

Analiza porównawcza wybranych metod magazynowania wodoru

Comparative analysis of selected hydrogen storage methods

Kacper Skakluk^{*}

Słowa kluczowe: wodór, magazynowanie wodoru, gospodarka wodorowa, transformacja energetyczna

Streszczenie

Wodór, jako lekki i powszechny pierwiastek o wysokiej wartości energetycznej, uznawany jest za ważny nośnik energii przyszłości. Ze względu na niską gęstość i łatwopalność, konieczne jest stosowanie odpowiednich metod magazynowania – fizycznych (sprężony, ciekły, sprężono-ciekły) oraz chemicznych (wodorki, LOHC, adsorpcja, związki takie jak amoniak czy metanol). Każda z nich ma zalety i ograniczenia – fizyczne formy oferują szybki dostęp, lecz są kosztowne; chemiczne są bezpieczniejsze, ale mniej wydajne. Analiza uwzględnia także wpływ warunków technicznych oraz zjawisko kruchości wodorowej. Ostatecznie stwierdzono, że wybór metody zależy od zastosowania, skali i infrastruktury – nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie.

Keywords: hydrogen, hydrogen storage, hydrogen economy, energy transformation

Abstract

Hydrogen, as a light and common element with high energy value, is considered an important energy carrier of the future. Due to its low density and flammability, appropriate storage methods are necessary – both physical (compressed, liquefied, cryo-compressed) and chemical (hydrides, LOHCs, adsorption, and compounds such as ammonia or methanol). Each method has its advantages and limitations – physical forms offer quick access but are costly; chemical ones are generally safer but less efficient. The analysis also considers the impact of technical conditions and the phenomenon of hydrogen embrittlement. Ultimately, it is concluded that the choice of method depends on the application, scale, and available infrastructure – there is no one-size-fits-all solution.

1. Wprowadzenie

Współczesna gospodarka stoi w obliczu konieczności transformacji energetycznej, wynikającej z wyczerpywania się zasobów paliw kopalnych, postępujących zmian klimatu oraz wzrastającego zapotrzebowania na energię. W tym kontekście coraz większego znaczenia nabierają odnawialne źródła energii oraz technologie umożliwiające ich efektywne wykorzystanie. Jednym z najważniejszych problemów, związanych z energetyką odnawialną, jest zapewnienie ciągłości dostaw energii, mimo jej niestabilnej produkcji. Odpowiedzią na ten problem jest rozwój technologii magazynowania energii, wśród których szczególną rolę odgrywa wodór, jako uniwersalny i perspektywiczny nośnik energii [3, 5, 10, 23, 27].

Wodór to najprostszy i najlżejszy pierwiastek chemiczny, który jednocześnie jest najbardziej rozpowszechnionym elementem we wszechświecie. Na Ziemi występuje w postaci dwuatomowej cząsteczki H₂ i odgrywa niezbędną rolę w wielu procesach chemicznych i fizycznych. Ze względu na swoje unikalne właściwości, które częściowo zostały przedstawione w tab. 1 oraz rosnące znaczenie w kontekście transformacji energetycznej, wodór zyskuje miano jednego z najważniejszych nośników energii przyszłości [5, 10, 27].:

Tabela 1: Właściwości wodoru [5]

Table 1: Properties of hydrogen [5]

Właściwość	Wartość	Jednostka
Masa molowa	2,016	g/mol
Gęstość (gaz)	0,08999	g/L
Gęstość (ciecz)	70,8	kg/m ³
Temperatura wrzenia	-252,2	°C
Temperatura topnienia	-259,2	°C
Ciepło spalania	141,86	kJ/kg
Wartość kaloryczna	120	MJ/kg
Wartość opałowa	33,3	kWh/kg
Temperatura zapłonu	585	°C
Zakres wybuchowości	4-75	% objętości w powietrzu
Temperatura krytyczna	-240,18	°C
Ciśnienie krytyczne	12,98	atm
Przewodność cieplna	0,1805	W/m * K

Wodór cechuje się wyjątkowo wysoką wartością energetyczną, w przeliczeniu na jednostkę masy. Wartość opałowa wodoru wynosi 33,3 kWh/kg, natomiast jego wartość kaloryczna sięga 120 MJ/kg. Dla porównania, te liczby są ponad trzykrotnie wyższe niż w przypad-

^{*} Kacper Skakluk – inż., Zakład Inżynierii Środowiska – Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie, e-mail: kacper.skakluk@o2.pl

ku paliw kopalnych, takich jak benzyna czy olej napędowy. Ciepło spalania wodoru wynosi 141,86 kJ/kg, co potwierdza jego znaczny potencjał energetyczny. W stanie gazowym wodór jest bezbarwny, bezwonny, nietoksyczny i nie wywiera negatywnego wpływu na środowisko. Jednym z jego największych atutów jest czystość procesu spalania – produktem spalania wodoru jest wyłącznie woda, co eliminuje emisję dwutlenku węgla oraz innych zanieczyszczeń [10, 27].

Pod względem parametrów fizycznych wodór wyróżnia się bardzo niską gęstością – w stanie gazowym wynosi ona zaledwie 0,08999 g/L, a w stanie ciekłym 70,8 kg/m³. Ma również niezwykle niskie temperatury wrzenia i topnienia, odpowiednio – 252,2°C i – 259,2°C. Wodór charakteryzuje się także wysoką przewodnością cieplną (0,1805 W/m·K) oraz bardzo wysoką temperaturą zapłonu, sięgającą 858 K (czyli około 585°C), co w teorii zmniejsza jego podatność na samozapłon. Zakres wybuchowości wodoru w powietrzu wynosi od 4% do aż 75% objętości, co oznacza, że jest on łatwopalny w szerokim przedziale stężeń [10, 27].

Jednym z kluczowych problemów przy zastosowaniu wodoru jest jego bardzo niska gęstość energetyczna w stanie objętościowym, co wymaga specjalnych metod magazynowania i transportu [30] – najczęściej w postaci sprężonej (350–700 barów), ciekłej (poniżej 20 K) lub chemicznie związanej w innych substancjach. Te metody wiążą się z wysokimi wymaganiami technicznymi i energetycznymi, a także kosztami. Pomimo wyzwań technologicznych, wodór jest wszechstronny – może być wykorzystywany w ogniwach paliwowych do produkcji energii elektrycznej, w transporcie [30], w przemyśle, a także jako magazyn energii pochodzącej z odnawialnych źródeł, takich jak turbiny wiatr czy panele słoneczne [3, 10, 27].

Z punktu widzenia bezpieczeństwa wodór wymaga szczególnej uwagi. Oprócz szerokiego zakresu wybuchowości w powietrzu, istotnym zagrożeniem jest jego wysoka dyfuzyjność – wodór bardzo łatwo przenika przez różne materiały, co może prowadzić do wycieków, zwłaszcza w systemach wysokociśnieniowych. W przypadku ulotnienia wodór łatwo miesza się z powietrzem, tworząc mieszaniny wybuchowe. Choć szybko unosi się w powietrzu i rozrzedza dzięki małej masie cząsteczkowej, w zamkniętych przestrzeniach może kumulować się w niekontrolowany sposób. Mimo to, ze względu na wysoką temperaturę zapłonu, ryzyko przypadkowego samozapłonu jest mniejsze niż w przypadku benzyny czy propanu [10, 13, 25, 27].

Szczególnym zagrożeniem w kontekście inżynierskim jest tzw. kruchość wodorowa – zjawisko degradacji materiałów metalicznych spowodowane penetracją atomów wodoru do ich struktury krystalicznej. W warunkach wysokiego ciśnienia, temperatury lub obecności wodoru atomowego, cząsteczki wodoru mogą przenikać do wnętrza metali, powodując osłabienie ich właściwości mechanicznych. Skutkiem tego są nieprzewidywalne pęknięcia, takie jak na rys. 1, zmniejszona plastyczność i wytrzymałość na rozciąganie, co stanowi poważne zagrożenie dla zbiorników ciśnieniowych, rurociągów oraz innych elementów infrastruktury wodorowej. Problem kruchości dotyczy głównie stali, aluminium, tytanu oraz ich stopów i wymaga stosowania specjalistycznych materiałów odpornych na działanie wodoru [10, 21].



Rys. 1. Przykład działania kruchości wodorowej na metal [15]

Fig. 1. An example of the effect of hydrogen embrittlement on metal [15]

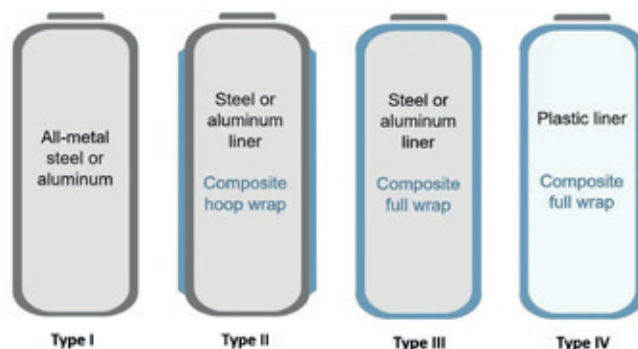
Pomimo wyzwań, wodór jest niezwykle obiecującym paliwem i nośnikiem energii. Może być produkowany z różnych źródeł – zarówno z paliw kopalnych, jak i w procesie elektrolizy wody, z wykorzystaniem energii odnawialnej. Jego neutralność emisyjna, wysoka wartość opałowa oraz zdolność do integracji z nowoczesnymi technologiami energetycznymi sprawiają, że staje się on istotnym elementem strategii dekarbonizacji gospodarki. Dalszy rozwój technologii wodorowych, poprawa bezpieczeństwa i efektywności systemów magazynowania oraz obniżenie kosztów produkcji będą niezbędne dla pełnego wykorzystania potencjału wodoru w przyszłych systemach energetycznych [10, 27].

