

AMONIAK JAKO PALIWO DLA ŻEGLUGI MORSKIEJ

POTENCJAŁ DEKARBONIZACYJNY I OGRANICZENIA WDROŻENIOWE

Cywilizacja ludzka poprzez swoją działalność w istotny sposób oddziałuje negatywnie na środowisko naturalne, przyczyniając się do zmian klimatycznych, zubożenia zasobów naturalnych, emisji substancji szkodliwych oraz generowania coraz większej ilości odpadów. Jednym z kluczowych kierunków ograniczania tego wpływu jest redukcja wykorzystania paliw kopalnych, upowszechnienie recyklingu oraz wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Wszystkie te działania wpisują się w koncepcję zrównoważonego rozwoju, obejmując zarówno sektor lądowy, jak i transport wodny.

WPROWADZENIE

Transport morski odpowiada za około 2–3% globalnych emisji CO₂, co stanowi około 1 miliarda ton CO₂ rocznie [1]. W celu zmniejszenia ilości emitowanego CO₂ Międzynarodowa Organizacja Morska przyjęła strategię redukcji emisji wymuszającą zwiększenie wykorzystania paliw alternatywnych.

W przypadku żeglugi morskiej rozważane są różnorodne scenariusze dekarbonizacji, obejmujące zastosowanie paliw przejściowych i docelowych. Do paliw niskoemisyjnych zalicza się m.in. metanol, etanol, CNG/LNG oraz LPG. Równolegle rozwijane są paliwa syntetyczne (np. SNG/e-LNG, e-paliwa), biopaliwa (biometanol, bioetanol, bioamoniak, biogaz), paliwa będące produktami recyklingu odpadów (oleje pirolityczne), a także paliwa nie emitujące CO₂ w procesie spalania (tzw. paliwa zeroemisyjne / bezemisyjne), takie jak wodór i amoniak.

Jednym z kluczowych kandydatów na paliwo zeroemisyjne w żegludze morskiej jest amoniak (NH₃). Jego podstawową zaletą jest brak atomów węgla w strukturze chemicznej, co umożliwia eliminację emisji CO₂ w procesie spalania. Celem niniejszego artykułu jest ocena potencjału wdrożeniowego amoniaku w sektorze morskim w kontekście dostępności „zielonego amoniaku”, bezpieczeństwa operacyjnego oraz konkurencji technologicznej.

Znaczenie tego kierunku badań i wdrożeń rośnie w związku z ujęciem strategii dekarbonizacji transportu. Kluczowym elementem jest pakiet „Fit for 55” (pol. „Gotowi na 55”) [2], który wyznacza ambitne cele klimatyczne dla państw członkowskich Unii Europejskiej. W jego ramach sektor żeglugi został objęty nowymi regulacjami mającymi na celu stopniowe ograniczanie intensywności emisji oraz promowanie paliw alternatywnych o niskim śladzie węglowym. W konsekwencji paliwa takie jak amoniak, wodór czy e-paliwa zyskują status nie tylko rozwiązań eksperymentalnych, ale potencjalnych filarów przyszłego systemu energetycznego transportu morskiego.



Autobus zasilany silnikiem na amoniak. Zbiorniki gazu umieszczone na froncie i na dachu pojazdu (Źródło: [3]).

Zdjęcia: domena publiczna

Szczególnie istotnym instrumentem wdrożeniowym jest inicjatywa „FuelEU Maritime” [4], która nakłada na armatorów obowiązek stopniowego ograniczania intensywności emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia energii wykorzystywanej na statkach. Regulacja ta promuje wykorzystanie paliw odnawialnych i niskoemisyjnych, biopaliw, e-paliw oraz paliw bezemisyjnych, w tym „zielonego amoniaku”, produkowanego m.in. z wodoru wytwarzanego w procesie elektrolizy zasilanej energią odnawialną. W praktyce oznacza to, że tempo oraz opłacalność wdrażania amoniaku w żegludze będą w dużej mierze zależeć od ram regulacyjnych Unii Europejskiej oraz dostępności odpowiedniej infrastruktury produkcyjno-dystrybucyjnej.

W tym kontekście amoniak zajmuje istotne miejsce w procesie transformacji energetycznej sektora morskiego. Jego rzeczywiste wdrożenie wymaga jednak rozwiązania szeregu wyzwań technologicznych i operacyjnych, w tym związanych z toksycznością, efektywnością energetyczną oraz rozwojem

Tabela 1. Właściwości zapłonowe wybranych paliw alternatywnych

Nazwa	Paliwa niskowęgłowe			Paliwa bezwęgłowe	
	LNG/CNG/ metan–etan	LPG propan–butan	metanol	amoniak	wodór
Gęstość w 20°C [g/cm ³]	0,000717 (metan) 0,001212 (etan)	0,001874 (propan) 0,00270 (butan)	0,792	0,000696	0,00008
Wartość opałowa w 15,5°C [MJ/kg]	50	44–46	19,9	18,6	150
Energia aktywacji reakcji spalania [kJ/mol]	~150–250	~120–250	~100–250	~100–300+	~40–80
Dolna granica wybuchowości w powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym [% obj.]	2,9 (etan) 5 (metan) 5 (LNG)	2,1 (propan) 1,8 (butan) 2,1 (LPG)	5,5	15	4
Górna granica wybuchowości w powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym [% obj.]	13 (etan) 15 (metan) 15 (LNG)	9,9 (propan) 8,4 (butan) 9,6 (LPG)	44	28	75
Temperatura zapłonu (w tyglu zamkniętym) [°C]	–135 (etan) –188 (metan) –188 (LNG)	–104 (propan) –60 (butan) –144 (LPG)	11–12	11	–253 – –150
Temperatura samozapłonu [°C]	540	454–510	455–470	630–651	565–585
Liczba metanowa LM [-]	100 (metan) 43,5 (etan) 72–98 (gaz ziemny)	35 (propan) 10,5 (butan) 35–80 (LPG)	nd.	nd.	0
Liczba oktanowa LO [-]	125 (metan) 120–130 (LNG)	97–105 (propan) 70–94 (butan) 90–120 (LPG)	106–110	120	> 130 (RON - badawcza) > 10 zwykle 60–70 (MON - motorowa)
Liczba cetanowa LC [-]	0 (metan)	–2 (propan) <3 (butan)	5	0	–10 –5

Źródło: (oprac. własne)

odpowiednich technologii napędowych i systemów bunkrowania.

