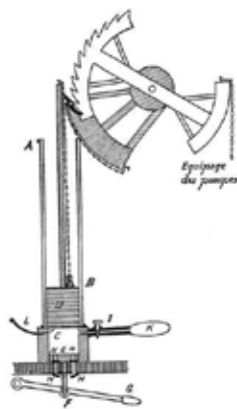
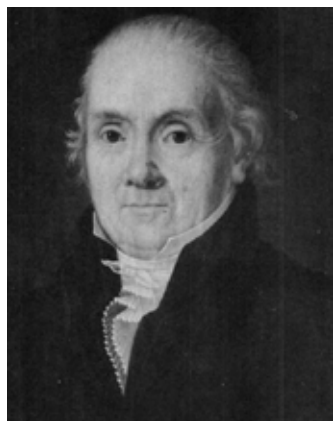


CZY WODÓR MA SZANSE STAĆ SIĘ PALIWEM POWSZECHNIE STOSOWANYM NA STATKACH?

Wodór od lat pojawia się w dyskusjach o przyszłości energetyki i transportu. Lekki, teoretycznie czysty w spalaniu i potencjalnie odnawialny – na papierze wygląda idealnie. Nic więc dziwnego, że wielu entuzjastów widzi w nim paliwo przyszłości również dla żeglugi morskiej. Jednak gdy schodzi się z poziomu haseł do konkretów – fizyki, logistyki i ekonomii – okazuje się, że wodór dla statków to zadanie znacznie trudniejsze, niż mogłoby się wydawać.

Praktyczne wykorzystanie wodoru jako paliwa znane jest od ponad dwóch stuleci. Otóż wodorem był zasilany silnik konstrukcji szwajcarskiego wynalazcy Françoisisa Isaaca de Rivaza (ur. 19 grudnia 1752 w Paryżu – zm. 30 lipca 1828 w Sion w Szwajcarii), który jest uznawany za pierwszy w historii zbudowany i przetestowany silnik spalinowy.



François Isaac de Rivaz i wczesny projekt jego silnika wodorowego (patent z 1807)

Rivaza zainspirowały dwie wcześniejsze koncepcje silników: pomysł Holendra Christiaana Huygensa, który jednak nigdy go nie zrealizował, oraz projekt Philippe'a Lebona polegający na tłoku napędzanym energią powstającą przy spalaniu gazu. W 1806 roku Rivaz opracował swój własny silnik, działający na mieszance wodoru i tlenu. Konstrukcja była jednak nietrwała, ponieważ wówczas nie dysponowano materiałami odpornymi na bezpośredni kontakt z przestrzenią, w której przeprowadzana jest reakcja spalania. Rok później Rivaz zbudował pojazd napędzany tym silnikiem i kontynuował prace nad jego udoskonaleniem, osiągając ostateczną wersję w 1813 roku.

W kolejnych latach powstawały nowe rozwiązania silników zasilanych zarówno wodorem, jak i innymi paliwami. Przełomowymi rozwiązaniami, jak się później okazało, były silniki spalinowe opracowane przez Nicolausa Augusta Otto oraz Rudolfa Christiana Karla Diesela. Silniki o zapłonie samoczynnym oparte na wynalazku Diesla w XX w. wyparły z żeglugi maszyny parowe i stały się głównym napędem stat-

ków. Obecnie wykorzystujemy wiele typów tłokowych silników spalinowych. Stopień ich rozwoju technicznego osiągnął wysoki pułap. Należy podkreślić, że współczesne krzyżulcowe wolnoobrotowe tłokowe silniki spalinowe są najbardziej sprawnymi maszynami cieplnymi dotychczas zbudowanymi przez człowieka – ich sprawności ogólne przekraczają obecnie w układach z głęboką utylizacją ciepła 55%, moce znamionowe przekraczają 80 MW, ich waga przekroczyła już 2300 ton, długość i wysokość odpowiednio ponad 27 m i 13 m, zaś skrzynia korbową ma objętość przekraczającą 500 m³. Silniki te są wciąż doskonalone w kontekście podwyższania efektywności energetycznej, ich bezpieczeństwa eksploatacyjnego i niezawodności oraz minimalizacji emisji szkodliwych substancji w spalinach.