2. Magazyny fizyczne

Fizyczne magazynowanie wodoru to jedna z najbardziej rozwiniętych i powszechnie stosowanych metod jego przechowywania. Polega na utrzymywaniu wodoru w postaci gazowej, ciekłej lub w stanie sprężono-ciekłym. Każda z tych form wymaga zastosowania odpowiedniej infrastruktury technicznej oraz spełnienia ścisłych wymagań bezpieczeństwa [5, 10, 27, 24, 25]

2.1. Magazynowanie wodoru w postaci sprężonej

Magazynowanie wodoru w butlach ciśnieniowych stanowi jedną z najbardziej rozpowszechnionych i technologicznie rozwiniętych metod fizycznego przechowywania tego pierwiastka. Metoda ta opiera się na kompresji wodoru do wysokich ciśnień, zwykle w zakresie od 200 do nawet 700 barów, co pozwala na znaczne zwiększenie jego gęstości energetycznej na jednostkę objętości i umożliwia efektywne magazynowanie oraz transport [30]. Dzięki rozwojowi materiałów konstrukcyjnych oraz zaawansowanych technologii produkcji, magazyny ciśnieniowe znajdują zastosowanie zarówno w systemach stacjonarnych, jak i mobilnych – od przemysłu po sektor transportu [10, 27].



Rys. 2. Typy magazynów na wodór sprężony [17]

Fig. 2. Types of compressed hydrogen storage [17]

Butle ciśnieniowe projektowane są w różnych wariantach konstrukcyjnych, klasyfikowanych jako typy I, II, III i IV (rys. 2), z których każdy różni się budową, materiałami oraz parametrami użytkowymi. Butle I typu są najprostsze i najtańsze w produkcji – wykonane w całości ze stali, oferują dużą wytrzymałość mechaniczną, jednak ich znaczną wadą jest masa, co ogranicza zastosowanie w sektorze mobilnym. Zbiorniki II typu łączą stalowy rdzeń z warstwą wzmacniającą z włókna szklanego, co pozwala na obniżenie masy, przy zachowaniu wysokiej odporności na ciśnienie. Typ III to konstrukcje z aluminiowym rdzeniem otoczonym włóknem węglowym – znacznie lżejsze i bardziej wytrzymałe, idealne do zastosowań w transporcie. Najbardziej zaawansowane są butle IV typu, w całości kompozytowe, z polimerowym rdzeniem i węglowym opłotem, które wyróżniają się minimalną masą oraz doskonałą wytrzymałością przy bardzo wysokich ciśnieniach [10, 12, 24, 25, 27, 30]. W tab. 2 zostały opisane typy butli ciśnieniowych z wyszczególnieniem ich cech

Tabela 2 Porównanie typów zbiorników na sprężony wodór [10], [27]

Table 2 Comparison of compressed hydrogen tank types [10], [27]

	I typ	II typ	III typ	IV typ
Materiał konstrukcyjny	Stal	Stalowy rdzeń, włókno szklane	Aluminiowy rdzeń, włókno szklane	Kompozyty
Ciśnienie robocze	200-300 bar	300-450 bar	350-700 bar	350-875 bar
Masa	Wysoka	Umiarkowana	Niska	Bardzo niska
Koszt jednostkowy	300-600 USD	500-1000 USD	1000-2000 USD	2000-3000 USD
Zalety	Niskie koszty, prostota konstrukcji	Lepszy stosunek masy do wytrzymałości	Lekka konstrukcja, wysoka wytrzymałość	Najlepszy stosunek masy do wytrzymałości
Wady	Ciężkie, podatne na korozję	Wyższy koszt niż I typ, wymaga bardziej zaawansowanych materiałów	Wyższy koszt niż II typ, wymaga jeszcze bardziej zaawansowanych materiałów	Bardzo wysoki koszt produkcji, potrzeba najwyższej zaawansowane materiały
Zastosowania	Przemysł chemiczny, magazyny stacjonarne	Magazynowanie przemysłowe, transport	Pojazdy wodorowe	Pojazdy wodorowe, lotnictwo

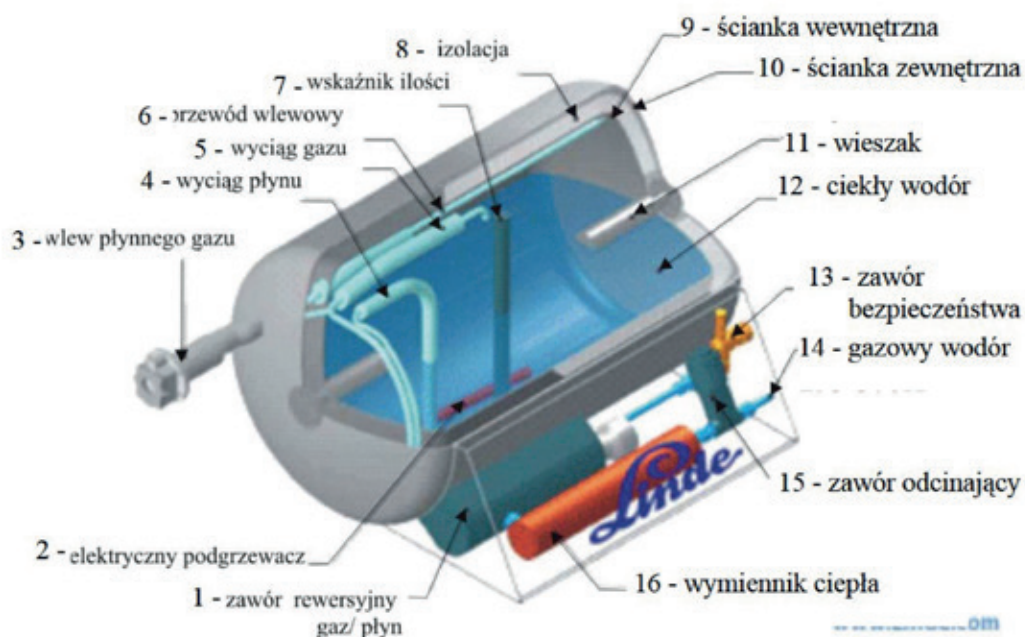
Niezależnie od konstrukcji, wszystkie zbiorniki muszą spełniać rygorystyczne normy bezpieczeństwa, ponieważ wodór jako gaz jest substancją wysoce łatwopalną. Wymaga to stosowania systemów zabezpieczających, takich jak zawory nadmiarowe czy odpowiednie powłoki antykorozyjne. Kluczowym zagadnieniem, w kontekście bezpieczeństwa i trwałości zbiorników, jest również zjawisko kruchości wodorowej – efekt degradacji materiałów, głównie metali, w wyniku dyfuzji atomowego wodoru do ich struktury. Proces ten prowadzi do spadku plastyczności i wytrzymałości materiału, co może skutkować nieprzewidywalnymi awariami mechanicznymi, zwłaszcza w warunkach wysokiego ciśnienia i zmiennych temperatur [10, 12, 21, 27].

Oprócz aspektów konstrukcyjnych, niezwykle istotne są również zagadnienia związane z termodynamiką sprężania gazu. Proces ten wymaga znacznych nakładów energii i generuje ciepło, dlatego istotne jest zapewnienie odpowiedniego chłodzenia i kontroli parametrów pracy. W obliczeniach operacyjnych wykorzystywane są zarówno równania stanu gazu doskonałego, jak i bardziej zaawansowane modele opisujące zachowanie wodoru jako gazu rzeczywistego, szczególnie przy ekstremalnych wartościach ciśnienia [10, 12, 27].

Zaletą stosowania butli ciśnieniowych jest ich wysoka dostępność, elastyczność zastosowań oraz relatywnie niskie koszty w przypadku prostszych konstrukcji. Wodór sprężony może być szybko ładowany i rozładowywany, co czyni tę metodę atrakcyjną dla stacji tankowania, transportu paliwowego oraz aplikacji przemysłowych. Z drugiej strony, wadą są wysokie wymagania materiałowe, masa zbiorników (szczególnie typów I i II) oraz koszty energii potrzebnej do sprężania [10, 12, 27].

Pod względem ekonomicznym koszty magazynowania wodoru w butlach zależą od typu zbiornika, materiałów użytych do jego produkcji, technologii wytwarzania, a także od skali produkcji. Na przykład, zbiorniki I typu są najtańsze w zakupie, lecz znacznie bardziej masywne i podatne na zjawisko kruchości wodorowej [10, 21]. Z kolei zbiorniki III i IV typu, choć znacznie droższe, oferują znacznie lepszy stosunek masy do pojemności wodoru, co sprawia, że są opłacalne w zastosowaniach mobilnych, gdzie każdy kilogram sprzętu ma znaczenie [10, 12, 27].

