z infrastrukturą zarówno dla gazowego, jak i dla ciekłego wodoru, jednakże stacje tankowania ciekłym wodorem są jeszcze we wczesnej fazie rozwoju, z drugiej strony fakt, iż są przedmiotem badań implikuje konieczność zapoznania się z aspektami bezpieczeństwa w tym zakresie.

W przypadku stacji tankowania wodorem niezwykle istotna jest lokalizacja takiej stacji ze względu na normatywne minimalne odległości od otaczającej ją infrastruktury.



Rysunek 1 Minimalne odległości dla systemów magazynowania gazowego wodoru⁷.

Jak wynika z rysunku 1, minimalne odległości uzależnione są wprost od wielkości systemu tankowania wodorem.

W przypadku stacji tankowania wodorem w kwestii bezpieczeństwa należy rozpatrzyć następujące elementy i obszary⁴:

- metody dostarczania wodoru do dystrybucji:
 - system wytwarzania wodoru na miejscu (elektrolizery),
 - system dostaw z zewnątrz,
- sprężarki,
- system magazynowania wodoru,
- system rurociągów,
- system dystrybucji wodoru.

Stacje tankowania wodorem wykorzystują głównie wodór sprężony od 350 bar oraz 700 bar⁵, etap tankowania, ze względu na oczekiwany krótki czas oraz możliwość uszkodzenia infrastruktury wynikającej z właściwości wodoru, jest etapem krytycznym w obszarze bezpieczeństwa. Z tego względu niezwykle ważne jest rozmieszczenie czujników temperatury tak, żeby samo umieszczenie tego urządzenia nie doprowadziło do utraty szczelności z jednej strony oraz wskazało odpowiednie odczyty w celu zachowania bezpieczeństwa.

Powyższy obszar jest niezwykle ważny ze względu na możliwy brak kompatybilności systemów po stronie stacji, jak po stronie producenta tankowanego pojazdu. Z tego względu celowe jest wyposażenie stacji tankowania wodorem w niezbędne urządzenia umożliwiające kontrolę kluczowych parametrów tankowanego pojazdu ze względu na wodorową inżynierię bezpieczeństwa⁵.

Stacja tankowania wodorem powinna posiadać również system detekcji wodoru oraz detekcji pożaru zgodnie z obowiązującymi przepisami. Właściwe jest jednak wykonanie indywidualnych analiz bezpieczeństwa dla stacji tankowania wodorem ze względu na otaczającą infrastrukturę oraz środowisko.

Strategia bezpieczeństwa wodorowego w obszarze stacji tankowania wodorem (gazowym) powinna uwzględniać w obszarze technicznym między innymi⁶:

- wykorzystanie atestowanego węża oraz armatury zarówno w obrębie dostaw, jak i dystrybucji,
- okresowe wymiany węża oraz armatury, zgodnie z wytycznymi producenta,
- system detekcji wodoru,
- system detekcji płomienia,
- zastosowanie zaworów odcinających,
- system monitoringu ciśnienia procesowego,
- system wentylacji mechanicznej,
- zastosowanie wyposażenia z certyfikatem ATEX^b,
- system uziemienia węża,
- zastosowanie automatycznego systemu wykrycia wycieku przed tankowaniem,
- zastosowanie ograniczników przepływu,
- zastosowanie urządzenia zrywnego (np. na węży),
- zastosowanie systemu antywstrząsowego,
- zastosowanie systemu odcięcia przepływu wodoru,
- zastosowanie odpowiedniej konstrukcji fundamentowania oraz przegród bezpieczeństwa.

Powyższy opis dotyczy zarówno stacji tankowania wodorem ciekłym, jak i gazowym. Dodatkowo stacje regazyfikacji wodoru ciekłego wymagają odpowiednich zabezpieczeń związanych z niską temperaturą wodoru.

Poza wymogami lokalizacyjnymi oraz technologicznymi stacje tankowania wodorem powinny być lokalizowane z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego oraz społecznego. Strategie w tym zakresie powinny uwzględniać również sposób zasilania stacji w wodór.

Podsumowując proces planowania strategicznego dla stacji tankowania wodorem wymaga wzięcia pod uwagę przynajmniej następujących elementów⁷:

- systemu produkcji wodoru (jeżeli nie jest dostarczany z zewnątrz),
- systemu oczyszczania wodoru,
- systemu sprężania wodoru,
- systemu magazynowania wodoru,
- systemu obniżania temperatury gazowego wodoru,
- systemu bezpieczeństwa
- właściwego wyposażenia technicznego i technologicznego,
- właściwej lokalizacji,
- analizy efektywności ekonomicznej inwestycji.

Dla wyboru lokalizacji stacji tankowania wodorem, uwzględniającego powyższe aspekty można zastosować różne modele matematyczne i empiryczne, jednakże żaden z tych modeli nie obejmuje obszaru bezpieczeństwa wodorowego. Jest to obecnie przedmiotem badań, pokazuje to, że do strategii bezpieczeństwa wodorowego potrzebny jest rozwój nauki w dziedzinie modelowania procesu decyzyjnego z uwzględnieniem tego obszaru⁷.

^b ATEX – z fr. Atmosphères Explosibles, Dyrektywa Unii Europejskiej (akt prawny) definiująca wymagania zasadnicze, jakie musi spełniać każdy produkt przeznaczony do stosowania w strefach zagrożonych wybuchem

3.2. INTERMODALNE ROZWIĄZANIA TRANSPORTOWE DROGOWE, KOLEJOWE, MORSKIE

Rozwiązania mobilne lądowe, opierają się obecnie głównie na rozwiązaniach ogniw paliwowych typu PEMFC^c, zasilanych sprężonym wodorem, ogniwa paliwowe, stałotlenkowe, typu SOFC wykorzystywane są do rozwiązań stacjonarnych.

Strategia bezpieczeństwa wodorowego w obszarze ogniw paliwowych typu PFMC powinna obejmować zarówno bezpieczeństwo aktywne, jak i pasywne,

Bezpieczeństwo aktywne, to bezpieczeństwo wynikające z konstrukcji samego pojazdu, bezpieczeństwo pasywne, jest to ekspozycja pojazdu np. na uszkodzenia wynikające z kolizji oraz wynikające z tego możliwe uszkodzenia systemu napędowego pojazdu.

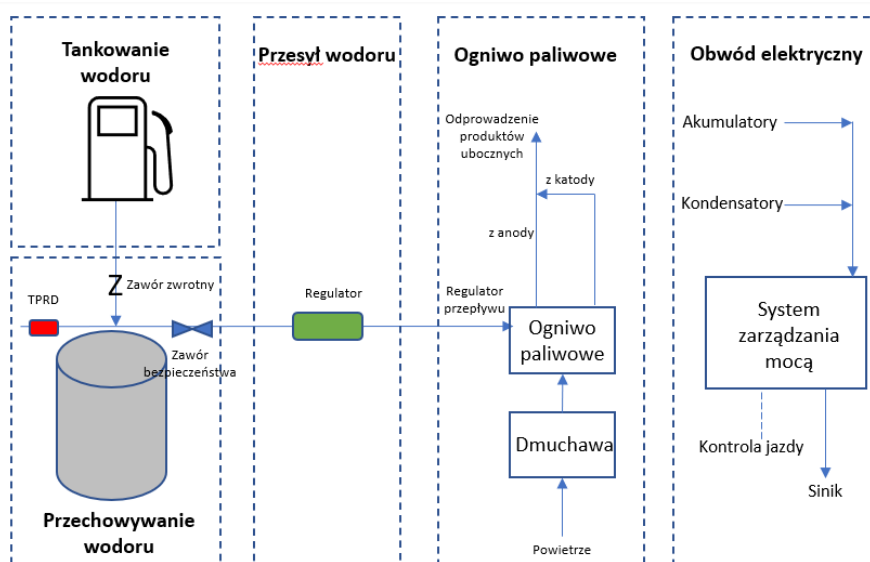
Wśród metod dostarczania wodoru w obrębie pojazdu poza zbiornikiem na sprężony wodór możemy wyróżnić również:

- zbiornik na ciekły wodór,
- wodorki metali w postaci stałej,
- system elektrolizy wody.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą jest w tym przypadku stosowanie zbiornika na sprężony wodór oraz ogniwa paliwowego z membraną PEMFC, jej udział w rynku szacuje się na 28% w roku 2021⁸. Ograniczenie, rozwoju tej gałęzi przemysłu napotyka obecnie na bariery infrastrukturalne, ekonomiczne i społeczne.

Pojazd wodorowy tankowany jest wodorem na specjalistycznej stacji tankowania wodorem, minimalizującej zagrożenia zewnętrzne dla takiego pojazdu.

System zabezpieczeń w pojeździe wykorzystującym technologie ogniw paliwowych w połączeniu z wodorem powinien obejmować zarówno obszar magazynowania wodoru, jego przesyłu, jak i obszar obiegu elektrycznego.



^c PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell – ogniwo paliwowe z membraną polimerową.

Rysunek 2 Główne elementy napędu wodorowego z udziałem ogniwa paliwowego, opracowano na podstawie⁹.

Argumentem za wyborem rozwiązań konstrukcyjnych z magazynem sprężonego wodoru może być również forma oraz potencjalne skutki wycieku wodoru, jako głównej przyczyny zdarzeń kryzysowych. Tabela 1 przedstawia porównanie profili wycieku wodoru oraz diesla.

Tabela 1 Porównanie profili wycieku wodoru oraz diesla¹⁰.

Własność	Sprężony wodór	Ciekły wodór	Diesel
Profil wycieku	gaz, szybko się unosi	ciecz, tworzy kałużę/zmarzlinę, która odparowuje	ciecz tworzy kałużę, wsiąka w grunt
Kształt	pionowy, zwarty kształt chmury gazu	opary mogą tworzyć płaskie i pionowe chmury gazu	ciecz tworzy rozlewiska na gruncie
Czas trwania	szybko rozprasza się w powietrzu, może gromadzić się w załamaniach, np. pod sufitem w pomieszczeniach zamkniętych	szybko odparowuje i rozprasza się w powietrzu, może gromadzić się w załamaniach, np. pod sufitem w pomieszczeniach zamkniętych	ciecz odparowuje wolno
Widoczność	brak	brak, potencjalnie chmura oraz zmarzlina w okolicach wycieku	brak
Zapach	brak	brak	mocno wyczuwalny
Palność	bardzo wysoka	bardzo wysoka	wysoka
Typ płomienia	niewidoczny w świetle dziennym	niewidoczny w świetle dziennym	widoczny w świetle dziennym
Odziaływanie na człowieka ¹¹	w małych ilościach jest nietoksyczny	duża ilość ciekłego wodoru w kontakcie ze skórą powoduje oparzenia	pary są toksyczne na poziomie 500 ppm.

Jak widać z powyższego zestawienia, w procesie dekarbonizacji transportu, bardziej bezpiecznym dla środowiska naturalnego zamiennikiem diesla jest wodór gazowy, dlatego też obserwujemy obecnie duży wzrost dostępności takich rozwiązań zarówno w transporcie indywidualnym – samochody osobowe, jak i publicznym – autobusy.

Dodatkowym zabezpieczeniem są odpowiednie procedury wynikające również z dobrej praktyki inżynierskiej. Obiekty przemysłowe, w których parkuje się lub obsługuje auta z zasobnikiem wodoru powinny przynajmniej posiadać¹⁰:

- dokumentację techniczną, harmonogram serwisowania oraz procedury wzorcowania detekcji wodoru oraz systemów alarmowych z nim związanych,
- dokumentację techniczną, harmonogram testów systemu detekcji wodoru oraz systemów alarmowych z nim związanych,
- dokumentację techniczną, harmonogram testów systemu detekcji wodoru oraz systemów pożarowych z nim związanych,
- dokumenty potwierdzające szkolenia pracowników, szkolenie, odnawiane w przypadku pojawienia się nowego sprzętu lub nowych zagrożeń
- instrukcje i procedury postępowania w przypadku alarmu związanego z wodorem,

- instrukcje i procedury postępowania z pojazdami wodorowymi, np.:
 - wodór powinien być bezpiecznie odprowadzony ze zbiornika przed pracami serwisowymi pojazdu,
 - ochrona urządzeń wodorowych oraz samego wodoru przed przypadkowym zapłonem,
 - pojazdy zasilane wodorem powinny być podłączone systemu wentylacji budynku.

Wodór jako paliwo w transporcie morskim wykorzystywane jest w dwojaki sposób, bezpośrednio jako paliwo, lub jako substrat do produkcji amoniaku, lub, jako substrat do magazynowania wodoru przy założeniu, że nastąpi wystarczający postęp techniczny w tym zakresie.

Ze względu na to, że branża transportu morskiego jest trudna do przewidzenia w zakresie transformacji energetycznej, konieczne są działania badawcze, które uzupełnią stan istniejącej wiedzy, na temat tego, jakie regulacje są konieczne do przeprowadzenia.

Prowadzone są szeroko zakrojone badania nad wykorzystaniem amoniaku jako paliwa alternatywnego, dedykowanego dla transportu morskiego. Należy tutaj wspomnieć, że amoniak, pomimo tego, że jest oceniany jako łatwiejszy w transporcie również jest substancją niebezpieczną i wymaga zastosowania dodatkowych zabezpieczeń, w tym systemów monitoringu, detekcji stężeń toksycznych wybuchowych dla tego czynnika (ochrona ludzi przed zatruciem oraz obiektów przed wybuchem). Dolna granica wybuchowości (DGW^d) dla amoniaku wynosi 15% v/v, górna (GGW^e) wynosi 33,6% v/v (na podstawie PN-EN-60079-20-1 2010P). Temperatura samozapłonu NH₃ to 630°C, klasa temperaturowa T1 kategoria IIA. Amoniak jest także gazem toksycznym dla człowieka, a jego NDS^f wynosi około 20 p pm (14 mg/m³), a NDSC^g około 40 ppm⁹ (28 mg/m³). Amoniak może być przechowywany zarówno w formie skroplonej (temp. wrzenia -33,34°C) lub sprężonej (ciśnienie w zbiorniku 12 - 18 bar.

