

Analiza zagrożeń i bezpieczeństwa instalacji w łańcuchu wodorowym

Risk analysis and safety of installations in the hydrogen economy

RENATA WŁODARCZYK, PAULINA KALEJA

DOI 10.36119/15.2025.7-8.1

Zielony wodór jest postrzegany jako kluczowy element przyszłości energetyki zeroemisyjnej i przemysłu zrównoważonego. Jego produkcja ma w najbliższych dekadach przybrać charakter rozproszony, a dzięki rozwojowi technologii (np. elektrolizerów) coraz większe znaczenie zyska ekologiczna metoda pozyskiwania wodoru z elektrolizy wody. Rozwój technologii wodorowych stanowi kluczowy element transformacji energetycznej, ale wiąże się ze specyficznymi wyzwaniami bezpieczeństwa wynikającymi z właściwości wodoru, takich jak: łatwopalność, szeroki zakres palności i kruchość wodorowa. Bezpieczne magazynowanie wodoru i przesył wodoru wymagają stosowania odpowiednich materiałów, systemów detekcji oraz przestrzegania norm i przepisów krajowych i unijnych (ATEX, PED, SEVESO III). Infrastruktura przesyłowa musi być projektowana z uwzględnieniem ryzyka wycieków mieszanin wybuchowych. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono analizę i ocenę zagrożeń związanych z instalacjami funkcjonującymi w ramach łańcucha wodorowego, przedstawiono gospodarkę wodorową jako innowacyjną i przyszłościową technologię, która może odegrać istotną rolę w procesie odchodzenia od paliw kopalnych. Zwrócono uwagę na specyficzne właściwości fizykochemiczne wodoru, które wymagają bezwzględnego przestrzegania norm, rozporządzeń i wytycznych dotyczących bezpiecznej eksploatacji instalacji, w których wodór jest produkowany, magazynowany lub transportowany.

Słowa kluczowe: technologie wodorowe, właściwości wodoru, magazynowanie wodoru, przesył wodoru, zasady bezpieczeństwa

Green hydrogen is seen as a key element of the future of zero-emission energy and sustainable industry. Its production is to become distributed in the coming decades, and thanks to the development of technology (e.g. electrolyzers), the ecological method of obtaining hydrogen from water electrolysis will become increasingly important. The development of hydrogen technologies is a key element of the energy transformation, but it is associated with specific safety challenges resulting from the properties of hydrogen, such as flammability, a wide range of flammability and hydrogen embrittlement. Safe hydrogen storage and transmission require the use of appropriate materials, detection systems and compliance with national and EU standards and regulations (ATEX, PED, SEVESO III). The transmission infrastructure must be designed taking into account the risk of leaks and explosive mixtures.

As part of this work, an analysis and assessment of the risks associated with installations operating within the hydrogen chain was carried out, the hydrogen economy was presented as an innovative and future technology that can play an important role in the process of moving away from fossil fuels. Attention was drawn to the specific physicochemical properties of hydrogen, which require strict compliance with standards, regulations and guidelines regarding the safe operation of installations in which hydrogen is produced, stored or transported.

Keywords: hydrogen technologies, hydrogen properties, hydrogen storage, hydrogen transmission, safety principles

Wprowadzenie – zielony wodór jako przyszłość energetyki zeroemisyjnej i zielonego przemysłu

W obliczu globalnych wyzwań klimatycznych i rosnącego zapotrzebowania na czystą energię, coraz większą uwagę poświęca się rozwojowi technologii wodorowych. Choć wciąż pozostają one w fazie dynamicznego rozwoju, już dziś

dostrzegalny jest ich ogromny potencjał. Wodór jako gaz o unikalnych właściwościach, staje się obiektem zainteresowania inżynierów, naukowców i przemysłu, ze względu na swoje liczne zalety oraz szerokie możliwości zastosowania m.in. w energetyce, transporcie, magazynowaniu i sprężaniu energii [1-2].

Kluczowym aspektem przy projektowaniu a następnie budowaniu instalacji wodorowych jest zapewnienie odpowied-

niego poziomu bezpieczeństwa poprzez zastosowanie nowoczesnych systemów detekcji, czujników i skutecznych zabezpieczeń przed dyfuzją wodoru. Eksperti prognozują, że w perspektywie najbliższych kilku dekad (od 5 do 50 lat), produkcja wodoru przyjmie w dużej mierze charakter rozproszony a skala jego wytwarzania będzie sukcesywnie rosnąć wraz z doskonaleniem technologii [3]. Wodór jest pierwiastkiem, który dzięki

dr inż. Renata Włodarczyk <https://orcid.org/0000-0002-0093-5178> – Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa

mgr inż. Paulina Kaleja – Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.

Autor do korespondencji/ Corresponding author: renata.wlodarczyk@pcz.pl

swoim zaletom znalazł zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, w tym paliwowo – rafineryjnym w takich procesach, jak: reforming, hydrokraking, hydrotorafinacja, syntezy: amoniaku i metanolu, uwodornienia czy produkcji aniliny [4]. W produkcji przemysłowej wykorzystywany do produkcji margaryny czy słodzików. Wodór jest wykorzystywany w przemyśle paliwowym jako paliwo w pojazdach wodorowych, w metalurgii służy do redukcji rud żelaza, a w energetyce atomowej – pełni funkcję moderatora w reaktorach jądrowych (wodór zawarty w wodzie H_2O lub D_2O). Jednym z najnowszych zastosowań wodoru jest branża kosmetyczna, gdzie wodór wykorzystywany jest do oczyszczania wodorowego [5-7].

Obecnie wodór najczęściej pozyskiwany jest z paliw kopalnych. Jednak dzięki postępującemu rozwojowi i upowszechnianiu się takich urządzeń, jak elektrolizery czy ogniwa paliwowe [8-9], coraz bardziej realna staje się produkcja wodoru z elektrolizy wody – jako ekologiczna i zrównoważona alternatywa. Ze względu na surowiec zastosowany do produkcji wodoru, a tym samym zastosowaną technologię, jej wpływem na środowisko oraz ponoszonymi kosztami, dokonuje się „kodowania” wodoru. „Kodowanie” wodoru odnosi się do systemu oznaczeń kolorystycznych [10-11]:

- wodór zielony: uzyskiwany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii odnawialnej (np. z elektrowni wiatrowych, słonecznych lub wodnych);
- wodór niebieski: uzyskiwany w procesie reformingu parowego metanu lub gazyfikacji węgla z zastosowaniem technologii wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (CCS Carbon Capture Storage);
- wodór szary: uzyskiwany w procesie reformingu parowego metanu lub gazyfikacji węgla bez zastosowania technologii CCS;
- wodór żółty: uzyskiwany w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii elektrycznej z sieci;
- wodór turkusowy: uzyskiwany poprzez pirolizę metanu;
- wodór biały: wodór naturalnie występujący w skorupie ziemskiej;
- wodór czarny/brązowy: wodór uzyskiwany w procesie gazyfikacji węgla, gdzie czarny wodór pochodzi z gazyfikacji węgla kamiennego, a brązowy z gazyfikacji węgla brunatnego;
- wodór różowy/fioletowy: wodór produkowany z elektrolizy wody zasilanej energią jądrową.

Na każdym etapie łańcucha wartości wodoru, które obejmują produkcję wodoru, magazynowanie, transport oraz wykorzystanie wodoru, niezwykle ważne są aspekty związane z zapewnieniem zachowania bezpieczeństwa, koszty oraz przygotowanie i przestrzeganie odpowiednich aktów prawnych w postaci przepisów, kodeksów i norm dotyczących urządzeń i instalacji [13-17]. We współczesnych systemach technologicznych jednym z kluczowych wyzwań pozostaje podnoszenie kultury bezpieczeństwa. Dotyczy to zarówno samych instalacji, jak i procesów technologicznych, a przede wszystkim – ochrony zdrowia i życia ludzi. W tym kontekście ogromne znaczenie ma dostęp do zestandardyzowanych procedur, norm, ustaw oraz wytycznych, które wspólnie tworzą ramy umożliwiające zachowanie bezpiecznych warunków pracy. Podejście to wpisuje się w ideę „safety worker” – pracownika świadomego zagrożeń i odpowiednio przygotowanego do ich minimalizacji.

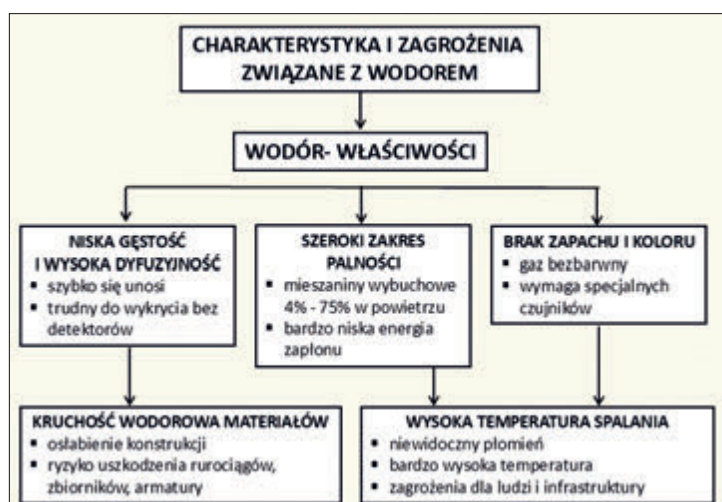
W ramach niniejszej pracy przeprowadzono analizę i ocenę zagrożeń związanych z instalacjami funkcjonującymi w ramach łańcucha wodorowego, przedstawiono gospodarkę wodorową jako innowacyjną i przyszłościową technologię, która może odegrać istotną rolę w procesie odchodzenia od paliw kopalnych. Zwrócono uwagę na specyficzne właściwości fizykochemiczne wodoru, które wymagają bezwzględного przestrzegania norm, rozporządzeń i wytycznych dotyczących bezpiecznej eksploatacji instalacji, w których wodór jest produkowany, magazynowany lub transportowany.

Właściwości wodoru w aspekcie wymagań bezpieczeństwa instalacji

Wodór, ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne, stwarza specy-

ficzne wyzwania w zakresie bezpieczeństwa instalacji. Wodór jest gazem lekkim (14 razy lżejszy od powietrza), łatwopalny z szerokim zakresem palności w powietrzu, co oznacza, że może się zapalić nawet przy niskich stężeniach. Podczas rozszczelnienia wydostaje się pod znacznym ciśnieniem i ulega samozapłonowi, pali się bezbarwnym i niewidocznym płomieniem, co może prowadzić do poważnych uszkodzeń instalacji oraz stwarzać dodatkowe zagrożenie dla personelu i otoczenia. Inne trudności w pracy z wodorem, a tym samym wymagany wysoki poziom kontroli szczelności instalacji wynikają z tego, że wodór jest to gaz bezbarwny, bezwonny i słabo rozpuszczalny w wodzie [18]. Wodór spala się intensywnie, wysokim płomieniem, a produktem spalania jest woda, co sprawia, że jest to gaz neutralny dla środowiska. Wysoka wartość liczby oktanowej wskazuje, że mieszanka wodorowo-powietrzna jest bardzo odporna na samozapłon i spalanie detonacyjne. Wodór, jako wyjątkowo lekki i reaktywny gaz, posiada szereg cech, które z jednej strony czynią go obiecującym nośnikiem energii, z drugiej zaś – generują istotne wyzwania związane z bezpieczeństwem jego stosowania. Na rys. 1 przedstawiono kluczowe właściwości wodoru oraz wymagania techniczne i organizacyjne, które należy spełnić, aby zminimalizować ryzyko podczas projektowania i eksploatacji instalacji wodorowych. Niska gęstość i wysoka dyfuzyjność, powodują, że wodór w przypadku wycieku bardzo szybko unosi się i rozprzyszcza w powietrzu. Choć ogranicza to ryzyko jego akumulacji w dolnych częściach pomieszczeń, jednocześnie znacząco utrudnia wykrycie wycieku bez odpowiednich systemów detekcji. Szeroki zakres palności sprawia, że wodór wymaga wyjątkowo niskiej energii zapłonu – nawet minimalna iskra może wywołać eksplozję.

Rys. 1. Kluczowe właściwości wodoru wpływające na bezpieczeństwo, opracowanie własne na podstawie [18-19]
Fig. 1. Key properties of hydrogen affecting safety, own study based on [18-19]



Dodatkowo wodór może tworzyć mieszaniny wybuchowe z powietrzem w bardzo szerokim zakresie stężeń (od ok. 4% do 75%). Ważnym aspektem, który należy uwzględnić podczas projektowania instalacji i wyboru materiałów jest zjawisko kruchości wodorowej wywołanej dyfuzją wodoru w głąb materiału, prowadzące do zmniejszenia wytrzymałości mechanicznej konstrukcji zbiorników, rurociągów i armatury. Mały rozmiar cząsteczek wodoru niesie ryzyko przenikania przez złączki, gwinty, kołnierze, zawory, uszczelki.

Zapewnienie bezpieczeństwa instalacji wodorowych wymaga spójnego i wieloaspektowego podejścia, które uwzględni zarówno unikalne właściwości fizykochemiczne wodoru, jak i odpowiedni dobór technologii, materiałów oraz wdrożenie skutecznych procedur organizacyjnych. Kluczowe znaczenie ma tu systemowe zarządzanie ryzykiem, które stanowi fundament bezpiecznego i zrównoważonego rozwoju nowoczesnej gospodarki wodorowej [15, 19-22]. Bezpieczeństwo instalacji wodorowych wymaga kompleksowego podejścia, łączącego znajomość specyfiki tego gazu z odpowiednim doбором technologii oraz wdrożeniem procedur organizacyjnych. Skuteczne zarządzanie ryzykiem jest fundamentem bezpiecznego rozwoju gospodarki wodorowej.

Aby zapewnić wysoki poziom bezpieczeństwa dla instalacji wodorowych należy zapewnić odpowiednie warunki pracy i zasady postępowania. Na rys. 2. zaprezentowano kluczowe aspekty, do których należą [19, 21-22]:

- czynniki ludzkie: szkolenia personelu w zakresie przestrzegania zasad BHP oraz procedur związanych z obsługą urządzeń, postępowania podczas wystąpienia ewentualnej awarii, kształcenie i edukacja;

- czynniki techniczne: dobór materiałów, stosowanie czujników i zaworów, zachowanie niezawodności i bezpieczeństwa dzięki regularnym kontrolom stanu technicznego, odpowiednio wentylowane pomieszczenia i hale, stacje tankowania, itp., eliminacja lub ograniczenie możliwych źródeł zapłonu.

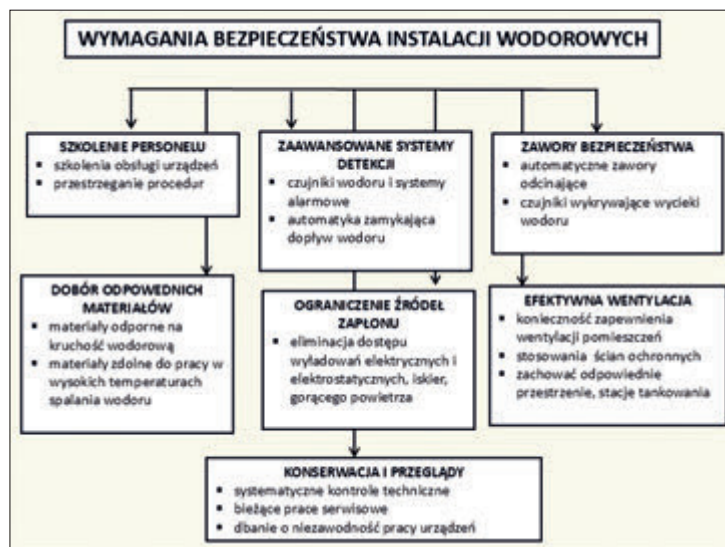
Akty prawne dotyczące wymagań bezpieczeństwa w zakresie postępowania z paliwem wodorowym

Analizując normy, ustawy oraz rozporządzenia obowiązujące w Polsce i na świecie dotyczące technologii wodorowych, można zauważyć, że regulacje te

obejmują szeroki zakres zagadnień od prawa energetycznego i budowlanego, po przepisy dotyczące ochrony przeciwpożarowej oraz ochrony środowiska. Szczególne znaczenie mają również kwestie związane z bezpieczeństwem i higieną pracy, paliwami alternatywnymi, elektromobilnością, projektowaniem i postępowaniem w strefach zagrożonych wybuchem, a także liczne wytyczne techniczne, standardy i normy branżowe. Zarówno przy projektowaniu infrastruktury technologicznej i transportowej, jak i w sytuacjach awaryjnych w zakładach o dużym lub zwiększonym ryzyku, kluczowe znaczenie mają odpowiednie dyrektywy, normy oraz akty prawne krajowe i międzynarodowe.

Tabela 1. Wybrane dokumenty dotyczące zasad bezpieczeństwa instalacji wodorowych
Table 1. Selected documents regarding the safety rules of hydrogen installations

Rodzaj dokumentu	Numer dokumentu	Akt prawny	Uwagi
STANDARDY, WYTYCZNE, NORMY	ISO/TR 15916:2015(E)	Basic considerations for the safety of hydrogen systems	[19]
	ISO 19880-1:2020(E)	Gaseous hydrogen – Fuelling stations – Part 1: General requirements	[20]
	ISO/DIS 19880-2	Gaseous hydrogen Fuelling stations Part 2: Dispensers and dispensing systems	
	ISO 22734:2019(E)	Hydrogen generators using water electrolysis – Industrial, commercial, and residential applications	[23]
	PN-EN IEC 60079-10-1:2021-09	Atmosfery wybuchowe – Część 10-1: Klasyfikacja przestrzeni-Gazowe atmosfery wybuchowe	[24]
	NFPA 855 (2023)	Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems	[25]
USTAWY	Ustawa z dnia 21 listopada 2024 r. o zmianie ustawy – Prawo energetyczne oraz niektórych innych ustaw		[26]
	Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo budowlane		[27]
	Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o elektromobilności i paliwach alternatywnych		[28]
	Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 15 maja 2020r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o ochronie przeciwpożarowej		[29]
	Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 1 grudnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo ochrony środowiska		[30]



Rys. 2. Wymagania bezpieczeństwa dla instalacji wodorowych, opracowanie własne na podstawie [19-22]
Fig. 2. Safety requirements for hydrogen installations, own study based on [19-22]

W tabeli 1 zamieszczono wybrane dokumenty międzynarodowe (ISO, IEC, NFPA) oraz normy krajowe (PN), które regulują techniczne aspekty projektowania, budowy i eksploatacji systemów wodorowych oraz instalacji fotowoltaicznych [19-20, 23-30]. Określają one m.in. zasady bezpieczeństwa dla systemów wodorowych, wymagania dla stacji tankowania wodoru (w tym dystrybutorów), generatory wodoru oparte na elektrolizie wody, a także klasyfikację stref zagrożonych wybuchem i projektowanie instalacji PV. Wszystkie te dokumenty mają kluczowe znaczenie przy tworzeniu bezpiecznej i zgodnej z przepisami infrastruktury energetycznej i wodorowej. Ustawy i obwieszczenia Sejmu RP przedstawiają obowiązujące

przepisy z zakresu prawa energetycznego, budowlanego, elektromobilności, ochrony przeciwpożarowej oraz ochrony środowiska. Uregulowania te mają na celu zapewnienie zgodności z zasadami zrównoważonego rozwoju, bezpieczeństwa i efektywnego wykorzystania paliw alternatywnych – w tym wodoru. Stanowią podstawę prawną dla inwestycji związanych z infrastrukturą wodorową w Polsce.

Wymienione rozporządzenia krajowe określają szczegółowe wymagania techniczne i prawne dotyczące projektowania, budowy i bezpieczeństwa stacji wodorowych oraz obiektów budowlanych, w tym obowiązki związane z ochroną przeciwpożarową, BHP i zagrożeniami wybuchowymi [19-20] – (tabela 2). Uregulowania te obejmują również wymagania wobec projektów budowlanych, systemów zaopatrzenia w wodę do celów pożarowych, klasyfikacji zakładów o podwyższonym ryzyku awarii oraz zasad użytkowania substancji niebezpiecznych.

magnetycznej kompatybilności (EMC), sprzętu elektrycznego (LVD), a także bezpieczeństwa pracy w atmosferach wybuchowych (ATEX User). SEVESO III reguluje prewencję poważnych awarii przemysłowych, a dyrektywy ADR i 70/156/EWG odnoszą się do bezpiecznego transportu towarów niebezpiecznych i homologacji pojazdów. Dyrektywa RED promuje wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, w tym wodoru, jako alternatywnego paliwa w kontekście transformacji energetycznej.

Karty charakterystyki

Karta charakterystyki to dokument opisujący właściwości danej substancji chemicznej lub mieszaniny. Zawiera ona kluczowe informacje, takie jak: właściwości fizykochemiczne, zagrożenia dla zdrowia i środowiska, środki ostrożności oraz zalecenia dotyczące bezpiecznego obchodzenia się z daną substancją. Dokument ten powinien być sporządzony w języku polskim i dostępny dla każdego użytkownika

charakterystyki substancji niebezpiecznej i preparatu niebezpiecznego [49],

- Ustawa z dnia 25 lutego 2011 r. o substancjach chemicznych i ich mieszaninach [50],
- unijne rozporządzenia CLP (*Classification, Labelling and Packaging*) [51] oraz REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) [52].

Każdy pracownik mający styczność z substancją chemiczną powinien zapoznać się z treścią karty charakterystyki oraz mieć do niej swobodny dostęp w miejscu pracy.

Warto dodać, że zawarte w karcie wartości mogą się nieznacznie różnić w zależności od producenta czy stężenia substancji w konkretnym opakowaniu. Karta charakterystyki podzielona jest na sekcje, które pozostają niezmiennie niezależnie od rodzaju związku, substancji czy mieszaniny [49]. Również wodór, jako ważny pierwiastek ma przypisaną kartę charakterystyki, w której zawarto między innymi informacje odnośnie do: identyfikacji zagrożeń, wymaganych środków pierwszej pomocy, postępowania w przypadku pożaru, uwolnienia do środowiska, informacji toksykologicznych, ekologicznych, postępowania z odpadami, transportu itp.

Ochrona przeciwpożarowa w instalacjach wodorowych

Wodór ze względu na swoje specyficzne właściwości fizyko – chemiczne podlega różnym zapisom i regułom zgodnym z ochroną przeciwpożarową. Wodór jest gazem palnym, przez co wskutek wybuchu/wydostania/uwolnienia się do powietrza itd. (w zależności od sytuacji) dochodzi do pożaru. Pożar z definicji to niekontrolowany proces spalania, występujący w miejscu do tego nieprzeznaczonym, rozprzestrzeniającym się w sposób niekontrolowany, powodującym zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi i zwierząt oraz straty materialne. Według PN-ISO 8421-1:1997: charakteryzuje się on emisją ciepła, której towarzyszy wydzielanie dymu i zazwyczaj płomieni [19-21, 53].

Cechy charakterystyczne pożaru:

- możliwość występowania wysokiej temperatury,
- wydzielanie się dużych ilości produktów spalania,
- możliwość rozprzestrzeniania się tzn. wzrost powierzchni lub objętości pożaru.

Ze względu na rodzaj substancji ulegających zapaleniu, pożary klasyfikuje się według następujących grup [53]:

Tabela 2. Rozporządzenia krajowe i dyrektywy unijne dotyczące zasad BHP instalacji wodorowych
Table 2. National regulations and EU directives regarding health and safety rules for hydrogen installations

Budownictwo i infrastruktura		
Akt prawny	Zakres regulacji	Uwagi
Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z 7.10.2022	Wymagania techniczne dla stacji wodoru	[31]
Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z 12.07.2022	Zakres i forma projektu budowlanego	[32]
Rozporządzenie MSWiA z 5.08.2023	Uzgodnianie projektów pod kątem ochrony p.poż.	[33]
Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z 15.04.2022	Warunki techniczne budynków i ich usytuowania	[34]
Bezpieczeństwo pożarowe i przeciwwybuchowe		
Obwieszczenie MSWiA z 21.03.2023	Ochrona p.poż. budynków i terenów	[35]
Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 8.07.2010	Minimalne wymagania BHP w atmosferach wybuchowych	[36]
Rozporządzenie MSWiA z 24.07.2009	Zaopatrzenie w wodę i drogi pożarowe	[37]
Dyrektywa 1999/92/WE (ATEX User)	Ochrona pracowników w strefach wybuchowych	[38]
Dyrektywa 2014/34/UE (ATEX)	Urządzenia i systemy ochronne w atmosferach wybuchowych	[39]
Bezpieczeństwo przemysłowe i awaryjne		
Rozporządzenie Ministra Rozwoju z 29.01.2016	Klasyfikacja zakładów o dużym i zwiększonym ryzyku	[40]
Dyrektywa 2012/18/UE (SEVESO III)	Zapobieganie poważnym awariom przemysłowym	[41]
Urządzenia techniczne i maszyny		
Dyrektywa 2014/68/UE (PED)	Urządzenia ciśnieniowe	[42]
Dyrektywa 2006/42/WE (MD)	Maszyny i bezpieczeństwo ich użytkowania	[43]
Instalacje elektryczne i kompatybilność elektromagnetyczna		
Dyrektywa 2014/35/UE (LVD)	Urządzenia niskonapięciowe	[44]
Dyrektywa 2014/30/UE (EMC)	Kompatybilność elektromagnetyczna urządzeń	[45]
Transport i pojazdy		
Dyrektywa 94/55/WE (ADR)	Transport drogowy towarów niebezpiecznych	[46]
Dyrektywa 70/156/EWG	Homologacja pojazdów i przyczep	[47]
Energetyka i zrównoważony rozwój		
Dyrektywa 2018/2001 (RED)	Promowanie energii odnawialnej, w tym wodoru	[48]

Z kolei dyrektywy unijne koncentrują się na harmonizacji przepisów technicznych i bezpieczeństwa na poziomie europejskim [31-48]. Dotyczą m.in. urządzeń ciśnieniowych (PED), maszyn (MD), urządzeń w strefach wybuchowych (ATEX), elektro-

nika mającego kontakt z daną substancją lub mieszaniną. Obowiązek jego opracowania wynika zarówno z przepisów krajowych, jak i unijnych – są to:

- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 3 lipca 2002 r. w sprawie karty

- Grupa A – pożary materiałów stałych, których spalanie przebiega z tworzeniem żarzącego się węgla, np. drewno, papier, tkaniny;
- Grupa B – pożary cieczy oraz materiałów stałych, które topnieją pod wpływem temperatury, np. paliwa, oleje, tworzywa sztuczne;
- Grupa C – pożary gazów, takich jak metan, propan, acetylen czy wodór;
- Grupa D – pożary metali, np. magnezu, sodu, potasu, glinu, tytanu;
- Grupa E – pożary urządzeń elektrycznych będących pod napięciem;
- Grupa F – pożary tłuszczów i olejów wykorzystywanych w urządzeniach kuchennych.

Wodór zaliczany jest do grupy pożarów C. Pożary tej grupy charakteryzują się tym, że spalanie gazów odbywa się w całej objętości mieszaniny. W przeciwieństwie do cieczy, gazy palne nie posiadają jednej, ściśle określonej temperatury zapłonu, gdyż zapalają się w dowolnej temperaturze, o ile ich stężenie mieści się w tzw. granicach wybuchowości [19-21, 53]. Do gaszenia pożarów stosuje się różnego rodzaju gaśnice, które różnią się zawartością środka gaśniczego, jednakże nie każda gaśnica nadaje się do wszystkich grup pożarów. Do gaszenia pożarów wywołanych materiałami z grupy C, do której zakwalifikowano paliwo wodorowe nadaje się gaśnica proszkowa ABC z możliwością gaszenia urządzeń elektrycznych pod napięciem do 1 kV oraz wyższym.

Detektory wodoru jako środki ochrony indywidualnej podczas użytkowania i przebywania w pobliżu instalacji wodorowych

Aby bezpiecznie wykonywać czynności eksploatacyjne i operacyjne, każdy pracownik musi być wyposażony w środki ochrony indywidualnej (ŚOI). Ich zadaniem jest zapewnienie ochrony zdrowia, życia oraz mienia podczas pracy.

Elementy odzieży roboczej wchodzącej w skład ŚOI obejmują [54]:

- kask ochronny z paskiem podbródkowym;
- okulary ochronne;
- rękawice ochronne (dodatkowo mogą występować w wersji specjalistycznej);
- kurtkę, spodnie oraz koszulkę/podkoszulkę o właściwościach antyelektrostatycznych;
- buty ochronne z metalowym tzw. noskiem i właściwościami antyelektrostatycznymi.

Poza odzież roboczą kluczową rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa odgrywają detektory osobiste oraz systemy de-

tekcji zbiorowej. Ich zadaniem jest wykrywanie niebezpiecznych stężeń substancji (np. wodoru), które mogą zagrażać zdrowiu ludzi lub bezpieczeństwu instalacji. Urządzenia te muszą spełniać wymogi norm CE oraz ATEX, ze względu na pracę w strefach zagrożonych wybuchem to znaczy ich konstrukcja i obudowa muszą być odpowiednio dostosowane do tych warunków. Detektory wodoru w zależności od klasy i dokładności mogą pełnić funkcję zarówno ochrony indywidualnej, jak i zbiorowej. Choć przepisy nie wskazują jednoznacznie, gdzie pracownik powinien nosić detektor, jego posiadanie podczas przebywania na terenie instalacji wodorowej jest obowiązkowe.

Transport wodoru w oparciu o międzynarodową umowę ADR i regulamin RID

Transport wodoru jest możliwy pod warunkiem spełnienia wymagań związanych z transportem w oparciu o przepisy Umowy ADR (fr. *L' Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route*) i Regulamin RID (fr. *Règlement concernant le transport International ferroviaire des marchandises Dangereuses*). Umowa ADR jest międzynarodową konwencją dotyczącą drogowego przewozu towarów i ładunków niebezpiecznych, sporządzoną w Genewie 30 września 1957 r. obowiązującą w ponad 50 krajach [55], natomiast RID to regulamin dla międzynarodowego przewozu kolejami towarów niebezpiecznych [56]. W obu dokumentach jest wyraźnie określone w jakich sposób należy oznaczyć pojazd przewożący dany materiał, jakie naklejki zastosować, i w jakim miejscu je umieszczać. Zgodnie z Umową ADR dla wodoru są stosowane odpowiednie pojazdy typu MEGC (ang. MEGC – *Multiple-Element Gas Container*). Pojazd MEGC jest to wieloelementowy kontener do gazu (MEGC) oznaczający jednostkę składającą się z elementów połączonych ze sobą kolektorem, zamocowanych w ramie. Za elementy wieloelementowego kontenera do gazu uważa się: butle, zbiorniki rurowe, wiązki butli, bębny ciśnieniowe oraz cysterny przeznaczone do przewozu gazów zdefiniowanych w 2.2.2.1.1, o pojemności większej niż 450 litrów [56]. Zgodnie z umową ADR wodór można także magazynować oraz transportować i przysyłać rurociągami, nazywane docelowo wodorociągami (o czym w dalszej części pracy):

- butlach;
- zbiornikach rurowych;
- bębnach ciśnieniowych;
- wiązkach butli, przy czym ważność (nie jest to okres gwarancji – tylko czasookres przeglądu) to 10 lat, zatem w tym okresie każda butla musi przejść przegląd.

Umowa ADR i Regulamin RID wskazują także jakie wyposażenie powinno znajdować się w pojeździe oraz jakie dokumenty powinny być przygotowane i uzupełnione przed transportem gazu. Zgodnie z ustawodawstwem polskim tj. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 25 sierpnia 2015 r. w sprawie sposobu oznakowania miejsc, rurociągów oraz pojemników i zbiorników służących do przechowywania lub zawierających substancje stwarzające zagrożenie lub mieszaniny stwarzające zagrożenie każdy rurociąg, w którym przepływają różnego rodzaju substancje/mieszaniny należy oznakować [57]:

- w sposób widoczny;
- na wysokości wzroku;
- poprzez napis z nazwą substancji/tabliczką informacyjną w punkcie centralnym;
- strzałki i kierunki przepływu;
- kolor rurociągu identyfikujący substancję.

Na rys. 3a zamieszczono przykładowe oznakowanie rurociągu, w którym przepływa gaz palny, w tym przypadku wodór. Kolor rurociągu oznaczamy kolorem żółtym, a oznakowanie zgodnie z systemem GHS. W przypadku butli, w której przechowywany jest wodór, istotne jest, aby butla posiadała w swojej górnej części tzw. naklejkę bananową. Na naklejce powinny być oznaczenia H w postaci piktogramów zgodnych z systemem GHS, zwroty P, nazwa handlowa produktu, wzory chemiczne substancji/mieszain, normy, nazwa producenta, okres ważności/przeglądu, kontakt do producenta oraz naklejki zgodne z Umową ADR

Rys. 3a. Oznakowanie rurociągu z przepływającym wodorem, Rys. 3b. Prawidłowy wygląd butli z wodorem [55]

Fig. 3a. Marking of the pipeline with flowing hydrogen, Fig. 3b. Correct appearance of the hydrogen cylinder [55]



[55]. Na rys. 3b przedstawiono wygląd przykładowej butli z wodorem: butla w swojej górnej części, gdzie się zwięża, obecnie musi być pomalowana na czernono-szaro (prawa strona rysunku). Poprzednio stosowano tylko kolor czerwony, obecnie jeśli butle uzyskały pozytywną ocenę podczas przeglądu, mogą być używane nadal (lewa strona rysunku).

Wymagania techniczne sieci i instalacji wodorowych

W świetle założeń Polskiej Strategii Wodorowej (PSW) do 2040 roku, jednym z kluczowych elementów transformacji energetycznej jest rozwój infrastruktury umożliwiającej bezpieczny i efektywny przesył wodoru [58]. Strategia przewiduje zarówno dostosowanie istniejących gazociągów do przesyłu mieszanek gazu ziemnego z wodorem, jak i budowę dedykowanych rurociągów wodorowych w strategicznych lokalizacjach. W miarę postępu technologicznego oraz w oparciu o wyniki analiz i projektów pilotażowych, podejmowane będą decyzje dotyczące wyboru konkretnych rozwiązań inżynierskich. Jednocześnie dokument podkreśla znaczenie integracji Polski z europejską siecią przesyłową wodoru, w tym poprzez możliwe połączenia transgraniczne. Rozwój systemów przesyłowych ma być komplementarny wobec rozbudowy wielkoskalowych magazynów wodoru, niezbędnych do zapewnienia elastyczności i bezpieczeństwa dostaw.

Strategia PSW uwzględnia wyzwania związane z mieszaniami wodoru z gazem ziemnym, m.in. ograniczenia techniczne infrastruktury, ryzyka bezpieczeństwa, wpływ na urządzenia końcowe oraz potrzebę separacji wodoru w przypadku jego wykorzystania w czystej postaci. Z tego względu w długoterminowej perspektywie preferowanym kierunkiem pozostaje budowa odrębnej, specjalistycznej infrastruktury do transportu wodoru. Oprócz wymienionych wyzwań, w kontekście transportu wodoru pojawiają się dodatkowe kwestie [58]:

- wysokie koszty budowy dedykowanej infrastruktury wodorowej: budowa nowych rurociągów wodorowych jest kosztowna i wymaga znacznych inwestycji;
- potrzeba dostosowania istniejącej infrastruktury: adaptacja istniejących gazociągów do przesyłu wodoru również wiąże się z kosztami i wyzwaniami technicznymi;
- wybór optymalnej strategii transportu: należy dokładnie przeanalizować, czy bardziej opłacalne jest mieszanie wodoru z gazem ziemnym na wcze-

snym etapie, czy też budowa dedykowanej infrastruktury.

Transport wodoru w sieciach gazowych

Transport wodoru rurociągami/wodorociągami wydaje się naturalnym krokiem w rozwoju gospodarki wodorowej. Jednak odmienną fizykochemiczną wodoru względem metanu, który dominuje w obecnych systemach gazowych, rodzi liczne pytania o trwałość materiałów, szczelność infrastruktury oraz bezpieczeństwo eksploatacyjne. Jednym z głównych wyzwań technicznych jest jednak efektywny i bezpieczny przesył wodoru, szczególnie przy wykorzystaniu istniejącej infrastruktury gazowej. Istnieje kilka potencjalnych metod transportu wodoru, w tym transport rurociągami (w postaci gazowej lub ciekłej), transport cysternami (gazowego lub ciekłego wodoru), a także transport w formie związanej chemicznie (np. w amoniaku lub organicznych nośnikach wodoru) [4]. Każda z tych metod charakteryzuje się odmiennymi kosztami inwestycyjnymi, operacyjnymi oraz efektywnością energetyczną. Najdroższy jest transport wodoru cysternami, a zwłaszcza w postaci ciekłej ze względu na konieczność utrzymywania niskich temperatur [18-20].

Jednym z kluczowych ryzyk podczas przesyłu wodoru jest tzw. kruchość wodorowa, czyli zjawisko pogarszania właściwości mechanicznych metalu wskutek przenikania wodoru do jego struktury. Wyróżnia się dwa podstawowe typy tego zjawiska [59-61]: kruchość wewnętrzna, która jest spowodowana obecnością wodoru resztkowego w strukturze stali, wprowadzonego podczas produkcji oraz kruchość zewnętrzna wynikająca z kontaktu materiału z wodorem atmosferycznym lub procesowym, np. w rurociągu. W aspekcie praktycznym przesyłu wodoru najistotniejsza jest kruchość zewnętrzna, powstająca na skutek długotrwałego oddziaływania sprężonego wodoru na stal. Wodór, który może wystę-

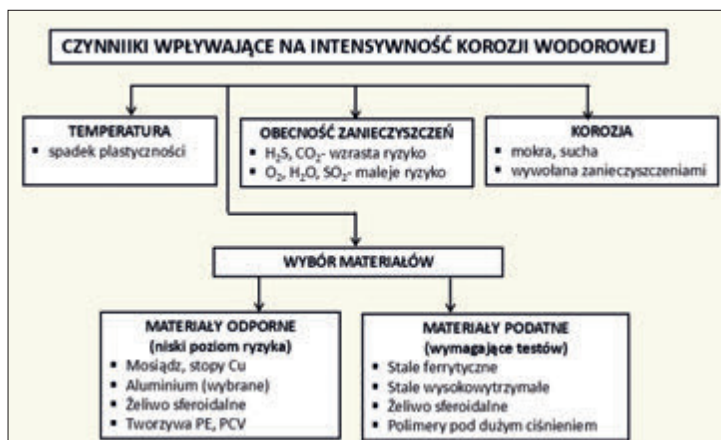
pować w postaci atomowej lub cząsteczkowej, tworzy defekty w strukturze metali, które z kolei wywołują pęknięcia i degradację materiału. Celem prawidłowego rozpoznania procesu propagacji korozji wodorowej wskazuje się na trzy główne mechanizmy niszczenia [62]:

- reakcyjna kruchość wodorowa – zachodzi w wysokich temperaturach na skutek reakcji wodoru z metalem, prowadząc do powstawania wodorków;
- środowiskowa kruchość wodorowa – występuje w zbiornikach lub rurociągach narażonych na kontakt z atmosferą bogatą w wodór;
- odwracalna kruchość wewnętrzna – pojawia się, gdy wodór penetruje materiał podczas jego przetwarzania, nawet jeśli później nie następuje bezpośredni kontakt z wodorem.

Wśród czynników wpływających na korozję i degradację materiałów podczas kontaktu z wodorem można wyróżnić działania środowiskowe oraz materiałowe, do których należą (rys. 4) [59-60]:

- temperatura: im niższa, tym większa podatność materiałów na utratę plastyczności; pojawia się tzw. „zerowa temperatura plastyczności”, poniżej której materiał przechodzi ze stanu ciągliwego do kruchego;
- zanieczyszczenia gazu: wodór wysokiej czystości zwiększa ryzyko kruchości, substancje takie jak O_2 , H_2O czy SO_2 mają działanie hamujące, natomiast H_2S i CO_2 pogarszają odporność materiałów;
- typ korozji: korozja sucha – powolna, zachodząca przy wyższych temperaturach w kontakcie z suchym gazem; korozja mokra – wywołana obecnością wody lub wilgoci w gazie; istotna przy nieodpowiednim oczyszczeniu wodoru;
- dobór materiałów na instalację: większość materiałów metalowych wykazuje pewien stopień wrażliwości na kruchość wodorową, ale wiele z nich

Rys. 4. Degradacja materiałów wywołana działaniem wodoru, opracowanie własne na podstawie [59-62]
Fig. 4. Degradation of materials caused by hydrogen, own study based on [59-62]



można stosować bez zachowania szczególnych środków ostrożności (pod względem ryzyka uszkodzenia przez kruchość wodorową). Materiały, które można stosować bez zachowania szczególnych środków ostrożności to [59-62]:

- mosiądz i większość stopów miedzi;
- aluminium i stopy aluminium (niektóre stopy aluminium o wysokiej wytrzymałości są wrażliwe na kruchość wodorową, ale dzieje się tak w warunkach korozji naprężeniowej);
- żeliwo sferoidalne;
- rury z tworzyw sztucznych polietylenu PE i polichlorku winylu PCV.

Sieciami przesyłowymi transportuje się gaz na duże odległości pod wysokim ciśnieniem wynoszącym około 6 MPa. Takie ciśnienie sprawia, że w większości przypadków są one budowane ze stali, gdyż polietylen PE nie jest odporny na wysokie naprężenia stałe; wybór stali wskazuje, że działanie destrukcyjne wodoru należy kontrolować.

Magazynowanie wodoru

Wodór może być magazynowany i transportowany w różnych stanach skupienia, z wykorzystaniem różnorodnych nośników, w zależności od metody jego pozyskania oraz potrzeb technicznych i ekonomicznych. Obecnie wyróżnia się cztery główne formy transportu wodoru: w postaci amoniaku (NH_3), wodoru sprężonego (CGH_2), w postaci ciekłej (LH_2) oraz związanego w metylocykloheksanie (MCH – stosowany w LOHC). Magazynowanie i transport wodoru w postaci związanej usprawniają jego przechowywanie i eliminują problemy wynikające z właściwości fizycznych i chemicznych. Formy magazynowania wodoru rozważane obecnie cechują się następującymi właściwościami [1-2, 5,7-8, 15, 19-21]:

- LH_2 (skroplony wodór): proces skroplenia wodoru wymaga kriogenicznych technologii oraz specjalistycznych, izolowanych zbiorników, ze względu na wysoką palność i potencjalne zagrożenia wybuchowe wodoru, jego transport wiąże się z dużymi wymaganiami bezpieczeństwa;
- NH_3 (amoniak): powstaje w procesie syntezy Hebera-Boscha, amoniak jest skraplany w temperaturze -33°C pod ciśnieniem atmosferycznym, w skali przemysłowej przechowuje się go w zbiornikach ciśnieniowych lub beciśnieniowych, amoniak jest bardzo toksyczny i łatwopalny, co stanowi istotne wyzwanie w kontekście bezpieczeństwa;

- CGH_2 (sprężony wodór gazowy): wodór w tej postaci nadaje się do transportu w zbiornikach wysokociśnieniowych i może być przesyłany infrastrukturą gazową przeznaczoną dla metanu;
- LOHC (ciekłe nośniki organiczne wodoru): wodór wiązany jest chemicznie z nośnikiem w temperaturze $150\text{--}200^\circ\text{C}$ pod ciśnieniem $30\text{--}50$ barów, takie mieszaniny przypominają właściwościami paliwa ciekłe, co ułatwia ich logistykę, wodór odzyskuje się przez proces odwodornienia w temperaturze $250\text{--}300^\circ\text{C}$, który wymaga doprowadzenia energii;
- Power to Liquid (P2L): technologia produkcji syntetycznych paliw wodorowych z wodoru i gazów zawierających węgiel (np. CO , CO_2), w oparciu o reakcję Fischera-Tropscha, otrzymane w wyniku procesu produkty (benzyna, olej napędowy, nafta, metanol) służą jako nośniki energii, ale nie zawierają czystego wodoru.

W stanie gazowym wodór przechowywany jest pod wysokim ciśnieniem ($200\text{--}350$ barów), natomiast w stanie ciekłym – po skropleniu w temperaturze poniżej $-240,18^\circ\text{C}$. Alternatywne formy przechowywania obejmują nośniki chemiczne, takie jak amoniak (NH_3), sprężony wodór gazowy (CGH_2), ciekłe nośniki organiczne wodoru (LOHC) oraz paliwa syntetyczne (Power to Liquid). Każda z tych metod wiąże się z określonymi wymaganiami technologicznymi, stratami energii i zagrożeniami bezpieczeństwa [15, 19-21].

Zbiorniki sprężonego wodoru

Zbiorniki sprężonego wodoru mają formę sferyczną lub cylindryczną i występują w pięciu typach [63-64]. Wybór technologii zależy głównie od wymaganego ciśnienia oraz kosztów produkcji. Najczęściej stosowane są zbiorniki metalowe – tańsze od kompozytowych, ale wiąże się to z istotnymi wyzwaniami:

- odporność awaryjna: metalowe zbiorniki są bardziej kruche i w razie uszkodzeń generują mniej rozproszonych, większych odłamków niż kompozytowe;
- charakterystyka materiałowa: metale są izotropowe (jednorodne mechanicznie w każdym kierunku), natomiast kompozyty są anizotropowe – ich wytrzymałość zależy od kierunku włókien wzmacniających;
- ryzyko kruchości wodorowej: metale, ze względu na strukturę krystaliczną, są podatne na kruchość wodorową, co skraca ich żywotność.

Metalowe zbiorniki są obecnie najczęściej stosowane w przemyśle i w zastosowaniach stacjonarnych, np. stalowe butle pracujące przy ciśnieniach $15\text{--}20$ MPa [65], używane w laboratoriach lub w małych instalacjach elektrolizy. W kontekście transportu i magazynowania wodoru największe znaczenie mają zbiorniki typu III i IV [64, 66]; typ III: kompozytowy z aluminium wkładką, typ IV: w pełni niemetalowy, z polimerową okładziną i wzmocnieniami z włókien szklanych lub węglowych. Zbiorniki te dominują w zastosowaniach mobilnych (pojazdy osobowe, ciężarówki, transport szynowy i morski), ponieważ łączą niską masę z wysoką wytrzymałością i pozwalają sprężyć wodór do $30\text{--}35$ MPa lub wyżej. W konstrukcjach kompozytowych kluczowe wyzwanie stanowi zapewnienie szczelności i ograniczenie dyfuzji wodoru, co wymusza stosowanie metalowych lub polimerowych barier.

Zbiorniki ciekłego wodoru

Skraplanie wodoru jest procesem energochłonnym ze względu na jego właściwości termodynamiczne, m.in. niską temperaturę inwersji (~ 200 K dla wodoru, 24 K dla helu – temperatura inwersji to maksymalna temperatura, przy której gaz ulega ochłodzeniu w wyniku rozprężania się – efekt Joule’a-Thomsona; wodór, hel i neon są wyjątkami wśród gazów, dla których temperatura inwersji jest niższa niż temperatura pokojowa), co komplikuje proces chłodzenia [62-66]. Aby uzyskać ciekły wodór wysokiej jakości, trzeba usunąć zanieczyszczenia (oprócz helu), przy czym dopuszczalny poziom zanieczyszczeń to maks. $0,001$ ppm [62-66]. Po skropleniu wodór musi być skutecznie izolowany od otoczenia (powietrza, substancji utleniających), co zapewnia się m.in. instalacjami próżniowymi. Materiał ścian zbiornika musi zapewniać wysoką wytrzymałość, odporność na dyfuzję wodoru i kriogeniczne temperatury. Stosuje się m. in. miedź, aluminium, tytan, stal austenityczną (głównie seria 300) oraz wybrane kompozyty [64]. Konstrukcje zbiorników na ciekły wodór dzielą się na:

- mobilne – kompaktowe, z odpowiednim oprzyrządowaniem;
 - stacjonarne – zwykle cylindryczne, zbudowane z dwóch koncentrycznych naczyń oddzielonych warstwą superizolacji, o dużym stosunku średnicy do długości.
- Izolacja termiczna ogranicza odparowanie wodoru – współczynnik odparowania zależy od pojemności zbiornika i jakości izolacji. Przykładowo dzienny ubytek

wynosi $\sim 0,4\%$ objętości dla zbiornika 50 m^3 i $\sim 0,06\%$ dla $20\,000 \text{ m}^3$ [59-61].

Jak już wspomniano powyżej, wodór jako paliwo wymaga ostrożnego obchodzenia się z uwagą na niską energię zapłonu i szeroki zakres palności. Wyciekający wodór łatwo się rozprasza w otwartej przestrzeni, ale w zamkniętych pomieszczeniach może tworzyć groźne mieszaniny wybuchowe [24-25]. Źródłem zapłonu mogą być iskry z narzędzi, telefonów czy naelektryzowanej odzieży – stąd wymóg stosowania odzieży antystatycznej i narzędzi przeciwwybuchowych. W razie zapłonu wodór powoduje deflagrację o wysokim ciśnieniu. Ciekły wodór dodatkowo może skraplać tlen z otoczenia, zwiększając ryzyko pożaru. Kontakt z ciekłym wodorem lub jego parami grozi oparzeniami kriogenicznymi, a wdychanie wodoru – utratą przytomności lub śmiercią [49].

Aby przeciwdziałać ryzyku ulatniania wodoru, a w konsekwencji wybuchowi, w konstrukcjach zbiorników coraz częściej stosuje się polimery wzmacniające (np. włókna szklane, węglowe, aramidowe [63-65]), mimo że cechują się one podatnością na przenikanie wodoru i pogorszeniem właściwości mechanicznych w czasie użytkowania. Magazynowanie wodoru jest zatem wyzwaniem materiałowym. Materiały na zbiorniki muszą być wytrzymałe, ale jednocześnie lekkie oraz odporne na znacząco wysokie ciśnienie. Wodór wpływa negatywnie na jakość materiałów polimerowych poprzez zniszczenie samego tworzywa w wyniku działania wodoru, a szczególnie zanieczyszczeń występujących w gazie, przenikanie wodoru przez materiał polimerowy (częsty problem w zbiornikach wysokociśnieniowych), tworzenie pęcherzyków gazu [63-65], pęcznienie materiału i wzrost objętości nawet o 15%, co wpływa na zmianę wymiarów i przyczynia się do pęknięcia, łatwopalność materiału polimerowego – zbiorniki są odporne maksymalnie od 6 do 12 minut ognia.

Proces projektowania oraz eksploatacja zbiorników stacjonarnych i mobilnych dla celów magazynowania wodoru wraz z pomocniczymi instalacjami musi spełniać odpowiednie standardy bezpieczeństwa w celu zminimalizowania zagrożenia [59-66]. Do zasad ogólnych wymaganych podczas projektowania zbiorników należą następujące kwestie (tabela 3):

- obudowy muszą być wentylowane w odpowiedni sposób;
- rurociąg przeznaczony dla wodoru ciekłego musi posiadać dwa zawory szeregowe, przy czym jeden z nich jest zaworem automatycznym;

Tabela 3. Zasady ogólne projektowania i eksploatacji zbiorników oraz instalacji pomocniczych do magazynowania wodoru, opracowano na podstawie [59-66]

Table 3. General principles of design and operation of tanks and auxiliary installations for hydrogen storage, developed on the basis of [59-66]

Lp.	Zasada	Opis
1.	Wentylacja obudów	Obudowy muszą być zaprojektowane z odpowiednim systemem wentylacji, aby zapobiegać akumulacji wodoru
2.	Bezpieczne rurociągi	Rurociąg dla wodoru ciekłego musi mieć dwa zawory szeregowe, w tym jeden automatyczny, by zapewnić kontrolę przepływu.
3.	Tace ociekowe	Muszą być tak zaprojektowane i rozmieszczone, aby zapobiec przedostawaniu się skroplonego wodoru na inne urządzenia i powierzchnie.
4.	Awaryjny zawór odcinający	Zbiorniki i mobilne cysterny muszą być wyposażone w awaryjny zawór umożliwiający natychmiastowe odcięcie dopływu wodoru.
5.	Urządzenia elektryczne	Pompy, oświetlenie i inne urządzenia elektryczne muszą mieć zabezpieczenia przeciwwybuchowe lub być wykonane w technologii obojętnej (z wyjątkiem pojazdów).
6.	Zabezpieczenia mechaniczne	Wszystkie urządzenia kontrolne powinny być chronione przed uszkodzeniami mechanicznymi.
7.	Izolacja kriogeniczna	Rurociągi i zbiorniki ciekłego wodoru muszą być odizolowane od elementów nieprzystosowanych do niskich temperatur (np. kable, podwozia, guma, plastik).

- tace ociekowe muszą zostać zaprojektowane a następnie umieszczone tak, by uniemożliwić skraplającą się cieczy przedostawanie się na inne urządzenia oraz powierzchnie;
- zbiorniki oraz cysterny mobilne muszą posiadać awaryjny zawór odcinający;
- wszystkie dostępne urządzenia elektryczne, takie jak pompy oraz oświetlenie, muszą posiadać odpowiednie zabezpieczenia przeciwwybuchowe bądź powinny być wykonane w technologii obojętnej, by zapewnić bezpieczną pracę z wodorem (z wyłączeniem instalacji występującej w pojazdach);
- kontrolne urządzenia muszą być zabezpieczone przed mechanicznymi uszkodzeniami;
- wymagana jest izolacja rurociągów i zbiorników z wodorem ciekłym od urządzeń, które nie są przystosowane do niskich temperatur np. kable, podwozia pojazdów, guma bądź plastik.

Podsumowanie

Wodór jest powszechnie uznawany za paliwo przyszłości o kluczowym znaczeniu dla dekarbonizacji gospodarki. Jego spalanie nie generuje emisji CO_2 , a jedynie parę wodną, co czyni go paliwem przyjaznym środowisku. Dodatkowo wodór charakteryzuje się wysoką gęstością energii i dużą sprawnością w ogniwach paliwowych, co przekłada się na wysoką efektywność energetyczną. Istotną kwestią jest możliwość szerokiego zastosowania wodoru od transportu (pojazdy drogowe, kolej, lotnictwo) po energię, gdzie może magazynować nadwyżki energii ze źródeł odnawialnych, stabilizując systemy energetyczne. W przemyśle chemicznym i rafineryjnym wodór zastę-

puje bardziej emisyjne surowce jak gaz ziemny czy węgiel. Produkcja wodoru jest możliwa z różnych źródeł, w tym z biomasy i wody (elektroliza).

Magazynowanie wodoru oraz jego transport stanowią jednak istotne wyzwania techniczne i bezpieczeństwa. Stosowane technologie obejmują wodór gazowy sprężony, ciekły, magazynowanie w podziemnych strukturach (np. kavernach solnych) oraz w formie wodorków metali. Każda z metod ma swoje zalety i ograniczenia – m.in. niską gęstość energii (gazowy), wymogi kriogeniczne (ciekły), czy wyzwania materiałowe (stałe wodorki).

Bezpieczeństwo magazynowania wymaga zastosowania specjalistycznych materiałów odpornych na korozję wodorową oraz przestrzegania norm międzynarodowych (np. ISO, ATEX, PED). Szczególną uwagę należy zwrócić na zjawisko kruchości wodorowej oraz degradację materiałów w kontakcie z wodorem.

Rozwój infrastruktury wodorowej wymaga znacznych nakładów inwestycyjnych (szacowanych na dziesiątki miliardów euro do 2030 r.), budowy dedykowanych sieci przesyłowych, dostosowania istniejących gazociągów oraz jednolitych regulacji bezpieczeństwa na poziomie UE i globalnym. Pomimo tych wyzwań wodór pozostaje kluczowym elementem transformacji energetycznej, oferując perspektywę znacznego ograniczenia emisji gazów cieplarnianych.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano następujące wnioski:

- Zielony wodór jest kluczowym elementem transformacji energetycznej, oferując zeroemisyjne źródło energii

- jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20230000822> (dostęp: 27.06.2025)
- [36] Dz.U. 2010 nr 138 poz. 931 – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 lipca 2010 r. w sprawie minimalnych wymagań, dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy, związanych z możliwością wystąpienia w miejscu pracy atmosfery wybuchowej, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=W-DU20101380931> (dostęp: 27.06.2025)
- [37] Dz.U. 2009 nr 124 poz. 1030 – Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 lipca 2009 r. w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=W-DU20091241030> (dostęp: 27.06.2025)
- [38] Dyrektywa 1999/92/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1999 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników zatrudnionych na stanowiskach pracy, na których może wystąpić atmosfera wybuchowa (piętnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) (dostęp: 27.06.2025)
- [39] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej (dostęp: 27.06.2025)
- [40] Dz.U. 2016 poz. 138 – Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 29 stycznia 2016 r. w sprawie rodzajów i ilości znajdujących się w zakładzie substancji niebezpiecznych, decydujących o zaliczeniu zakładu do zakładu o zwiększonym lub dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=W-DU20160000138> (dostęp: 27.06.2025)
- [41] Dyrektywa 2012/18/UE (SEVESO III) – Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/18/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie kontroli zagrożeń poważnymi awariami związanymi z substancjami niebezpiecznymi, zmieniająca, a następnie uchylająca dyrektywę Rady 96/82/WE (dostęp: 27.06.2025)
- [42] Dyrektywa 2014/68/UE (PED) – Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/68/UE z dnia 15 maja 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do udostępniania na rynku urządzeń ciśnieniowych (dostęp: 27.06.2025)
- [43] Dyrektywa 2006/42/WE (MD) – Dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn, zmieniająca dyrektywę 95/16/WE (dostęp: 27.06.2025)
- [44] Dyrektywa 2014/35/UE (LVD) – Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/35/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do udostępniania na rynku sprzętu elektrycznego przewidzianego do stosowania w określonych granicach napięcia (dostęp: 27.06.2025)
- [45] Dyrektywa 2014/30/UE (EMC) – 2014/30/UE Dyrektywa kompatybilności elektromagnetycznej EMC (dostęp: 27.06.2025)
- [46] Dyrektywa 94/55/WE (ADR) – Dyrektywa Rady 94/55/WE z dnia 21 listopada 1994 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich w zakresie transportu drogowego towarów niebezpiecznych (dostęp: 27.06.2025)
- [47] Dyrektywa 70/156/EWG – Dyrektywa Rady z dnia 6 lutego 1970 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich w odniesieniu do homologacji typu pojazdów silnikowych i ich przyczep (dostęp: 27.06.2025)
- [48] Dyrektywa 2018/2001 (RED) – Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych (dostęp: 27.06.2025)
- [49] Dz.U. 2002 nr 140 poz. 1171 – Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 3 lipca 2002 r. w sprawie karty charakterystyki substancji niebezpiecznej i preparatu niebezpiecznego, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20021401171> (dostęp: 27.06.2025)
- [50] Dz.U. 2011 nr 63 poz. 322 – Ustawa z dnia 25 lutego 2011 r. o substancjach chemicznych i ich mieszaninach <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20110630322> (dostęp: 27.06.2025)
- [51] Classification, Labelling and Packaging of chemicals (CLP Regulation) – Regulation (EU) 2024/2865 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 amending Regulation (EC) No 1272/2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/2865/oj> (dostęp: 27.06.2025)
- [52] REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006R1907> (dostęp: 27.06.2025)
- [53] PN-ISO 8421-1/Ak:1997 Ochrona przeciwpożarowa – Terminologia – Terminy ogólne i dotyczące zjawiska pożaru, PKN – Warszawa 1997
- [54] Dz.U. 2021 poz. 1210 – Rozporządzenie Ministra Rodziny i Polityki Społecznej z dnia 2 czerwca 2021 r. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=W-DU20210001210> (dostęp: 27.06.2025)
- [55] ADR – Dyrektywa 2008/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 24 września 2008 r. w sprawie transportu lądowego towarów niebezpiecznych <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=cele-x%3A32008L0068> (dostęp: 27.06.2025)
- [56] Regulamin RID – Dyrektywa Rady 96/49/WE z dnia 23 lipca 1996 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich dotyczących transportu kolejowego towarów niebezpiecznych <https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/rail-safety-transport-of-dangerous-goods-by-rail.html?from-Summary=32> (dostęp: 27.06.2025)
- [57] Dz.U. 2015 poz. 1368 – Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 25 sierpnia 2015 r. w sprawie sposobu oznakowania miejsc, rurociągów oraz pojemników i zbiorników służących do przechowywania lub zawierających substancje stwarzające zagrożenie lub mieszaniny stwarzające zagrożenie <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=W-DU20150001368> (dostęp: 27.06.2025)
- [58] Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040 (PSW), 2021
- [59] ISO/TR 20172:2018 – Welding – Welding of steels – Summary of hydrogen embrittlement of steels <https://www.iso.org/standard/70361.html> (dostęp: 27.06.2025)
- [60] ASME B31.12-2019 – Hydrogen Piping and Pipelines <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-12-hydrogen-piping-pipelines> (dostęp: 27.06.2025)
- [61] DNV-RP-F112 (2021) – Design of Hydrogen Pipelines <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RP/2021-08/DNV-RP-F112.pdf> (dostęp: 27.06.2025)
- [62] Li, X., Chen, B., Li, C. et al. (2020). “Hydrogen Embrittlement of Metallic Materials.” *Materials Today Advances*, 8, 100086.
- [63] ISO 19884:2018 – Gaseous hydrogen – Cylinders and tubes for stationary storage <https://www.iso.org/standard/66215.html> (dostęp: 27.06.2025)
- [64] ISO 11119 – Gas cylinders – Refillable composite gas cylinders and tubes <https://www.iso.org/standard/73418.html> (dostęp: 27.06.2025)
- [65] SAE J2579 (2020) Technical Information Report for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles https://www.sae.org/standards/content/j2579_202006/ (dostęp: 27.06.2025)
- [66] Shamsi, M., et al. (2022). “Advances in high-pressure hydrogen storage tank design and manufacturing.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(69): 29865–29885.