Warto podkreślić, że fizyczne magazynowanie wodoru w butlach ciśnieniowych nie jest rozwiązaniem uniwersalnym – jego przydatność zależy od wielu czynników, takich jak lokalizacja, infrastruktura, potrzeby użytkowe oraz możliwości budżetowe. W praktyce, butle



Rys. 3. Przekrój przez zbiornik na skroplony wodór [30]

Fig. 3. Cross-section of a liquefied hydrogen tank [30]

ciśnieniowe stanowią jednak jeden z filarów rozwoju gospodarki wodorowej, wspierając zarówno zastosowania przemysłowe, jak i rozwój zeroemisyjnego transportu oraz stabilizacji sieci energetycznych [10, 12, 27].

2.2. Magazynowanie w postaci ciekłej

Magazynowanie wodoru w stanie ciekłym to zaawansowana technologicznie metoda fizycznego przechowywania, która polega na schłodzeniu wodoru do temperatury poniżej -253°C (20 K), co pozwala na jego skroplenie i znaczne zwiększenie gęstości energetycznej. Dzięki temu, możliwe jest przechowywanie większych ilości energii w stosunkowo niewielkiej objętości, co czyni tę technologię szczególnie atrakcyjną dla zastosowań wymagających dużej pojemności, przy ograniczonej przestrzeni, takich jak transport dalekiego zasięgu, lotnictwo, przemysł kosmiczny czy długodystansowy przesył wodoru [10, 12, 27].

Wodór w postaci ciekłej przechowywany jest w specjalnych zbiornikach kriogenicznych, takich jak na rys. 3, które zapewniają odpowiednią izolację termiczną i minimalizują straty wynikające z odparowywania gazu (tzw. efekt „boil-off”). Zbiorniki te muszą być niezwykle szczelne oraz odporne na ekstremalne różnice temperatur, a ich konstrukcja uwzględnia zarówno bezpieczeństwo użytkowania, jak i efektywność termiczną. Zastosowanie odpowiednich materiałów oraz wielowarstwowych powłok izolacyjnych pozwala ograniczyć przenikanie ciepła z otoczenia, które prowadziłoby do parowania ciekłego wodoru i wzrostu ciśnienia wewnątrz zbiornika [10, 27, 28].

Jedną z największych zalet tej metody jest wysoka gęstość energetyczna ciekłego wodoru, która przewyższa wartości osiągane w magazynach wodoru sprężonego. Pozwala to na zmniejszenie rozmiaru zbiorników, przy zachowaniu tej samej ilości energii, co ma istotne znaczenie w transporcie, gdzie waga i objętość odgrywają kluczową rolę. Skroplony wodór znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym i kosmicznym, gdzie konieczne jest zminimalizowanie masy, przy jednoczesnym zachowaniu dużej ilości energii dostępnej natychmiast po uruchomieniu systemów napędowych [10, 27, 28].

Mimo licznych korzyści technicznych, magazynowanie wodoru w stanie ciekłym wiąże się także z istotnymi wyzwaniem. Najważniejszym z nich są bardzo wysokie koszty energetyczne procesu skraplania wodoru. Przemiana wodoru ze stanu gazowego do ciekłego wymaga znacznych nakładów energii, które mogą sięgać nawet 30% wartości energetycznej samego wodoru. To sprawia, że metoda ta jest opłacalna głównie tam, gdzie wysoka gęstość energetyczna jest absolutnym priorytetem, a nie gdzie efektywność kosztowa odgrywa decydującą rolę [10, 27, 28].

Kolejnym istotnym ograniczeniem są straty wodoru w trakcie jego przechowywania. Mimo stosowania zaawansowanej izolacji, nawet niewielki napływ ciepła z otoczenia, prowadzi do parowania ciekłego wodoru, a powstający gaz musi być odprowadzany z układu, w celu uniknięcia nadciśnienia. Proces ten, znany jako „boil-off”, może skutkować systematyczną utratą części przechowywanego medium, co jest istotne zarówno z perspektywy bezpieczeństwa, jak i kosztów eksploatacyjnych [10, 27, 28].

Zagadnienia bezpieczeństwa odgrywają szczególną rolę w technologii skroplonego wodoru. Niska temperatura przechowywania wymaga stosowania materiałów odpornych na kruchość kriogeniczną [21] i zachowujących swoje właściwości mechaniczne w ekstremalnych warunkach. Dodatkowo, wodór pozostaje gazem silnie łatwopalnym, dlatego niezbędne są zaawansowane systemy kontroli ciśnienia, zawory bezpieczeństwa, systemy detekcji wycieków oraz mechanizmy automatycznego odpowietrzania [10, 27, 28].

Pomimo tych wyzwań, magazynowanie ciekłego wodoru znajduje coraz szersze zastosowanie w nowoczesnych systemach energetycznych, zwłaszcza w kontekście rozwoju globalnej gospodarki wodorowej. Transport wodoru na duże odległości drogą morską

za pomocą tankowców kriogenicznych [23], a także jego wykorzystanie w mobilnych źródłach energii, takich jak samoloty czy pojazdy kosmiczne, sprawiają, że technologia ta ma duży potencjał rozwoju. Wymaga to jednak dalszych inwestycji w optymalizację procesów skraplania, poprawę izolacji zbiorników oraz rozwój infrastruktury wspierającej dystrybucję i przechowywanie ciekłego wodoru. W tab. 3 przedstawiono porównanie najważniejszych cech wodoru przechowywanego w bulach ciśnieniowych i kriogenicznych [10, 27, 28].

Tabela 3 Koszty magazynowania wodoru sprężonego i skroplonego [4]

Table 3 Compressed and liquefied hydrogen storage costs [4]

Faza wodoru	Temperatura [K]	Ciśnienie [atm]	Gęstość [kg/L]	Koszt [\$/kgH ₂]
Sprężony 1500 kg	300	350	0,0235	700 (stalowa butla z wkładką)
Sprężony 1500 kg	300	350	0,0235	650 (stalowa butla z elementami kompozytowymi)
Skroplony 3000 kg	15-20	5-10	0,75	70 (silnie zaizolowane)
Skroplony 1000 kg	15-20	5-10	0,75	105 (silnie zaizolowane)

2.3. Magazynowanie sprężono-ciekłe (CCH₂)

Magazynowanie wodoru w postaci sprężono-ciekłej (ang. Cryo-Compressed Hydrogen Storage, CCH₂) stanowi innowacyjne połączenie dwóch fizycznych metod przechowywania wodoru: w stanie sprężonym i ciekłym. W tej technologii wodór jest utrzymywany w warunkach kriogenicznych, czyli w bardzo niskiej temperaturze (zbliżonej do punktu skraplania, około -253°C), przy jednoczesnym zastosowaniu wysokiego ciśnienia (zwykle od 200 do 350 barów). Dzięki takiemu podejściu możliwe jest znaczne zwiększenie gęstości energetycznej wodoru, w porównaniu do jego tradycyjnych form magazynowania, a także ograniczenie strat wynikających z odparowywania, charakterystycznych dla wodoru ciekłego [10, 28].

Rozwiązania sprężono-ciekłe są bardziej efektywne energetycznie niż typowe magazyny na wodór sprężony, a jednocześnie charakteryzują się mniejszymi stratami niż zbiorniki na wodór ciekły. Zbiorniki kriogeniczne przeznaczone do tego typu magazynowania wymagają zaawansowanej izolacji termicznej oraz materiałów odpornych na działanie wodoru i ekstremalne warunki pracy. Ich konstrukcja pozwala na uzyskanie wysokiego stosunku przechowywanej energii do masy, co czyni je szczególnie atrakcyjnymi w zastosowaniach transportowych oraz w stacjach tankowania wodoru, gdzie istotna jest optymalizacja przestrzeni i redukcja strat energetycznych [10, 28].

Wodór w postaci sprężono-ciekłej oferuje wyraźne korzyści w porównaniu do tradycyjnych metod, takich jak wyższa pojemność energetyczna przy mniejszej objętości zbiornika czy możliwość ograniczenia strat związanych z „boil-off”, czyli odparowywaniem wodoru ciekłego. Pomimo relatywnie wysokich kosztów, związanych z wytworzeniem i eksploatacją takich zbiorników, technologia CCH₂ znajduje zastosowanie przede wszystkim tam, gdzie wymagania energetyczne, mobilność oraz efektywność przechowywania są kluczowe [10, 28].

Z uwagi na konieczność utrzymania niskiej temperatury i wysokiego ciśnienia, systemy sprężono-ciekłe muszą być wyposażone w precyzyjne układy kontroli ciśnienia i temperatury, a także w systemy bezpieczeństwa zapobiegające nadmiernemu wzrostowi ciśnienia. W przyszłości, dzięki dalszemu rozwojowi materiałów izolacyjnych i technologii kriogenicznych, magazynowanie wodoru w postaci sprężono-ciekłej może odegrać istotną rolę w rozwoju infrastruktury wodorowej, zwłaszcza w obszarach transportu oraz magazynowania energii na dużą skalę [10, 28].