Zanieczyszczenie powietrza przez spaliny z silników okrętowych szacowane jest przez IMO na poziomie 2–3% całego antropogenicznego zanieczyszczenia środowiska. Europejski pakiet „Fit for 55” i przepisy prawa takie jak FuelEU oraz ETS, a także wymagania międzynarodowe wymuszają na armatorach poszukiwanie alternatyw dla obecnie stosowanych rozwiązań w układach napędowych statków, które powszechnie są napędzane paliwami ropopochodnymi. Rozwijane są obecnie nowe niskoemisyjne systemy napędowe zasilane paliwami niskowęglowymi – LNG, CNG i metanol oraz bezwęglowymi. W tej ostatniej grupie, w dyskusji publicznej pojawiają się amoniak i wodór.

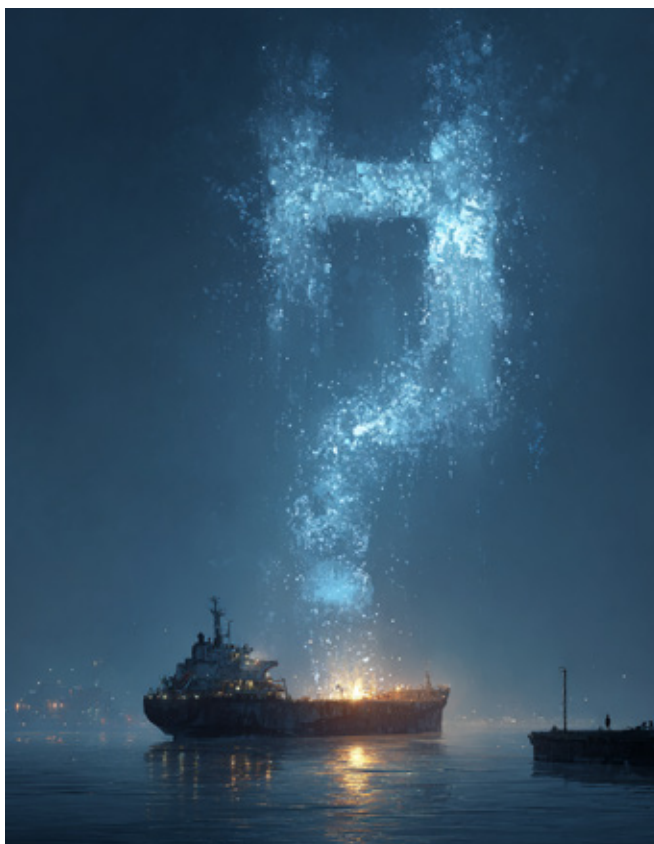
Spalanie wodoru przebiega w trzech charakterystycznych etapach [S. Szwaja, 2019]:

1. Reakcje inicjujące spalanie wodoru:
 $H_2 + M = H + H + M$ oraz $H_2 + O_2 = H + HO_2$,
gdzie: M – molekula substancji obojętnej;
2. Łańcuchowe reakcje powielające:
 $H + O_2 = O + OH$, $H_2 + O = H + OH$ i $H_2 + OH = H + H_2O$;
3. Reakcje końcowe spalania wodoru:
 $H + H + M = H_2 + M$, $O + O + M = O_2 + M$
i $H + OH + M = H_2O + M$.

W niniejszym artykule przyjrzymy się wodorowi jako nośnikowi energii, starając się jednocześnie odpowiedzieć na pytanie: dlaczego dotychczas wodór nie jest powszechnie stosowany w transporcie oraz czy będzie w przyszłości paliwem wykorzystywanym do napędu statków?

EKONOMICZNOŚĆ I EKOLOGICZNOŚĆ WYKORZYSTANIA WODORU

Podstawową barierą związaną z potencjalną szeroką stosowalnością wodoru jako paliwa jest opłacalność jego produkcji. Wodór nie występuje w naturze w postaci gazowej w ilościach wystarczających do praktycznego wykorzystania, w związku z czym musi zostać wytworzony z innych substancji, w których skład wchodzi atomy wodoru. Gdy uwzględnimy cały cykl „życia” wodoru, czyli zaczynając od jego produkcji, poprzez składowanie i transport, a kończąc na jego docelowym wykorzystaniu, gaz ten okazuje się nieopłacalny zarówno energetycznie, jak i ekonomicznie.