AMONIAK JAKO NOŚNIK ENERGII

Salmiak jako pierwszy opisany związek amoniaku znany był w Egipcie już w 332 r. p.n.e. Wytworzenie amoniaku z salmiaku przypisuje się żyjącemu w XV w. Basiliusowi Valentinusowi. Choć autentyczność tej osoby i jego dzieł jest kwestionowana.

Pomysł wykorzystania amoniaku jako paliwa do silników można datować na rok 1822, czyli okres rozwoju silników parowych, kiedy to zgodnie z relacją przedstawioną w książce „A History of The Growth of The Steam-Engine” (pol. „Historia rozwoju silnika parowego”) brytyjski wynalazca sir Goldsworthy Gurney zbudował działający na gazowym amoniaku modelowy silnik wykorzystany do napędu lokomotywy. Z kolei pierwsze udokumentowane wykorzystanie amoniaku jako pali-

wa do napędu silników spalinowych datowane jest na 1905 rok i dotyczy firmy włoskiej Ammonia Casale SA. Z amoniakiem jako nośnikiem energii eksperymentował też wcześniej Rudolf Diesel, który w latach 1883–1889 prowadził zakończone niepowodzeniem prace nad poprawą sprawności silnika parowego przy użyciu amoniaku. Eksperymenty Diesla zakończyły się eksplozją i zniszczeniem laboratorium, a sam wynalazca o mało nie stracił w wyniku tego wypadku życia.

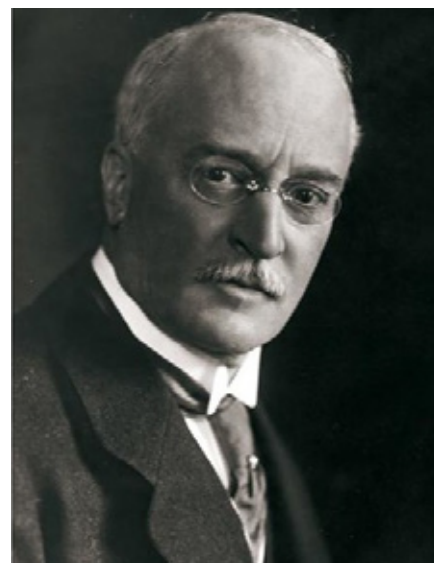
Amoniak (NH₃), jako substancja łatwa do syntezy z azotu atmosferycznego i wodoru, pojawiał się okresowo w dyskusjach jako potencjalne paliwo, jednak jego zastosowanie było ograniczone przez niską sprawność spalania i jego wysoką toksyczność. W tabeli 1 zestawiono wybrane wskaźniki opisujące palność paliw mogących stanowić alternatywę dla ciekłych paliw kopalnych. Jak widać z tabeli, wysoka wartość liczby oktanowej powoduje, że amoniak jest paliwem potencjalnie nadającym się do wykorzystania w silnikach o zapłonie iskrowym. W praktyce w silnikach jednopaliwo-



Basilius Valentinus
(XV w.)



Goldsworthy Gurney
(14.02.1793 – 28.02.1875)



Rudolf Diesel
(18.03.1858 – 29.09.1913)

wych stosowane są zaawansowane rozwiązania (np. zapłon plazmowy, zwielokrotnienie liczby świec zapłonowych, domieszkanie paliwa wodorem itp.) usprawniające spalanie amoniaku. Wynika to z faktu, że amoniak charakteryzuje się niską reaktywnością chemiczną, wysoką energią aktywacji zapłonu, bardzo małą prędkością propagacji płomienia oraz wąskim zakresem palności w mieszaninie z powietrzem. Dodatkowo jego spalanie jest silnie ograniczane przez wysoką temperaturę samozapłonu i tendencję do generowania niecałkowitego utlenienia (tzw. ammonia slip).

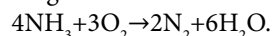
Pierwsze szerzej udokumentowane próby wykorzystania amoniaku jako paliwa miały miejsce w latach 30. i 40. XX wieku. W latach 1935–1936 firma Ammonia Casale, Ltd. uzyskała na swoje rozwiązania silnikowe patenty w Szwajcarii i Francji. W okresie II wojny światowej, ze względu na niedobory paliw kopalnych, prowadzono badania nad alternatywnymi źródłami energii, w tym nad mieszaninami gazów zawierających amoniak. Nie doprowadziło to jednak do szerszych wdrożeń komercyjnych, ponieważ silniki spalinowe tamtego okresu nie były przystosowane do efektywnego spalania tego związku chemicznego.

Na lata 1941–1942 datowane jest pierwsze szerokie wykorzystanie silników na amoniak do napędu ok. 100 aut, a w 1943 w Belgii wprowadzono do eksploatacji pierwsze autobusy zasilane amoniakiem.

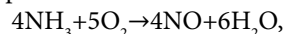
W kolejnych dekadach zainteresowanie amoniakiem jako paliwem malało, ustępując miejsca rozwojowi silników spalinowych, zarówno o zapłonie samoczynnym, jak i benzynowych. Dopiero kryzysy naftowe lat 70. ponownie skierowały uwagę naukowców na paliwa alternatywne. Wówczas amoniak analizowano głównie jako nośnik wodoru, a nie bezpośrednie paliwo silnikowe. Wynikało to z jego wysokiej zawartości wodoru oraz możliwości transportu i magazynowania w warunkach skroplonych. Równolegle jednak

powstawały wynalazki w postaci silników zasilanych amoniakiem.

Przełom w podejściu do amoniaku nastąpił dopiero w XXI wieku wraz z intensyfikacją działań na rzecz dekarbonizacji transportu. W szczególności sektor morski zaczął poszukiwać paliw bezwęglowych, które mogłyby zastąpić ciężkie oleje napędowe wykorzystywane powszechnie jako paliwa żeglugowe. Amoniak zyskał w tym kontekście znaczenie jako jeden z głównych kandydatów, obok wodoru i metanolu. Jego kluczową zaletą jest brak atomów węgla, co eliminuje emisję CO₂ podczas spalania. Spalanie amoniaku w tlenie przebiega według równania



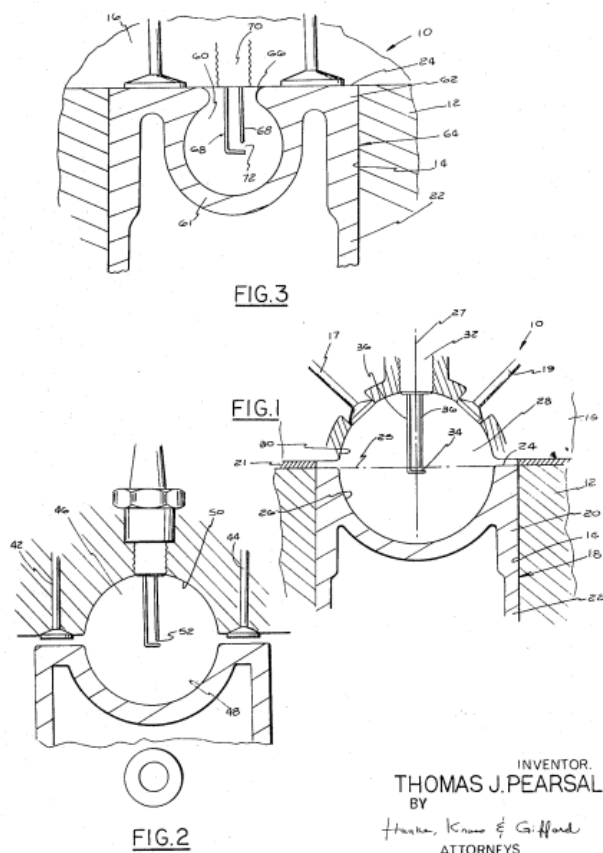
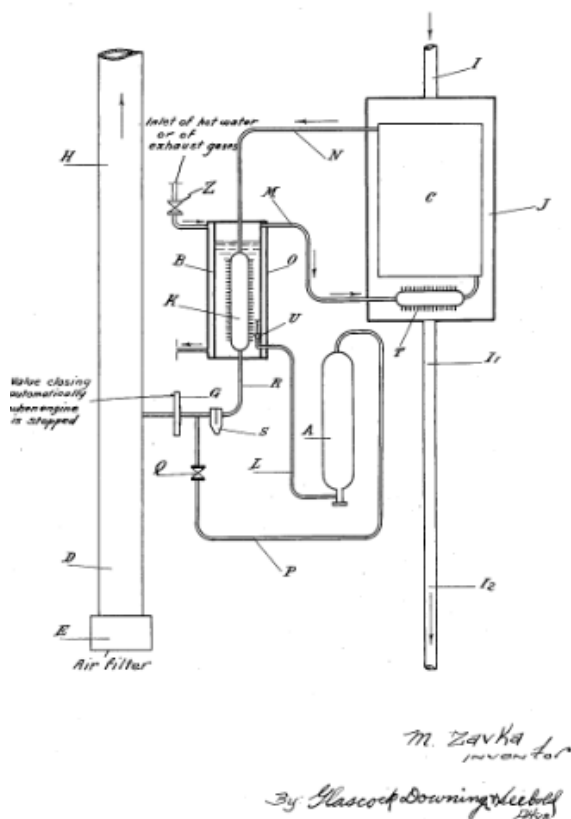
A więc produktami spalania są azot i woda, czyli substancje naturalnie występujące w środowisku. Należy mieć na uwadze, że w kontakcie z katalizatorami (np. platyną) oraz w wysokiej temperaturze proces spalania amoniaku przyjmuje postać:



czyli spalanie amoniaku w takich warunkach generuje tlenek azotu – substancję silnie toksyczną i związaną z tworzeniem smogu fotochemicznego.

Współczesny rozwój silników na amoniak koncentruje się głównie na adaptacji istniejących silników o zapłonie samoczynnym i na opracowaniu nowych konstrukcji spalających mieszaniny amoniaku z paliwami pilotującymi takimi jak olej napędowy lub wodór. Przykładowo firma Everllence na bazie dwupaliwowych silników na gaz ziemny MAN B&W ME-GI opracowała dwupaliwowe silniki amoniakalne Everllence B&W ME-LGIA.

Prowadzone są także badania nad technologią spalania bezpośredniego, która pozwoliłaby na całkowite wyeliminowanie paliw węglowych w procesie inicjacji spalania. Równolegle rozwijane są ogniwa paliwowe wykorzystujące amoniak



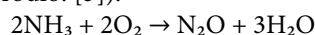
Fragmenty opisów patentowych silników amoniakalnych
 (patenty z 1938 r. i 1969 r.)

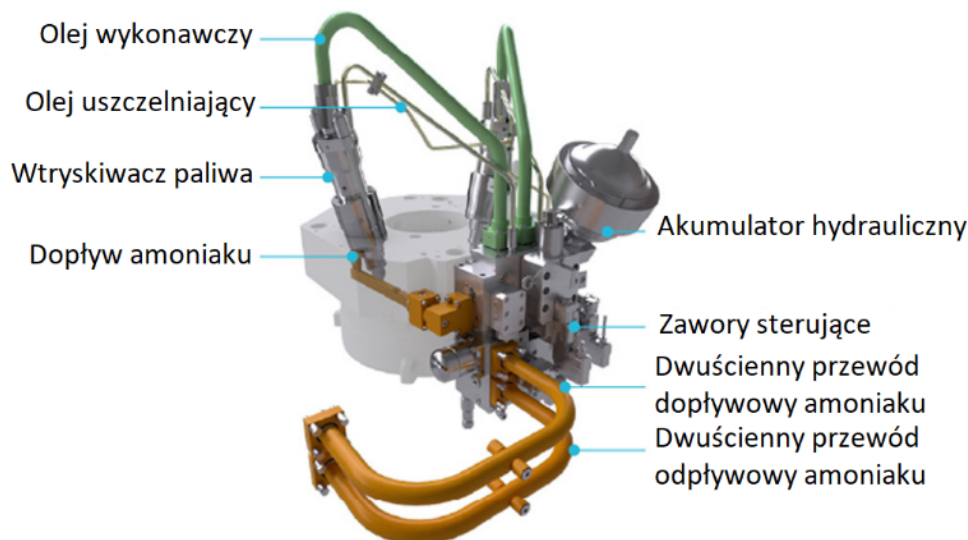
jako nośnik wodoru. Wykorzystanie amoniaku jako paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym w związku z niską liczbą cetanową tego paliwa możliwe jest w silnikach dwupaliwowych z wykorzystaniem ciekłego paliwa jako paliwa pilotowego. Paliwem pilotowym jest w tym przypadku zwykle lekki lub ciężki olej napędowy, a więc paliwo węglowodorowe, zwykle ropopochodne.

Obecnie największe wyzwania technologiczne związane z silnikami na amoniak dotyczą jego niskiej reaktywności w porównaniu do paliw tradycyjnych, emisji tlenków azotu (NO_x – zbiorcze oznaczenie dla tlenków NO i NO_2) oraz kwestii bezpieczeństwa wynikającej z jego toksyczności. Mimo to intensyfikacja badań oraz presja regulacyjna, szczególnie w sektorze żeglugi morskiej, sprawiają, że amoniak staje się jednym z kluczowych kierunków rozwoju technologii napędowych w procesie transformacji energetycznej.

Podczas rozważań nad wykorzystaniem amoniaku (NH_3) jako paliwa zeroemisyjnego często podkreśla się, że nie zawiera on węgla, a więc jego spalanie nie prowadzi do emisji CO_2 . Jednak z punktu widzenia klimatu nie oznacza to

automatycznie pełnej neutralności środowiskowej. Jednym z istotnych problemów związanych ze spalaniem amoniaku jest wcześniej wskazana możliwość powstawania w trakcie procesu spalania tlenków azotu NO_x , a także w pewnych warunkach podtlenku azotu (N_2O). Tlenki azotu NO_x powstają jako wynik utlenienia azotu zawartego w paliwie i w powietrzu zasilającym silnik. W celu zmniejszenia poziomu emisji NO_x stosowane są rozwiązania techniczne takie jak reaktory SCR w układzie wylotowym. Z kolei podtlenek azotu N_2O jest jednym z najsilniejszych gazów cieplarnianych. Może on powstawać w wysokotemperaturowych procesach spalania amoniaku, szczególnie gdy reakcje utleniania azotu przebiegają niecałkowicie lub w warunkach niedoboru tlenu. Mechanizmy jego tworzenia są złożone i obejmują zarówno reakcje pośrednie w płomieniu, jak i procesy zachodzące na powierzchni katalizatorów lub w strefach chłodzenia spalin. W postaci uproszczonej spalanie amoniaku do podtlenku azotu można przedstawić w postaci (źródło: [5]):





Aparatura paliwowa na głowicy silnika Everlence B&W ME-LGIA

W praktyce oznacza to, że nawet jeśli amoniak nie zawiera węgla, jego spalanie może generować emisje gazów cieplarnianych o bardzo wysokim potencjale ocieplenia globalnego. Znaczenie tego zjawiska wynika z faktu, że N_2O ma znacznie większy wpływ na klimat niż dwutlenek węgla. Według wartości stosowanych w raportach Intergovernmental Panel on Climate Change, w horyzoncie 100-letnim jego współczynnik ocieplenia globalnego (GWP100) wynosi około 265–298 razy więcej niż CO_2 . Oznacza to, że jedna tona podtlenku azotu ma taki sam wpływ na efekt cieplarniany jak niemal trzysta ton dwutlenku węgla.

W konsekwencji nawet niewielkie ilości N_2O powstające podczas spalania amoniaku mogą znacząco pogarszać „bilans klimatyczny” tego paliwa. Jest to szczególnie istotne w kontekście jego potencjalnego zastosowania w transporcie morskim i energetyce, gdzie zakłada się dużą skalę zużycia paliwa.

Problem ten stanowi jedno z kluczowych wyzwań technologicznych w rozwoju silników i instalacji energetycznych zasilanych amoniakiem. Badania koncentrują się obecnie na ograniczaniu powstawania N_2O poprzez optymalizację warunków spalania, stosowanie katalizatorów redukujących tlenki azotu oraz projektowanie układów spalania o lepiej kontrolowanej temperaturze i mieszaniu paliwa z powietrzem.

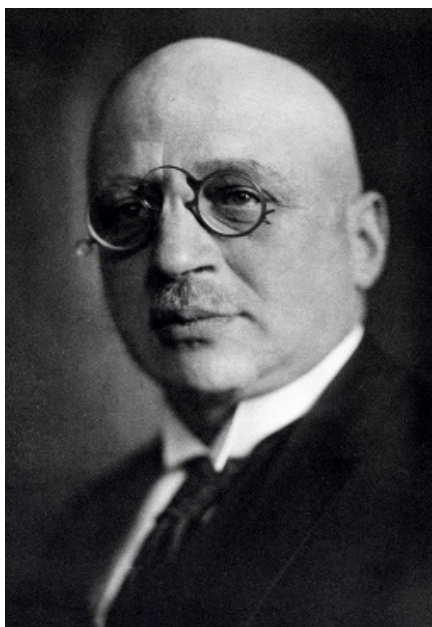
Podsumowując, choć amoniak jest często postrzegany jako potencjalnie bezwęglowe paliwo przyszłości, jego spalanie nie jest całkowicie wolne od wpływu na klimat. Emisja podtlenku azotu stanowi istotne ograniczenie jego „zieloności”. Ostateczna ocena jego przydatności jako paliwa zeroemisyjnego zależy więc nie tylko od eliminacji CO_2 , ale również od skutecznego kontrolowania powstawania N_2O oraz minimalizacji emisji NO_x .

W efekcie można stwierdzić, że historia silników na amoniak zatoczyła koło: od marginalnych eksperymentów w XIX–XX wieku, przez okres zapomnienia, aż po współczesne odrodzenie w kontekście dekarbonizacji transportu. Wszystko wskazuje na to, że w nadchodzących dekadach technologia ta może przejść z fazy badań do realnych wdrożeń komercyjnych, szczególnie w żegludze dalekomorskiej.

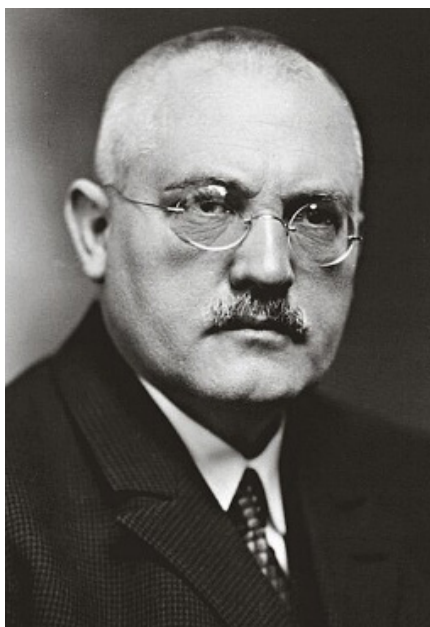
METODY PRODUKCJI AMONIAKU

Amoniak (NH_3) jest związkiem chemicznym o dużym znaczeniu przemysłowym, który jednocześnie posiada wyraźne dwojaki charakter środowiskowy. Z jednej strony stanowi kluczowy surowiec dla rolnictwa oraz coraz częściej analizowany jest jako paliwo przyszłości w procesach dekarbonizacji. Z drugiej strony jest substancją silnie toksyczną, której niekontrolowane uwolnienie może prowadzić do poważnych skutków dla zdrowia ludzi oraz ekosystemów wodnych i lądowych. Ocena jego „zieloności” wymaga więc rozróżnienia pomiędzy wpływem klimatycznym a bezpośrednim oddziaływaniem toksykologicznym.

Amoniak jest jednym z najczęściej analizowanych kandydatów na paliwo przyszłości ze względu na brak emisji CO_2 w procesie spalania, co czyni go potencjalnie atrakcyjnym nośnikiem energii w sektorach trudnych do dekarbonizacji, takich jak żegluga morska. Zwróćmy jednak uwagę na fakt, że amoniak w warunkach przemysłowych produkowany jest przede wszystkim w procesie Habera–Boscha, polegającym na syntezie azotu atmosferycznego i wodoru w wysokiej temperaturze oraz pod wysokim ciśnieniem. Jest to jedna z najważniejszych technologii chemicznych XX i XXI wieku, ponieważ umożliwia produkcję nawozów azotowych oraz



Fritz Haber
(9.12.1868 – 29.01.1934)

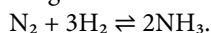


Carl Bosch
(27.08.1874 – 29.04.1940)



Friedrich Bergius
(11.10.1884 – 30.03.1949)

materiałów wybuchowych na skalę globalną, a tym samym intensyfikację rozwoju rolnictwa i wzrost produkcji żywności, rozwój technologii militarnych, budownictwa i innych sektorów. Proces polega na bezpośredniej reakcji azotu i wodoru zgodnie z równaniem:



Fritz Haber w 1918 roku został uhonorowany Nagrodą Nobla w dziedzinie chemii „za syntezę amoniaku z jego pierwiastków” zgodnie z przedstawioną wcześniej reakcją. To odkrycie było kluczowe, ponieważ pokazało, że azot atmosferyczny można chemicznie „uaktywnić” i przekształcić w amoniak, co wcześniej uważano za praktycznie niemożliwe w skali przemysłowej. Sama metoda Habera–Boscha jako proces przemysłowy powstała dzięki współpracy Habera z inżynierem Carlem Boschem w firmie BASF. Bosch odpowiadał za rozwinięcie technologii na skalę przemysłową (wysokie ciśnienia, reaktory, katalizatory i aparatura), co umożliwiło masową produkcję amoniaku. W roku 1931 Carl Bosch otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii wraz z Friedrichem Bergiusem za wkład w wynalezienie i rozwój chemicznych procesów wysokociśnieniowych.

Aby umożliwić realizację procesu na skalę przemysłową, stosuje się wysokie ciśnienie (zwykle 150–300 bar) oraz podwyższoną temperaturę (około 400–500 °C). Dodatkowo wykorzystuje się katalizatory, najczęściej na bazie żelaza z dodatkami promotorów (np. tlenków potasu i glinu), które przyspieszają reakcję i zwiększają jej wydajność.

Kluczowym elementem procesu jest wielokrotne zawracanie nieprzereagowanych gazów. Ponieważ równowaga reakcji nie pozwala na pełne przekształcenie substratów w amoniak w jednym przebiegu, mieszanina gazów jest chłodzona, a powstały amoniak jest oddzielany poprzez skraplanie. Pozostałe

azot i wodór są ponownie kierowane do reaktora, co zwiększa efektywność całego procesu.

W tradycyjnym ujęciu największym problemem metody Habera–Boscha nie jest sama reakcja syntezy, lecz produkcja wodoru. W większości instalacji przemysłowych wodór pozyskuje się z gazu ziemnego w procesie reformingu parowego metanu (SMR), co wiąże się z emisją znacznych ilości CO₂. Z tego powodu klasyczna produkcja amoniaku jest jednym z istotnych źródeł emisji gazów cieplarnianych na świecie.

Kluczowym czynnikiem determinującym wpływ środowiskowy nie jest więc sama reakcja chemiczna w procesie Habera–Boscha, lecz źródło wodoru. W tradycyjnym podejściu pozyskuje się go z gazu ziemnego lub węgla, co prowadzi do wysokich emisji dwutlenku węgla. W ten sposób powstaje tzw. „szary amoniak”, który wiąże się z istotnym śladem węglowym. Obecnie globalna produkcja amoniaku wynosi około 180–190 mln ton rocznie, z czego około 95% opiera się na reformingu gazu ziemnego (tzw. „szary amoniak”), 4–5% wykorzystuje procesy z częściową redukcją emisji („niebieski amoniak”), natomiast mniej niż 1% stanowi amoniak wytwarzany z odnawialnego wodoru („zielony amoniak”) [6]. Produkcja zielonego amoniaku wymaga zastosowania elektrolizy wody zasilanej odnawialnymi źródłami energii, wysokiej dostępności taniej energii OZE oraz integracji tego procesu z klasycznym układem syntezy Habera–Boscha.

W odpowiedzi na wyzwania klimatyczne rozwinięto mniej emisyjne warianty produkcji. „Niebieski amoniak” wykorzystuje paliwa kopalne, ale część emisji CO₂ jest wychwytywana i magazynowana dzięki technologii CCS (Carbon Capture and Storage), co ogranicza jego wpływ klimatyczny, choć go nie eliminuje. Bardziej zaawansowaną koncepcją jest amoniak turkusowy, w którym wodór uzyskuje się w proce-

Tabela 2. Stężenie amoniaku w powietrzu oraz skutki zdrowotne [5]

Stężenie amoniaku w powietrzu (ppm)	Skutek ekspozycji
5–25	Wyczuwalny zapach
20–50	Łagodny dyskomfort
50–80 (2 h)	Umiarkowane podrażnienie oczu i gardła
100 (2 h)	Uciążliwe podrażnienie oczu i gardła
140 (co najmniej 2 h)	Silne podrażnienie oczu, nosa, gardła i klatki piersiowej; konieczność opuszczenia strefy narażenia
300	Silne podrażnienie błon śluzowych; jednocześnie brak jest objawów ograniczających zdolność do ewakuacji oraz brak trwałych skutków
500 (30 min.)	Podrażnienie górnych dróg oddechowych, łzawienie oczu
700–1 700	Kaszel, skurcz oskrzeli, ból w klatce piersiowej, silne podrażnienie oczu i łzawienie
5 000–10 000	Zgon w krótkim czasie: chemiczne zapalenie oskrzeli oraz chemiczne oparzenia skóry
10 000+	Natychmiastowy zgon

się pirolizy metanu, prowadząc do powstania stałego węgla zamiast dwutlenku węgla. Technologia ta pozostaje jednak w fazie rozwoju i nie jest jeszcze powszechnie stosowana.

Najbardziej pożądaną z punktu widzenia transformacji energetycznej formą jest „zielony amoniak”, w którym wodor produkowany jest w procesie elektrolizy wody zasilanej energią odnawialną. Dzięki temu cały łańcuch produkcyjny może być pozbawiony emisji CO₂, co czyni go potencjalnie zeroemisyjnym nośnikiem energii. Jednak koszt jego produkcji jest obecnie 2–4 razy wyższy niż amoniaku konwencjonalnego [4]. W konsekwencji w 2026 roku amoniak nie stanowi jeszcze w pełni zdekarbonizowanego paliwa w skali przemysłowej dla żegludgi.

Jednocześnie należy podkreślić, że amoniak jako substancja chemiczna jest związkiem powodującym szybkie i poważne podrażnienie błon śluzowych (tab. 2). Z tego względu amoniak klasyfikowany jest jako substancja silnie toksyczna zarówno dla ludzi, jak i organizmów wodnych [7]. W środowisku wodnym powoduje zaburzenia równowagi biologicznej poprzez podwyższanie pH i toksyczne oddziaływanie na organizmy wodne.

W kontekście zastosowań morskich szczególnie istotne są kwestie bezpieczeństwa eksploatacyjnego.

W systemach okrętowych cały niespalony amoniak, który może powstać w wyniku przecieków / nieszczelności lub procesów przedmuchu instalacji paliwowej, musi być bezwzględnie wychwytywany. Nie może on być w żadnym przypadku uwalniany do atmosfery ani środowiska morskiego. Wymaga to stosowania specjalnych systemów detekcji, separacji i obiegu zamkniętego, które minimalizują ryzyko emisji oraz chronią zarówno załogę, jak i środowisko naturalne.

W efekcie ocena środowiskowa amoniaku obejmuje dwa odrębne aspekty. Pierwszy dotyczy emisji gazów cieplarnianych i zależy od technologii jego produkcji – od wysokoemisyjnego „szarego amoniaku” po potencjalnie zeroemisyjny „zielony amoniak”. Drugi dotyczy jego toksyczności, która

jest niezależna od sposobu wytwarzania i wymaga rygorystycznych systemów bezpieczeństwa w całym cyklu życia substancji.

Podsumowując, amoniak nie może być jednoznacznie klasyfikowany jako substancja „zielona” lub „szkodliwa”. Jego wpływ na środowisko zależy zarówno od sposobu produkcji, jak i od warunków użytkowania. Może on odegrać istotną rolę w transformacji energetycznej, jednak jego zastosowanie – szczególnie w żegludze – wymaga zaawansowanych technologii ograniczających ryzyko emisji i zapewniających pełną kontrolę nad jego toksycznością.

Amoniak (NH₃) jako paliwo i ładunek energetyczny w żegludze morskiej wiąże się nie tylko z wyzwaniem toksykologicznymi, lecz także z istotnymi problemami technicznymi wynikającymi z jego właściwości fizykochemicznych. Kluczowe znaczenie mają trzy obszary: oddziaływanie korozyjne, niska gęstość energetyczna oraz wymagania związane z magazynowaniem i chłodzeniem amoniaku w stanie skroplonym. Razem determinują one zarówno konstrukcję statków, jak i ekonomikę jego wykorzystania w transporcie morskim.

Z punktu widzenia materiałowego amoniak wykazuje umiarkowane, ale istotne właściwości korozyjne, szczególnie w obecności wilgoci. W warunkach bezwodnych jest relatywnie stabilny wobec wielu metali konstrukcyjnych, jednak w obecności wody tworzy roztwory o odczynie zasadowym, które mogą powodować korozję naprężeniową i degradację niektórych stopów miedzi oraz aluminium. Z tego powodu w systemach okrętowych wykorzystujących amoniak stosuje się specjalistyczne materiały, takie jak stale niskostopowe, stale nierdzewne oraz odpowiednio dobrane powłoki ochronne. Szczególną uwagę zwraca się również na szczelność instalacji, ponieważ wycieki nie tylko stanowią zagrożenie toksykologiczne, ale mogą przyspieszać degradację elementów konstrukcyjnych.

Istotnym ograniczeniem zastosowania amoniaku jako paliwa jest jego stosunkowo niska gęstość energetyczna w po-



Przykładowe indywidualne środki ochrony firmy Dräger dla osób pracujących przy systemach przechowywania, transportu i przetwarzania amoniaku (źródło: [8])



Silnik Everlence B&W 6G60ME-LGIA HPSCR w Engine & Machinery firmy Hyundai Heavy Industries podczas testów homologacyjnych w fabryce (źródło: [9])

równaniu z paliwami węglowodorowymi. Wartość opałowa amoniaku wynosi około 18,6 MJ/kg / 3,5 MJ/l, co stanowi mniej niż połowę wartości typowych paliw takich jak olej napędowy morski (około 40–45 MJ/kg / 10–11 MJ/l). Oznacza to, że aby zmagazynować tę samą ilość energii, konieczne jest przechowywanie znacznie większej objętości paliwa. W praktyce przekłada się to na konieczność zwiększenia rozmiarów zbiorników paliwowych na statkach lub ograniczenia ich zasięgu operacyjnego. Wpływa to bezpośrednio na projektowanie jednostek oraz ich efektywność ekonomiczną, szczególnie w transporcie dalekomorskim.

Kolejnym kluczowym aspektem jest konieczność magazynowania amoniaku w stanie skroplonym. Amoniak ulega skropleniu w temperaturze około -33°C przy ciśnieniu atmosferycznym, co oznacza, że jego transport i bunkrowanie wymagają zastosowania systemów schładzania i/lub zbiorników ciśnieniowych. W praktyce morskiej preferuje się zbiorniki chłodzone i izolowane termicznie, które utrzymują amoniak w stanie ciekłym przy niskim ciśnieniu, co zwiększa bezpieczeństwo operacyjne. Systemy te muszą być wyposażone w zaawansowaną izolację termiczną oraz układy kontroli ciśnienia i temperatury, aby zapobiegać niekontrolowanemu odparowaniu (tzw. boil-off gas). Jednak należy zauważyć, że systemy te są znacznie prostsze i mające niższe zapotrzebowanie w energię niż systemy kriogeniczne stosowane do utrzymywania w postaci skroplonej paliw takich jak metan, etan, czy

wodór. Niemniej jednak konieczność instalacji na statku dodatkowych urządzeń oraz niewykorzystane przestrzenie otaczające zbiorniki powodują, że rzeczywista wielokrotność objętości (ang. gross tank size factor) konieczna do przechowania paliwa o określonej energii w porównaniu do oleju napędowego (wartość referencyjna równa 1) w przypadku amoniaku wynosi 3,9. Ogranicza to istotnie dystans, na którym statki prowadzą żeglugę bez bunkrowań w trakcie pojedynczej podróży.

W przypadku transportu morskiego amoniaku kluczową rolę odgrywają również systemy chłodzenia i zarządzania oparami tego paliwa. Odparowujący amoniak musi być kontrolowany poprzez systemy powtórnego skraplania lub bezpiecznego spalania w specjalnie przygotowanych układach pomocniczych. Zapobiega to wzrostowi ciśnienia w zbiornikach oraz ogranicza ryzyko emisji amoniaku do atmosfery. Wymaga to zastosowania złożonych instalacji technologicznych, które zwiększają koszt i stopień skomplikowania jednostek przystosowanych do przewozu lub wykorzystania amoniaku jako paliwa.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie amoniaku w żegludze morskiej wiąże się z istotnymi ograniczeniami technicznymi wynikającymi z jego właściwości fizykochemicznych. Jego oddziaływanie korozyjne wymaga specjalistycznych materiałów konstruk-

cyjnych, niska wartość opałowa determinuje konieczność stosowania dużych zbiorników paliwowych, a potrzeba utrzymania go w stanie skroplonym wymusza zastosowanie zaawansowanych systemów chłodzenia i kontroli ciśnienia. Czynniki te sprawiają, że mimo potencjału dekarbonizacyjnego amoniak pozostaje paliwem wymagającym wysokiego stopnia zaawansowania technologicznego i istotnych kompromisów projektowych.

Amoniak konkuruje obecnie z innymi paliwami alternatywnymi w żegludze. Do głównych konkurentów należą metanol, który jest już wdrażany komercyjnie w nowej flocie, bio-LNG wykorzystujący istniejącą infrastrukturę LNG oraz biopaliwa ciekłe kompatybilne z obecnymi silnikami. Równolegle rozwijane są również napędy bateryjne, szczególnie w segmencie żeglugi krótkiego zasięgu i promów, gdzie dzięki ograniczonemu zasięgowi operacyjnemu możliwe jest ich efektywne zastosowanie. Dane rynkowe wskazują, że w latach 2023–2025 większość nowych zamówień statków o alternatywnych napędach dotyczy metanolu i LNG [10]. Najwięksi producenci silników okrętowych napędu głównego Everllence oraz WinGD opracowali i przeprowadzili próby na hamowni swoich silników zasilanych amoniakiem, a uruchomienie tych silników na statkach jest coraz bliższe realizacji. Przykładowo 20 kwietnia br. firma Everllence ogłosiła pomyślny odbiór fabryczny swojego pierwszego silnika spalającego amoniak, zbudowanego przez licencjobiorcę Engine & Machinery należącego do Hyundai Heavy Industries (HHI-EMD) w Korei Południowej.

Jednak na wyniki płynące z eksploatacji tych silników musimy jeszcze poczekać, a poznamy je dopiero za kilka lat po zakończeniu budowy i rozpoczęciu użytkowania statków transportowych wyposażonych w takie silniki. Wprawdzie obecnie realizowanych jest kilka pilotowych projektów statków zasilanych silnikami na amoniak, ale nie są to dane reprezentatywne.

Pomimo wysokiego „potencjału klimatycznego” amoniak znajduje się wciąż na bardzo wczesnym etapie komercjalizacji w żegludze. Kluczowe bariery jego wdrożenia obejmują brak masowej produkcji zielonego amoniaku, wysoką toksyczność, ograniczoną infrastrukturę bunkrowania oraz brak dojrzałych standardów operacyjnych. Dodatkowo istotnym ograniczeniem są wyzwania eksploatacyjne związane z jego właściwościami fizykochemicznymi, w tym wymagania dotyczące szczelności systemów, trudności w bezpiecznym magazynowaniu i obsłudze paliwa oraz konieczność stosowania zaawansowanych procedur bezpieczeństwa. Wysokie ryzyko dla załóg w przypadku wycieku lub awarii instalacji stanowi dodatkowy czynnik ograniczający jego szerokie wdrożenie w żegludze. W efekcie rozwój technologii amoniakalnych zależy nie tyle od samej technologii spalania, ile od całego łańcucha produkcyjno-logistycznego oraz zdolności do zapewnienia bezpiecznej eksploatacji.

Na obecnym etapie nie ma jeszcze szeroko eksploatowanych statków handlowych napędzanych wyłącznie amoniakiem

w skali komercyjnej. Trwają jedynie prace rozwojowe oraz testy prototypowych rozwiązań i jednostek demonstracyjnych. Oznacza to, że rzeczywiste dane eksploatacyjne dotyczące niezawodności systemów, efektywności operacyjnej, liczby awarii czy incydentów bezpieczeństwa dopiero powstaną w najbliższych latach. Dopiero na podstawie wyników ich eksploatacji, w tym rzeczywistej liczby wypadków, problemów technicznych oraz doświadczeń operacyjnych załóg będzie można wiarygodnie ocenić, czy amoniak stanie się paliwem przyszłości w żegludze, czy też zostanie ponownie odrzucony jako rozwiązanie nieprzystosowane do realiów operacyjnych sektora.

Podsumowując, amoniak należy do najbardziej obiecujących paliw zeroemisyjnych dla żeglugi, jednak w obecnym stanie technologicznym pozostaje rozwiązaniem potencjalnym, a nie w pełni wdrożonym. Najbardziej realistyczny scenariusz transformacji sektora transportu morskiego zakłada współistnienie kilku paliw przejściowych i docelowych, w tym metanolu, bio-LNG, rozwijających się napędów bateryjnych oraz stopniowo rozwijanego amoniaku. Pozostaje nam poczekać, aby dowiedzieć się, co przyniesie przyszłość.

WAŻNIEJSZE ŹRÓDŁA

- [1] Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) (2020), Fourth IMO Greenhouse Gas Study, IMO Publishing, online: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>.
- [2] Komisja Europejska (2021), „Gotowi na 55”: osiągnięcie unijnego celu klimatycznego na 2030 r. w drodze do neutralności klimatycznej, COM(2021) 550 final, Bruksela, online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550>.
- [3] Kroch E., Ammonia, Fuel for Motor Buses. J. Inst. Petroleum, czerwiec 1945, s. 213–223
- [4] Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej (2023), Rozporządzenie (UE) 2023/1805 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie stosowania paliw odnawialnych i niskoemisyjnych w transporcie morskim (FuelEU Maritime), Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 234, 22.09.2023, online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1805>.
- [5] <https://www.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php?equation=O2+%2B+NH3+%3D+N2O+%2B+H2O&hl=en>, dostęp: 11.05.2026
- [6] International Energy Agency (IEA) (2024), Global Hydrogen Review 2024, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
- [7] European Maritime Safety Agency (EMSA) (2024), Study investigating the safety of ammonia as fuel on ships. <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5264-study-investigating-the-safety-of-ammonia-as-fuel-on-ships.html>
- [8] <https://www.facebook.com/DraegerGlobal/posts/safety-first-when-working-with-ammonia-due-to-its-toxic-and-corrosive-nature-res/1179616520876980/>, dostęp: 10.05.2026
- [9] <https://www.everllence.com/company/press-releases/details/2026/04/20/ammonia-engine-passes--huge-milestone--en-route-to-commercial-debut>, dostęp: 10.5.2026
- [10] Clarksons Research (2025), Green Technology Tracker: Record Investments in Alternative Fuel. <https://www.clarksons.com/home/news-and-insights/2025/green-technology-tracker-record-investments-in-alternative-fuel/>.

Leszek Chybowski