Tabela 4 Koszty magazynowania wodoru w rurociągach [4]

Table 4 Costs of storing hydrogen in pipelines [4]

Stan napełnienia rurociągu		Średnica rury [cal]			
		48	36	24	12
Napełnianie 90 bar	Ciśnienie wyjściowe [bar]	81	78	72	47
	Przepływy wodoru [kg/dzień/km]	81500	48200	20500	4300
Rozładowanie 70 bar	Ciśnienie wyjściowe [bar]	63	61	56	37
	Przepływy wodoru [kg/dzień/km]	59800	33100	14200	38500
Pobranie 10 % z rurociągu o długości 100 km	Różnica w magazynowaniu kg wodoru [kg/dzień]	277000	151000	62500	3800
	Spełniona frakcja [kg/dzień/100km]	0,067	0,036	0,025	0,0014
	Suma długości rurociągu [km]	1492	2777	4000	72000
	Koszt wodoru [\$ /kg H ₂]	0,015	0,05	0,057	0,2

2.4. Magazynowanie w rurociągach

Magazynowanie wodoru w rurociągach to specyficzna forma fizycznego przechowywania, która łączy funkcje transportowe i buforowe, umożliwiając jednocześnie przesył i krótkoterminowe składowanie wodoru w systemach energetycznych. Choć pierwotną funkcją rurociągów jest dystrybucja gazu, odpowiednio zaprojektowana sieć przesyłowa może służyć także jako element infrastruktury magazynującej, szczególnie w kontekście dynamicznie zmieniającego się zapotrzebowania na wodór oraz integracji odnawialnych źródeł energii. W tab. 3 przedstawiono wartości wodoru przepływającego przez rurociąg w zależności od średnicy oraz ciśnienia [11].

Systemy rurociągowo wykorzystywane do przesyłu wodoru mogą być budowane jako instalacje dedykowane lub adaptowane z istniejących sieci gazowych, poprzez wprowadzenie odpowiednich modyfikacji materiałowych i technicznych. Możliwe jest również mieszanie wodoru z gazem ziemnym w odpowiednich proporcjach, co pozwala na stopniowe wdrażanie rozwiązań wodorowych, bez konieczności natychmiastowej przebudowy całej infrastruktury. Rozwiązanie to, znane jako „wodór w sieci gazowej” (H₂ blending), zyskuje na znaczeniu w krajach rozwijających politykę transformacji energetycznej [11].

Magazynowanie wodoru w rurociągach polega na jego przechowywaniu pod wysokim ciśnieniem, zazwyczaj w zakresie od kilkunastu do kilkudziesięciu megapascalów (MPa), co pozwala nie tylko na jego efektywny przesył, lecz również na tymczasowe gromadzenie nadmiarowej ilości gazu w systemie. Ciśnienie robocze w rurociągach wodorowych może być dostosowywane w zależności od zapotrzebowania, co umożliwia dynamiczne zarządzanie przepływem i rezerwą energii w systemie. W ten sposób rurociągi pełnią funkcję magazynu buforowego, wyrównującego wahania pomiędzy produkcją a konsumpcją wodoru [11].

Kluczowym wyzwaniem technicznym w tej metodzie magazynowania jest dobór odpowiednich materiałów do budowy rurociągów, ponieważ wodór jako najmniejszy i najbardziej dyfuzyjny pierwiastek chemiczny ma zdolność przenikania przez struktury metaliczne, prowadząc do ich osłabienia. Zjawisko to, znane jako kruchość wodorowa, może powodować powstawanie mikropęknięć, zmniejszenie plastyczności materiału oraz jego podatność na awarie mechaniczne, szczególnie w przypadku stali. W celu ograniczenia tego zjawiska stosuje się specjalne stopy metali, powłoki ochronne, a także procedury monitorowania integralności strukturalnej sieci [11, 21].

Wodór przesyłany rurociągami może być dostarczany do różnych punktów odbioru, takich jak zakłady przemysłowe, stacje tankowania, elektrownie wodorowe czy instalacje przekształcające wodór w energię elektryczną. Rozproszony charakter takiej infrastruktury

pozwała na elastyczne reagowanie na lokalne zapotrzebowanie i minimalizację strat logistycznych. Rurociągi są również kluczowym elementem planowania przyszłej gospodarki wodorowej, w której wodór stanie się podstawowym medium energetycznym, wymagającym sieci przesyłowej na podobieństwo dzisiejszych gazociągów ziemnych czy linii energetycznych [11].

Pod względem ekonomicznym, magazynowanie wodoru w rurociągach cechuje się niskimi kosztami operacyjnymi w przypadku dużej skali zastosowań, lecz wiąże się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi na etapie budowy lub adaptacji infrastruktury. Konieczność użycia materiałów odpornych na działanie wodoru oraz systemów kontroli i bezpieczeństwa podnosi koszty instalacji, jednak w długim okresie korzyści wynikające z możliwości buforowania energii i obniżenia strat logistycznych przeważają nad początkowymi nakładami [11].

Warto podkreślić, że wykorzystanie rurociągów jako magazynów wodoru wpisuje się w szerszy trend dekarbonizacji i decentralizacji systemów energetycznych. Integracja rurociągów z odnawialnymi źródłami energii, takimi jak farmy wiatrowe czy instalacje fotowoltaiczne, pozwala na magazynowanie nadwyżek produkcyjnych w formie wodoru i ich późniejsze wykorzystanie, gdy zapotrzebowanie wzrasta. Tym samym rurociągi mogą pełnić funkcję inteligentnych, elastycznych kanałów dostarczania energii, jednocześnie kompensując niestabilność produkcji ze źródeł odnawialnych [11].

2.5. Magazynowanie w kawernach solnych i formacjach geologicznych

Magazynowanie wodoru w formacjach geologicznych stanowi jedną z najbardziej obiecujących i opłacalnych metod fizycznego przechowywania wodoru na dużą skalę. Technologia ta polega na wprowadzaniu wodoru do naturalnych lub sztucznie wytworzonych struktur podziemnych, takich jak kawerny solne których przykłady zamieszczono w tabeli 5, wyeksploatowane złoża gazu ziemnego i ropy naftowej oraz porowate skały wodonośne. Dzięki znacznym pojemnościom i właściwościom izolacyjnym tych struktur możliwe jest długoterminowe składowanie dużych ilości wodoru przy stosunkowo niskich kosztach jednostkowych [5, 22, 33].

Jednym z najczęściej wykorzystywanych rozwiązań są kawerny solne – podziemne przestrzenie wydrążone w warstwach soli kamiennej, które charakteryzują się wyjątkową szczelnością i stabilnością geologiczną. Dzięki właściwościom soli, która naturalnie uszczelnia wszelkie mikroszczeliny pod wpływem ciśnienia, kawerny te zapewniają bezpieczne środowisko do magazynowania wodoru. Ponadto proces ich tworzenia poprzez wypłukiwanie soli wodą (tzw. elucję) pozwala na kontrolowanie kształtu i objętości zbiornika, co czyni tę metodę elastyczną i technicznie przewidywalną [5, 22, 33].

Tabela 5 Przykłady kavern solnych do magazynowania wodoru [5]

Table 5 Examples of salt caverns for hydrogen storage [5]

Lokalizacja	Teesside Wielka Brytania	Chevron Philips USA, Texas	AirLiquide, USA, Texas	Moss Bluff, Praxair USA, Texas
Objętość całkowita [m ³]	3x150 000 3x70 000	580 000	906 000	566 000
Głębokość położenia [m]	350-380	850-1150	1158-1524	1400
Poziom ciśnien [MPa]	4,5	7-13,5	6,8-20	Brak danych
Zgromadzona energia [GWh]	25	83,3	Brak danych	80

Alternatywną opcją są wyeksploatowane złoża gazu i ropy, które wcześniej służyły jako naturalne magazyny dla węglowodorów i mogą zostać przystosowane do składowania wodoru. Ich główną zaletą jest duża pojemność oraz dostępność istniejącej infrastruktury przesyłowej i wydobywczej, co obniża koszty inwestycyjne. W takich lokalizacjach magazynowanie wodoru wymaga jednak dokładnych analiz geologicznych oraz oceny obecności pozostałości gazów poduszgowych, takich jak metan, które mogą wpływać na czystość składowanego wodoru i efektywność procesu odzysku [22, 33].

Porowate skały wodonośne, choć mniej powszechne, również rozważane są jako potencjalne środowiska magazynowe, zwłaszcza w regionach pozbawionych kavern solnych czy eksploatowanych złóż. Ich zastosowanie wymaga jednak bardzo dokładnego rozpoznania geologicznego i hydrodynamicznego, aby zapewnić szczelność i stabilność systemu magazynowego [5, 22, 33].

Wszystkie formy magazynowania wodoru w strukturach geologicznych łączy szereg zalet, które czynią tę metodę szczególnie przydatną w kontekście przyszłościowej transformacji energetycznej. Przede wszystkim, umożliwiają one składowanie bardzo dużych ilości wodoru w sposób bezpieczny i relatywnie tani. Straty związane z magazynowaniem są minimalne, a systemy te mogą być zintegrowane z sieciami przesyłowymi oraz wykorzystywane jako bufor energetyczny w systemach zasilanych źródłami odnawialnymi, takimi jak energia wiatrowa czy słoneczna [5, 22, 33].