Zabezpieczenia przed ryzykiem wystąpienia zdarzeń kryzysowych w technologiach morskich wykorzystujących amoniak, jako paliwo, to przede wszystkim¹²:

- umieszczenie detektorów gazu, na wszystkich wlotach powietrza do pomieszczeń mieszkalnych na jednostce morskiej,
- wyloty amoniaku powinny być zlokalizowane w obszarach, których strefy bezpieczeństwa związane z dyspersją amoniaku minimalizują kontakt z obszarem mieszkalnym na jednostce morskiej,
- we wszystkich wejściach należy uwzględnić śluzy powietrzne,
- odgromniki umieszczać poza strefami bezpieczeństwa związanego z ewentualną dyspersją amoniaku,
- odpowiednie zabezpieczenia stref bezpieczeństwa, czujniki, detektory, alarmy etc.,
- aby umożliwić bezpieczną ewakuację, należy rozważyć zastosowanie kurtyn wodnych i mgły wodnej w celu rozcieńczenia chmur amoniaku.

W tabeli 2 przedstawiono główne czynniki ryzyka dla amoniaku.

^d DGW – Dolna Granica Wybuchowości - stężenie substancji palnej (gazu, pary lub pyłów) w mieszaninie z powietrzem lub tlenem, w zakresie których pod wpływem bodźca energ. może nastąpić wybuch (PWN) - minimalne.

^e GGW - Górna Granica Wybuchowości - stężenie substancji palnej (gazu, pary lub pyłów) w mieszaninie z powietrzem lub tlenem, w zakresie których pod wpływem bodźca energ. może nastąpić wybuch (PWN) - maksymalne.

^f NDS- najwyższe, dopuszczalne stężenie

^g Ppm- ang. parts per million, cząstek na milion

Tabela 2 Czynniki ryzyka dla amoniaku¹².

Czynnik ryzyka	Efekt
Toksyczność dla ludzi	Przy wysokich dawkach gazowy amoniak może prowadzić do niekorzystnych skutków dla zdrowia, w tym śmierci, tj. poważne oparzenia skóry, uszkodzenia oczu i układu oddechowego, długotrwały i powtarzający się kontakt ze skórą może prowadzić do zapalenia skóry, długotrwała ekspozycja może prowadzić do potencjalnych urazów płuc, odmrożenia (postać ciekła)
Toksyczność dla organizmów wodnych	Amoniak jest toksyczny dla organizmów wodnych z potencjalnie długotrwałymi skutkami
Niskie temperatury	Kontakt ze skroplonym amoniakiem może wywoływać kruchość, tj. utratę plastyczności prze inne materiały.
Palność	Dolna granica palności amoniaku wynosi 15% objętości; jego górna granica palności wynosi 28% objętości w powietrzu. Może się zapalić i stwarza zagrożenie wybuchem.
Rozlanie, kałuże	Rozlanie może spowodować powstanie kałuży ciekłego amoniaku. Amoniak odparowując tworzy łatwopalną i toksyczną chmurę.
Pożary	Amoniak może prowadzić do pożaru błyskawicznego, intensywnego i nagłego, ale zazwyczaj krótkotrwałego.
Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) -	BLEVE jest zwykle powodowany przez zewnętrzny pożar, który obejmuje i ogrzewa zbiornik skroplonego amoniaku, powodując wzrost ciśnienia. Może to doprowadzić do uszkodzenia zbiornika oraz intensywnego wybuchu.
Higroskopijność	Gazowy amoniak jest higroskopijny (łatwo wchłania wilgoć) i tworzy gęstą, widoczną białą chmurę wodorotlenku amonu.
Reaktywność	Amoniak reaguje gwałtownie z niektórymi materiałami po wystawieniu na działanie, np. chlorem, kwasami, mosiądzem, miedź, srebro i cynk
Reaktywność	Amoniak jest reaguje z niektórymi materiałami, co prowadzi do zwiększonego ryzyka pożaru i wybuchu, zwłaszcza w kontakcie z: utleniaczami (np. nadtlenkami), mocnymi kwasami (np. kwas solny) i halogeny (np. chlor).
Degradacja w wysokich temperaturach	W wysokich temperaturach amoniak może rozpaść się na łatwopalny gaz, wodór i substancje toksyczne.
Wpływ na korozję	Korozyjność amoniaku może prowadzić do degradacji materiału i uszkodzenia sprzętu przy przedłużonej ekspozycji.

3.3. SYSTEMY PRZEMYSŁOWE I PRZESYŁOWE

Produkcja i wykorzystanie wodoru w przemyśle mają swoją bogatą historię, jednakże są to rozwiązania, realizowane głównie w wydzielonych terytorialnie zakładach przemysłowych, a jego źródłem jest wysokoemisyjny proces reformingu parowego gazu ziemnego. Pozyskiwanie wodoru z paliw kopalnych jest cały czas konkurencyjne pod względem kosztów produkcji w stosunku do produkcji wodoru ze źródeł odnawialnych¹³. W dokumencie „Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu” opublikowanym przez Komisję Europejską¹⁴ przewiduje się utworzenie do 2050 roku ekosystemu wodorowego w Europie, wykorzystującego odnawialne źródła energii. Regulacje centralne są w tym aspekcie niezbędne, ze względu na wspomniane konkurencyjne ceny wodoru pochodzące z wysokoemisyjnych źródeł.

Stanowisko to oznacza, że państwa członkowskie, nie tylko muszą dostosować legislację, ale również wspierać rozwój technologii produkcji i wykorzystania wodoru pochodzącego ze źródeł odnawialnych. Celem wparcia inwestycji w tym zakresie jest powołanie europejskiego sojuszu na rzecz czystego wodoru, którego celem jest stworzenie i rozwijanie przejrzystego wykazu opłacalnych projektów inwestycyjnych w obszarze

wodorowym¹³. Dokument ten określa również zasady zaprojektowania ram dla infrastruktury wodorowej wraz z opracowaniem zasad rynkowych.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa ze względu na konieczność zapewnienia pełnego łańcucha dostaw, dokument ten wskazuje konieczność dalszych działań badawczo-innowacyjnych¹⁴, tj.:

- po stronie wytwarzania wodoru konieczne będzie zwiększenie rozmiarów elektrolizerów do skali gigawatów oraz ich optymalizacji kosztowej pod względem wydajności i efektywności, wraz z zachętą do tworzenia rozwiązań na niższym poziomie gotowości technologicznej, np. produkcja wodoru z alg morskich, fotolizy wody, lub pirolizy,
- po stronie dystrybucji, magazynowania i dystrybucji wodoru konieczny jest rozwój infrastruktury, z uwzględnieniem dużych odległości. Przekształcenie istniejącej infrastruktury gazowej do transportu wodoru,
- po stronie wykorzystania wodoru należy dalej rozwijać zastosowania końcowe na dużą skalę, zwłaszcza w przemyśle (np. wykorzystanie wodoru w celu zastąpienia węgla kokсового do produkcji stali, w przemyśle chemicznym i petrochemicznym) oraz w transporcie (drogowy, kolejowy, lotniczy, wodny). Badania przednormalizacyjne, dot. m.in. aspektów bezpieczeństwa powinny być podstawą do stworzenia zharmonizowanych norm,
- po stronie legislacyjnej dalsze badania są konieczne, aby kształtować lepsze i zharmonizowane normy bezpieczeństwa oraz monitorowanie i ocenę skutków społecznych. Należy rozwijać techniki oceny wpływu technologii wodorowych na środowisko naturalne oraz opracowywać odpowiednie działania proekologiczne, zabezpieczające zasoby naturalne oraz zrównoważony rozwój technologii wodorowych.

Bezpieczeństwo technologii wodorowych stosowanych w przemyśle, takich, jak np. reforming parowy jest dobrze rozpoznane, również ze względu na wieloletnie doświadczenie w tym zakresie. Nowe wyzwania dotyczące systemów przemysłowych produkujących czy wykorzystujących wodór swoim procesie powinny być obiektem ciągłych badań oraz rozwoju.

Do systemów przemysłowych, które w swoim procesie posiadają wodór w obrębie nowych technologii możemy zaliczyć proces elektrolizy czy wykorzystanie ogni w paliwowych w energetyce.

Strategie bezpieczeństwa w tym zakresie opierają się na opisanych już procesach zabezpieczenia instalacji przed zdarzeniami kryzysowymi, uwzględniającymi szczególne właściwości wodoru. Realizowanie europejskiej i polskiej strategii wodorowej wymaga rozwijania technologii bezpieczeństwa związanej z pracą tych urządzeń w tzw. stosach. Praca urządzeń w stosach powoduje szereg dodatkowych wyzwań w zakresie bezpieczeństwa, są to głównie dodatkowe aspekty związane z wytwarzaniem ciepła oraz zarządzania obwodem elektrycznym.

W przypadku stosu elektrolizerów ważnym aspektem związanym z bezpieczeństwem jest prawdopodobieństwo resztkowych pozostałości wodoru i tlenu w poszczególnych urządzeniach, dlatego też nieumiejętne serwisowanie tego typu urządzeń może nieść ze sobą ryzyka związane z wytworzeniem łuku elektrycznego¹⁵.

„Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu” zakłada przystosowanie istniejącego systemu gazociągów do dystrybucji wodoru na duże odległości. Zastosowanie takiego rozwiązania niesie za sobą konieczność zastosowania odpowiednich technologii w zakresie bezpieczeństwa wodorowego.

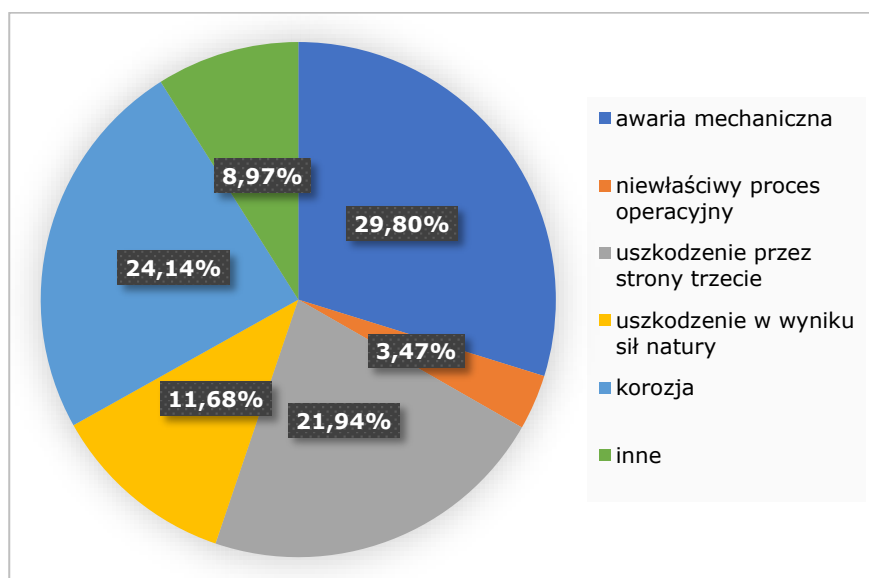
Gazowe linie przesyłowe w Polsce pod względem ciśnienia można podzielić na następujące warianty¹⁷:

- rurociągi niskiego ciśnienia, do 10 kPa,
- rurociągi średniego ciśnienia od 10 kPa do 0,5 MPa,
- rurociągi podwyższonego ciśnienia od 0,5 MPa do 1,6 MPa,
- rurociągi wysokiego ciśnienia, powyżej 1,6 MPa.

Szacuje się, że na koniec 2021 roku sieć gazowa w Polsce osiągnęła długość 165,7 tys.km, z 7 285 tys. przyłączy do budynków. ¹⁶.

Wyzwania związane z bezpieczeństwem w tym przypadku zależą od poziomu domieszki wodoru. Szacuje się, że pomiędzy 5%-15% domieszki wodoru nie powoduje znaczących zmian w procesie operacyjnym czy technologicznym dla gazociągu, domieszka na poziomie 15%-50% wymaga już znaczących zmian w tym zakresie, włączając w to aspekty związane z właściwościami wodoru (niekontrolowane uwolnienie, zapłon, etc.). Domieszka powyżej 50% niesie ze sobą wielopoziomowe wyzwania związane między innymi z doбором materiałów konstrukcyjnych dla gazociągów¹⁷.

Rysunek 3 przedstawia główne przyczyny uszkodzeń gazociągów ¹⁷:



Rysunek 3 główne przyczyny uszkodzeń gazociągów, opracowanie na podstawie¹⁷.

Kluczowymi obszarami, które powinny być brane pod uwagę w procesie tworzenia strategii bezpieczeństwa wodorowego są aspekty związane z:

- awaryjnością mechaniczną, na którą może składać się zarówno wadliwy proces projektowy, wykonanie, czy operacyjny instalacji przesyłowej,
- korozją,
- uszkodzeniami infrastruktury przez osoby trzecie oraz w wyniku działania sił natury.

Dokumentem opisującym metody projektowe w tym zakresie jest np. niemiecki standard DVG^h G 265-3, wsparty przez DVGWⁱ G 262 dotyczący projektowania i budowy instalacji

^h DGW - Deutscher Verein des Gas- - Niemieckie Stowarzyszenie Techniczno-Naukowe ds. Gazu

ⁱ DVGW – z niem. Deutscher Verein des Gas-und Wasserfaches - Niemieckie Stowarzyszenie Techniczno-Naukowe ds. Gazu i Wody.

zatłaczania wodoru do sieci gazowej¹⁸. Kwestia zatłaczania wodoru do istniejącej sieci gazowej jest znaczącym wyzywaniem, ze względu na jej wiek oraz stan techniczny.