Dlaczego? Otóż około 95% globalnej produkcji wodoru to wodór „szary” – czyli wytwarzany z paliw kopalnych bez wychwytywania CO₂. Jeśli wodór jest produkowany z paliw kopalnych, to przy okazji generowana jest znacząca emisja CO₂ do atmosfery, co praktycznie niweluje jego ekologiczne zalety. Nawet przy technologii wychwytywania CO₂ koszty infrastruktury i operacyjne są bardzo wysokie. Wykorzystanie takiego wodoru nie stanowi więc kroku ku dekarbonizacji przemysłu. Szacuje się, że obecnie ok. 48% produkowanego na świecie wodoru wytwarzane jest z gazu ziemnego, 30% z ropy naftowej, a 18% z węgla, podczas gdy wodór pochodzący z elektrolizy wody stanowi ok. 4% [K. Lejda, 2013; Brott, 2022].

Celowe jest więc wyłącznie wykorzystanie „zielonego” wodoru wytwarzanego z odnawialnych źródeł energii poprzez elek-

trolizę wody, „niebieskiego” wodoru, gdzie przy jego produkcji wykorzystuje się dodatkowo instalacje do wychwytywania CO₂, „turkusowego” wodoru, który powstaje w procesie pirolizy metanu bez emisji CO₂ lub „fioletowego” wodoru powstającego w wyniku elektrolizy wykorzystującej energię elektryczną dostarczaną przez elektrownie jądrową. Praktyka pokazuje, że „niebieski” i „turkusowy” wodór są wciąż technologiami kosztownymi i mało sprawdzonymi na wielką skalę. „Fioletowy” wodór z kolei jest wciąż dostępny w zbyt małej ilości z powodu braku powszechności elektrowni jądrowych. Z kolei wodór „zielony” jest aktualnie jednym z najdroższych paliw energetycznych.

Dlaczego? Produkcja wodoru z elektrolizy wody przy użyciu energii odnawialnej wymaga znacznego nakładu energii: do wytworzenia 1 kg wodoru potrzeba około 50–55 kWh energii elektrycznej. Dodatkowo proces sprężania lub skraplania wodoru w celu magazynowania i transportu pochłania kolejne 5–13 kWh/kg, co oznacza, że aż do 30–40% energii chemicznej wodoru zostaje zużyte na jego przygotowanie. W rezultacie, pomimo wysokiej masowej gęstości energetycznej wodoru, efektywna energia dostępna do napędu statku jest znacznie niższa, a koszt wytworzenia i dostarczenia paliwa – znacznie wyższy niż w przypadku tradycyjnego oleju napędowego lub LNG.

Podsumowując, wodór wymaga dużych nakładów energii do produkcji i magazynowania, a przy użyciu obecnych technologii jego produkcja może generować znaczną emisję CO₂. To sprawia, że w skali przemysłowej jest paliwem energetycznym i ekonomicznie nieefektywnym.

ZAPEWNIENIE DOSTĘPNOŚCI I EFEKTYWNE MAGAZYNOWANIE WODORU

Kolejną barierą na drodze do upowszechnienia wodoru jest „logistyka”. Otóż wodór napotyka na poważne problemy logistyczne i ograniczenia w zastosowaniu na statkach, wynikające zarówno z jego właściwości fizycznych, jak i braku infrastruktury. Choć wodór ma najwyższą masową wartość energetyczną spośród wszystkich paliw wynoszącą ok. 120 MJ/kg (dla porównania: olej napędowy ma ok. 42–45 MJ/kg) – jego objętościowa wartość energetyczna jest wyjątkowo niska i w warunkach normalnych wynosi ok. 10,8 MJ/m³ (dla porównania: olej napędowy ma ok. 35–37 GJ/m³).

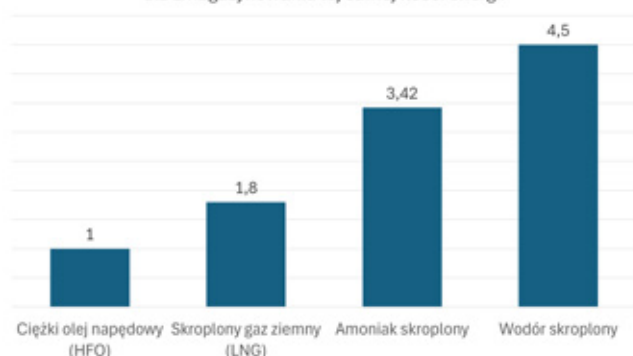
W warunkach normalnych wodór ma gęstość wynoszącą zaledwie 0,0899 kg/m³, podczas gdy olej napędowy to około 850 kg/m³. Aby więc zgromadzić sensowną ilość energii na statku, wodór trzeba albo sprężyć (w praktyce systemy sprężonego wodoru pracują pod ciśnieniem do 700 barów), co zwiększa jego gęstość do ok. 40 kg/m³, albo schłodzić do temperatury -253 °C w postaci ciekłej, osiągając wtedy gęstość ok. 70,8 kg/m³.

Nawet w takiej formie, aby zgromadzić energię równoważną jednej tonie oleju napędowego, potrzebne są zbiorniki ponad czterokrotnie większe niż w przypadku paliwa konwencjonalnego. Dla statków, których efektywność zależy od maksymalnego wykorzystania przestrzeni ładunkowej, oznacza to mniejszą ładowność i wyższe koszty operacyjne.

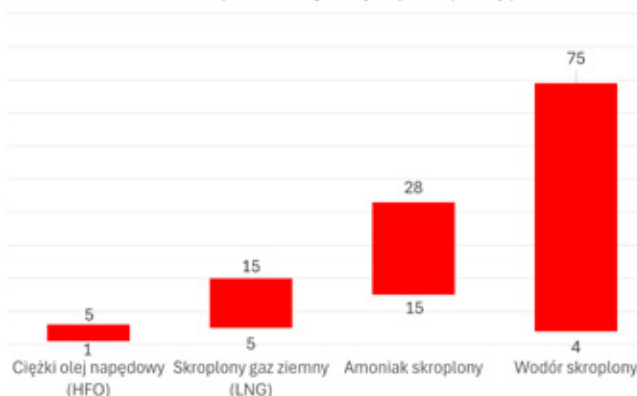


Napędzany wodorem i energią wiatru statek Hydrogen Challenger w porcie Bremerhaven w 2006 roku
(Wikimedia, licencja CC BY-SA, 2.5)

Względne porównanie wymaganej wielkości zbiorników dla zmagazynowania tej samej ilości energii



Granice palności wybranych paliw (% obj.)



Na dodatek globalna infrastruktura portowa do bunkrowania wodoru praktycznie nie istnieje, a jej budowa wymagałaby ogromnych inwestycji. W branży, w której koszty liczy się w promilach wartości przewożonych ładunków, wodór po prostu nie broni się ekonomicznie.

NIEZAWODNOŚĆ I BEZPIECZEŃSTWO SYSTEMÓW WODOROWYCH

Wodór stwarza poważne wyzwania w zakresie bezpieczeństwa. Jest nie tylko najlżejszym ze wszystkich gazów, ale również wyjątkowo przenikliwym, gdyż potrafi przenikać przez metale, powodując ich kruchość (tzw. embrittlement). Z tego powodu instalacje muszą być wykonane ze specjalnych stopów i zabezpieczeń odpornych na działanie wodoru. Zwiększa to oczywiście koszty wykonania i naprawy tych instalacji. Dodatkowo wodór charakteryzuje się niską energią zapłonu wynoszącą zaledwie 0,02 mJ (dla porównania, benzyna wymaga ok. 0,24 mJ) oraz bardzo szerokim zakresem stężeń wybuchowych w powietrzu, który wynosi od 4% do 75% obj.

W praktyce oznacza to, że systemy bunkrowania i przesyłu wodoru muszą spełniać znacznie bardziej rygorystyczne normy, a każda ewentualna nieszczelność jest znacznie groźniejsza niż w przypadku paliw konwencjonalnych. Systemy detekcji i wentylacji muszą być rozbudowane i kosztowne, często zwiększając budowę instalacji o 20–30% w stosunku do konwencjonalnych systemów paliwowych. Na statku, gdzie przestrzeń jest ograniczona, a załoga bezpośrednio narażona na skutki awarii, wszystkie te komplikacje zwiększają ryzyko i pomnażają koszty eksploatacyjne.

EKOLOGICZNOŚĆ ROZWIĄZAŃ OPARTYCH NA WODORZE

Choć wodór sam w sobie nie jest gazem cieplarnianym, jego uwolnienie do atmosfery może pośrednio wpływać na efekt cieplarniany. Wodór w atmosferze reaguje z rodnikami hydroksylowymi ($\cdot\text{OH}$), które normalnie uczestniczą w rozkładzie metanu i innych gazów cieplarnianych. W efekcie nadmiar wodoru może wydłużać czas życia meta-

nu w atmosferze, przyczyniając się do jego kumulacji i wzrostu efektu cieplarnianego [M. Sand et al., 2023].

Dodatkowo spalanie wodoru w silnikach wytwarza parę wodną, która w wyższych warstwach atmosfery może działać jako gaz cieplarniany, zwiększając promieniowanie podczerwone i efekt cieplarniany w troposferze i dolnej stratosferze. Choć te oddziaływania są mniejsze niż emisje CO₂ z paliw kopalnych, masowe wykorzystanie wodoru wymaga uwzględnienia jego pośredniego wpływu na klimat w skali globalnej.

Wodór ma bardzo wysoką liczbę oktanową wynoszącą ok. 130–140, co powoduje, że nadaje się jako samodzielne paliwo do silników spalinowych o zapłonie iskrowym. Silniki takie opracowały m.in. firmy Kubota (Kubota WG3800-H), Toyota (Toyota G16E-GTS), Mazda (silnik Wankla Mazda RX-8 Hydrogen RE), JCB (JCB 448 ABH2 Hydrogen), Anglo Belgian Corporation (BeHydro single-fuel) czy też Wärtsilä (Wärtsilä 31 „hydrogen-ready”). Alternatywą jest wykorzystanie go w dwupaliwowych silnikach o zapłonie samoczynnym. Rozwiązania takie opracowały firmy Anglo Belgian Company (BeHydro dual-fuel), MAN Engines (D2862 H2 Dual Fuel oraz H4576) czy też Deutz AG (TCG 7.8 H2).

Liczba cetanowa wodoru wynosi ≤ 5 , a więc wodór ma bardzo dużą zwłokę samozapłonu i tym samym nie nadaje się jako samodzielne paliwo do wykorzystania w silniku o zapłonie samoczynnym. Aplikacja wodoru w silniku o zapłonie samoczynnym wymaga więc zastosowania technologii dual fuel (silnik dwupaliwowy), gdzie podczas pracy silnika do cylindra wypełnionego mieszaniną wodoru i tlenu podawana jest pilotowa dawka paliwa ciekłego o wysokiej liczbie cetanowej, które ulega samozapłonowi i inicjuje proces spalania. Skutkuje to niestety emisją CO₂ będącego produktem spalania paliwa pilotowego. Należy dodać, że w przypadku każdego silnika spalinowego spalający się w silniku olej smarowy pochodzący ze smarowania tulei cylindrowych również jest źródłem emisji CO₂.

Silniki spalinowe zasilane wodorem, mimo że emitują niewielkie ilości dwutlenku węgla i węglowodorów, wciąż generują tlenki azotu (NO_x). Problem ten nasila się ze wzrostem obciążenia silnika, z czym wiąże się wysokie temperatury spalania. Wysoko obciążony silnik zasilany wodorem może więc generować tlenki azotu w ilości większej, niż ma to miejsce w przypadku silnika zasilanego olejem napędowym. Tlenki azotu powstają w wyniku reakcji azotu z powietrza w wysokiej temperaturze spalania. Widzimy więc, że wodór nie może zostać uznany za paliwo „czyste”. W badaniach iskrowych silników zasilanych wodorem emisje NO_x w zależności od technologii i zastosowanej obróbki spalin wynoszą od ok. 1,9 mg/kWh przy użyciu katalizatora SCR do nawet 63,7 mg/kWh w wariantach bez zaawansowanego oczyszczania [L. J. Webster et al., 2025]. Konieczność instalacji katalizatora zwiększa koszty instalacji oraz nakłady operacyjne związane z dodatkowym zużyciem energii, konserwacją oraz dostarczeniem reagentów.

Alternatywą dla silników spalinowych są ogniwa paliwowe, które wprost przetwarzają wodór na energię elektryczną bez emisji NO_x [J. Surygała, 2008]. Choć technologia ta

pozwała uniknąć problemu zanieczyszczeń, jej wdrożenie w przypadku dużych mocy niezbędnych do napędu statków morskich jest obecnie ekonomicznie nieopłacalne i technologicznie ograniczone. Instalacje ogniwo-paliwowych o mocy rzędu kilku megawatów wymagają kosztownych i trudnych do skalowania systemów magazynowania wodoru oraz chłodzenia, co czyni je niepraktycznym rozwiązaniem dla większości jednostek handlowych.

Reasumując, zastosowanie wodoru jako paliwa w silnikach spalinowych wymaga zastosowania systemów oczyszczania spalin w celu minimalizacji emisji NO_x. Wersja oparta na ogniwach paliwowych jest teoretycznie bezemisyjna, ale w praktyce nie jest dostępna ani ekonomicznie opłacalna w przypadku jednostek o dużych mocach potrzebnych w żegludze morskiej.

PROBLEMY ZWIĄZANE Z EKSPLOATACJĄ SILNIKÓW WODOROWYCH

Wodór charakteryzuje się bardzo wysoką prędkością spalania i szerokim zakresem wybuchowości mieszanki paliwo-powietrznej. Te właściwości sprawiają, że kontrolowanie procesu spalania jest znacznie trudniejsze niż w przypadku tradycyjnych paliw węglowodorowych. Przy spalaniu mieszanek wodorowych często dochodzi do przedwczesnego spalania. Wysoka prędkość rozprzestrzeniania się płomienia zwiększa ryzyko jego cofania się (tzw. *flashback*), czyli przedostania się płomienia do układu dolotowego, co może prowadzić do uszkodzenia zaworów, przewodów paliwowych i elementów komory spalania.

Problem ten nasila się przy wysokich ciśnieniach i dużych stopniach sprężania, które są dopuszczalne dzięki wysokiej liczbie oktanowej wodoru. W takich warunkach nawet niewielkie wahania składu mieszanki paliwo-powietrznej lub zmiany prędkości przepływu powietrza mogą wywołać cofanie się płomienia. Konieczne jest stosowanie zaawansowanych układów zapłonowych, sterowania wtryskiem i systemów bezpieczeństwa, które monitorują i regulują parametry spalania w czasie rzeczywistym.

W praktyce oznacza to, że projektowanie i eksploatacja silników zasilanych wodorem wymaga dodatkowych zabezpieczeń i precyzyjnego sterowania, aby uniknąć ryzyka awarii i zapewnić stabilną pracę silnika, co zwiększa koszty i złożoność techniczną całego układu napędowego.

Silniki spalinowe zasilane wodorem napotykać również istotne problemy w zakresie smarowania, wynikające z właściwości samego paliwa. Wodór nie zawiera węgla ani węglowodorów, które w tradycyjnych silnikach częściowo uczestniczą w tworzeniu filmów ochronnych na powierzchniach tłoków i pierścieni. Brak tych składników powoduje, że klasyczne oleje silnikowe nie zawsze skutecznie chronią elementy ruchome przed zużyciem.

Dodatkowo spalanie wodoru przebiega w wyższych temperaturach niż w przypadku benzyny czy diesla, co zwiększa oddziaływanie degradacyjne środowiska w cylindrze. Podczas

spalania wodoru powstaje para wodna (H_2O), która wnika do oleju silnikowego i prowadzi do jego degradacji, zmniejszając właściwości smarne i przyspieszając zużycie części silnika. Wyższa temperatura spalania dodatkowo sprzyja tworzeniu osadów i zwiększa tarcie między tłokiem a cylindrem.

Problem pogłębia się w silnikach o dużym stopniu sprężania, które są projektowane dla wodoru z uwagi na jego wysoką liczbę oktanową. Konieczne jest wówczas stosowanie odpowiednich olejów o podwyższonej stabilności termicznej, dodatkach antykorozyjnych oraz odpowiednia kontrola jakości mieszanki paliwowej, aby ograniczyć degradację oleju smarowego przez powstającą podczas spalania wodoru wodę.

W efekcie efektywne smarowanie silników wodorowych podnosi koszty eksploatacji i utrudnia wdrożenie wodoru jako paliwa dla jednostek morskich, gdzie wymagana jest długotrwała i niezawodna praca silnika.

Wodór znacząco komplikuje codzienną eksploatację statków. Instalacje kriogeniczne wymagają stałego monitoringu i wysokiego poziomu wiedzy technicznej, a odparowanie wodoru (tzw. *boil-off gas*) jest trudne do kontrolowania. Dodatkowo przechowywanie wodoru w ekstremalnie niskich temperaturach jest bardzo energochłonne.