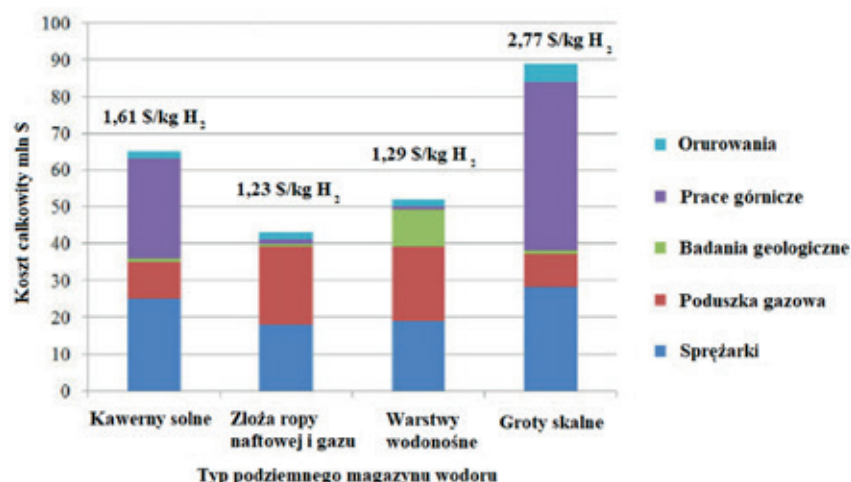
Procesy ładowania i rozładowywania wodoru w tego rodzaju magazynach odbywają się z wykorzystaniem odpowiednio zaprojektowanych systemów ciśnieniowych, przy czym ciśnienia robocze mogą sięgać nawet 20 MPa. Operacje te wymagają zastosowania specjalistycznych sprężarek, systemów chłodzenia oraz precyzyjnego monitorowania parametrów termodynamicznych, takich jak temperatura, ciśnienie i masa gazu. Wysokie ciśnienie i charakter

gazu powodują, że wodór nie zachowuje się jak gaz doskonały, co wymaga stosowania złożonych równań stanu oraz metod bilansowych opartych na równaniach zachowania masy i energii [5, 22, 33].

Istotną cechą tych procesów jest zależność parametrów wewnątrz zbiornika od zmienności masy wodoru w czasie. W miarę wzrostu masy składowanego gazu, zmieniają się zarówno ciśnienie, jak i temperatura w obrębie formacji, co musi być uwzględnione przy projektowaniu systemów ładowania i odbioru wodoru. W zależności od rodzaju przemiany termodynamicznej (adiabaticzna, izotermiczna, izentalpowa), stosuje się odpowiednie modele analityczne, pozwalające na optymalizację pracy magazynu oraz zapewnienie jego stabilności [5, 22, 33].

Choć magazynowanie wodoru w formacjach geologicznych oferuje wiele korzyści, również ta technologia wiąże się z pewnymi problemami. Główne ograniczenia wynikają z konieczności istnienia odpowiednich warunków geologicznych – nie wszędzie możliwe jest bezpieczne wdrożenie tej metody. Dodatkowo, potencjalna interakcja wodoru z materiałem geologicznym może prowadzić do strat lub zmian w strukturze skał, dlatego konieczne są szczegółowe badania laboratoryjne i symulacje przed uruchomieniem instalacji na skalę przemysłową [5, 22, 33].

Pod względem ekonomicznym jest to jedna z najbardziej opłacalnych metod przechowywania wodoru przy dużej skali operacji. Niskie koszty jednostkowe, niewielkie straty oraz możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury sprawiają, że formacje geologiczne będą odgrywać kluczową rolę w przyszłościowej gospodarce wodnorodowej. Złóżka w kontekście zapewnienia elastyczności i niezawodności dostaw wodoru w systemach opartych na niestabilnych źródłach energii odnawialnej, ta metoda może stanowić filar strategii długoterminowego bilansowania popytu i podaży energii. Na rys. 7 przedstawiono koszty magazynowania wodoru, w zależności od wybranej struktury podziemnej [5, 22, 33].

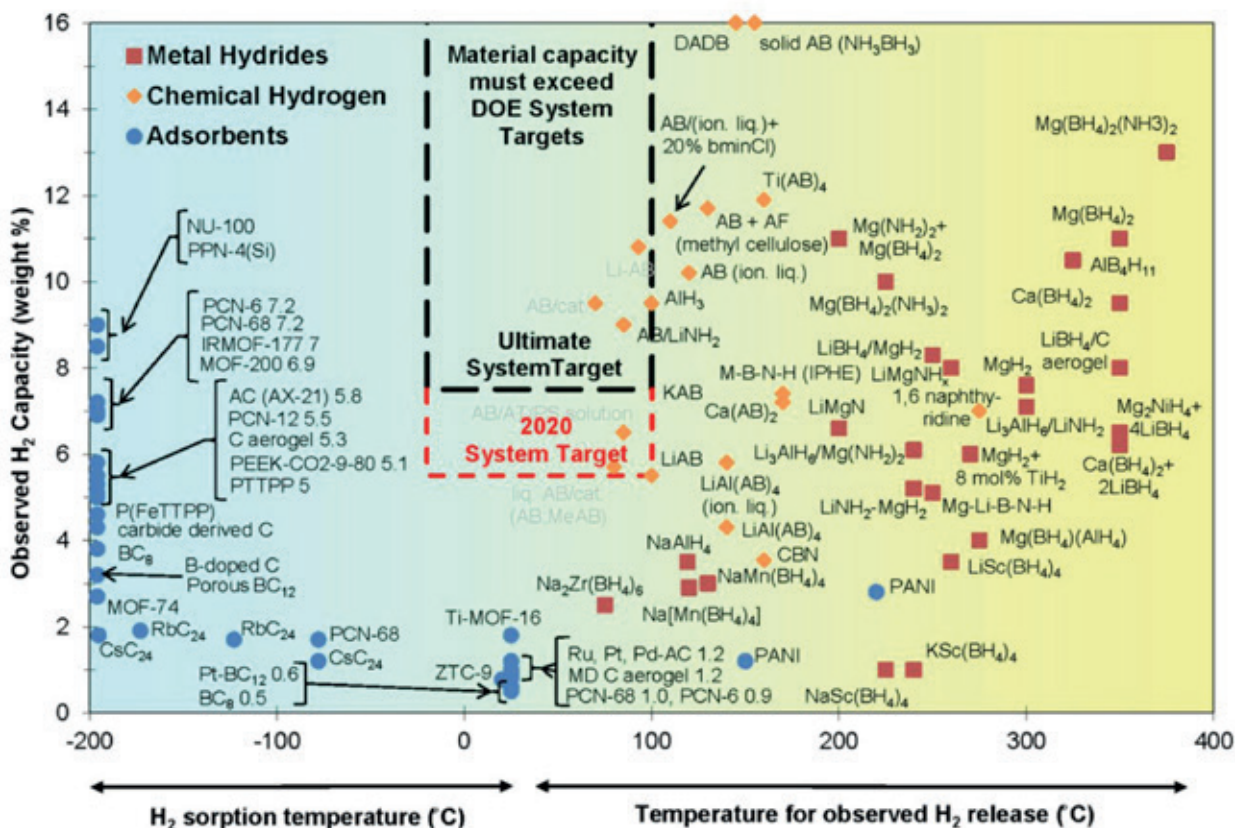


Rys. 4. Koszty poszczególnych typów podziemnych magazynów [5]

Fig. 4. Costs of individual types of underground storage [5]

3. Magazyny chemiczne

Chemiczne magazynowanie wodoru to jedna z najbardziej zaawansowanych metod przechowywania tego pierwiastka, która polega na trwałym wiązaniu wodoru w strukturach chemicznych – zarówno organicznych, jak i nieorganicznych. W odróżnieniu od metod fizycznych, takich jak sprężanie czy skraplanie, rozwiązania chemiczne oferują wyższy poziom bezpieczeństwa oraz stabilność przechowywania, co czyni je szczególnie interesującymi w kontekście długoterminowego magazynowania energii oraz w aplikacjach, gdzie kluczowe znaczenie mają niezawodność i odporność na zmienne warunki zewnętrzne [10]. Na rys. 8 przedstawiono wykres substancji chemicznych zawierających wodór, wraz z temperaturą przyjęcia i oddania wodoru.