Jednym z podstawowych wyzwań dotyczących zatłaczania wodoru do sieci gazowej jest objętościowy spadek kaloryczności mieszaniny gazu z wodorem, co w połączeniu z koniecznością dostarczania zamówionego strumienia energii powoduje konieczność zwiększenia strumienia gazu w sieci w celu kompensacji kaloryczności. Podstawowe wyzwania związane z zatłaczaniem wodoru do sieci gazowej, to ¹⁸:

- zachowanie przepustowości sieci w związku ze zmianą natężenia przepływu gazu,
- dodatkowe spadki ciśnienia związane ze zwiększoną prędkością przepływu gazu,
- właściwości termodynamiczne mieszaniny wodoru z gazem.

Zatłoczenie wodoru do istniejącej sieci gazowniczej wymaga zatem licznych analiz, prac legislacyjnych oraz prac badawczo-rozwojowych. W marcu 2023 roku Gaz-System S.A. ogłosił, że planuje zrealizować trzy projekty inwestycyjne w obszarze wodoru z uwzględnieniem europejskich instrumentów wsparcia, tj ¹⁹:

- Nordycko-Bałtycki Korytarz Wodorowy (Nordic-Baltic Hydrogen Corridor), który ma na celu budowę korytarza służącego do transportu wodoru z Finlandii, przez państwa bałtyckie i Polskę do Niemiec,
- krajowy szkielet wodorowy obejmujący infrastrukturę łączącą krajowych producentów wodoru, źródła importowe, magazyn wodoru w Damasławku z odbiorcami końcowymi i ew. lokalnymi sieciami dystrybucyjnymi,
- magazyn wodoru w Damasławku.

Zabezpieczenie gazowej infrastruktury przesyłowej przed zjawiskiem dyspersji gazu na elementach armatury rurociągu, gazociągu (zawory, czujniki, systemy automatyki) jest niezwykle ważną kwestią w ujęciu uszkodzenia struktury rurociągu w wyniku pożaru, lub wybuchu. Z przeprowadzonych badań wynika, że zagrożenie pożarowe związane z mieszaniną metanu i wodoru są mniejsze w porównaniu z czystym metanem, jednakże całkowite ryzyko związane z transportem mieszanki mogą być wyższe, chociażby ze względu na fakt, że prawdopodobieństwo uszkodzenia rurociągów transportujących mieszaninę wodoru i metanu może być wyższe²⁰.

W transporcie wodoru sieciami gazowymi innym bardzo ważnym zagrożeniem jest zjawisko korozji wodorowej, mogącej powodować pęknięcia oraz poważne uszkodzenia struktury.

Zapobieganie zjawisku korozji wodorowej w strukturze stali jest bardzo trudne, jednakże można zastosować następujące techniki minimalizujące to zjawisko²¹:

- minimalizować obszary gromadzenia się mieszaniny, tj. unikanie „martwych stref”,
- używać odpowiednich powłok oraz innych zabezpieczeń,
- dokonywać okresowych kontroli infrastruktury.

Plany i strategie w obszarze przesyłu wodoru sieciami gazowymi są obecnie bardzo ostrożne, ponieważ, jak wynika z przeprowadzonych wywiadów, sieć gazowa jest oparta na konstrukcjach z lat 70-80, i jest trudna do oceny technicznej. Nie należy spodziewać się dynamicznego rozwoju przesyłu wodoru istniejącymi gazociągami dedykowanymi obecnie do metanu - ograniczeniem w ocenie stanu technicznego infrastruktury jest brak odpowiednich regulacji.

3.4. SYSTEMY MAGAZYNOWANIA I KONWERSJI WODORU

Systemy magazynowania wodoru pojawiają się w większości technologii wodorowych, dlatego też strategia bezpieczeństwa oraz zabezpieczenia w tym obszarze są niezwykle ważna ze względu na poziom niezawodności instalacji zarówno stacjonarnych, jak i mobilnych.

Głównym obszarem są tutaj zbiorniki wraz z armaturą, zarówno na gazowy, sprężony wódór, jak i na jego postać ciekłą w niskich temperaturach kriogenicznych^j. Pojęcie kriogenika stosuje się na określenie metod uzyskiwania i wykorzystywania temperatur niższych od 120 K, a dokładnie 111,1 K, tj. temperatury wrzenia metanu pod ciśnieniem normalnym. Temperatura wrzenia ciekłego metanu jest umowną granicą wyodrębniającą kriogenicę z chłodnictwa ustanowioną w 1971 roku przez XIII Międzynarodowy Kongres Chłodnictwa. Przedmiotem kriogeniki są więc zjawiska zachodzące w temperaturach bardzo niskich w porównaniu z temperaturą otoczenia wynoszącą około 300 K.

Strategie bezpieczeństwa w przypadku magazynowania wodoru skroplonego powinny brać pod uwagę²²²³:

- wysokie całkowite zużycie energii magazynowanego wodoru (ok 35%),
- straty spowodowane zjawiskiem „boil off” – odparowanie wodoru,
- możliwości zminimalizowania strat „boil off” poprzez wykorzystanie endotermicznego zjawiska przemiany para-orto wódór w procesie skraplania²⁴,
- konieczność stosowania konstrukcji zbiorników o podwyższonej wytrzymałości,
- wykorzystanie istniejącej infrastruktury (np. terminali LNG), z uwzględnieniem koniecznych modyfikacji i dostosowań,
- wykorzystanie planowanej infrastruktury do obsługi wodoru i innych gazów (np. wzrost kompatybilności materiałów dla różnych czynników)
- wczesny etap rozwoju projektów obejmujących dużą skalę (jeden terminal dedykowany dla wodoru ciekłego Kobe-Japonia).

Obecnie najbardziej rozpowszechnionymi zbiornikami, są zbiorniki typu III^k i IV^l, jako systemy magazynowania zgodnej ze standardem ISO (w zabudowie kontenerowej), na statkach, w miejscach produkcji wodoru, stacje dystrybucji, czy dla systemów przemysłowych²².

W związku z szerokim zastosowaniem technologii magazynowania wodoru prognozuje się ich rozwój, również w ujęciu magazynowania wodoru w głębokiego, podziemnego magazynowania wodoru, jednakże prawdopodobnie nie do 2030 r. tj.:

- kawerny solne,
- kawerny skalne,
- naturalne zbiorniki wodonośne,
- opuszczone kopalnie podziemne.

^j Temperatura kriogeniczna – temperatura poniżej 120 K.

^k Zbiornik typu III - konstrukcja składająca się z okładziny metalowej, zwykle z aluminium, w pełni owiniętej kompozytem z żywic epoksydowych lub winylo-estrowych z ciągłym włóknem węglowym. Obciążenia konstrukcyjne są przejmowane przez matrycę kompozytową.

^l Zbiornik typu IV - Konstrukcja niemetalowa, składająca się z kompozytu z włókna węglowego lub szklanego i węglowego, który jest owinięty wokół okładziny z polimeru termoplastycznego. Obciążenia konstrukcyjne przenoszą materiały kompozytowe.

Strategie bezpieczeństwa związane z przechowywaniem wodoru w kawernach solnych powinny obejmować konieczność projektowania tego typu rozwiązań z uwzględnieniem właściwości soli oraz dokładnych okoliczności eksploatacji. Projekt taki powinien zapewniać ich stabilność, szczelność, dopuszczalne osiadanie powierzchni oraz bezpieczeństwo otoczenia. Dotyczy to zarówno procesu ługowania, zatłaczania, jak i wydobywania magazynowanego wodoru.

Przy wykorzystaniu tego typu rozwiązań magazynowych należy wziąć również pod uwagę fakt, że czym głębiej znajduje się taki magazyn, tym można przechowywać pod wyższym ciśnieniem (możliwość przechowania większej ilości wodoru w tej samej objętości).

Kawerny solne zlokalizowane na głębokości kilkuset metrów dają możliwość magazynowania wodoru, z uwzględnieniem korzyści wynikających z niskich kosztów budowy, niskich wskaźników wycieków, minimalnego ryzyka zanieczyszczenia wodoru oraz wysoką gęstość magazynowanej energii. Obecnie wydaje się za optymalne wykorzystanie istniejących kawern związanych z magazynowaniem gazu ziemnego lub budowa podobnych kawern w zbadanym już złożu i istniejącą infrastrukturą i pozwoleniami²³. Pozwoli to na zachowanie bezpieczeństwa wodorowego na wyższym poziomie.

Obecnie prowadzi się również prace nad nowymi rozwiązaniami w kwestii magazynowania wodoru, w tym na Politechnice Gdańskiej oraz Politechnice Wrocławskiej – np. projekt wsparty przez Unię Europejską: ROAD THRYP^m, z 2,5 mln. Euro dofinansowaniem będzie obejmował pracę nad stworzeniem wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych do transportu wodoru tzw. rurowozami (1,5 tony wodoru pod ciśnieniem 700 bar)^m.

Strategia bezpieczeństwa wodorowego powinna przewidywać przechowywanie wodoru w ilościach minimalnych, uwzględniając konieczną, niezbędną ilość wodoru oraz lokalizację z uwzględnieniem czynników ekonomicznych.

Z przeprowadzonych wywiadów wynika również, że magazynowanie wodoru jest obszarem bardzo dynamicznego rozwoju. W obszarze bezpieczeństwa respondenci stwierdzili, że techniczne aspekty związane ze zbiornikami i magazynami wodoru dotyczą szczególnie: przenikalności wodoru, a więc kwestii materiałowych, ciśnienia oraz temperatury wodoru. Wraz ze wzrostem ciśnienia, wzrasta tendencja do migracji cząsteczek wodoru, a trend związany ze zbiornikami wodorowymi kieruje się w stronę wysokociśnieniowych. Z przeprowadzonych wywiadów wynika, że sprężenie wodoru do tak wysokiego ciśnienia może poprawić ekonomikę magazynowania i aplikacji transportowych, wiąże się jednak z wyższymi nakładami energetycznymi ponoszonymi na sprężanie wodoru do tak wysokich ciśnień. W przypadku skroplonego wodoru, jest on przechowywany w bardzo niskich temperaturach, więc kriogenikaⁿ jest kolejnym wyzwaniem technicznym w obszarze bezpieczeństwa. Jest to pod wieloma względami przeszkoda, jeśli chodzi o kwestie ekonomiczne, jak i projektowe.

Wykorzystanie wodoru, jako nośnika energii wymaga jego konwersji na energię elektryczną lub energię cieplną. Strategia bezpieczeństwa wodorowego w tym zakresie, jest to bardzo szerokie zagadnienie obejmujące takie obszary, jak transport oparty na wodorze, czy kogeneracja.

W przypadku konwersji wodoru na energię elektryczną oraz ciepło strategii bezpieczeństwa wodorowego powinny obejmować m. in. zagadnienia związane z szerokim zastosowaniem ogniwi paliwowych, zarówno w technologiach transportu - drogowym,

^m <https://pwr.edu.pl/uczelnia/aktualnosci/powstana-zbiorniki--ktore-pomieszcza-az-1-5-tony-wodoru-czesc-prac-beda-prowadzic-nasi-naukowcy-12595.html> .

ⁿ Temperature kriogeniczna – temperature poniżej 120K.

kolejowym oraz morskim (również w postaci konwersji wodoru na amoniak) oraz kogeneracji. Jednym z przykładów układów kogeneracyjnych jest połączenie ogniwa paliwowego z turbiną gazową. Układ tego typu zwiększa sprawność całego układu, przy prostszej (mniej części ruchomych) konstrukcji oraz wyższą możliwością przetwarzania ciepła, jednakże stwarza również szereg wyzwań związanych z bezpieczeństwem²⁵.

Włączenie ogniwa paliwowego zasilanego wodorem ze źródeł odnawialnych stanowi dużą korzyść dla układów kogeneracyjnych, chociażby ze względu na stały poziom produkowanej energii elektrycznej²³.

Systemy wykorzystujące układy ogniw paliwowych i elektrolizerów, lub „odwracalnych ogniw paliwowych” służą do magazynowania oraz produkowania energii. Systemy te stanowią jeden z rodzajów magazynów energii elektrycznej. Technologia ta jest opisana w normie PN-EN IEC 62282-8-201:2020-10 Technologie ogniw paliwowych – Część 8-201: Systemy magazynowania energii wykorzystujące moduły ogniw paliwowych w trybie odwróconym – Procedury badań dla układów typu power-to-power (PN-EN IEC 62282-8-201:2020-10). Proces ładowania, to proces elektrolizy, proces uzyskania energii elektrycznej i ciepła polega na wykorzystaniu ogniwa paliwowego zasilanego zmagazynowanym wodorem. Bezpieczeństwo technologii wodorowych w tym przypadku obejmuje zarówno proces elektrolizy, konwersji wodoru na energię elektryczną i ciepło oraz magazynowania wodoru²³.

Obecnie obserwuje się szybki rozwój technologii ogniw paliwowych, również w kierunku wykorzystania ich przez odbiorców indywidualnych. Wymaga to budowania właściwych strategii bezpieczeństwa wodorowego uwzględniającego prace badawczo – rozwojowe w tym zakresie.

3.5. POZOSTAŁE KWESTIE

Strategia bezpieczeństwa wodorowego w obszarze wytwarzania wodoru jest ściśle związana z procesami przesyłu oraz magazynowania wodoru. Moce produkcyjne elektrolizerów oraz ich stosów będą podlegać ograniczeniom, jeżeli nie będą towarzyszyć procesowi produkcji wodoru odpowiednie rozwiązania, zapewniające odbiór wytworzonego wodoru. Może mieć to też związek z technologiami OZE oraz organizacją dostaw niskoemisyjnej energii elektrycznej do procesu elektrolizy.

Dlatego też nie możemy rozpatrywać strategii bezpieczeństwa w obszarze wytwarzania wodoru w oderwaniu od jego przesyłu i magazynowania. Sam proces elektrolizy jest procesem znanym i opanowanym pod względem bezpieczeństwa, wdrożone procedury bezpieczeństwa postępowania z wodorem, czy wysokimi temperaturami są wymagane przez odpowiednie przepisy i normy. W strategii bezpieczeństwa wodorowego należy jednak rozpatrzyć czynniki techniczne, ekonomiczne oraz społeczne w procesie implementacji takiej inwestycji.

Doniesienia prasowe ze stycznia 2023 roku mówią, że polski operator systemu przesyłowego w celu bilansowania zastosował redukcję mocy z farm wiatrowych²⁶. Świadczy, to o tym, że w Polsce nie ma jeszcze wypracowanego systemu magazynowania nadwyżek energii i wykorzystywania jej do produkcji, np. niskoemisyjnego wodoru. Potwierdza to konieczność wspólnego rozwoju rynku wodorowego oraz OZE²⁷.

4. STRATEGIE WODOROWE DLA SYSTEMÓW PRZEMYSŁOWYCH I UŻYTKOWYCH

Ministerstwo Klimatu i Środowiska opublikowało w październiku 2021, jako załącznik do uchwały nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r (poz. 1138) dokument „Polska Strategia Wodorowa do roku 2020 z perspektywą do roku 2040”, określa on główne cele rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce i obszary interwencji, jakie są konieczne dla ich osiągnięcia. Dokument powstał w oparciu o światowe, europejskie i krajowe działania w obszarze gospodarki niskoemisyjnej²⁸.

W raporcie przedstawiono:

- informacje o wodorze oraz łańcuchu dostaw związanych z gospodarką wodorową,
- cele strategii w różnych obszarach związanych z gospodarką wodorową,
- metodologię wdrażania, finansowania oraz monitorowania strategii wodorowej.

Dokument ten stanowi główną wytyczną dla rozwoju polskiej gospodarki wodorowej, również dla tworzenia indywidualnych strategii wodorowych uczestników tego rynku, niezależnie od ich wielkości oraz zakładanych celów.

Polska Strategia Wodorowa, uwzględnia między innymi trzy główne inicjatywy europejskie w zakresie strategii wodorowych, opublikowane w lipcu 2020 roku:

- strategia UE w zakresie wodoru ustanowiła wstępne cele w zakresie wykorzystania wodoru, co będzie wymagało do 2050 r. nakładów inwestycyjnych na poziomie 470 mld EUR,
- Europejski Sojusz na rzecz Czystego Wodoru (ECHA^o), organ współpracujący z europejskimi gigantami energetycznymi, takimi, jak Shell, Siemens, Électricité De France (EDF) etc.,
- powołano duży fundusz innowacji w zakresie czystych technologii z budżetem 1 mld EU rocznie, koncentrujący się na inwestycjach w energetykę wodorową.

4.1. ROZWIĄZANIA W OBSZARZE DETALICZNYM

Strategia wodorowa w obszarze detalicznym, dotycząca indywidualnych użytkowników pojazdów wodorowych, zasilanych w paliwo na specjalistycznych stacjach tankowania wodoru.

W tym obszarze należy wziąć pod uwagę dwa główne aspekty, po pierwsze dostępność pojazdów wodorowych oraz stacji tankowania wodorem dla odbiorców indywidualnych. Jako dostępność należy mieć na uwadze również cenę takiego pojazdu, jak i koszty eksploatacji.

Wspomniana Polska Strategia Wodorowa pomija kwestię odbiorcy detalicznego, skupiając się na transporcie zbiorowym, drogowym, kolejowym, lotniczym oraz morskim, kładąc nacisk na konieczność rozwoju technologii ogni w paliwowych w transporcie lądowym oraz rozwiązań bazujących na amoniaku, jako paliwie w transporcie morskim.

Warto jednak zaznaczyć, że przyjęta w 2023 roku wytyczna organów Unii Europejskiej, która mówi, że po 2035 roku będzie obowiązywał zakaz sprzedaży określonej grupy nowych aut spalinowych, a do roku 2050 wszystkie auta powinny być bezemisyjne będzie miała znaczny wpływ na rynek transportowy w Polsce. Szanuje się, że rozwój rynku pojazdów zasilanych wodorem będzie rozwijał się głównie w kierunku transportu publicznego

^o ECHA - European Clean Hydrogen Alliance

i towarowego. Udział ciężkich samochodów dostawczych w roku 2050 szacuje się na poziomie 30%, a zapotrzebowanie na wodór w tym sektorze będzie wynosić ok 230 000 ton. Osobowe samochody wodorowe będą w tym czasie stanowiły ok 3% rynku, a autobusy wodorowe ok 10% rynku. Szacuje się, że transport związany z wykorzystaniem wodoru będzie w tym czasie zużywał ok 20% ogólnego zapotrzebowania na wodór²⁹.

Dodatkowo producenci osobowych samochodów wodorowych wykorzystujących ogniwa paliwowe do produkcji energii elektrycznej konkurują z producentami aut elektrycznych zasilanych z sieci, gdzie infrastruktura dostępu do energii jest znacznie bardziej rozwinięta, niż dostęp aut wodorowych do detalicznych stacji tankowania wodorem.

Jednakże można wskazać kilka cech aut wodorowych, które podnoszą ich konkurencyjność wobec aut elektrycznych, tj. większy zasięg przy jednym tankowaniu, czy krótszy proces tankowania.

Wg badania projektu HyFIVE^{p30} potencjalni użytkownicy wodorowych aut osobowych kierują się następującymi przesłankami przy jego wyborze:

- cena zakupu/najmu/leasingu,
- dostęp do stacji tankowania wodorem (również na autostradach),
- zasięg na jednym tankowaniu,
- niezawodność stacji tankowania wodorem,
- lokalna sieć stacji tankowania wodorem,
- cena wodoru,
- walory użytkowa auta,
- niezawodność auta.

Tabela 3 przedstawia dostępne w sprzedaży detalicznej samochody typu FCEV^q, wykorzystujące technologię ogniw paliwowych zasilanych wodorem

Tabela 3 Dostępne w sprzedaży detalicznej samochody typu FCEV, wykorzystujące technologię ogniw paliwowych zasilanych wodorem³¹.

Producent	Model	Moc silnika	Maksymalna prędkość	Zużycie wodoru	Pojemność baterii	Zasięg	Pojemność zbiornika na wodór	Cena
		kW	km/h	Kg/100 km	kWh	km	in kg	EUR/Niemcy
Hyundai	Nexo	120	177	0,95	1,56	666	6,33	77.290
Toyota	Mirai (2 generacja)	134	175	0,89	1,24	650	5,6	65.990

Prognozuje się, że do 2030 roku 1 na 22 aut osobowych oraz 1 na 15 lekkich aut ciężarowych będzie, to pojazd typu FCEV (Fuel Cell electric Vehicle), co ma stanowić 15% spadek emisji NO_x w transporcie drogowym³².

W 2008 roku UE ustanowiła partnerstwo publiczno-prywatne o nazwie „Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertakin („FCHJU”), który odegrał kluczową rolę w opracowywaniu i wdrażaniu technologii wodorowych i ogniw paliwowych w Europie. Organizacja ta zakłada

^p HyFIVE – Hydrogen for Innovative Vehicles, Wodór dla innowacyjnych pojazdów, projekt zrzeszający 15 partnerów, którzy wdrożą 185 pojazdów elektrycznych napędzanych ogniwami paliwowymi (FCEV) pięciu światowych firm motoryzacyjnych, które przodują w komercjalizacji tych technologii.

^q FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle

rynek wodorowych aut osobowych wykorzystujących technologię ogniw paliwowych na 3,7 milionów do roku 2030³³.

W roku 2019 jedynie 16% patentów w obszarze technologii wodorowych pochodziło z Unii Europejskiej, dlatego też opracowano centralnie następujące kroki w strategii długoterminowej³³:

- przemysł i organy legislacyjne powinny współpracować, aby wyznaczyć jasne, długoterminowe cele dekarbonizacji w różnych segmentach rynku pojazdów wodorowych, również w obszarze niezbędnej infrastruktury i dostępności,
- aby zachować konkurencyjność oraz atrakcyjność inwestycyjną, Unia Europejska powinna prowadzić prace w zakresie ogniw paliwowych i ich wykorzystania. Osiągnięcie tego celu wymaga współpracy pomiędzy podmiotami zarówno rynkowymi, jak i legislacyjnymi. Jest to niezbędne ze względu na dużą konkurencyjność Japonii oraz Chin,
- w branży transportowej organy legislacyjne powinny określić jasną politykę legislacyjną, tzw. mapę drogową umożliwiającą osiąganie celów strategicznych, również poprzez wsparcia finansowania oraz zachęty inwestycyjnych,
- przyjęcie celu rozwinięcia infrastruktury dla pojazdów FCEV, co ostatecznie doprowadziłoby do ogólnych obniżek kosztów i zwiększenia możliwości wyboru pojazdów przez użytkowników końcowych.

Polska Strategia Wodorowa Przewiduje do 2030 roku powstanie 32 stacji tankowania wodorem, jednakże według opinii uczestników wywiadów do 2030 roku powstanie 15-20 takich stacji. Przewidują również, że do 2040 roku pojazdy wodorowe będą powszechniejsze od aut elektrycznych, stanowić też będą większy udział w rynku aut osobowych (ok 10%). Uczestnicy wywiadów przewidują dalszy rozwój rynku wodorowych aut osobowych, zaznaczyli jednak, że jest to zależne od otoczenia legislacyjnego, dostępności oraz rozwoju towarzyszącej infrastruktury.

4.2. ROZWIĄZANIA W OBSZARZE SAMORZĄDOWYM

Polska Strategia Wodorowa przewiduje, że dekarbonizacja w obszarze drogowego transportu publicznego zwiększy udział w rynku pojazdów FCEV^r, wykorzystujących technologię ogniw paliwowych. Użytkowanie autobusów FCEV obok autobusów elektrycznych ma przyczynić się do osiągnięcia celów w zakresie niskoemisyjnego transportu, określonych w Strategii na rzecz zrównoważonej i inteligentnej mobilności Komisji Europejskiej 2040³⁴. Zgodnie z tą strategią od 2025 r. miasta o ludności powyżej 100 tys. mieszkańców będą zobowiązane do zakupu wyłącznie bezemisyjnych^s pojazdów (cel zeroemisyjna flota do 2030 roku). Wspierane działania, to:

Do roku 2025:

- rozpoczęcie eksploatacji autobusów zeroemisyjnych napędzanych wodorem – od 100 do 250 nowych autobusów wodorowych,
- rozwój sieci stacji tankowania i bunkrowania wodoru – min. 32 nowe stacje,
- powstanie instalacji do oczyszczania wodoru do standardu czystości zgodnie z normą obowiązującą w UE.

^r FCEV – z ang. Fuel Cell Electric Vehicle, środek lokomocji wykorzystujący ogniwa paliwowe.

^s Pojazdy bezemisyjne – w rzeczywistości, zdaniem autorów raportu pojazdy niskoemisyjne.

Do roku 2030:

- rozpoczęcie eksploatacji – od 800 do 1000 nowych autobusów wodorowych, w tym wyprodukowanych w Polsce,
- dalszy rozwój infrastruktury tankowania i bunkrowania wodoru.

W styczniu 2023 roku, według opracowania CIRE^t roku sytuacja na rynku autobusów wodorowych wyglądała następująco³⁵ :

- Kraków, użytkowane są dwa pojazdy FVEV, w planach zakup 150 szt.,
- Rybnik, planuje zakup 11 szt. pojazdów FCEV w 2023 roku,
- Konin, użytkowany jest jeden pojazd FCEV, planowany jest zakup 30 szt.,
- Lublin, zakupiony jeden pojazd FCEV (planowana dostawa sierpień 2023),
- Wrocław, trwają testy, aktualnie użytkują pojazdy o napędzie elektryczny, ładowane z sieci,
- Łódź, trwają testy, aktualnie użytkują pojazdy o napędzie elektryczny, ładowane z sieci,
- Gdańsk, trwają testy, aktualnie użytkują pojazdy o napędzie elektryczny, ładowane z sieci.

Miasta testujące autobusy typu FCEV^u, to Wrocław, Gdynia, Gdańsk, Łódź, Warszawa, Rybnik, miasta użytkujące autobusy typu FCEV, to Kraków 2 szt., Konin 1 szt., Lublin 1 szt. od sierpnia 2023.

Wszystkie ośrodki miejskie planują hybrydowe rozwiązania w transporcie publicznym, tj. kombinację floty autobusów typu FCEV oraz autobusów z napędem elektrycznym ładowanych z sieci.

Niewątpliwie kluczowym aspektem w przypadku budowania strategii rozwoju floty w zakresie technologii wodorowych jest możliwość jego finansowania, w tym dostępność środków dotacyjnych. Budowanie strategii bezpieczeństwa wodorowego w tym zakresie powinno obejmować m. in.:

- bezpieczeństwo technologiczne i operacyjne,
- bezpieczeństwo związane z łańcuchem dostaw (dostępność wodoru oraz stacji tankowania),
- efektywność inwestycji w rozwiązania FCEV z uwzględnieniem interesu społecznego oraz środowiskowego.

4.3. ROZWIĄZANIA DLA SYSTEMÓW PRZEMYSŁOWYCH

W chwili obecnej wodór w Polsce jest wykorzystywany głównie jako surowiec w przemyśle chemicznym, petrochemicznym i rafineryjnym, a głównym wytwórcą wodoru jest w Polsce przemysł²⁸:

- związany z produkcją nawozów azotowych, gdzie jako półprodukt występuje amoniak, wytwarzany w ilości przekraczającej 2 mln ton rocznie,
- petrochemiczny i rafineryjny w procesie produkcji m.in. paliw ciekłych. Wodór wytwarzany jest w tym przypadku z gazu ziemnego w procesie reformingu parowego metanu. Wolumen to ok 1,3 mln ton wodoru rocznie,
- stalowy, gdzie przyjmuje się bardzo wysoka jego emisyjność, ok 1,83 tony CO₂/tonę stali,

^t CIRE - Centrum Informacji o Rynku Energii, www.cire.pl.

^u FCEV- Fuel Cell Electric Vehicles, pojazdy z napędem elektrycznym zasilane wodorem.

- szklarski, energetyczny jako gaz chłodzący w generatorach, spożywczy, elektroniczny, transportowy³⁶.

Rozwiązaniem dla zmniejszenia emisyjności związanej z produkcją oraz przetwarzaniem wodoru w przemyśle jest pozyskiwanie go ze źródeł niskoemisyjnych. Zakłada się, że ta zmiana pozwoli w samym procesie reformingu parowego zredukować emisję CO₂ o ok. 1,4 mln ton rocznie²⁸.

W celu propagowania zastosowań niskoemisyjnego wodoru planuje się wsparcie dla dolin wodorowych, czyli organizacji budujących łańcuch dostaw niskoemisyjnego wodoru. Zgodnie z założeniami Polskiej Strategii Wodorowej panuje się następujące działania w tym zakresie:

Do roku 2025:

- działania na rzecz pozyskania i zastosowania niskoemisyjnego wodoru do procesów produkcji petrochemicznej, chemicznej oraz nawozowej w oparciu o zieloną energetykę przemysłową,
- budowa strategii wdrażania niskoemisyjnych technologii wodorowych w najbardziej energochłonnych gałęziach przemysłu,
- dedykowane programy pilotażowe dla gałęzi przemysłu, którym najtrudniej będzie osiągnąć neutralność klimatyczną (stalowy, rafineryjny, chemiczny),
- wykonywanie studiów wykonalności dla łańcuchów dostaw w ramach dolin wodorowych.

Do roku 2030:

- powstanie co najmniej 5 dolin wodorowych będącymi centrami doskonałości w procesie wdrażania gospodarki wodorowej, integracji sektorów, transformacji klimatycznej przemysłu oraz budowie infrastruktury,
- transfer wiedzy w obszarze międzynarodowym, w tym europejskim.

Niewątpliwie ważną gałęzią przemysłu związanego z Polską Strategią Wodorową jest produkcja wodoru w nowych instalacjach. Kluczowe wg Ministerstwa Klimatu i Środowiska jest tutaj zapewnienie warunków dla uruchomienia instalacji do produkcji wodoru ze źródeł nisko i zeroemisyjnych. Należy tutaj podkreślić, że produkcja wodoru odnawialnego będzie ściśle powiązana z rozwojem OZE. Planuje się następujące działania w tym zakresie:

Do roku 2025:

- prace B+R dla niskoemisyjnych technologii pozyskiwania wodoru,
- uruchomienie instalacji do produkcji wodoru z niskoemisyjnych źródeł, procesów i technologii (łączna moc min. 50 MW):
 - wody w procesie elektrolizy,
 - biomasy w technologii zgazowania, fermentacji lub pirolizy,
 - biogazu w procesie reformingu parowego,
 - biometanu w procesie reformingu parowego,
 - odpadów w technologii zgazowania,
 - termicznego przetwarzania lub procesie,
 - pirolizy,
 - gazów odpadowych,

- węglowodorów w procesie reformingu parowego z wykorzystaniem CCS^v/CCU^w,
- węgla w procesie zgazowania z wykorzystaniem CCS/CCU, technologii IGCC^x oraz IGFC^y,
- innych niskoemisyjnych procesów i technologii pozyskiwania wodoru,
- uruchomienie wytwarzania gazów syntetycznych w procesie metanizacji wodoru oraz wykorzystanie niskoemisyjnego wodoru w produkcji amoniaku.

Do roku 2030:

- dążenie do osiągnięcia mocy instalacji do produkcji wodoru i jego pochodnych z niskoemisyjnych źródeł, procesów i technologii na poziomie 2 GW, w tym w szczególności instalacji elektrolizerów.

Uczestnicy wywiadów zwrócili jednak uwagę, że nie spodziewają się gwałtownego rozwoju technologii OZE do 2030 roku, który to rozwój prognozują dopiero w perspektywie roku 2050. W związku z tym należałoby zweryfikować założenia Polskiej Strategii Wodorowej o szerszy opis uwzględniający powiązanie wytwarzania niskoemisyjnego wodoru z technologiami OZE jako bazy (wąskiego gardła) możliwości rozwoju tego sektora.

Jeżeli chodzi o przemysł, który wykorzystuje wodór ze źródeł wysokoemisyjnych uczestnicy wywiadów przewidują do 2030 roku rozwój prac badawczo-rozwojowych, systemów pilotażowych, jednak dopiero na rok 2040 prognozują szersze wykorzystanie niskoemisyjnego wodoru w tym obszarze. Uczestnicy wywiadów przewidują też, że stanie się to koniecznością ze względu na bariery legislacyjne oraz limity emisyjności. Ponownie tutaj należy wspomnieć o konieczności wspólnego wsparcia dla obszaru wytwarzania wodoru niskoemisyjnego oraz dla dalszego rozwoju OZE.

Należy zwrócić uwagę, że Polska Strategia Wodorowa upatruje sukces osiągania celów w ścisłej współpracy dołin wodorowych, a co za tym idzie podmiotów zarówno naukowych, samorządowych, legislacyjnych, jak i przemysłu. Jest to jeden z najważniejszych obszarów, które powinny być monitorowane oraz wspierane.

4.4. POZOSTAŁE KWESTIE

Na uwagę w obszarze strategii wodorowych zasługuje również obszar strategii wykorzystania niskoemisyjnego wodoru w obszarze transportu morskiego.

Polska Strategia Wodorowa wskazuje na konieczność minimalizacji emisji CO₂ w obszarze transportu morskiego, co można osiągnąć wykorzystując niskoemisyjny wodór oraz amoniak. Silnie rozwijający się obecnie sektor morskiej gospodarki wiatrowej również stawia przed armatorami konieczność wypracowania rozwiązań niskoemisyjnych, chociażby w obszarze obsługi flotowej dla farm wiatrowych.

Obecnie prowadzi się prace nad rozwojem następujących technologii niskoemisyjnych napędów w obszarze morskim (tabela 4):

^v CCS – Carbon Capture and Storage, proces polegający na wychwytywaniu dwutlenku węgla ze spalin oraz jego późniejszego magazynowania.

^w CCU – Carbon Capture and Utilisation, proces polegający na wychwytywaniu dwutlenku węgla ze spalin oraz jego późniejszego wykorzystania.

^x IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle technologia bloku gazowo-parowego ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa lub też kompleks zgazowania pozostałości rafineryjnych,

^y IGFC – Integrated Gasification Fuel Cell system -

Tabela 4 Drogi rozwoju niskoemisyjnych napędów morskich³⁷.

Technologia	Napęd	Magazyn energii	Konwersja energii
Baterie	Silnik elektryczny	Baterie	Bezpośrednio z baterii do silnika elektrycznego
Wodorowe ogniwa paliwowe	Silnik elektryczny	Ciekły wodór	Elektrochemiczna za pomocą ogniw paliwowych
Silniki wodorowe z wewnętrzną komorą spalania	Silnik z wewnętrzną komorą spalania	Ciekły wodór	Spalanie ciekłego wodoru w silniku
Ogniwa paliwowe zasilane amoniakiem	Silnik elektryczny	Ciekły amoniak	Produkcja wodoru z amoniaku za pomocą reformera, następnie elektrochemiczna za pomocą ogniwa paliwowego
Silniki z wewnętrzną komorą spalania zasilane amoniakiem	Silnik z wewnętrzną komorą spalania	Ciekły amoniak	Spalanie ciekłego amoniaku w silniku
Silniki z wewnętrzną komorą spalania zasilane elektro-metanem ^z	Silnik z wewnętrzną komorą spalania	Metan syntetyczny wytwarzany z udziałem energii elektrycznej	Spalanie elektro-metanu w silniku
Silniki z wewnętrzną komorą spalania zasilane elektro-dieslem	Silnik z wewnętrzną komorą spalania	Diesel syntetyczny wytwarzany z udziałem energii elektrycznej	Spalanie elektro-diesla w silniku

Przy wyborze rozwiązań w tym obszarze należy wziąć pod uwagę szereg czynników mogących wpływać na efektywność ekonomiczną oraz technologiczną wybranego rozwiązania. Rozwiązania wodorowe oraz amoniak wydają się być efektywnym rozwiązaniem, jednak obecnie drogim. Dodatkowo rozwiązania wodorowe związane są z wykorzystaniem przestrzeni ładunkowej w stopniu mogącym wpływać na opłacalność transportu. Uczestnicy wywiadów rekomendują wykorzystanie hybrydy technologii akumulatorów oraz odnawialnego wodoru/metanu, jako najbardziej prawdopodobnych w szybkim rozwoju opierającym się na niskoemisyjnych rozwiązaniach.

Uczestnicy wywiadów również wskazali na konieczność budowania strategii w tym obszarze uwzględniając różne czynniki, tj., stwierdzili, że możliwości zastosowania technologii związanych z wodorem w jednostkach pływających są zróżnicowane ze względu na ich specyfikę. Najcenniejszym zasobem na pokładzie jest powierzchnia i ładowność, a wodór wraz ze zwiększeniem dystansu i np. przeznaczeniem danej jednostki do transportu towarów, zajmuje więcej miejsca. Generalnie, im dłuższa odległość jaką pokonuje dana jednostka, tym aplikacja technologii wodorowych jest mniej opłacalna ze względu na zajmowanie dużej przestrzeni i kwestie ekonomiczne oczywiście w połączeniu z realizacją celów w obszarze redukcji emisyjności.

Nierozierwanie z niskoemisyjnością floty związany jest również obszar portowy, który powinien podążać w kierunku portu zielonego, niskoemisyjnego, Uczestnik wywiadów

^z Elektro-paliwa, lub e-paliwa – paliwa syntetyczne powstałe w wyniku połączenia wodoru z dwutlenkiem węgla, przy użyciu energii elektrycznej, jako głównego źródła energii.

związany z przemysłem portowym stwierdził, że istnieje obecnie silna współpraca pomiędzy portami, w celu osiągnięcia maksymalnego ograniczenia śladu węglowego.

5. IDENTYFIKACJA OBSZARÓW KONIECZNYCH DO OPRACOWANIA W ISTNIEJĄCYM OTOCZENIU PRAWNYM I TECHNICZNYM

Jako główne bariery w otoczeniu legislacyjnym uczestnicy wywiadów wskazali:

- brak jednego „prawa wodorowego” powoduje, że wiele przepisów dotyczących technologii wodorowych jest niejasnych i trudnych w interpretacji, a także są one umieszczone w wielu szczegółowych aktach prawnych, co rodzi ryzyko wzajemnie się wykluczających zapisów,
- problem rozproszenia legislacyjnego wiąże się również z resortowością polityk. Różne departamenty mogą na wodór patrzeć przez pryzmat odmiennych interesów, co prowadzić może do konfliktów, a w rezultacie do sprzecznych aktów prawnych,
- brak jest również konkretnych wytycznych (na przykład w zakresie prawa budowlanego w związku z budową stacji tankowania wodorem, homologacji pojazdów używanych w transporcie publicznym, składowania wodoru na statkach, mieszanina wodoru z innym gazem). Przekłada się to na duże ryzyko inwestycyjne, wiążące się z obawą przed biurokracją (np. urzędnicy w obliczu braku jednoznacznych regulacji nie są w stanie wydawać odpowiednich pozwoleń),
- chociaż istnieją normy związane z tankowaniem wodorem, w Polsce nadal nie ma ustawy ani rozporządzeń regulujących tę kwestię (wyjściem z tej sytuacji jest posiłkowanie się regulacjami dot. CNG^{aa})^{bb},
- jednym z pomysłów na uzyskiwanie niskoemisyjnego wodoru jest wytwarzanie go jako biopaliwa, jednakże nie ma w polskim ustawodawstwie definicji biowodoru,
- brak regulacji ogólnych bądź szczegółowych jest ważną barierą dla rozwoju wodoru w Polsce, ponieważ jego specyfika wymaga dookreślenia kwestii związanych z bezpieczeństwem. Przy braku regulacji biznes obawia się o inwestycje, ponieważ nie wiadomo, w którym kierunku te regulacje podążą (czy będą restrykcyjne, czy liberalne),
- ustawodawstwo i regulacje dotyczące wodoru powstają w dużej mierze na poziomie europejskim. Stanowi to z jednej strony wyznacznik dla legislacji polskiej, z drugiej jest dla niej poważnym ograniczeniem. Dodatkowo, nie zawsze prawo na poziomie europejskim powstaje jako wynik merytorycznych prac, ale również politycznych nacisków różnych krajów, które starają się lobbować na rzecz rozwiązań, które przyniosą korzyści w pierwszej kolejności swojemu krajowi,
- istnieje po stronie respondentów związanych z biznesem obawa, że regulacje będą zmierzały w stronę stworzenia państwowego monopolu i uprzywilejowania w pierwszej kolejności jednej ze spółek skarbu państwa. Z drugiej strony istnieje silna potrzeba regulacji w związku ze specyfiką wodoru (problem zapewnienia bezpieczeństwa),
- z uwagi na fakt, że zastosowanie rozwiązań wodorowych w wielu sektorach jest dopiero wdrażane bądź będzie wdrażane w przyszłości, to brak jest praktyki kalkulowania ryzyka, co objawia się na przykład w kwestii gwarancji i ubezpieczeń produktów wodorowych. Brak regulacji powoduje brak jasności w procedurze szacowania ryzyka, a także uniemożliwia obejmowania gwarancjami produktów związanych z wodorem, co może powodować obawę przed inwestycjami,

^{aa} CNG - z ang. Compressed Natural Gas, sprężony gaz ziemny.

^{bb} Kwestię reguluje Rozporządzenie Ministerstwa Klimatu i Środowiska z 07.11.2022 w sprawie stacji tankowania wodorem.

- w związku z kalkulowaniem ryzyka istotną barierą jest również niskie doświadczenie ubezpieczycieli w zabezpieczaniu inwestycji wodorowych; te doświadczenia są dopiero zbierane,
- wdrożenie wielu inwestycji wodorowych będzie odbywało się na poziomie lokalnym. Zakłada to udział urzędów gminnych w zakresie planowania zagospodarowania przestrzennego. Coraz więcej obowiązków planistycznych po stronie gmin może rodzić ryzyko, że te mogą nie poradzić sobie z tym wyzwaniem zarówno na poziomie kadrowym, jak i merytorycznym (tzn. z wydawaniem decyzji zgodnie z obowiązującym prawem w taki sposób, aby nie spowalniać inwestycji).

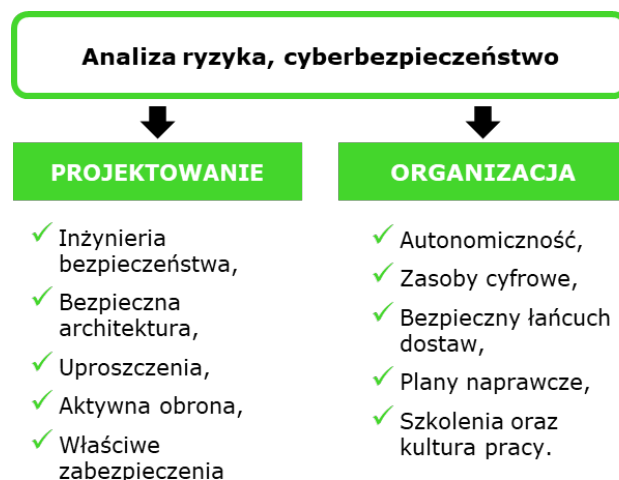
W obszarze technologicznym uczestnicy wywiadów wskazali, że największe wyzwania, to:

- krajowa infrastruktura dystrybucyjna jest z różnym stanie technicznym. Najstarsze z odcinków istnieją od kilkudziesięciu lat. Pojawia się wiele niewiadomych i kontrowersji: jak infrastruktura poradzi sobie z przesyłem wodoru pod kątem materiałów, czy technologie łączenia rur pozwolą na dystrybucję etc. Dodatkowo, w zależności od tego, czy mowa o domieszkowaniu wodoru do gazu lub dystrybucji 100% wodoru, zmieniają się wymagania techniczne dla takiej infrastruktury, co jest dodatkowym kryterium wpływającym na podejmowane działania modernizacyjne. Istnieją rurociągi badawcze do transportu wodoru, ale rurociągi do transportu 100% wodoru w Polsce wciąż nie funkcjonują,
- techniczne aspekty związane ze zbiornikami i magazynami wodoru dotyczą szczególnie: przenikalności wodoru, a więc kwestii materiałowych, ciśnienia oraz temperatury wodoru. Wraz ze wzrostem ciśnienia, wzrasta migracja cząsteczek wodoru, a trend związany ze zbiornikami wodorowymi kieruje się w stronę wysokociśnieniowych - między 500 a 1000 bar. Sprężenie wodoru do tak wysokiego ciśnienia poprawia ekonomikę. W przypadku skroplonego wodoru, jest on przechowywany w bardzo niskich temperaturach (ok. -260°C), więc kriogenika jest kolejnym wyzwaniem technicznym. *Jest to przeszkoda pod wieloma względami - zarówno przeszkoda, jeśli chodzi o kwestie ekonomiczne, jak i projektowe,*
- różne zastosowania wodoru będą wymagały istnienia wyspecjalizowanej kadry o wykształceniu technicznym, której na chwilę obecną brakuje nie tylko w Polsce, ale w całej Europie,
- na poziomie edukacji wyższej nie ma dużej liczby dedykowanych studiów kształcących kompetencje związane z rozwojem gospodarki wodorowej. Jeszcze trudniejsza sytuacja panuje na poziomie edukacji technicznej i zawodowej.

6. SCENARIUSZE KRYZYSOWE – CYBERBEZPIECZEŃSTWO I ZAPOBIEGANIE ATAKOM TERRORYSTYCZNYM

W procesie projektowym dla ogólnie rozumianych instalacji oraz urządzeń wodorowych konieczne jest zwrócenie uwagi na zagadnienia dotyczące cyberbezpieczeństwa, tj. zabezpieczenia sieci informatycznych, urządzeń, oprogramowania oraz danych przed niekontrolowanym dostępem stron trzecich. Dostęp taki można wykorzystać nie tylko w celu nieuprawnionego skopiowania danych, ale również do wywołania scenariusza kryzysowego z krytycznym wpływem na otoczenie³⁸.

Niezwykle istotne jest, aby system zabezpieczeń dotyczących cyberbezpieczeństwa powstał już na etapie projektowym. Pozwoli to na właściwy dobór, implementację oraz testowanie zabezpieczeń.



Rysunek 4 Obszary działania cyberinżynierii³⁸.

W dniu 28 sierpnia 2018 roku weszła w życie Ustawa o Krajowym Systemie Cyberbezpieczeństwa, która implementuje do polskiego prawodawstwa wymagania Dyrektywy Unii Europejskiej NIS^{cc} (Network and Information Security EU 2016/1148). Ustawa o Krajowym Systemie Cyberbezpieczeństwa nakłada na operatorów kluczowych:

- obowiązek szacowania ryzyka, wdrażania procedur zarządzania incydentami, usuwania podatności systemów informatycznych,
- wdrożenie odpowiednich środków technicznych i organizacyjnych w celu właściwego szacowania ryzyk oraz zapobiegania i ograniczania wpływu incydentów na bezpieczeństwo systemu informacyjnego, zbieranie informacji o zagrożeniach oraz podatności na nie,
- obowiązek przygotowania audytu w obszarze cyberbezpieczeństwa.

Dyrektywa NIS obejmuje trzy kluczowe podsektory: energia elektryczna, ropa naftowa oraz gaz ziemny. 16 stycznia 2023 roku Dyrektywa NIS została znowelizowana (EU 2022/2555), jest ona nazwana zwyczajowo Dyrektywą NIS2. Nowelizacja Dyrektywy NIS wprowadza jako jeden z kluczowych sektorów w obszarze energetyki, operatorów instalacji służących do produkcji, magazynowania oraz przesyłu wodoru³⁹. Kluczowe sektory Dyrektywy NIS2, to:

- energia elektryczna,
- system ciepłowniczy,
- ropa naftowa,
- gaz ziemny,
- wodór.

Istotną zmianą jest wprowadzenie w NIS2 włączające w zakres działania Dyrektywy wszystkie średnie i duże przedsiębiorstwa, które działają w sektorach kluczowych, co oznacza, że organy właściwe ds. bezpieczeństwa nie będą indywidualnie wyznaczały podmioty podlegające Dyrektywie. Nakłada to na przedsiębiorstwa dodatkowe obowiązki w tym zakresie i powinno być brane pod uwagę w szacowaniu ryzyk, w tym inwestycyjnych. Dodatkowo wszystkie duże i średnie podmioty, będą miały obowiązek spełnienia Dyrektywy NIS2, również w obszarach niespełniających kryteriów sektorów kluczowych wg. Dyrektywy. Ponadto Dyrektywa NIS2 wprowadza nowe obowiązki dla sektorów kluczowych w obszarze⁴⁰:

^{cc} NIS - z ang. Network and Information Security, bezpieczeństwo sieciowe i informacyjne.

- zapewnienia ciągłości działania oraz właściwego zarządzania kryzysowego,
- zapewnienia bezpieczeństwa w obszarze łańcucha dostaw,
- zapewnienia bezpieczeństwa w obszarze zarządzania siecią i systemami informatycznymi wraz z analizą podatności,
- zapewnienia właściwych procedur wdrażania, użytkowania, oceny i zarządzania ryzykiem,
- zapewnienie użytkowania metod kryptograficznych oraz szyfrujących,
- odpowiedzialności finansowej członków zarządu (do 10 000 000 EUR lub 2% rocznego obrotu),
- uprawnień właściwych organów, tj:
 - kontroli, w tym kontroli wrywkowych,
 - audytów, ocen ryzyka, analizy informacji,
 - skanowania bezpieczeństwa w oparciu o przejrzyste kryteria,
 - występowania z niezbędnymi wnioskami o udzielenie informacji lub żądanie do nich dostępu, koniecznych do oceny ryzyka oraz środków bezpieczeństwa cybernetycznego,
 - występowania z wnioskiem o dowody wdrożenia zarządzania oraz procedur, posiadania wykwalifikowanej kadry etc.

Ustawodawca krajowy ma obowiązek wprowadzenia Dyrektywy do prawodawstwa lokalnego w ciągu dwóch lat od publikacji dyrektywy, także w chwili obecnej organy legislacyjne stoją przed wielkim wyzwaniem dostosowania prawa do zmieniającego się otoczenia. Konieczne będzie klasyfikowanie incydentów znaczących (NIS2) oraz istotnych (RCE^{dd}) wraz z zapewnieniem niezbędnego zarządzania oraz komunikacji.

Należy podkreślić, że oprócz dyrektyw NIS i NIS2 infrastruktura podlega również Dyrektywie RCE (Directive on the Resilience of Critical Entities), w której mowa jest o podmiotach krytycznych, obejmuje ona te same podsektory, co Dyrektywa NIS2. Dyrektywa RCE ma zastąpić Dyrektywę z 2008 roku dotyczącą europejskiej infrastruktury krytycznej, w odróżnieniu od NIS2, która odwołuje się do kwestii zabezpieczeń sieci i informacji. Niestety pomimo deklaracji Komisji Europejskiej wciąż notowany jest rozdźwięk pomiędzy podejściem usługowym i obiektywowym^{ee} w obszarze bezpieczeństwa. Jeżeli chodzi o wymagania Dyrektywy RCE w zakresie cyberbezpieczeństwa dotyczą one głównie potencjalnych incydentów i zagrożeń teleinformatycznych⁴⁰.

Agencją Unii Europejskiej odpowiedzialną za aspekty cyberbezpieczeństwa jest ENISA (European Union Agency For Cybersecurity), która odgrywa kluczową rolę w zastosowaniu Dyrektywy NIS2 w krajach członkowskich Unii Europejskiej, ocenia ona, że wprowadzenie nowelizacji, spowoduje:⁴¹:

- stworzenie niezbędnej struktury zarządzania kryzysami cybernetycznymi,
- zwiększenie stopnia harmonizacji w zakresie wymogów bezpieczeństwa i obowiązków sprawozdawczych,
- zachęcania państw członkowskich do wprowadzenia nowych obszarów zainteresowania, takich jak łańcuch dostaw, zarządzanie podatnością na zagrożenia, do ich krajowych strategii bezpieczeństwa cybernetycznego,
- wniesienie nowatorskich pomysłów, takich jak wzajemne oceny, w celu wzmocnienia współpracy i dzielenia się wiedzą między państwami członkowskimi

^{dd} RCE- z ang. Directive on the Resilience of Critical Entities, Dyrektywa w sprawie odporności podmiotów o krytycznym znaczeniu.

^{ee} Podejście obiektywne – skierowane na obiekt krytyczny, usługowe – skierowane na podmiot krytyczny.

- objęcie większej części gospodarki i społeczeństwa poprzez włączenie większej liczby sektorów, co oznacza, że więcej podmiotów jest zobowiązanych do podjęcia działań w celu podniesienia poziomu swojego cyberbezpieczeństwa.

Organizacja ENISA opublikowała w marcu 2023 roku dokument „Identifying emerging cyber security threats and challenges for 2030” opisujący sześć strategicznych celów w obszarze prognozowania obecnych oraz przyszłych wyzwań dla bezpieczeństwa cybernetycznego. Opracowanie jest wynikiem prac grup projektowych oraz wywiadów z zewnętrznymi ekspertami (polityka, ekonomia, socjologia, technologia, prawo, środowisko naturalne) w okresie od marca do sierpnia 2022 roku.

Po opracowaniu metodologii pracy, zespół projektowy zweryfikował listę trendów, z których można budować scenariusze. Scenariusze, to w tym przypadku określone, możliwe w przyszłości zdarzenia wynikające z określonych trendów. Techniki bezpieczeństwa oparte na budowaniu scenariuszy stają się obecnie coraz bardziej istotne, ze względu na ich przydatność w dużej niepewności i złożoności tych zdarzeń. Budowanie scenariuszy w zespołach projektowych stymuluje wyobraźnię i myślenie strategiczne. Poniżej przedstawiono kombinację pięciu scenariuszy z wybranymi trendami⁴².

Wynikiem przeprowadzonych prac jest wskazanie 21 zagrożeń, wynikających z kombinacji scenariuszy i trendów, które będą kluczowe w perspektywie do 2030 roku, jako główne zagrożenia wymieniono⁴²:

1. zachwianie łańcucha dostaw, w wyniku zależność od oprogramowania,
2. wprowadzanie zaawansowanych techniki dezinformacyjne,
3. wzrost autorytaryzmu nadzoru oraz utrata prywatności,
4. błąd ludzki oraz wadliwa eksploatacja systemów cybernetyczno-fizycznych,
5. ataki ukierunkowane, wspierane przez zwinne urządzenia techniczne do zbierania danych,
6. braki w analizie i kontroli infrastruktury i innych obiektów,
7. wzrost zaawansowanych ataków hybrydowych,
8. umiejętność szybkiego uczenia się systemów technicznych,
9. awarie ze strony dostawców usług z branży informatycznej i telekomunikacyjnej,
10. zagrożenia wynikające z manipulacji w procesie uczenia się sztucznej inteligencji,
11. cyberprzestępstwa związane z walutą cyfrową,
12. cyberprzestępstwa związane z e-zdrowiem,
13. manipulacje w łańcuchu dostaw z wykorzystaniem technologii obrazu AI (sztucznej inteligencji),
14. ataki związane z technologiami kwantowymi,
15. zagrożenia związane z niezabezpieczonymi obszarami danych wymienianych między sektorami,
16. zagrożenia z wykorzystaniem sztucznej inteligencji,
17. zagrożenia hakerskie na łańcuchach dostaw związanych z żywnością,
18. zagrożenia wynikające z niekompatybilności technologicznej blockchain,
19. wywoływanie zakłóceń w publicznej blockchain,
20. zagrożenia związane z fizycznymi zakłóceniami środowiskowymi,
21. zagrożenia wynikające z celowego przeładowania systemów i służb bezpieczeństwa.

Niewielka ilość publikacji związanych z cyberbezpieczeństwem w obszarze energetyki wodorowej wyznacza konieczność opierania się na wytycznych dotyczących ogólnie obszaru energetycznego. Oczywiście zagadnienia cyberbezpieczeństwa są uniwersalne dla wielu systemów wykorzystujących technologie cyfrowe, tak jak obszar wodorowy, jednakże, jak widać z projektu ENISA, przytoczonego powyżej, eksperci zaproszeni do tego projektu, wskazali technologie wodorowe jako jeden z trendów wpływających na

budowanie strategii cyberbezpieczeństwa. Dlatego też koniecznym wydaje się rozwój piśmiennictwa w tym obszarze.

Również uczestnicy wywiadów podkreślili, że zagadnienia cyberbezpieczeństwa są niezwykle istotne w obszarze zapewnienia bezpieczeństwa w łańcuchu dostaw w technologii wodorowej. Jest tak ponieważ powszechnie używa się tutaj technologii cyfrowych do przesyłu oraz przechowywania danych.

Eksperti wskazali, że w aspekcie cyfrowym na polskim rynku występuje oferta związana z zarządzaniem pracą habu wodorowego. Rozbudowywane są systemy informatyczne służące do zarządzania, bilansowania produkcji i zużycia wodoru w lokalnej wyspie energetycznej, w danym ekosystemie przy koegzystencji różnych źródeł energii, magazynów energii etc. W Polsce znajdują się podmioty zajmujące się cyfrowymi zabezpieczeniami dla infrastruktury wodorowej Realizują zlecenia głównie zagraniczne, ale jest gotowa do obsługi polskich klientów.

Uczestnik wywiadów wskazał też, że obecnie w procesie silnego rozwoju są dostępne zabezpieczenia opierające się na technologii kwantowej.

Tabela 5 przedstawia powiązania pomiędzy trendami i scenariuszami w obszarze cyberbezpieczeństwa.

Tabela 5 Powiązania pomiędzy trendami i scenariuszami w obszarze cyberbezpieczeństwa, opracowanie na podstawie⁴².

	Obszary				
	Scenariusz 1	Scenariusz 2	Scenariusz 3	Scenariusz 4	Scenariusz 5
Trendy	Blockchain (blokowa architektura danych), deepfake (technologie budowania obrazów AI) i cyberprzestępczość w środowisku bogatym w dane	Przyjazne dla środowiska, zrównoważone w rozwoju miasta (smart cities)	Więcej danych - mniej kontroli	Zrównoważona energia, automatyzacja pracy	Legislacja, stronniczość, wymieranie i globalne zagrożenia
	Wzrost użycia zdalnych technologii utrzymania ruchu	Obniżenie poziomu dostępu do świeżej wody	Wzrost trudności dostępu organów ścigania do szyfrowanych sieci i danych	Wzrost popularności pracy nie opartej na tradycyjnym modelu struktury pracy	Wzrost ilości wprowadzanych regulacji w obszarze technologii
	Wzrost użycia technologii Distributed Ledger (DIT) - infrastruktura technologiczna i protokoły, które umożliwiają jednoczesny dostęp, weryfikację i aktualizację rekordów w sieciowej bazie danych.	Wzrost wpływu geopolitycznego na dostawę usług komunikacji	Wzrost liczby urządzeń, które nie są lub nie mogą być regularnie zabezpieczane przed błędami	Wzrost zaufania do automatyzacji oraz łączności w obszarze produkcji energii odnawialnej	Kontrola satelitarna infrastruktury krytycznej
	Rozwój technologii deepfake	Wzrost wpływu na politykę instytucji pozarządowych	Systemy decyzyjne oparte na automatycznej analizie danych	Wzrost popularności dostępu do technologii w chmurze	Rozwój technologii opartej na sztucznej inteligencji

Wzrost użycia technologii zbierania i analizowania danych dotyczących zachowania się użytkowników, zwłaszcza w sektorze prywatnym	Wzrost cyberbezpieczeństwa podczas wyborów	Problemy natury psychicznej i psychologicznej ofiar cyberprzestępczości	Automatyzacja rolnictwa	Nadrzędność technologii cyfrowych
Wzrost możliwości połączeń w obszarze przestępczości gospodarczej	Powstawanie inteligentnych miast "smart city"	Możliwości kontroli danych stają się technicznie coraz bardziej wymagające	Zastępowanie paliw kopalnych technologiami wodorowymi i elektrycznością	Zmiany w populacji biologicznej, wymieranie

7. WNIOSKI I REKOMENDACJE

Analiza tematyki wodorowej, jak i przeprowadzone wywiady nakreśliły obraz polskiej gospodarki wodorowej, jako obszaru w bardzo dynamicznym rozwoju, jednak z ciągle nieuregulowanym obszarem prawno-gospodarczym, co niewątpliwie wpływa na konkurencyjność tego sektora, zarówno na arenie krajowej, jak i międzynarodowej.

Polski rynek wodorowy, to obecnie głównie duże przedsiębiorstwa zarówno w obszarze potencjalnego wytwarzania, jak i wykorzystywania wodoru. Należy tutaj wspomnieć o dużym wkładzie merytorycznym jednostek naukowych oraz badawczych, które wspólnie z przemysłem realizują innowacyjne programy badawczo-rozwojowe w obszarze wodoru.

Obecnie na rynku obserwuje się konkurencyjność dużych organizacji w obszarze wodorowym, istnienie klastrów oraz dolin wodorowych zdaje się nie rozwiązywać kompleksowo zjawiska ograniczonej współpracy pomiędzy podmiotami.

Wciąż obserwuje się duży udział wodoru wytwarzanego metodami tradycyjnymi, wysokoemisyjnymi, a więc głównie wodoru „szarego”. Dodatkowo odnotowano, że produkcja wodoru ze źródeł odnawialnych jest obecnie w fazie rozwoju oraz wysokiej konkurencyjności. Wiodącą rolę w obszarze technologii wodorowych w Polsce odgrywają duże podmioty oraz tworzone przez nie klastry wodorowe.

Analiza silnych i słabych stron obszaru technologii wodorowych wynikających z przeprowadzonych wywiadów wskazuje, że główne słabe strony, to ograniczenia technologiczne związane z wytwarzaniem zielonego wodoru, bariery związane z logistyką i infrastrukturą, legislacją oraz dostępem do wykwalifikowanych kadr, są to głównie:

- niedostateczny poziom finansowania obszarów OZE w porównaniu z krajami zachodnimi,
- nieprzystosowanie do zwiększonego udziału OZE w infrastrukturze energetycznej,
- nierównomierna lokalizacja inwestycji OZE ze względu na topografię Polski (wiatraki tylko na północy kraju),
- brak stabilności dostaw ze źródeł OZE, a co za tym idzie możliwy do wystąpienia negatywny efekt ekonomiczny,
- ograniczony dostęp do technologii i komponentów, np. elektrolizerów, ze względu na długi czas oczekiwania,
- brak sieci stacji tankowania wodorem, co wpływa negatywnie na plany inwestycyjne związane z technologiami wodorowymi w obszarze mobilności,
- ograniczenia ekonomiczne związane z dostawami wodoru do stacji dystrybucji, tj. skroplony wodór można przewozić w niewielkich, co do zapotrzebowania ilościach, skroplony wodór, ze względu na koszty procesu skroplenia oraz

konieczność utrzymania niskiej temperatury w czasie transportu czyni go również nieoptycznym w transporcie bliskim (do 1000 km),

- magazynowanie skroplonego wodoru wymaga również większych nakładów inwestycyjnych oraz generuje inne ryzyko niż wodór sprężony,
- przesył gazowego wodoru w mieszaninie z metanem powoduje ryzyko wystąpienia korozji wodorowej, która ze względu na konstrukcję sieci, często jest trudna do predykcji,
- wysokie rozproszenie legislacyjne, brak jednolitych regulacji prawnych i normatywnych, konieczność opierania się głównie o wytyczne międzynarodowe,
- bariera finansowa związana zarówno z dostępem do odpowiednich programów dofinansowania publicznego, wysokie nakłady inwestycyjne oraz koszty użytkowania systemów wodorowych, poziom zamożności społeczeństwa,
- wodorowe wyspy technologiczne, tj. punktowy rozwój technologii wodorowych,
- wiodąca rola dużych koncernów, korzystających z dofinansowania europejskiego, brak szerokiej współpracy,
- brak dedykowanych kierunków edukacji związanych z technologiami wodorowymi ogranicza rozwój branży poprzez brak kadr.

Innymi ograniczeniami związanymi z obszarem technologii wodorowych są ryzyka technologiczne, środowiskowe oraz społeczne. Uczestnicy wywiadów wskazali, że szczególnym obszarem koniecznym do rozwoju będzie zastąpienie tradycyjnych i dobrze poznanych, również pod względem bezpieczeństwa metod produkcji wodoru, procesami związanymi z odnawialnymi źródłami energii. Jednakże będzie się to wiązać przede wszystkim z dostępem do wody o odpowiedniej jakości oraz rozbudowaniem sieci przesyłowej w odpowiedniej technologii. Są to bariery, które niosą ze sobą również silny efekt ekonomiczny. Akceptacja społeczna, to również jedna ze słabych stron wprowadzania technologii wodorowych w Polsce, według respondentów jest to również obszar wymagający odpowiednich działań informacyjnych. Polskie społeczeństwo jest bardzo ostrożne w procesie akceptacji technologii wodorowych, preferując lepiej poznane technologie wiatrowe, czy fotowoltaiczne. Można tutaj zwrócić uwagę, że kampanie społeczne dotyczące wodoru nie są mocno rozpowszechnione. Z drugiej strony, to od akceptacji społecznej w głównej mierze zależeć będzie rozwój ważnych gałęzi technologii wodorowych, takich, jak mobilność wodorowa, czy kogeneracja.

Szanse rozwoju obszaru technologii wodorowych, w obszarach ekonomicznym, politycznym, społecznym, środowiskowym oraz infrastrukturalnym, to przede wszystkim:

- konieczność śledzenia śladu węglowego, będzie powodowała, że gospodarka wodorowa będzie zyskiwała na konkurencyjności,
- możliwości rozwoju przedsiębiorstw w projektowaniu oraz produkcji podzespołów urządzeń wodorowych, tj. wypracowanie jednego z kluczowych etapów łańcucha dostaw w obszarze technologii wodorowej,
- rozproszony system ciepłowniczy, pozwala na niskoskalową transformację energetyczną z wykorzystaniem odnawialnego wodoru,
- duże zainteresowanie technologiami wodorowymi dużych koncernów może spowodować rozwinięcie łańcucha dostaw o mniejsze przedsiębiorstwa technologiczne,
- otoczenie polityczno-ekonomiczne Polski implikuje konieczność rozwinięcia technologii pozyskiwania paliw konkurencyjnie, do źródeł zewnętrznych,
- istnienie dolin wodorowych oraz rozwijanie współpracy międzysektorowej w obszarze gospodarki OZE,
- istnienie sieci niezelektryfikowanej kolei, co pozwala na wykorzystanie technologii wodorowych w tym obszarze,

- zmiana pokoleniowa w społeczeństwie oraz kształceniu kadr, większa otwartość na nowe technologie, pozwoli przyspieszyć transformację energetyczną w obszarze wodorowym,
- tworzenie habów wodorowych z instalacjami OZE dla lokalnej produkcji i wykorzystania wodoru,
- nowe regulacje oraz inicjatywy Unii Europejskiej, w tym „European Hydrogen Backbone”.

Współpraca w ramach organizacji zajmujących się rozwojem technologii wodorowych w Europie i w Polsce opiera się na sieci habów oraz wspólnych inicjatyw zarówno publicznych, jak i komercyjnych. W Polsce mamy obecnie sześć dolin wodorowych.

W tabeli 6 przedstawiono polskie doliny wodorowe.

Tabela 6 Polskie doliny wodorowe, opracowanie na podstawie⁴³

Nazwa	Data powstania	Wybrani Liderzy Projektu	Główne założenia projektu
Wielkopolska Dolina Wodorowa	2021/2019	Władze miasta: Poznań, Konin, Kalisz, Piły, Leszno, Ostrowa Wielkopolskiego, Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu, Politechnika Poznańska, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Solaris Bus&Coach Sp. z o.o., ZEPAK S.A., Agencja Rozwoju Regionalnego w Koninie.	Promocja, wspieranie, rozwój badań i produktów oraz usług na rzecz zastosowania technologii wodorowych oraz efektywne połączenie i wykorzystanie potencjału zrzeszonych w jego ramach organizacji.
Pomorska Dolina Wodorowa	2019	Województwo Pomorskie, Klaster Technologii Wodorowych i Czystych Technologii Węglowych Gmina Miasta Gdyni, KP Energetyka S.A., Zarząd Morskiego Portu Gdynia S.A., Rada Inteligentnej Specjalizacji Pomorza z obszaru Technologie morskich i portowo-logistyczne Rada Inteligentnej Specjalizacji Pomorza z obszaru Technologie efektywne w produkcji, przesył, dystrybucji i zużyciu energii i paliw oraz w budownictwie, Stowarzyszenie Obszar metropolitalny Gdańsk, Gdynia, Sopot	Zwiększenie świadomości na temat zmniejszenia emisji szkodliwych gazów, konsultowania prawa w obszarze technologii wodorowych, budowanie relacji biznesowych oraz partnerstw strategicznych, rozwijanie projektów "power to gas" na terenie województwa pomorskiego.
Podkarpacka Dolina Wodorowa	2021	Województwo Podkarpackie, Miasto Rzeszów, Politechnika Rzeszowska, Uniwersytet Rzeszowski, Instytut Energetyki, Oddział Ceramiki CEREL w Boguchwale, Polenergia S.A. Polenergia Elektrociepłownia Nowa Sarzyna Sp. z o.o., ML System S.A., Agencja Rozwoju Przemysłu S.A., Dolina Lotnicza, Stowarzyszenie Grupy Przedsiębiorców Przemysłu	Stworzenie modelu współpracy biznesowej w rozpoczęciu oraz skalowaniu produkcji wodoru za pomocą elektrolizerów z wykorzystaniem nadwyżek energetycznych OZE, Wykorzystywanie potencjału badawczo-naukowego w obszarze technologii wodorowych, wymiana doświadczeń i wiedzy w celu budowania inicjatyw wodorowych.