PODSUMOWANIE

Choć wodór często przedstawiany jest jako paliwo przyszłości, w praktyce żegluga morska stawia przed nim wyjątkowo trudne wymagania. Niska objętościowa wartość energetyczna, problemy z przechowywaniem, wysokie koszty, kwestie bezpieczeństwa i brak rozwiniętej infrastruktury bunkrowej tworzą bariery, które znacznie utrudniają jego powszechne zastosowanie. W rezultacie wodór może znaleźć swoją niszę przede wszystkim w małych jednostkach lub statkach specjalistycznych, ale nie jest realistyczny jako paliwo dla szeroko rozumianej floty handlowej.

Na rynku dostępne są już alternatywy, które w wielu zastosowaniach morskich wypadają lepiej i są prostsze w eksploatacji [H. Fan et al. 2025]. Przykładowo, amoniak cechuje się łatwiejszym przechowywaniem, większą objętościową wartością energetyczną i nie wymaga zastosowania systemów kriogenicznych. Z kolei metanol można transportować przy użyciu istniejącej infrastruktury dla paliw ciekłych, a LNG i biopaliwa mogą pełnić rolę paliw przejściowych. Dodatkowo rośnie obecnie znaczenie napędów hybrydowych, szczególnie w żegludze bliskiego zasięgu. Wszystkie wymienione technologie są tańsze, prostsze i bezpieczniejsze w codziennej obsłudze niż wodór.

W ostatnich latach zbudowano kilka jednostek pływających zasilanych wodorem, które jednak są konstrukcjami eksperymentalnymi i pilotażowymi. Mając jednak na uwadze dostępne moce obecnych silników spalinowych oraz brak realnej alternatywy dla napędu dużych jednostek, można przypuszczać, że obecne rozwiązania wykorzystujące zasilanie paliwami kopalnymi długo jeszcze będą stosowane w żegludze morskiej.



Wodór, choć obiecujący w teorii, w praktyce wciąż pozostaje paliwem niszowym. Odpowiadając na pytanie postawione w tytule niniejszego tekstu, uważam, że liczne bariery technologiczne, logistyczne, ekonomiczne i związane z bezpieczeństwem sprawiają, że nie ma realnych przesłanek, by wodór stał się paliwem powszechnie stosowanym na statkach w najbliższych dekadach. Jego wdrożenie będzie prawdopodobnie ograniczone do małych jednostek specjalistycznych, statków testowych lub niszowych zastosowań, gdzie zalety wodoru mogą przeważać nad jego ograniczeniami.

Polecana literatura

1. Brott für die Welt (2022) *Technical potential & challenges of Renewable hydrogen*. On-line: <https://www.boell.de/sites/default/files/2022-12/35-bfdw-hbs-green-hydrogen-report-hr-with-cropmarks.pdf>, dostęp: 24.11.2025.
2. Fan, H., Abdussamie, N., Chen, P. S.-L., Harris, A., Gray, E. M. A., Arzaghi, E., Bhaskar, P., Mehr, J. A., & Penesis, I. (2025). *Two decades of hydrogen-powered ships (2000–2024): Evolution, challenges, and future perspectives*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 219, 115878, doi: 10.1016/j.rser.2025.115878
3. Lejda K. (2013). *Wodór w aplikacjach do środków napędu w transporcie drogowym*. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów.
4. Sand, M., Skeie, R. B., Sandstad, M., Krishnan, S., Myhre, G., Bryant, H., Derwent, R., Hauglustaine, D., Paulot, F., Prather, M., Stevenson, D. (2023). *A multi-model assessment of the global warming potential of hydrogen*. *Communications Earth & Environment*, doi: 10.11582/2023.00024.
5. Surygala, J. (2013). *Wodór jako paliwo*. PWN, Warszawa.
6. Szwaja, S. (2019). *Wodór jako paliwo podstawowe i dodatkowe do tłokowego silnika spalinowego*. Politechnika Częstochowska, Częstochowa.
7. Webster, L. J., Ballard, R., Beamish, T., et al. (2025). *Evaluating low NO_x hydrogen engines designed for off-road and construction applications*. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 27, 486–497, doi: <https://doi.org/10.1039/d4em00448e>.

Leszek Chybowski