Rys. 5. Substancje, które można wykorzystać do magazynowania wodoru [14]

Fig. 5. Substances that can be used to store hydrogen [14]

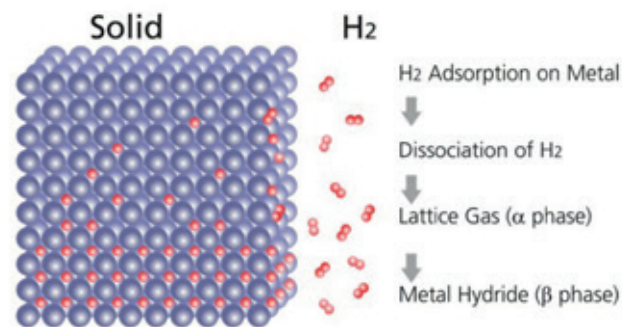
W chemicznym magazynowaniu wodoru pierwiastek ten nie występuje w postaci wolnej (gazowej lub ciekłej), lecz jest związany z innymi związkami, z których może być później uwolniony w wyniku odpowiednio zaprojektowanych reakcji chemicznych [10]. Do najczęściej stosowanych technologii należą: magazynowanie w wodorkach metali [29], ciekłych nośnikach organicznych wodoru (LOHC [19]), związkach chemicznych takich jak amoniak [1], metanol [2] czy kwas mrówkowy [8], a także adsorpcja i absorpcja wodoru w materiałach porowatych [31] i nanostrukturalnych [20], a także w węglowodorach syntetycznych [9].

Zaletą chemicznego magazynowania wodoru jest wysoki poziom bezpieczeństwa oraz brak ryzyka wybuchu czy wycieku wolnego wodoru. W większości przypadków wodór jest chemicznie związany i może być uwolniony tylko w kontrolowanych warunkach, co ogranicza zagrożenia eksploatacyjne. Ponadto związki chemiczne można łatwo transportować i magazynować w istniejącej infrastrukturze, co pozwala na integrację z aktualnym systemem logistycznym. Wady tej technologii to natomiast złożoność reakcji, ograniczona szybkość ładowania i rozładowywania oraz konieczność stosowania katalizatorów, które zwiększają koszty operacyjne.

3.1. Wodorki metali

Jedną z najbardziej znanych i badanych grup są wodorki metali, w których wodór tworzy trwałe połączenia z metalami lub ich stopami, tak jak przedstawiono na rys. 10. Magazynowanie wodoru w takiej postaci jest wyjątkowo bezpieczne – wodór nie ulega łatwemu uwolnieniu ani samozapłonowi, a cały proces przebiega w umiarkowanych warunkach ciśnienia i temperatury [10, 29]. Wadą tego rozwiązania jest stosunkowo niska pojemność masowa oraz wysoki koszt materiałów, takich jak magnez [18], tytan czy lantany. Mimo to technologia ta znajduje zastosowanie w stacjonarnych systemach magazynowania energii oraz w aplikacjach, gdzie

bezpieczeństwo ma pierwszorzędne znaczenie [10, 29]. W tab. 7 przedstawiono wybrane wodorki metali, wraz z zawartością wodoru w nich.



Rys. 6. Schemat formowania się wodorku metalu [16]

Fig. 6. Metal hydride formation diagram [16]

3.2. LOHC

Innym podejściem są ciekłe nośniki organiczne wodoru (LOHC), czyli związki chemiczne, w których wodór jest wiązany w sposób odwracalny. Do najczęściej stosowanych substancji należą toluen i jego pochodne, które po nasyceniu wodorem tworzą odpowiednie nośniki energetyczne. Ich główną zaletą jest możliwość transportowania i magazynowania wodoru w warunkach zbliżonych do atmosferycznych, bez konieczności stosowania wysokiego ciśnienia lub niskich temperatur. Wodór można uwolnić na żądanie w kontrolowany sposób, z wykorzystaniem katalizatorów. Systemy LOHC wymagają jednak

Tabela 7 Wodorki metali [29]

Table 7 Metal hydrides [29]

Wodorek	Zawartość wodoru (% wag.)	Temperatura desorpcji (°C)	Cechy
Wodorek magnezu – MgH_2	7,6	300	Wysoka gęstość energii, trudna kinetyka desorpcji
Wodorek lantanu-niklu – $LaNi_5H_6$	1,4	50-120	Dobra kinetyka, niska pojemność wagowa
Wodorek tytanu-żelaza – $TiFeH_2$	1,8	150	Stabilne cyklicznie, wrażliwość na zanieczyszczenia
Wodorek cyrkonu-wanadu – ZrV_2H_5	3	200	Wysoka stabilność, średnia kinetyka
Alan sodowy – $NaAlH_4$	5,5	120-220	Rewitalizacja katalizatorami, użycie w transporcie
Borowodorek litu – $LiBH_4$	18	400	Wysoka zawartość wodoru, trudna regeneracja
Borowodorek sodu – $NaBH_4$	10,6	100 (z katalizatorem)	Stabilny w przechowywaniu; wymaga katalizatorów do reakcji
Wodorek glinu – AlH_3	10,1	150	Wysoka gęstość wodoru; szybka desorpcja
Borowodorek cynku – $Zn(BH_4)_2$	8,5	90	Łatwa desorpcja, ograniczone możliwości regeneracji
Wodorek wapnia – CaH_2	4,8	400	Wysoka stabilność, używany do generacji wodoru w miejscu

odpowiednio zaprojektowanej infrastruktury technologicznej – w tym reaktorów do ładowania i rozładowywania nośników, co zwiększa ich koszt i złożoność [19].

3.3. Adsorpcja wodoru

Chemiczne metody magazynowania obejmują również adsorpcję wodoru w materiałach porowatych [31], takich jak zeolity [7], grafen [20, 32], nanorurki węglowe [20] czy struktury metalowo-organiczne (MOF) [6]. Techniki te bazują na zatrzymywaniu wodoru na powierzchni materiałów o bardzo dużej powierzchni właściwej. Adsorpcja jest procesem fizycznym, lecz może być zaliczana do metod chemicznych ze względu na specyfikę wiązań i interakcji powierzchniowych. Główną barierą dla szerokiego wdrożenia tej technologii jest niska pojemność masowa przy temperaturze pokojowej oraz konieczność utrzymywania niskich temperatur i wysokiego ciśnienia w celu zapewnienia stabilności adsorpcji.

3.4. Związki chemiczne

Wodór można także magazynować w związkach chemicznych, które pełnią funkcję nośników wodoru. Przykładem jest amoniak, który składa się w 17,6% z wodoru wagowo i może być stosunkowo łatwo transportowany i przechowywany w postaci ciekłej. Jego rozkład prowadzi do uwolnienia wodoru i azotu, co czyni go atrakcyjnym kandydatem do zastosowań przemysłowych. Wadą

jest toksyczność oraz konieczność usuwania azotu jako produktu ubocznego [1]. Podobne właściwości mają inne związki, takie jak metanol [2] czy kwas mrówkowy [8], które również mogą służyć jako źródła wodoru, szczególnie w ogniwach paliwowych. Metanol można uzyskiwać z biomasy, co czyni go potencjalnie neutralnym pod względem emisji CO_2 [2, 25]. W każdym z tych przypadków zachodzi potrzeba kontrolowanego rozkładu związku i oczyszczania uwolnionego wodoru.

3.5. Amoniak

Amoniak (NH_3) to efektywny nośnik wodoru, zawierający 17,6% wagowo tego pierwiastka. Występuje w stanie ciekłym przy umiarkowanym ciśnieniu, co ułatwia jego magazynowanie i transport, przy wykorzystaniu istniejącej infrastruktury przemysłowej. Wodór odzyskuje się z amoniaku w procesie rozkładu w wysokiej temperaturze, bez emisji CO_2 , przy użyciu katalizatorów. Metoda ta wymaga jednak zachowania wysokiego poziomu bezpieczeństwa ze względu na toksyczność amoniaku oraz znaczących nakładów energetycznych do jego rozkładu [1].

3.6. Metanol

Metanol (CH_3OH) jest ciekłym nośnikiem wodoru, który zawiera około 12,6% wagowo wodoru. Może być łatwo przechowywany i transportowany w warunkach otoczenia, co czyni go wygodnym

Tabela 8 Porównanie najpopularniejszych chemicznych magazynów wodoru [1], [2], [7], [8], [19], [20], [31], [32]

Table 8 Comparison of the most popular chemical hydrogen storage systems [1], [2], [7], [8], [19], [20], [31], [32]

Związek / Technologia	Wzór chemiczny / Reprezentant	Masa molowa [g/mol]	Zawartość wodoru [%]	Forma wiązania wodoru	Uwagi technologiczne
Amoniak	NH_3	17,031	17,8	Wodór kowalencyjnie związany z azotem	Łatwy rozkład katalityczny, dobrze przebadany nośnik
Metanol	CH_3OH	32,042	12,6	Wodór związany w grupie metylowej i hydroksylowej	Reforming parowy uwalnia H_2 , CO_2 jako produkt uboczny
Kwas mrówkowy	$HCOOH$	46,025	4,4	Wodór związany z grupą karboksylową	Uwalnia H_2 i CO_2 , prosty rozkład
LOHC	np. Toluen	80-300	5-8	Wodór dodany do cząsteczki organicznej	Stabilny w temperaturze pokojowej, wymaga energii do odzysku H_2
Zeolity	np. H-chabazite	Zależy od zeolitu	0,5-3	Adsorpcja fizyczna na powierzchni	Wysoka powierzchnia właściwa, wymaga niskich temperatur
Grafen	C	Zmienna, zależna od powierzchni	5-6	Adsorpcja lub chemisorpcja	Teoretycznie wysoka pojemność
Nanorurki węglowe	C_NH_M	Zmienna, zależna od długości rurki	0,5-2	Adsorpcja wewnątrz rurek lub na powierzchni	Wysoka powierzchnia, trudność z odwracalnością adsorpcji

medium energetycznym. Wodór odzyskuje się z metanolu poprzez reforming parowy lub autotermiczny, zazwyczaj w temperaturach 200–300°C, z udziałem katalizatorów. Metoda ta charakteryzuje się stosunkowo niskimi kosztami i dobrą wydajnością, jednak towarzyszy jej emisja CO₂, co stanowi istotne ograniczenie środowiskowe [2].