Nazwa	Data powstania	Wybrani Liderzy Projektu	Główne założenia projektu
		Lotniczego, Autosan Sp. z o.o., Miasto Sanok, Fibrain Sp z o.o.	
Mazowiecka Dolina Wodorowa	2021	PKN ORLEN, Agencja Rozwoju Przemysłu, Sieć Badawcza Łukasiewicz, Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego PAN, Instytut Energetyki, Politechnika Warszawska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Krajowa Agencja Poszanowania Energii, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, TOYOTA Motor Poland Co., Pojazdy Szynowe PESA, ALSTOM KONSTAL Bydgoszcz, Siemens Energy Solaris Bus&Coach Sp. z o.o., Komunikacja Miejska Płock, Izba Gospodarcza Energetyki i Ochrony Środowiska, Polska Izba Przemysłu Chemicznego, STOMIL Bydgoszcz, Politechnika Łódzka, Urząd Dozoru Technicznego	Rozwój i upowszechnianie technologii wodorowych w gospodarce Polski, realizacja projektów badawczo-naukowych, rozwiązania w obszarze kształcenia kadr, konsultowanie obszaru legislacyjnego.
Śląsko-Małopolska Dolina Wodorowa	2022	Orlen Południe, Grupa Azoty Polenergia, Columbus, Węglukoks, Politechnika Śląska, Uniwersytet Śląski, Instytut, Politechnika Krakowska, Instytut Techniki Gazowej Komag, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Główny Instytut Górnictwa, Metropolia Górnośląska-Zagłębiowska	Wspieranie rozwoju gospodarki wodorowej oraz zbudowanie gałęzi śląsko-małopolskiego przemysłu wodorowego, również w obszarze elektrolizy, OZE oraz wykorzystania wodoru w energetyce, w tym ciepłej, transporcie, przemyśle oraz infrastrukturze.
Dolnośląska dolina Wodorowa	2022	KGHM Polska Miedź, Grupa Azoty Zakłady Azotowe Kędzierzyn S.A., Agencja Rozwoju Przemysłu S.A., Uniwersytet Wrocławski, Politechnika Wrocławska, Uniwersytet Wrocławski	Wspieranie rozwoju gospodarki wodorowej oraz realizacja przedsięwzięć naukowych i technologicznych oraz przemysłowych, budowa wspólnego łańcucha gospodarki wodorowej.

Polskie doliny wodorowe są skupione wokół największych graczy rynkowych, stanowią główną oś współpracy w obszarze technologii wodorowych, jednakże inicjatywy takie są niejako skazane na nadrzędność celów swoich liderów.

Słabą stroną Polskich Dolin Wodorowych w porównaniu do podobnych organizacji europejskich, jest przede wszystkim ich regionalizacja ze względów terytorialnych, brak jest klastrów branżowych, międzyterytorialnych oraz działań konsorcyjnych nad konkretnymi projektami ⁴³.

Rekomendacje wynikające z przeprowadzonych prac, to:

- konieczność uregulowania otoczenia legislacyjnego dla branży wodorowej, brak jednolitego prawa spowalnia rozwój przemysłu wodorowego,
- włączenie w łańcuch dostaw organizacji mniejszych, mogących mieć wpływ na szybszy rozwój branży, wypracowanie odpowiednich narzędzi komunikacji w tym obszarze,
- budowanie Strategii Wodorowych w oparciu o szeroki łańcuch dostaw, nieskupianie się tylko na realizacji celów największych graczy,
- odstąpienie od finansowania publicznego inwestycji energetycznych spoza obszaru OZE, kładzenie nacisku na wypracowanie narzędzi akceleryacyjnych w tym zakresie,
- budowanie, odpowiedzialnej społecznej polityki informacyjnej w obszarze wodorowym,
- wspieranie sieci wymiany informacji i kompetencji pomiędzy Organizacjami działającymi w technologiach wodorowych, promowanie budowania konsorcjów Firm międzysektorowych, o różnym rozmiarze i potencjale.

¹ Saffers J-B, Molkov V, „Hydrogen safety engineering framework and elementary design safety tools”, *International Journal of Hydrogen Energy*, tom 39, nr 11, str. 6268-6285, 2014.

² „ISO/TR 15916:2015(E),” International Standard Organisation”, Licensed to Sim-Engineer Sp. z o.o., dostęp płatny od 24/01/2023, nr zamówienia OP-661115.

³ Aktualności, Parlament Europejski, [online] dostępne: <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20210512STO04004/odnawialny-wodor-jakie-sa-korzysci-dla-ue> 18-05-2021, [Data uzyskania dostępu: 17 04 2023], archiwum: <http://archive.today/KBYR7>.

⁴ Vereš J. et al., „Safety Aspects of Hydrogen Fuelling Stations”, The Italian Association of Chemical Engineering, 2022.

⁵ Faudou, J-Y. et. al, „Hydrogen refueling stations: safe filling procedures”, *Air Liquide*, Paryż, str. 1

⁶ Houssin D., *Air Liquide*, 2020, str. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), Grant Agreement Number 875089, str. 34-35.

⁷ Nithin I., Akshay K. S., “A Review of the Optimization Strategies and Methods Used to Locate Hydrogen Fuel Refueling Stations”, *Energies*, 2023, 16(5), 2171; <https://doi.org/10.3390/en16052171>, Howard College Campus, University of KwaZulu-Natal, Durban 4041, South Africa, str. 3, 14.

⁸ “Hydrogen Fuel Cell Vehicle Market (By Vehicle Type: Commercial Vehicle, Passenger Vehicles; By Technology: Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Phosphoric Acid Fuel Cells, Alkaline Fuel Cell, Solid Oxide Fuel Cell, Others) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2022-2030”, [online] <https://www.precedenceresearch.com/hydrogen-fuel-cell-vehicle-market>, [Data uzyskania dostępu: 15.04.2023]., archiwum: <http://archive.today/txoXc>.

⁹ „Introduction of hydrogen safety for responders, European Train the Trainer Programme for Responders,” *Responder*, Hy, 2021. [Online]. https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2021/04/L1_HyResponder_Level4_210616.pdf. [Data uzyskania dostępu: 28.03.2023].

¹⁰ Simon J.M., et.al, „Guidelines for use of hydrogen fuel in commercial vehicles”, U.S, Department of transportation, Booz Allen Hamilton Inc., 2007.

¹¹ Wolanski P. „Alternatywne paliwa lotnicze do silników turbinowych”, *Technika Lotnicza i Astronautyczna*, 1987, nr.2 str 6-8.

¹² Laursen, R.; et al., „Potential of Ammonia as fuel in Shipping,” European Maritime Safety Agency (EMSA), 2022.

¹³ Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-społecznego i Komitetu Regionów, Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu, Komisja Europejska, Bruksela, dnia 8.7.2020 r.COM(2020) 301 final, str.5

-
- ¹⁴ EUR Lex, [online] dostępne: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301> [Data uzyskania dostępu: 15.04.2023].
- ¹⁵ "Handling/maintenance of water electrolysis cell stacks – avoiding electrical discharge", <https://h2tools.org/bestpractices/handlingmaintenance-water-electrolysis-cell-stacks-avoiding-electrical-discharge>, dostęp: 15-04-2023.
- ¹⁶ GUS, Gospodarka energetyczna i gazownictwo w 2021 r., 15.09.2022, str. 3
- ¹⁷ Stolecka K., „Hazards of hydrogen transport in the existing natural gas pipeline network”, *Journal of Power Technologies*, tom 98, nr 4, str. 329–335, 2018.
- ¹⁸ Chaczykowski M., Osiadacz A. J. „Technologie Power to gas”, *Przegląd Gazowniczy*, marzec 2016, str 42.
- ¹⁹ „Gaz-System zgłosił projekty wodorowe do nadania statusu PCI” z dnia 3.03.2023, <https://www.gaz-system.pl/pl/dla-mediow/komunikaty-prasowe/2023/marzec/03-03-2023-gaz-system-zglosil-projekty-wodorowe-do-nadania-statusu-pci.html>.
- ²⁰ Stolecka K., „Hazards of hydrogen transport in the existing natural gas pipeline network”, *Journal of Power Technologies*, tom 98, nr 4, str. 329–335, 2018.
- ²¹ Ćwiek J., „Prevention methods against hydrogen degradation of steel”, *Journal of achievements in materials and Manufacturing Engineering*, OSCOO Word Pess 2010, tom 43, nr 1, str. 214-221, 2010.
- ²² Opracowanie własne.
- ²³ Ligęza K., Narloch P., „Perspektywy magazynowania wodoru z odnawialnych źródeł wodoru z odnawialnych źródeł energii w Polsce”, *Nowa Energia* 1(87), AGH w Krakowie, Polska Spółka Gazownictwa Sp. z o.o., OZG Kraków, 2023, str.79-80.
- ²⁴ Matveev K.I., Leachman J.W., “Modeling of Liquid Hydrogen Tank Cooled with Para-Orthohydrogen Conversion”, *Hydrogen*, 4(1), 2023, 146-153; <https://doi.org/10.3390/hydrogen4010010> , str. 1
- ²⁵ Żyjewska U., „Rodzaje ogniw paliwowych i ich potencjalne kierunki wykorzystania”, *Nafta-Gaz*, 2020, nr 5, s. 332–339, DOI: 10.18668/NG.2021.05.06, str. 338
- ²⁶ Rapacka P., „Dlaczego w Polsce nie ma jeszcze elektrolizerów?”, 2023. [Online]. dostępne: <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/wodor-elektrolizery-Polska-12934.html>. [Data uzyskania dostępu: 17-04-2023].
- ²⁷ <https://wiadomosci.wp.pl/zagrozenie-bezpieczenstwa-dostaw-energii-elektrycznej-to-drugi-raz-w-historii-6890454142093920a>
- ²⁸ Ministerstwo Klimatu. i Środowiska, „Polska Strategia Wodorowa do roku 2030, z perspektywą do 2040 r.”, Uchwała nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. (poz 1138), Warszawa, 2021.
- ²⁹ Pyrka M., Jeszke R., Boratyński J., Tatarewicz I., Witajewski-Baltvilks J., Rabięga W., Wąs A., Kobus P., Lewarski M., Skwierz S., Gorzałczyński A., Tobiasz I., Raślaniec M., Cygler M., Sekuła M., Krupin V., POLSKA NET-ZERO 2050 Mapa drogowa osiągnięcia wspólnotowych celów polityki klima dla Polski do 2050 r. Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy (IOŚ-PIB), str.64.
- ³⁰ „Hydrogen Mobility in Europe, Overview of Progress Towards Commercialisation,” *HyFIVE: Hydrogen for Onnovative vehicles in Europe*, Cambridge, 2018.

-
- ³¹ „<https://en.greengear.de/>,” 2023. [Online]. Available: <https://en.greengear.de/list-market-overview-comparison/fuel-cell-electric-cars-vehicles-fcev/>. [Data uzyskania dostępu: 17 04 2023].
- ³² „Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy,” <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0817d60d-332f-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en>, 2022, dostęp 2023-04-17.
- ³³ „Fueling the future of mobility hydrogen and fuel cell solutions transportation,” Deloitte China, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>, 2020, dostęp 2023-04-17.
- ³⁴ <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-14012-2020-INIT/pl/pdf>
- ³⁵ „Ekologia kontra finanse, autobusy na wodór,” Energia i Recykling, numer 01 2023.
- ³⁶ <https://h2poland.eu/pl/kategorie/zastosowanie/przemysl/wodor-w-przemysle-czekana-nowe-zastosowania/> .
- ³⁷ Abbasow F. et al., „Roadmap to decarbonising European Shipping,” Transport & Environment, Bruksela, 2018.
- ³⁸ Egger S. et al., „Cyber-informed engineering case study of an integrated hydrogen generation plant,” Idaho National Laboratory, Fermont, 2021.
- ³⁹ Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 333, z dnia 27 grudnia 2022 r., „<https://eur-lex.europa.eu/>,” 27.12.2022. [Online]. dostępne: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2022:333:FULL&from=EN>. [Data uzyskania dostępu: 20.04.2023].
- ⁴⁰ Wrzosek M., „Dyrektywa w sprawie odporności przedmiotów krytycznych i Dyrektywa NIS 2,” Nowa Energia, str. 67-68, 5-6 2021.
- ⁴¹ „<https://www.enisa.europa.eu/>,” European Union Agency For Cybersecurity, [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/topics/cybersecurity-policy/nis-directive-new>. [Data uzyskania dostępu: 17 04 2023].
- ⁴² Mattioli R. et al., „Identifying Emerging Cyber Security Threads and Challenges for 2030,” European Union Agency for Cybersecurity), ISBN: 978-92-9204-634-7, DOI: 10.2824/117542, Bruksela, 2023, strona 8
- ⁴³ Wielkopolska Kierunek Wodór, „Przegląd funkcjonowania dolin wodorowych w Polsce i UE,” 11 2022. [Online]. dostępne: <https://h2wielkopolska.pl/wp-content/uploads/2022/11/Doliny-wodorowe.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 28-03-2023].