3.7. Kwas mrówkowy

Kwas mrówkowy (HCOOH) to ciekły nośnik wodoru zawierający około 4,4% wagowo wodoru. Może być przechowywany i transportowany w temperaturze pokojowej, co upraszcza obsługę i infrastrukturę. Uwalnianie wodoru następuje w niskiej temperaturze (ok. 80–120°C) przy użyciu katalizatorów, bez emisji CO₂, jeśli źródłem kwasu był proces pochłaniania dwutlenku węgla. Choć technologia ta oferuje dużą czystość wodoru i prostotę obsługi, ograniczeniem pozostaje niska zawartość wodoru oraz konieczność regeneracji kwasu w zamkniętym obiegu [8].

Chemiczne magazyny wodoru, nie licząc wodorków metali, zostały dokładniej przedstawione w tab. 8, wraz z ich najważniejszymi cechami.

Dobór odpowiedniego rodzaju chemicznego magazynu wodoru zależy od konkretnego zastosowania, oczekiwanej pojemności, warunków pracy i dostępnej infrastruktury. W aplikacjach stacjonarnych, gdzie liczy się stabilność i bezpieczeństwo, dominują wodorki metali. W transporcie i sektorze mobilnym coraz większe zainteresowanie budzą systemy LOHC [19] i lekkie związki organiczne. Z kolei materiały porowate, choć nadal w fazie badań, mają potencjał do wykorzystania w technologiach przyszłości, dzięki możliwościom miniaturyzacji i integracji z elektroniką [31].

4. Podsumowanie

Metody fizyczne cechują się wysokim stopniem dojrzałości technologicznej i są szeroko stosowane w transporcie, logistyce oraz magazynowaniu sezonowym. Ich głównymi zaletami są łatwość integracji z istniejącą infrastrukturą, szybkość dostępu do wodoru oraz skalowalność. Wadami pozostają koszty energii (w szczególności dla wodoru ciekłego), wysokie wymagania materiałowe oraz ryzyko związane z przechowywaniem pod dużym ciśnieniem lub w niskiej temperaturze [10, 27].

Metody chemiczne zapewniają wyższy poziom bezpieczeństwa oraz możliwość długoterminowego i stabilnego przechowywania wodoru. Złożoność reakcji chemicznych, niska sprawność procesów uwalniania wodoru oraz koszt regeneracji nośników pozostają jednak istotnymi wyzwaniami. Pomimo tego, chemiczne magazynowanie wodoru ma ogromny potencjał, zwłaszcza w aplikacjach stacjonarnych i w połączeniu z odnawialnymi źródłami energii [10, 27].

Ekonomia i efektywność systemów zależą od wielu zmiennych: typu zastosowania, lokalizacji, kosztów infrastruktury i energii, czasu eksploatacji oraz dostępności surowców. Systemy sprężonego wodoru (typ I–IV) oferują kompromis między kosztem a dostępnością, natomiast zaawansowane technologie jak LOHC [19] czy MOF [6] wymagają dalszych badań i rozwoju.

Magazynowanie wodoru, choć kluczowe dla rozwoju gospodarki wodorowej, pozostaje wyzwaniem zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym. Różnorodność dostępnych technologii przechowywania tego gazu sprawia, że wybór optymalnego rozwiązania zależy od wielu czynników, takich jak docelowe zastosowanie, skala operacji, dostępność infrastruktury czy warunki środowiskowe. Wśród najważniejszych metod magazynowania wyróżnia się podejścia fizyczne (gaz sprężony, ciekły i sprężono-ciekły) oraz chemiczne (wodorki metali, związki organiczne, materiały porowate [31], związki chemiczne takie jak amoniak [1] czy metanol [2]).

Z technicznego punktu widzenia, metody fizyczne charakteryzują się stosunkowo prostą konstrukcją i szybką dostępnością zgromadzonego wodoru. Przechowywanie wodoru w stanie sprężonym wymaga zastosowania zaawansowanych zbiorników, często wykonanych z kompozytów węglowych, zdolnych wytrzymać ciśnienia sięgające 700 barów. Choć technologia ta jest dobrze znana i stosunkowo łatwa do wdrożenia, jej głównym ograniczeniem jest niska gęstość energetyczna oraz ryzyko wycieków. Przechowywanie wodoru w postaci ciekłej, z kolei, pozwala osiągnąć wyższą gęstość energii, ale wiąże się z koniecznością utrzymania ekstremalnie niskiej temperatury, co generuje znaczne koszty oraz straty energii związane z odparowaniem. Technologia sprężono-ciekła stanowi kompromis pomiędzy tymi dwiema metodami, łącząc zalety obu, ale jednocześnie podnosząc wymagania konstrukcyjne i koszty instalacyjne [10, 27].

Magazynowanie chemiczne natomiast oferuje potencjalnie większe bezpieczeństwo i stabilność długoterminową. Wodorki metali, takie jak wodorki magnezu [18] czy tytanu, umożliwiają przechowywanie wodoru w warunkach umiarkowanej temperatury i ciśnienia. Zaletą tych rozwiązań jest ich zwarta forma i mniejsze ryzyko wycieków, jednak niska pojemność masowa i wysoka cena materiałów ograniczają ich szerokie zastosowanie. Ciekłe nośniki organiczne wodoru (LOHC [19]), takie jak toluen, umożliwiają wiązanie wodoru w stabilnych cieczach, które można przechowywać i transportować w warunkach atmosferycznych. Wodór uwalniany jest na żądanie, ale proces ten wymaga użycia katalizatorów i energii, co wpływa na efektywność całego układu. Z kolei materiały porowate [31] – zeolity [7], grafen [20, 32], nanorurki węglowe [20] – oferują obiecujące możliwości dzięki dużej powierzchni adsorpcyjnej, choć nadal borykają się z ograniczoną pojemnością magazynową i koniecznością utrzymania niskiej temperatury.

W ujęciu ekonomicznym, żadna z metod nie oferuje obecnie idealnego kompromisu pomiędzy kosztami inwestycyjnymi, eksploatacyjnymi a wydajnością energetyczną. Zbiorniki I typu (stalowe) cechuje niski koszt produkcji, ale wysoka masa i podatność na kruchość wodorową [21] ograniczają ich użycie do aplikacji stacjonarnych. Zaawansowane zbiorniki III i IV typu, wykonane z materiałów kompozytowych, są znacznie lżejsze i bardziej wytrzymałe, ale ich produkcja wiąże się z wysokimi kosztami. Podobne dylematy dotyczą systemów chemicznych – choć oferują lepsze parametry bezpieczeństwa, ich złożoność konstrukcyjna, wymagania energetyczne i wysoka cena materiałów ograniczają ich rentowność na dużą skalę [10, 27].

Istotną rolę w wyborze odpowiedniego rozwiązania odgrywają również czynniki eksploatacyjne, takie jak tempo ładowania i rozładowywania, trwałość cykliczna systemu oraz odporność na wpływ środowiska. W przypadku zastosowań mobilnych, priorytetem jest niska masa i wysoka gęstość energetyczna – co przemawia za technologiami kompozytowymi lub ciekłym wodorem. W instalacjach stacjonarnych, gdzie przestrzeń i masa są mniej istotne, większe znaczenie ma koszt i bezpieczeństwo długoterminowego przechowywania [10, 27]. W tabeli 9 przedstawiono finalne porównanie wybranych magazynów wodoru, z wyszczególnieniem ich najważniejszych właściwości technicznych i ekonomicznych.

Podsumowując, porównanie techniczne i ekonomiczne metod magazynowania wodoru prowadzi do wniosku, że nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie. Każda z technologii znajduje zastosowanie w określonych warunkach i spełnia inne wymagania. Dobór odpowiedniego systemu zależy od specyfiki zastosowania, dostępnych zasobów, wymagań logistycznych oraz docelowego modelu wykorzystania wodoru jako nośnika energii. W miarę postępu technologicznego i spadku kosztów materiałów, można spodziewać się szerszego wdrażania rozwiązań hybrydowych, łączących zalety różnych metod w celu maksymalizacji bezpieczeństwa, efektywności i opłacalności [5, 10, 13, 23, 26].

Tabela 9: Porównanie metod magazynowania wodoru [Na podstawie wszystkich źródeł]

Table 9: Comparison of hydrogen storage methods [Based on all sources]

Metoda	Zawartość wodoru	Zastosowanie	Zalety	Wady	Cena
Butle I typu	Niska	Przemysł chemiczny, magazyny stacjonarne	Prosta konstrukcja, niskie koszty	Ciężkie, podatne na korozję	300-600 USD
Butle II typu	Umiarkowana	Magazynowanie przemysłowe, transport	Lepszy stosunek masy do wytrzymałości	Wyższy koszt niż typu I, wymaga zaawansowanych materiałów	500-100 USD
Butle III typu	Wysoka	Pojazdy wodorowe	Lekka konstrukcja, wysoka wytrzymałość	Wyższy koszt niż typu III, wymaga zaawansowanych materiałów	1000-2000 USD
Butle IV typu	Wysoka	Pojazdy wodorowe, lotnictwo	Najlepszy stosunek masy do wytrzymałości	Najwyższy koszt wśród zbiorników ciśnieniowych	2000-3000 USD
Zbiorniki kriogeniczne	Wysoka	Transport dalekobieżny, magazyny wodoru	Większa gęstość energetyczna niż wodór sprężony	Straty energii w procesie skraplania, zaawansowana izolacja	Wysokie
Zbiorniki sprężono-kriogeniczne	Bardzo wysoka	Transport, magazyny	Połączenie wysokiego ciśnienia i niskiej temperatury, wysoka efektywność	Bardzo zaawansowana technologia, wysokie koszty	Bardzo wysokie
Rurociągi	Wysoka	Dystrybucja w systemach lokalnych	Wykorzystanie istniejącej infrastruktury	Wysoki koszt instalacji w nowych lokalizacjach	Wysokie
Formacje geologiczne	Wysoka	Długoterminowy magazyn	Wykorzystanie istniejących formacji	Ograniczona dostępność	Niskie w odpowiednich lokalizacjach
Magnez	Umiarkowana	Magazynowanie chemiczne	Stabilne wiązanie wodoru, niskie koszty materiału	Wysoka temperatura uwalniania, mała pojemność masowa	Średnie
Wodorki metali	Umiarkowana	Magazyny stacjonarne	Wysoka stabilność, możliwość magazynowania w umiarkowanych warunkach	Wysokie koszty materiałów, trudna regeneracja	Średnie-wysokie
Grafen	Niska	Magazyny eksperymentalne	Bardzo wysoka powierzchnia właściwa	Kosztowna produkcja, niska efektywność w temperaturze pokojowej	Wysokie
Nanorurki węglowe	Niska	Magazyny eksperymentalne	Duża powierzchnia właściwa, szybka adsorpcja	Niska pojemność masowa w temperaturze pokojowej	Wysokie
Zeolity	Niska	Magazyny eksperymentalne	Porowata struktura, niski koszt materiałów	FizySORPCJA wymaga niskich temperatur	Niskie
Amoniak	Średnia	Magazynowanie chemiczne, transport	Stabilność, wysoka zawartość wodoru	Toksyczność, wymagane katalizatory do uwalniania	Średnie
Metanol	Średnia	Magazynowanie chemiczne, transport	Płynna forma, stabilność w warunkach pokojowych	Emisje CO ₂ przy produkcji i regeneracji	Średnie
Kwas mrówkowy	Średnia	Magazynowanie chemiczne	Łatwo dostępny, płynna forma	Średnia zawartość wodoru, wymaga katalizatorów	Niskie
LOHC	Niska	Dystrybucja zdecentralizowana	Stabilność w temperaturze pokojowej, możliwość transportu	Wymaga zaawansowanych technologii uwalniania i regeneracji	Średnie-wysokie
Struktury biologiczne	Niska	Magazynowanie ekologiczne	Wykorzystanie odpadów biologicznych, niska emisja CO ₂	Wymaga niskich temperatur, ograniczona pojemność	Niskie

LITERATURA

- [1] Aziz Muhammad, Agung Tri Wijayanta, Asep Bayu Dani Nandiyanto. 2020. "Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization".
- [2] Behrens Malte. 2015. "Chemical hydrogen storage by methanol: Challenges for the catalytic methanol synthesis from CO₂".
- [3] Bossel Ulf, Baldur Eliasson. 2003. "Energy and the "Hydrogen Economy".
- [4] Burke Andrew, Joan Ogden, Lewis Fulton. 2024. "Hydrogen Storage and Transport: Technologies and Costs". Institute of Transportation Studies, UC Davis.
- [5] Chmielniak Tadeusz, Tomasz Chmielniak. 2020. "Energetyka Wodorowa". Wydawnictwo naukowe PWN SA.
- [6] Collins David J., Hong-Cai Zhou. 2007. "Hydrogen storage in metal-organic frameworks".
- [7] Dong Jinxiang, Xiaoyan Wang, Hong Xu, Qiang Zhao, Jinping Li. 2007. "Hydrogen storage in several microporous zeolites". Research Institute of Special Chemicals, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, PR China.
- [8] Eppinger Jörg, Kuo-Wei Huang. 2016. "Formic Acid as a Hydrogen Energy Carrier". KAUST Catalysis Center and Division of Physical Sciences & Engineering, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal 23955-6900, Saudi Arabia.
- [9] Gallandat Noris, Jérémie Bérard, François Abbet, Andreas Züttel. 2017. "Small-scale demonstration of the conversion of renewable energy to synthetic hydrocarbons".
- [10] Godula-Jopek Agata, Walter Jehle, and Jörg Wellnitz. 2012. "Hydrogen Storage Technologies: New Materials, Transport and Infrastructure". Wydawnictwo Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [11] Guy Pluvinaud, Toth Laszlo, Capelle Julien. 2021. "Effects of Hydrogen Addition on Design, Maintenance and Surveillance of Gas Networks".
- [12] Hassan I.A., Hautham S. Ramadam, Mohamed A. Saleg, Daniel Hissel. 2021. "Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspective".
- [13] Houchins Cassidy, Brian D. James, Yacet Acevedo, Zachary Watts. 2022. "Final Report: Hydrogen Storage System Cost Analysis (2017-2021)".
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_storage (dostęp 20.07.2025r.).
- [15] <https://epodreczniki.open.agh.edu.pl/handbook/1893/module/1934/reader> (dostęp 20.07.2025r.).
- [16] <https://www.ifam.fraunhofer.de/en/Aboutus/Locations/Dresden/HydrogenTechnology/hydrides/applications-of-metal-hydrides.html> (dostęp 20.07.2025r.).

- [17] <https://www.redriver.team/understanding-hydrogen-storage-type-3-vs-type-4-tanks/> (dostęp 20.07.2025r.).
- [18] Jain I.P., Chhagan Lal, Ankur Jain. 2009. "Hydrogen storage in Mg: A most promising material".
- [19] Li Linlin, Ming Yang, Yuan Dong, Pan Mei, Hansong Cheng. 2016. "Hydrogen storage and release from a newpromising Liquid Organic Hydrogen Storage Carrier (LOHC): 2-methylindole". Sustainable Energy Laboratory, Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, PR China.
- [20] Liu Chang, Yong Chen, Cheng-Zhang Wu, Shi-Tao Xu, Hui-Ming Cheng. 2009. "Hydrogen storage in carbon nanotubes revisited". Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 72 Wenhua Road, Shenyang 110016, PR China.
- [21] Lynch Stan. 2014. "Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms". Defence Science and Technology Organisation, PO Box 4331, 3001 Melbourne, Australia.
- [22] Małachowska Aleksandra, Natalia Łukasik, Joanna Mioduska, Jacek Gębicki. 2022. "Hydrogen Storage in Geological Formations – The Potential of Salt Caverns".
- [23] Morgan Trevor. 2006. "The Hydrogen Economy: A Non-technical Review".
- [24] Orlova S., N. Mezeckis, V.P.K. Vasudev. 2023. "Compression of Hydrogen Gas For Energy Storage: A Review". Latvian Journal of physics and technical science.
- [25] Poudineh Rahmat, Aliaksei Patonia. 2023. "Hydrogen storage for a net-zero carbon future". Oxford Institute for Energy Studies.
- [26] Riis T., E.F. Hagen, Preben J. S. Vie, Øystein Ulleberg. 2006. "Hydrogen production R&D: Priorities and gaps".
- [27] Romański Leszek. 2007. "Wodór nośnikiem energii". Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego We Wrocławiu.
- [28] Sadaghiani MS, Mehrpooya M. 2017. "Introducing and energy analysis of a novel cryogenic hydrogen liquefaction process configuration". International Journal of Hydrogen Energy.
- [29] Sakintuna Billur, Farida Lamari-Darkrim, Michael Hirscher. 2007. "Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review".
- [30] Shin Hyun Kyu, Sung Kyu Ha. 2023. "A Review on the Cost Analysis of Hydrogen Gas Storage Tanks for Fuel Cell Vehicles".
- [31] Thomas K. Mark. 2006. "Hydrogen adsorption and storage on porous materials". Northern Carbon Research Laboratories, School of Natural Sciences, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK.
- [32] Tozzini Valentina, Vittorio Pellegrini. 2012. "Prospects for hydrogen storage in graphene".
- [33] Uliasz-Misiak Barbara, Joanna Lewandowska-Śmierczalska, Rafał Matuła. 2024. "Hydrogen Storage Potential in Natural Gas Deposits in the Polish Lowlands". Faculty of Drilling, Oil and Gas, AGH University of Krakow, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland.