



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu



mgr inż. Aleks Jagielski

Napęd wodorowy w kategorii pozadrogowej

PRACA DOKTORSKA

Promotor:

prof. dr hab. inż. Paweł Fuć

Streszczenie

Badania nad wprowadzeniem napędu wodorowego w maszynach kategorii „non-road” zyskują na znaczeniu w kontekście znaczącego udziału tego sektora w globalnej emisji substancji szkodliwych oraz gazów cieplarnianych. Niniejsza rozprawa doktorska analizuje zasadność wykorzystania wodorowego ogniwa paliwowego jako składnika systemu napędowego w zastosowaniach „non-road”, wykorzystując jako obiekt badawczy wielopaliwowy układ napędowy zintegrowany z jachtem motorowym. W ramach przeprowadzonych analiz dokonano kompleksowego przeglądu literatury w celu pozyskania aktualnej wiedzy dotyczącej wymagań technicznych, uwarunkowań prawnych oraz praktycznych ograniczeń związanych z integracją ogniw paliwowych w kategorii NRMM (*Non-Road Mobile Machinery*). Przegląd skoncentrowano na identyfikacji rozwiązań charakteryzujących się największym potencjałem konwersji na napęd wodorowy oraz na szczegółowej analizie regulacji prawnych wpływających na wdrażanie technologii wodorowych w sektorze NRMM. Analiza objęła systematyczną klasyfikację maszyn według ich funkcji operacyjnej, parametrów nośności oraz specyficznych wymagań eksploatacyjnych, co umożliwiło identyfikację elementów napędu potencjalnie kompatybilnych z technologią ogniw paliwowych zasilanych wodorem. Analizę przeprowadzono dla zróżnicowanego spektrum maszyn obejmującego koparki, spycharki, ciągniki rolnicze, ciężkie pojazdy użytkowe oraz jednostki pływające. Szczególnie uwzględniono maszyny charakteryzujące się wysokim zapotrzebowaniem na moc, długimi cyklami pracy oraz eksploatacją w odległych lokalizacjach, ponieważ cechy te stanowią warunki dla wykorzystania wodorowych ogniw paliwowych, które wykazują przewagę w zakresie gęstości energetycznej w porównaniu z systemami opartymi wyłącznie na akumulatorach elektrochemicznych jako źródle napędu. Zastosowanie napędu zasilanego wodorem w tego typu maszynach wiąże się z kompleksowymi wymogami regulacyjnymi, obejmującymi zarówno normy emisji substancji szkodliwych, jak i protokoły bezpieczeństwa związane z magazynowaniem oraz obsługą infrastruktury wodorowej. Przepisy Unii Europejskiej wprowadzają stopniowo bardziej rygorystyczne limity emisji dla maszyn oraz urządzeń pozadrogowych, co sprzyja przejściu na wodorowe ogniwa paliwowe jako bezemisyjną technologię alternatywną. Pomimo tego postępu, kwestie bezpieczeństwa operacyjnego, takie jak wykorzystanie wodoru w przestrzeniach zamkniętych oraz wymagania infrastrukturalne dotyczące stacji tankowania, nadal stanowią istotne wyzwania techniczne oraz ekonomiczne. W rozprawie dokonano analizy tych ograniczeń, wskazując, że mimo stopniowej adaptacji przepisów w regionach takich jak UE oraz USA, występują nadal luki w regulacjach dla sektora „non-road”, które wymagają uzupełnienia w celu umożliwienia szerszego wdrożenia technologii wodorowych. Po przeprowadzeniu przeglądu literatury oceniono możliwość praktycznego zastosowania wodorowych ogniw paliwowych w analizowanych maszynach na przykładzie katamaranu wyposażonego w wielopaliwowy układ napędowy. Analizę skoncentrowano na efektywności

energetycznej napędu, systemach magazynowania wodoru oraz niezbędnych modyfikacjach technicznych istniejących konfiguracji silnikowych. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że ogniwa paliwowe oferują istotne korzyści w zakresie redukcji emisji szkodliwych składników spalin, obniżenia poziomu hałasu oraz poprawy sprawności rzeczywistej, szczególnie w porównaniu z napędami wykorzystującymi wyłącznie silniki spalinowe, w tym głównie jednostki o zapłonie samoczynnym. Wykazano jednocześnie ograniczenia związane z wysokimi kosztami inwestycyjnymi, wyzwaniem magazynowania wodoru wynikającymi z dużych gabarytów zbiorników oraz koniecznością wzmocnienia konstrukcji maszyn w celu montażu infrastruktury technicznej obsługującej ogniwa paliwowe. W celu oceny praktycznych możliwości wykorzystania ogniw paliwowych zasilanych wodorem przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem jednostki pływającej napędzanej silnikami spalinowymi oraz porównano uzyskane wyniki z badaniami prototypu katamaranu wyposażonego w wodorowe ogniwa paliwowe.

Abstract

Research on the implementation of hydrogen propulsion in non-road machinery is gaining significance in the context of this sector's substantial contribution to global emissions of harmful substances and greenhouse gases. This doctoral dissertation analyzes the viability of utilizing hydrogen fuel cells as components of propulsion systems in non-road applications, employing a multi-fuel propulsion system integrated with a motor yacht as the research subject. Within the scope of the conducted analyses, a comprehensive review of specialized literature was performed to acquire current knowledge concerning technical requirements, legal frameworks, and practical limitations associated with fuel cell integration in this category of applications. The review focused on identifying machinery characterized by the greatest potential for conversion to hydrogen propulsion and on detailed analysis of legal regulations affecting the implementation of hydrogen technologies in the non-road mobile machinery (NRMM) sector. The analysis encompassed systematic classification of machinery according to their operational functions, load-bearing parameters, and specific operational requirements, which enabled identification of propulsion elements potentially compatible with hydrogen fuel cell technology. The analysis was conducted for a diverse spectrum of machinery including excavators, bulldozers, agricultural tractors, heavy commercial vehicles, and floating units. Priority consideration was given to machinery characterized by high power demands, extended operating cycles, and operation in remote locations, as these characteristics constitute optimal conditions for utilizing hydrogen fuel cells, which demonstrate advantages in terms of energy density compared to systems based exclusively on electrochemical batteries as propulsion sources. Implementation of hydrogen-powered propulsion in such machinery involves complex regulatory requirements, encompassing both emission standards for harmful substances and safety protocols related to hydrogen infrastructure storage and handling. European Union regulations are progressively introducing more stringent emission limits for non-road machinery and equipment, which favors the transition to hydrogen fuel cells as a zero-emission alternative technology. Despite this progress, operational safety issues, such as hydrogen utilization in confined spaces and infrastructural requirements concerning refueling stations, continue to present significant technical and economic challenges. This dissertation analyzes these limitations, indicating that despite gradual adaptation of regulations in regions such as the EU and USA, gaps remain in non-road sector regulations that require completion to enable broader implementation of hydrogen technologies. Following the literature review, the practical applicability of hydrogen fuel cells in the analyzed machinery was evaluated using a catamaran equipped with a multi-fuel propulsion system as an example. The analysis concentrated on propulsion energy efficiency, hydrogen storage systems, and necessary technical modifications to existing engine configurations. Results of the conducted research demonstrated that fuel cells offer significant benefits in terms of reducing harmful exhaust emissions, decreasing noise levels, and improving actual efficiency, particularly compared to propulsion systems utilizing

exclusively internal combustion engines, primarily compression-ignition units. Simultaneously, limitations were identified related to high investment costs, hydrogen storage challenges resulting from large tank dimensions, and the necessity of reinforcing machinery structures to accommodate technical infrastructure supporting fuel cells. To evaluate practical possibilities for utilizing hydrogen-powered fuel cells, experimental research was conducted using a combustion engine-powered floating unit, and the obtained results were compared with studies of a catamaran prototype equipped with hydrogen fuel cells.

Spis treści

Streszczenie	2
Abstract	4
Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń	8
1. Wprowadzenie.....	10
1.1. Charakterystyka maszyn pozadrogowych	10
1.2. Podział NRMM według rodzaju napędu i środowiska operacyjnego	12
1.3. Charakterystyka napędów w przemyśle jachtowym	15
2. Wybrane przepisy dotyczące emisji związków szkodliwych.....	17
2.1. Przegląd norm emisji UE.....	17
2.2. Przegląd amerykańskich norm emisji.....	18
2.3. Przegląd norm emisji w wybranych państwach poza USA oraz UE.....	20
2.4. Przepisy Unii Europejskiej dotyczące napędu wodorowego.....	22
2.5. Amerykańskie przepisy dotyczące napędu wodorowego	23
3. Wodór w transporcie	25
3.1. Właściwości fizyczne i chemiczne wodoru.....	25
3.2. Metody pozyskiwania wodoru.....	25
3.3. Klasyfikacja wodoru.....	27
3.4. Charakterystyka metod magazynowania wodoru.....	28
3.5. Transport i magazynowanie wodoru w sektorze morskim.....	29
3.6. Materiały do wykonania instalacji wodorowych w jednostkach pływających.....	34
3.7. Ogniwa paliwowe	35
3.8. Analiza stosowanych układów napędowych wykorzystujących wodór w kategorii pozadrogowej.....	39
4. Cel i zakres pracy.....	42
5. Metodologia badań.....	44
5.1. Obiekt badań.....	44
5.2. Trasy badawcze	49
5.3. Aparatura badawcza	51
5.4. Algorytm sterowania	52

6. Opracowanie algorytmu sterowania	53
6.1. Operacje w obszarze cumowania	53
6.2. Operacje w obszarze wód śródlądowych i offshore	55
7. Badania w warunkach rzeczywistych	58
7.1. Wyniki badań w warunkach rzeczywistych	58
7.2. Opracowanie modelu zużycia energii.....	63
8. Wyniki obliczeń na podstawie modelu – walidacja	68
8.1. Walidacja modelu	68
8.2. Wskaźniki emisji	71
9. Modelowanie warunków rzeczywistych.....	75
9.1. Opis modelowanych trach badawczych	75
9.2. Rejs port, zatoka, farma wiatrowa	79
10. Wnioski i podsumowanie	86
Literatura	92

Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń

a	– przyspieszenie [m/s^2]
ADR	– <i>Accord Dangereux Routier</i> – przewóz drogowy towarów niebezpiecznych
AFC	– <i>Alkaline Fuel Cell</i> – alkaiczne ogniwo paliwowe
BIM	– <i>Building Information Modeling</i> – modelowanie informacji o budynku
CAA	– <i>Clean Air Act</i> – ustawa o czystym powietrzu
CAN	– <i>Controller Area Network</i> – szeregową magistrala komunikacyjna
CEPA	– <i>Canadian Environmental Protection Act</i> – Kanadyjska Ustawa o Ochronie Środowiska
CEPiK	– Centralna Ewidencja Pojazdów i Kierowców
CF	– <i>Conformity Factor</i> – współczynnik niezgodności zanieczyszczeń
CL	– <i>Catalyst Layer</i> – warstwa katalizatora
CNG	– <i>Compressed Natural Gas</i> – sprężony gaz ziemny
CO	– <i>Carbon Monoxide</i> – tlenek węgla
CO₂	– <i>Carbon Dioxide</i> – dwutlenek węgla
CTV	– <i>Crew Transfer Vessels</i> – transportowo-serwisowa jednostka pływająca
DI	– <i>Direct Injection</i> – wtrysk bezpośredni
DPF	– <i>Diesel Particulate Filter</i> – filtr cząstek stałych silników o zapłonie samoczynnym
DMFC	– <i>Direct Methanol Fuel Cell</i> – ogniwo paliwowe zasilane bezpośrednio metanolem
DOE	– <i>Department of Energy</i> – ogniwo paliwowe zasilane bezpośrednio metanolem
ECCC	– <i>Controller Area Network</i> – szeregową magistrala komunikacyjna
EEA	– <i>European Environment Agency</i> – Europejska Agencja Środowiskowa
EPA	– <i>Environmental Protection Agency</i> – Agencja Ochrony Środowiska
FID	– <i>Flame Ionization Detector</i> – analizator płomieniowo-jonizacyjny
GDL	– <i>Gas Diffusion Layer</i> – warstwa dyfuzyjna gazu
GHG	– <i>Greenhouse Gases</i> – gazy cieplarniane
GPS	– <i>Global Positioning System</i> – globalny system pozycjonowania
HC	– <i>Hydrocarbons</i> – węglowodory
H₂	– <i>Hydrogen</i> – wodór
ICCT	– <i>International Council on Clean Transportation</i> – Międzynarodowa Rada ds. Czystego Transportu
ICE	– <i>Internal Combustion Engine</i> – silnik spalinowy
IMO	– <i>International Maritime Organization</i> – Międzynarodowa Organizacja Morska
LAN	– <i>Local Area Network</i> – wewnętrzna sieć przewodowa

MCFC	– <i>Molten Carbonate Fuel Cell</i> – ogniwo paliwowe ze stopionym węglanem
MEA	– <i>Membrane Electrode Assembly</i> – zespół elektrody membranowej
MHV	– <i>Material Handling Vehicle</i> – pojazd do transportu materiałów
MPL	– <i>Microporous Layer</i> – warstwa mikroporowata
n	– prędkość obrotowa wału korbowego [obr./min]
NDIR	– <i>Non-Dispersive Infrared</i> – analizator niedyspersyjny na promienie podczerwone
NDUV	– <i>Non-Dispersive Ultraviolet</i> – analizator niedyspersyjny na promienie ultrafioletowe
NRE	– <i>Engines for Non-road Mobile Machinery</i> – silniki do maszyn nieporuszających się po drogach
NRMM	– <i>Non-Road Mobile Machinery</i> – maszyny z kategorii pozadrogowej
PAFC	– <i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i> – ogniwo paliwowe z kwasem fosforowym
PDM	– <i>Power Distribution Module</i> – moduł dystrybucji energii
PEMFC	– <i>Proton-exchange Membrane</i> – membrana do wymiany protonów
PEMFC	– <i>Proton-exchange Membrane Fuel Cell</i> – ogniwo paliwowe z membraną do wymiany protonów
PEMS	– <i>Portable Emissions Measurement System</i> – mobilne urządzenie do pomiarów emisji spalin
PM	– <i>Particulate Matter</i> – cząstki stałe
PN	– <i>Particulate Number</i> – liczba cząstek stałych
SCR	– <i>Selective Catalytic Reduction</i> – Selektywna Redukcja Katalityczna
SOFC	– <i>Solid Oxide Fuel Cell</i> – stałotlenkowe ogniwo paliwowe
THC	– <i>Total Hydrocarbons</i> – suma węglowodorów
ZS	– silniki o zapłonie samoczynnym

1. Wprowadzenie

1.1. Charakterystyka maszyn pozadrogowych

Maszyzny pozadrogowe stanowią szeroką kategorię jednostek mobilnych, która wykracza poza intuicyjne rozumienie pojazdów nieporuszających się po drogach publicznych [149]. Zgodnie z definicją zawartą w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 z dnia 14 września 2016 roku w sprawie wymogów dotyczących wartości granicznych emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych oraz homologacji typu w odniesieniu do silników spalinowych wewnętrznego spalania przeznaczonych do maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach, terminem „maszyna mobilna nieporuszająca się po drogach” określa się „maszynę ruchomą, przewoźne urządzenie lub pojazd z nadwoziem lub kołami lub bez nadwozia lub kół, nieprzeznaczoną do przewozu pasażerów lub towarów po drogach, obejmuje maszyny montowane na podwoziach pojazdów przeznaczonych do przewozu pasażerów lub towarów po drogach” [68, 206]. Istotnym aspektem tej kategoryzacji jest fakt, że zakres maszyn pozadrogowych (non-road) obejmuje znacznie szersze spektrum urządzeń niż tradycyjne pojęcie maszyn terenowych (off-road), uwzględniając również pojazdy szynowe oraz jednostki pływające [187, 233]. Heterogeniczny charakter tej grupy technologicznej skutkuje znaczącymi różnicami w parametrach mocy poszczególnych jednostek napędowych, gdzie spektrum rozciąga się od maszyn budowlanych wyposażonych w silniki przekraczające 1000 kW mocy, po kompaktowe dwusuwowe silniki spalinowe o zapłonie iskrowym stosowane w urządzeniach pomocniczych, których moc może być mniejsza niż 1 kW [25, 196]. Dla ilustracji rozpiętości technologicznej charakteryzującej tę kategorię można zestawzić jednostkę pływającą typu katamaran wykorzystywaną w zastosowaniach badawczych z powszechnie stosowanymi kosiarkami do trawy, co podkreśla różnorodność zastosowań oraz wymagań operacyjnych w ramach jednolitej klasyfikacji prawnej (rys. 1) [165].



Rys. 1. Obiekty techniczne zakwalifikowane jako NRMM (*Non-Road Mobile Machinery*)

Globalne standaryzowanie norm emisyjnych oraz procedur badawczych dla całego zakresu pojazdów oraz maszyn, obejmujących również kategorie NRMM (*Non-Road Mobile Machinery*), koncentruje się głównie w dwóch ośrodkach legislacyjnych, którymi są Agencja Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (EPA) oraz kompetentne instytucje Unii Europejskiej [68, 225]. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska ustanowiła restrykcyjne normy emisji Tier 4 specjalnie dedykowane dla pozadrogowych silników o zapłonie samoczynnym, wprowadzając rygorystyczne ograniczenia emisji zanieczyszczeń, szczególnie tlenków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (PM), co wymusza zastosowanie zaawansowanych technologii oczyszczania spalin [37, 169]. Jednocześnie Unia Europejska wprowadzała równolegle normy Stage V, które zaimplementowano w 2019 roku i stanowią one najbardziej rygorystyczne standardy emisyjne dla maszyn pozadrogowych na świecie, wprowadzając dodatkowo limity liczby cząstek stałych (PN) oraz rozszerzając zakres regulacji na silniki małej mocy poniżej 19 kW oraz wysokiej mocy powyżej 560 kW [13, 107].

Aspekty ekonomiczne dotyczące pojazdów NRMM na rynku europejskim wykazują duże znaczenie, szczególnie w kontekście sektora sprzętu budowlanego, gdzie w ostatnich latach odnotowano znaczący wzrost wartości rynkowej, uwarunkowany intensywną urbanizacją oraz rozległymi inwestycjami infrastrukturalnymi [45]. Zgodnie z najnowszymi dostępnymi danymi rynkowymi z 2023 roku, wartość europejskiego rynku maszyn budowlanych osiągnęła poziom przekraczający 150 miliardów euro, przy czym prognozy wskazują na kontynuację wzrostowej tendencji w nadchodzących latach, mimo okresowych wahań związanych z cyklicznością gospodarczą [77]. Podobną dynamikę rozwojową obserwuje się na europejskim rynku maszyn rolniczych, gdzie rolnicy intensywnie wprowadzają zaawansowane technologie w swoich gospodarstwach w celu zwiększenia produktywności oraz dostosowania do rosnącego zapotrzebowania na żywność wynikającego ze wzrostu demograficznego oraz wymogów zrównoważonego rolnictwa [64]. W Europie szczególne znaczenie zyskuje rolnictwo precyzyjne, wykorzystujące technologie GPS, bezzałogowe systemy powietrzne oraz zaawansowane czujniki, co prowadzi do racjonalizacji zużycia zasobów oraz minimalizacji negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne [64, 71].

Postęp technologiczny wywiera wpływ na ewolucję pojazdów NRMM w Europie, gdzie integracja systemów automatyki oraz telematyki znacząco poprawia efektywność operacyjną oraz poziom bezpieczeństwa tych pojazdów klasyfikowanych jako OHV (*Off-Highway Vehicles*). Autonomiczne pojazdy, takie jak samojezdne ciągniki czy bezzałogowe ciężarówki górnicze, są intensywnie rozwijane oraz wdrażane, co redukuje zapotrzebowanie na operatorów ludzkich oraz zwiększa precyzję wykonywanych operacji technologicznych [174, 210]. Ponadto, europejskie regulacje dotyczące emisji spalin, w tym norma Stage V, wymuszają stosowanie zaawansowanych technologii napędowych oraz systemów oczyszczania spalin, co stymuluje innowacyjność w sektorze producentów maszyn [145, 14]. W transporcie morskim również następuje znaczący postęp technologiczny, szczególnie w Europie, gdzie porty oraz armatorzy dążą do zwiększenia efektywności energetycznej oraz redukcji emisji gazów

cieplarnianych, co jest szczególnie istotne, gdyż sektor ten pozostaje najbardziej zaniedbany emisyjnie w transporcie z uwagi na znaczący udział jednostek pływających wyposażonych w napędy wykonane według przestarzałych technologii. Wprowadzane są innowacyjne rozwiązania napędowe, takie jak statki zasilane skroplonym gazem ziemnym (LNG), metanolem, amoniakiem czy wykorzystujące wodór do zasilania ogniw paliwowych, a dodatkowo rozwijane są technologie żagli rotorowych oraz napędów elektrycznych dla statków krótkiego zasięgu [81, 122]. Autonomiczne statki oraz systemy zdalnego sterowania są intensywnie testowane w celu zwiększenia bezpieczeństwa oraz efektywności operacyjnej [161]. Regulacje takie jak Międzynarodowa Konwencja o Zapobieganiu Zanieczyszczaniu Morza przez Statki (MARPOL) oraz unijne dyrektywy dotyczące redukcji emisji siarki oraz tlenków azotu wpływają na modernizację floty oraz inwestycje w nowe technologie. Europejski Zielony Ład oraz strategia Fit for 55 dodatkowo stymulują sektor morski do osiągnięcia neutralności klimatycznej przez redukcję emisji gazów cieplarnianych o 55% do 2030 roku w porównaniu z poziomami z 1990 roku.

1.2. Podział NRMM według rodzaju napędu i środowiska operacyjnego

Maszyny pozadrogowe stanowią heterogeniczną kategorię urządzeń technicznych nieprzeznaczonych do eksploatacji tylko na drogach publicznych, których systematyzacja opiera się na charakterystyce oraz parametrach jednostek napędowych oraz specyfice środowiska operacyjnego. Głównie swoje funkcje maszyny tej kategorii realizują poza nimi. Silniki spalinowe, szczególnie jednostki o zapłonie samoczynnym (ZS), stanowią dominujący rodzaj napędu dla większości NRMM ze względu na ich charakterystyczny wysoki moment obrotowy oraz korzystne właściwości związane z ekonomicznością zużycia paliwa, które są ważne przy eksploatacji w trudnych warunkach terenowych. Ponadto silniki ZS są preferowane ze względu na niezrównaną niezawodność oraz zdolność do funkcjonowania w wymagających warunkach środowiskowych charakteryzujących się znacznymi wahaniami temperatur oraz wysoką zawartością cząstek stałych w atmosferze. Niemniej jednak, jednostki te znacząco przyczyniają się do degradacji jakości powietrza atmosferycznego, emitując istotne stężenia tlenków azotu (NO_x), masę oraz liczbę cząstek stałych (PM i PN), a także gazy cieplarniane (GHG), co stanowi poważne wyzwanie środowiskowe. Wzrost świadomości ekologicznej społeczeństwa oraz rosnące zrozumienie wpływu NRMM na środowisko naturalne doprowadziło do implementacji bardziej rygorystycznych norm emisyjnych. Europejskie normy emisji Stage V, obowiązujące od 2019 roku, wymagają drastycznego ograniczenia emisji NO_x oraz PM dla NRMM, wymuszając na producentach wprowadzenie zaawansowanych technologii kontroli emisji, takich jak filtry cząstek stałych (DPF) oraz systemy selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) wykorzystujące roztwory mocznika. Dotychczasowa zależność od tradycyjnych silników spalinowych jest coraz częściej kwestionowana zarówno z powodu czynników środowiskowych, jak i rosnącej

dostępności alternatywnych źródeł napędu [76]. Prowadzone są intensywne prace badawcze zmierzające do poprawy efektywności silników spalinowych, opracowania jednostek kompatybilnych z paliwami alternatywnymi oraz integracji systemów hybrydowych w celu ograniczenia negatywnego wpływu NRMM na środowisko naturalne [14, 113]. Napęd elektryczny zyskuje na atrakcyjności dla NRMM dzięki postępowi w technologii akumulatorów oraz globalnej presji na redukcję emisji szkodliwych substancji. Elektryczne pojazdy oraz maszyny o zastosowaniach pozadrogowych oferują istotne korzyści, takie jak obniżone koszty operacyjne, zredukowaną emisję akustyczną oraz zerową lokalną emisję spalin, dzięki czemu nadają się idealnie do użytku w obszarach zurbanizowanych oraz w zamkniętych środowiskach, gdzie jakość powietrza ma duże znaczenie dla zdrowia publicznego [170, 237]. Wdrożenie napędu elektrycznego w NRMM napotyka jednak znaczące wyzwania technologiczne, takie jak potrzeba akumulatorów o wysokiej gęstości energii do obsługi długotrwałych operacji oraz niedostateczny rozwój infrastruktury ładowania w odległych lokalizacjach [62, 104]. Pomimo tych ograniczeń producenci wprowadzają na rynek elektryczne modele maszyn, takich jak koparki, ładowarki oraz wózki widłowe. Przykładem jest Volvo Construction Equipment, które wprowadziło elektryczne koparki EC230 Electric (rys. 2. a) oraz ładowarki kołowe L90 Electric (rys. 2. b) o wydajności porównywalnej do ich odpowiedników z silnikami spalinowymi [235, 236]. Oczekuje się, że innowacje w technologii akumulatorów, takie jak ogniwa półprzewodnikowe, zwiększą penetrację rynkową elektrycznych NRMM, oferując wyższą gęstość energii, skrócone czasy ładowania oraz podwyższone bezpieczeństwo eksploatacyjne [23].



Rys. 2. Obiekty techniczne Volvo Construction Equipment a) EC230 Electric b) L90 Electric [235, 236]

Hybrydowe układy napędowe, łączące tradycyjne silniki spalinowe wewnętrznego spalania (ICE – internal combustion engine) z silnikami elektrycznymi, oferują równowagę między dużą mocą wyjściową konwencjonalnych jednostek a efektywnością systemów elektrycznych. Maszyny hybrydowe mogą funkcjonować w różnorodnych trybach operacyjnych, ograniczając zużycie energii przez inteligentne przełączanie lub łączenie źródeł zasilania w zależności od bieżących wymagań eksploatacyjnych [47, 148]. Hybrydowe NRMM mogą znacząco zmniejszyć zużycie paliwa oraz emisję spalin w porównaniu do maszyn z konwencjonalnym napędem spalinowym, przy czym zdolność do odzysku energii podczas hamowania umożliwia przechowywanie jej w akumulatorach lub kondensatorach do późniejszego wykorzystania [61].

Przykładem jest hybrydowa koparka hydrauliczna Komatsu PC200-8 Hybrid, która wykorzystuje elektryczny silnik-generator wahadłowy oraz superkondensator do magazynowania energii, co pozwala na oszczędność paliwa sięgającą 25% w porównaniu z maszynami konwencjonalnymi [147, 241]. Systemy hybrydowe służą jako technologia przejściowa w kierunku pełnej elektryfikacji, oferując istotne korzyści środowiskowe oraz rozwiązując niektóre ograniczenia obecnych systemów napędowych [117].

Wykorzystanie paliw alternatywnych stanowi kolejne podejście do ograniczenia negatywnego wpływu NRMM na środowisko naturalne [8]. Paliwa takie jak biodiesel, sprężony gaz ziemny (CNG), a w szczególności wodór oferują potencjalną redukcję emisji oraz mniejsze uzależnienie od paliw kopalnych [65, 173]. Biodiesel, odnawialne paliwo pochodzące z olejów roślinnych lub tłuszczów zwierzęcych, może być stosowany w aktualnie eksploatowanych silnikach ZS przy minimalnych modyfikacjach konstrukcyjnych, a jego zastosowanie powoduje redukcję emisji PM oraz gazów cieplarnianych w porównaniu z olejem napędowym [201]. Sprężony gaz ziemny (CNG), jako bardziej czysta alternatywa dla paliw kopalnych, wytwarza mniejsze stężenia NO_x , PM oraz GHG niż olej napędowy, a silniki zasilane CNG są szeroko stosowane w maszynach takich jak wózki widłowe oraz lotniskowy sprzęt obsługi naziemnej. Dostępność gazu ziemnego oraz istniejąca infrastruktura dystrybucji w wielu regionach sprawiają, że CNG stanowi praktyczną opcję paliwa alternatywnego [116]. Wodorowe ogniwa paliwowe wytwarzają energię elektryczną przez reakcję elektrochemiczną wodoru z tlenem atmosferycznym, przy czym jedynym produktem ubocznym jest para wodna [99]. Chociaż technologie te oferują znaczący potencjał jako źródła energii bezemisyjnej, nadal istnieją ograniczenia związane z produkcją, magazynowaniem oraz rozwijaniem infrastruktury tankowania wodoru [103].

Maszyny kategorii pozadrogowej NRMM w środowisku lądowym obejmują maszyny budowlane, rolnicze, leśne oraz górnicze, przy czym każda z branż, w których te maszyny są wykorzystywane, charakteryzuje się specyficznymi wymaganiami wpływającymi na konstrukcję oraz funkcjonalność maszyn [48]. Maszyny budowlane, takie jak koparki, ładowarki, dźwigi, spychacze oraz równiarki, przeznaczone są do zadań obejmujących prace ziemne, przenoszenie materiałów oraz rozwój infrastruktury [129]. Branża budowlana implementuje technologie takie jak modelowanie informacji o budynku (BIM), telematykę oraz automatyzację w celu zwiększenia wydajności oraz obniżenia kosztów operacyjnych [29]. Normy środowiskowe przyspieszają stosowanie ekologicznych technologii w sprzęcie budowlanym, gdzie elektryczne oraz hybrydowe maszyny umożliwiają firmom budowlanym realizację celów redukcji emisji, szczególnie w obszarach zurbanizowanych z rygorystycznymi przepisami dotyczącymi jakości powietrza [58].

Maszyny rolnicze NRMM obejmują ciągniki, kombajny, sadzarki oraz inne urządzenia niezbędne w nowoczesnym rolnictwie przemysłowym [41, 63]. Integracja technologii rolnictwa precyzyjnego pozwala rolnikom dostosować nakłady, takie jak nasiona, nawozy oraz pestycydy, co zwiększa plony oraz zmniejsza negatywny wpływ na środowisko naturalne

[4, 190]. Autonomiczne ciągniki oraz zrobotyzowane kombajny stanowią przełomowe rozwiązania, które obiecują znaczące unowocześnienie rolnictwa, zmniejszając zapotrzebowanie na siłę roboczą oraz zwiększając precyzję wykonywanych operacji [204, 218]. Firmy, takie jak John Deere oraz CNH Industrial, intensywnie inwestują w rozwój automatyzacji oraz łączności telematycznej, aby oferować inteligentne rozwiązania rolnicze wykorzystujące sztuczną inteligencję oraz systemy wizyjne [55, 141].

Istotny udział w kategorii NRMM ma transport morski oraz śródlądowy, gdzie statki pełnią zasadniczą rolę w globalnym handlu, rybołówstwie, produkcji energii offshore oraz transporcie, przewożąc około 90% towarów handlowych na świecie [220]. Statki tradycyjnie zasilane mazutem emitują znaczne stężenia SO_x , NO_x oraz CO_2 do atmosfery [118]. Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) wdrożyła przepisy mające na celu ograniczenie emisji tych substancji, takie jak globalny limit zawartości siarki wynoszący 0,50% od 1 stycznia 2020 roku [105, 188]. Technologie takie jak LNG, systemy elektryczne oraz hybrydowe, a także technologie wodorowe są intensywnie wdrażane w celu spełnienia tych wymagań oraz zmniejszenia emisji szkodliwych substancji [20]. Strategia IMO zakłada redukcję emisji gazów cieplarnianych z transportu śródlądowego oraz morskiego o co najmniej 50% do 2050 roku w porównaniu z poziomami z 2008 roku [88]. Transport morski oraz śródlądowy często jest interpretowany wyłącznie jako przewóz towarów, różnego rodzaju rud, kontenerów, węgla, paliwa oraz gazu [102]. Jednak należy zwrócić uwagę, że obejmuje on również szeroko pojętą działalność gospodarczą, turystykę oraz rekreację w postaci jachtów, łodzi motorowych, łodzi rybackich, jak również jednostek pływających do obsługi portów rzecznych oraz morskich [89]. Te ostatnie to holowniki, barki, pogłębiarki, jednostki ratownicze, badawcze, przeciwpożarowe, jednostki techniczne, w tym również jednostki serwisowe do obsługi farm wiatrowych określane jako CTV (*Crew Transfer Vessels*) [82, 220]. Wymienione jednostki mają szczególne znaczenie w aspekcie ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin, ponieważ operują bezpośrednio w pobliżu linii brzegowej oraz wód przybrzeżnych, co jest istotne ze względu na fakt, że jednostkowe zużycie paliwa, a w tym również emisja spalin z tych źródeł, jest znacząco wyższa w porównaniu ze źródłami emisji pojazdów oraz maszyn eksploatowanych na lądzie [27, 189]. Dlatego wszystkie nowoczesne technologie napędowe są również implementowane do tych jednostek, gdzie głównie dotyczy to montowania nowoczesnych jednostek napędowych spełniających rygorystyczne przepisy norm gazów wylotowych, jednak coraz częściej eksperymentuje się z wielopaliwowymi układami napędowymi [179, 193].

1.3. Charakterystyka napędów w przemyśle jachtowym

Charakterystyka napędów w przemyśle jachtowym wymaga szczegółowej analizy z perspektywy oddziaływania środowiskowego, ponieważ sektor ten generuje nieproporcjonalnie wysokie emisje w stosunku do liczby eksploatowanych jednostek i

faktycznego czasu ich użytkowania. Współczesne jachty i super jachty wyposażone w konwencjonalne silniki ZS emitują średnio 5672 ton CO₂ rocznie na jednostkę, co odpowiada rocznemu śladowi węglowemu 864 przeciętnych mieszkańców Unii Europejskiej, podczas gdy największe jednostki mogą generować nawet 7020 ton CO₂ rocznie – wartość przekraczającą ponad 1500-krotnie emisję przeciętnego samochodu osobowego [182, 244]. Przemysł jachtowy, szczególnie w segmencie jednostek o długości przekraczającej 24 metry, odpowiada za emisję około 16 milionów ton ekwiwalentu dwutlenku węgla rocznie w skali globalnej, co stanowi 0,05% całkowitych emisji światowych, jednak w przeliczeniu na pojedynczą jednostkę lub godzinę eksploatacji znacząco przewyższa wskaźniki charakterystyczne dla innych środków transportu [40, 178]. Z kolei jednostki pływające o długości poniżej 24 m również mają duże znaczenie w aspekcie środowiskowym, ponieważ są eksploatowane głównie o otoczeniu aglomeracji miejskich i około portowych. Spalanie paliw konwencjonalnych w silnikach jachtów generuje znaczne ilości tlenków azotu i tlenków siarki, które przyczyniają się do lokalnego pogorszenia jakości powietrza w rejonach przybrzeżnych charakteryzujących się intensywnym ruchem jednostek rekreacyjnych [80]. Badania naukowe wskazują, że sektor transportu morskiego odpowiada za 24% całkowitych emisji tlenków azotu oraz 24% emisji tlenków siarki w krajach Unii Europejskiej, przy czym jachty rekreacyjne operujące przy niskich obciążeniach silników poniżej 25% mocy znamionowej wykazują jeszcze wyższe wskaźniki emisji jednostkowych niż statki handlowe [72, 109]. Negatywny wpływ przemysłu jachtowego wykracza poza emisje gazów cieplarnianych, obejmując również fizyczne uszkodzenia ekosystemów morskich, zanieczyszczenie wód przez wycieki paliw, olejów i środków przeciwporostowych, a także hałas podwodny zakłócający migracje i komunikację zwierząt morskich [94]. Badania przeprowadzone w rezerwatach morskich wykazały, że intensywny ruch jachtowy może prowadzić do redukcji pokrywy łąk morskich o 40% oraz znacznych uszkodzeń raf koralowych przez kotwice i śruby napędowe, których regeneracja wymaga dziesiątek lat [36]. W kontekście zaostrzających się regulacji środowiskowych, takich jak normy emisji trzeciego poziomu Międzynarodowej Organizacji Morskiej obowiązujące od 2021 roku, przemysł jachtowy stanął przed koniecznością radykalnej transformacji technologicznej, gdyż systemy redukcji emisji wymagane przez nowe przepisy charakteryzują się zbyt dużą masą i złożonością konstrukcyjną do instalacji na jachtach o długości 24-40 metrów [123, 134]. W obliczu tych wyzwań alternatywne źródła napędu, zwłaszcza systemy wodorowe i hybrydowe, stanowią jedyną ścieżkę rozwoju przemysłu jachtowego zgodną z globalnymi celami klimatycznymi i rosnącymi oczekiwaniami właścicieli oraz organów regulacyjnych [92].

2. Wybrane przepisy dotyczące emisji związków szkodliwych

2.1. Przegląd norm emisji UE

Unia Europejska wprowadzała stopniowo coraz bardziej restrykcyjne normy emisyjne dla maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach (NRMM), stanowiące zasadniczy element europejskiej polityki ochrony środowiska oraz poprawy jakości powietrza atmosferycznego [78, 108]. Regulacje te są głównie kodyfikowane przez Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 z dnia 14 września 2016 roku, które precyzyjnie definiuje wartości graniczne emisji dla różnorodnych kategorii silników spalinowych, mając na celu skuteczną kontrolę oraz ograniczenie zanieczyszczeń pochodzących z maszyn samojezdnych nieporuszających się po drogach [70, 205]. Przedmiotowe rozporządzenie wprowadza najsurowsze na świecie standardy dotyczące redukcji emisji tlenków azotu (NO_x), cząstek stałych pod względem masy (PM) oraz liczby (PN), węglowodorów (HC), a także tlenku węgla (CO), przy czym normy Stage V obowiązują od 2019 roku dla większości kategorii silników w zależności od ich mocy nominalnej (tab. 1) [15, 76, 46].

Tabela 1. Limity emisji UE dla maszyn samojezdnych nieporuszających się po drogach
(Rozporządzenie UE 2016/1628)

Składnik toksyczny	Limity normy IIIA (g/kWh)	Limity normy IV (g/kWh)	Limity normy V (g/kWh)
NO_x	3,3	0,4	0,4
PM	0,025	0,015	0,015
HC	0,19	0,19	0,19
CO	5,0	5,0	5,0

Akty prawne regulujące problematykę emisji z maszyn pozadrogowych:

- Rozporządzenie (UE) 2016/1628 stanowi fundamentalny akt prawny określający rygorystyczne wymogi dotyczące emisji gazów szkodliwych oraz cząstek stałych z silników spalinowych wewnętrznego spalania zainstalowanych w maszynach mobilnych nieporuszających się po drogach, wprowadzając najsurowsze na świecie standardy emisyjne Stage V.
- Dyrektywa 2000/25/WE, mimo iż została formalnie uchylona wraz z wejściem w życie Rozporządzenia 2016/1628, zapewniła historyczne podstawy prawne dla regulacji emisji NRMM oraz odegrała zasadniczą rolę w kształtowaniu obecnej polityki emisyjnej Unii Europejskiej, szczególnie w zakresie metodologii badań oraz kategoryzacji silników.
- Dyrektywa 97/68/WE również wywarła istotny wpływ na standaryzację procedur testowania emisji przed jej włączeniem do aktualnie obowiązującego rozporządzenia 2016/1628, ustanawiając pierwsze kompleksowe normy dla silników spalinowych

stosowanych w maszynach pozadrogowych oraz wprowadzając podstawowe kategorie mocy.

W celu zapewnienia zgodności z normami emisji spalin, Unia Europejska wprowadzała obowiązkowe przeprowadzanie trzech kategorii testów: testów homologacyjnych weryfikujących zgodność silnika z przepisami przed wprowadzeniem na rynek, testów na linii produkcyjnej kontrolujących jakość produkcji seryjnej oraz testów w rzeczywistych warunkach eksploatacji wykorzystujących przenośne systemy pomiaru emisji (PEMS), które zapewniają, że silniki nadal spełniają normy emisji w rzeczywistych warunkach operacyjnych (tab. 2) [26, 98, 143]. Systemy PEMS, stanowiące zaawansowane urządzenia pomiarowe wyposażone w analizatory gazów, przepływomierze spalin, stacje meteorologiczne oraz systemy GPS, umożliwiają precyzyjne monitorowanie emisji węglowodorów (HC), tlenku węgla (CO), dwutlenku węgla (CO₂), tlenków azotu (NO_x) oraz cząstek stałych (PM) w rzeczywistych warunkach eksploatacji maszyn [6, 60].

Tabela 2. Wymogi dotyczące badań emisji dla NRMM w UE

Typ testu	Opis	Mierzone parametry
Homologacja typu	Testowanie silników na zgodność z przepisami przed wejściem na rynek	NO _x , PM, HC, CO
Zgodność użytkowania	Testy drogowe/terenowe z PEMS	NO _x , PM
Testowanie linii produkcyjnej	Zapewnia stałą zgodność produkowanych silników	PM, NO _x , CO, HC

2.2. Przegląd amerykańskich norm emisji

W Stanach Zjednoczonych kontrola emisji pochodzących z jednostek mobilnych nieporuszających się po drogach jest realizowana przez Agencję Ochrony Środowiska (*Environmental Protection Agency* - EPA) w oparciu o przepisy ustawy o czystym powietrzu (*Clean Air Act*) [38, 222]. Amerykańskie standardy EPA Tier, obejmujące progresywną sekwencję od Tier 1 do Tier 4, precyzyjnie określają dopuszczalne poziomy emisji tlenków azotu (NO_x), cząstek stałych (PM), węglowodorów (HC) oraz tlenku węgla (CO) dla różnorodnych kategorii silników z grupy pozadrogowych [53, 110, 215]. Normy Tier 4, obowiązujące w pełnym zakresie od 2015 roku po etapowym wprowadzaniu rozpoczętym w 2008 roku, wprowadziły najbardziej restrykcyjne limity mające na celu drastyczne ograniczenie emisji z jednostek terenowych, wymuszając szersze zastosowanie zaawansowanych technologii oczyszczania spalin, takich jak filtry cząstek stałych (DPF) oraz systemy selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) wykorzystujące roztwór mocznika o komercyjnej nazwie AdBlue [32, 106, 221]. Implementacja standardów Tier 4 wymagała jednoczesnego wprowadzenia ultraczystego oleju napędowego (ULSD) o zawartości siarki

nieprzekraczającej 15 ppm, co było niezbędne dla prawidłowego funkcjonowania wrażliwych na siarkę technologii katalitycznych [18, 49]. Porównując standardy Tier 1 z Tier 4, osiągnięto redukcję emisji NO_x oraz PM o 96%, przy czym koszty dodatkowego wyposażenia emisyjnego szacowane są na 1-3% całkowitej ceny sprzętu, co według EPA zostanie skompensowane oszczędnościami wynikającymi z poprawy efektywności paliwowej (tab. 3) [191, 224].

Tabela 3. Porównanie norm emisji poziomów EPA dla silników o zapłonie samoczynnym nieporuszających się po drogach

Tier	NO _x (g/kWh)	PM (g/kWh)	HC (g/kWh)	CO (g/kWh)	Rok wprowadzenia
Tier 1	9,2	0,54	1,3	11,4	1996
Tier 2	7,4	0,45	0,8	5,0	2001
Tier 4	0,4	0,02	0,19	5,0	2014

Zasadnicze dokumenty prawne stanowiące fundamenty amerykańskiego systemu kontroli emisji:

- Ustawa o czystym powietrzu (*Clean Air Act* – CAA), skodyfikowana w tytule 42 kodeksu Stanów Zjednoczonych pod paragrafem 7401 i następnymi, stanowi fundamentalny akt prawny upoważniający Agencję Ochrony Środowiska (EPA) do kompleksowego regulowania zanieczyszczeń atmosferycznych pochodzących zarówno ze źródeł stacjonarnych, jak i mobilnych, w tym do ustanawiania Krajowych Standardów Jakości Powietrza Atmosferycznego (NAAQS) w celu ochrony zdrowia publicznego oraz dobrobytu społecznego.
- Część 40 Kodeksu Przepisów Federalnych, paragraf 1039 (40 CFR Part 1039), stanowi szczegółową sekcję przepisów federalnych, która w sposób kompleksowy reguluje normy emisji dla silników spalinowych o zapłonie samoczynnym, obejmując wymagania certyfikacyjne, procedury testowe oraz limity emisji NO_x, PM, HC i CO dla różnych kategorii mocy silników od modelowego roku 2008.
- Normy EPA Tier 4, wprowadzone jako najnowsze i najbardziej restrykcyjne standardy emisyjne, koncentrują się na implementacji zaawansowanych technologii kontroli emisji, takich jak filtry cząstek stałych (DPF) oraz systemy selektywnej redukcji katalitycznej (SCR), wymagając jednoczesnego wprowadzenia ultraczystego oleju napędowego (ULSD) o zawartości siarki nieprzekraczającej 15 ppm.

Procedury testowe oraz certyfikacyjne dla silników niedrogowych obejmują wieloetapowy system weryfikacji zgodności, gdzie testy certyfikacyjne przeprowadzane na prototypach silników weryfikują zgodność z przepisami przed wprowadzeniem na rynek, natomiast testy na linii produkcyjnej zapewniają ciągłą zgodność produkowanych seryjnie jednostek z wymaganymi standardami emisyjnymi [31, 227]. Krajowe Laboratorium Emisji Pojazdów i Paliw EPA (*National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory* - NVFEL), zlokalizowane

w Ann Arbor w stanie Michigan, odgrywa istotną rolę w testowaniu oraz egzekwowaniu przepisów dotyczących emisji, będąc akredytowanym według ISO/IEC 17025:2017 i certyfikowanym ISO 14001:2015 ośrodkiem badawczym wyposażonym w zaawansowane hamownie oraz systemy analityczne służące do precyzyjnego pomiaru emisji z szerokiej gamy pojazdów i silników [176, 226, 228]. NVFEL przeprowadza testy certyfikacyjne i zgodności dla wszystkich nowych samochodów osobowych oraz ciężarówek, wykorzystując standardowe cykle jezdne symulujące różnorodne warunki jazdy, w tym miejskie, autostradowe oraz agresywne, a także warunki zimne i gorące, zapewniając tym samym kompleksową weryfikację skuteczności systemów kontroli emisji przez okres użyteczności pojazdu wynoszący 120-150 tysięcy mil [83, 219].

2.3. Przegląd norm emisji w wybranych państwach poza USA oraz UE

Inne kraje, szczególnie Japonia oraz Kanada, wprowadziły kompleksowe normy emisyjne dla maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach, charakteryzujące się ścisłą harmonizacją z regulacjami obowiązującymi w Unii Europejskiej oraz Stanach Zjednoczonych, co odzwierciedla globalny trend względem standardów emisyjnych w celu ułatwienia handlu międzynarodowego oraz ujednolicenia wymagań technicznych [50, 192]. Japońskie Ministerstwo Środowiska (*Ministry of the Environment* – MOE) oraz Ministerstwo Gruntów, Infrastruktury, Transportu i Turystyki (MLIT) regulują emisje z maszyn nieporuszających się po drogach w oparciu o ustawę o kontroli zanieczyszczenia powietrza (*Air Pollution Control Law*, Act No. 51 z 2005 roku), która dzieli regulowane jednostki na dwie kategorie: pojazdy specjalne (Special Motor Vehicles) zarejestrowane do użytku na drogach publicznych oraz pojazdy pozadrogowe specjalne (*Non-road Special Motor Vehicles*) przeznaczone wyłącznie do eksploatacji poza drogami publicznymi [2, 3, 139]. Japońskie standardy emisyjne, opracowane na podstawie rekomendacji Centralnej Rady Środowiskowej (*Central Environment Council* - CEC), są bezpośrednio zharmonizowane z amerykańskimi normami EPA Tier 3 i Tier 4, przy czym limity emisji obowiązują dla silników o mocy 19-560 kW oraz obejmują identyczne substancje regulowane: tlenki azotu (NO_x), cząstki stałe (PM), węglowodory (HC) oraz tlenek węgla (CO) [16, 52, 166].

Kanadyjskie Ministerstwo Środowiska i Zmian Klimatycznych (*Environment and Climate Change Canada* - ECCC), działając w oparciu o kanadyjską ustawę o ochronie środowiska z 1999 roku (*Canadian Environmental Protection Act 1999* - CEPA 1999), wprowadziło kompleksowy system harmonizacji z normami EPA w ramach kanadyjsko-amerykańskiego porozumienia o jakości powietrza z 1991 roku [57, 91, 216]. Kanadyjskie regulacje przyjmują zasadę uznawania certyfikatów emisyjnych EPA, co oznacza, że silniki certyfikowane przez EPA i sprzedawane jednocześnie w Kanadzie oraz Stanach Zjednoczonych muszą spełniać identyczne standardy emisyjne w obu krajach, przy czym większość maszyn sprzedawanych w Kanadzie wykorzystuje właśnie tę ścieżkę certyfikacji [51, 157]. Istotną różnicą między

kanadyjskim a amerykańskim systemem regulacyjnym jest wprowadzanie norm emisyjnych z kilkuletnim opóźnieniem w stosunku do odpowiednich regulacji EPA, szczególnie w przypadku silników pozadrogowych, gdzie kanadyjskie daty wejścia w życie są przesunięte o 2-4 lata w stosunku do pierwotnego amerykańskiego harmonogramu [90, 185]. Dodatkowo, kanadyjski system nie obejmuje programów uśredniania, gromadzenia i handlu emisjami (*Averaging, Banking and Trading* - ABT), które są dostępne w ramach amerykańskich regulacji EPA (tab. 4) [56].

Tabela 4. Porównanie norm emisji dla NRMM w UE, USA, Japonii i Kanadzie [50, 52, 57]

Region/Państwo	NO _x (g/kWh)	PM (g/kWh)	Metodologia testowania	Organ regulacyjny
UE	0,4	0,015	Laboratorium, PEMS	Komisja Europejska
USA	0,4	0,02	Laboratorium, testowanie na miejscu	Agencja Ochrony Środowiska (EPA)
Japonia	0,7	0,03	Laboratorium	Ministerstwo Środowiska
Kanada	Zharmonizowane z USA	Zharmonizowane z USA	Laboratorium, testowanie na miejscu	Środowisko i zmiany klimatu w Kanadzie

Fundamentalne akty prawne regulujące emisje z maszyn pozadrogowych w Japonii i Kanadzie:

- Japońska ustawa o kontroli zanieczyszczenia powietrza (*Air Pollution Control Act - Taiki Osen Boshi Ho*), początkowo uchwalona w 1968 roku jako akt nr 97 i kompleksowo zrewidowana w 2005 roku pod numerem 51, stanowi podstawowy akt prawny regulujący emisje zanieczyszczeń atmosferycznych z wszystkich źródeł mobilnych i stacjonarnych, w tym pojazdów oraz urządzeń nieporuszających się po drogach publicznych. Ustawa ta upoważnia Ministerstwo Środowiska oraz prefektury do ustanawiania standardów jakości powietrza atmosferycznego, limitów emisji dla różnych kategorii źródeł zanieczyszczeń oraz procedur certyfikacji i kontroli zgodności, przy czym szczególne znaczenie ma wprowadzony w 2005 roku system regulacji emisji z pozadrogowych pojazdów specjalnych (*Non-road Special Motor Vehicles*) obejmujący maszyny budowlane, rolnicze oraz przemysłowe. Regulacje japońskie wprowadzają dwustopniową strukturę kontroli obejmującą zarówno certyfikację typów silników przed wprowadzeniem na rynek, jak i okresowe kontrole zgodności w trakcie eksploatacji, przy czym odpowiedzialność za zapewnienie zgodności spoczywa zarówno na producentach silników, jak i końcowych użytkownikach maszyn.
- Kanadyjska ustawa o ochronie środowiska (*Canadian Environmental Protection Act 1999 - CEPA 1999*), uchwalona jako rozdział 33 ustaw z 1999 roku i będąca

podstawowym aktem prawnym w dziedzinie ochrony środowiska w Kanadzie, upoważnia Ministerstwo Środowiska i Zmian Klimatycznych (ECCC) do kompleksowego regulowania emisji z różnorodnych źródeł oraz egzekwowania zgodności z ustanowionymi normami na terytorium całego kraju. Na podstawie tej ustawy, kanadyjski system regulacyjny przyjmuje zasadę automatycznej harmonizacji z normami amerykańskiej EPA, co oznacza, że kanadyjskie regulacje dotyczące emisji z silników pozadrogowych są w praktyce identyczne z odpowiednimi amerykańskimi standardami, z wyjątkiem dat wejścia w życie, które mogą być przesunięte o 2-4 lata w stosunku do pierwotnego amerykańskiego harmonogramu. CEPA 1999 przewiduje również kompleksowy system kar oraz sankcji za naruszenie przepisów emisyjnych, obejmujący grzywny do 1 miliona dolarów kanadyjskich dla osób fizycznych oraz do 6 milionów dolarów kanadyjskich dla korporacji, przy czym w przypadku poważnych naruszeń możliwe jest również orzekanie kar pozbawienia wolności do 3 lat. Egzekwowanie zgodności odbywa się przez system inspektorów środowiskowych upoważnionych przez ECCC do przeprowadzania kontroli u producentów, importerów oraz użytkowników końcowych, a także przez program dobrowolnego zgłaszania naruszeń oraz współpracę z organizacjami branżowymi w zakresie edukacji i zwiększania świadomości.

2.4. Przepisy Unii Europejskiej dotyczące napędu wodorowego

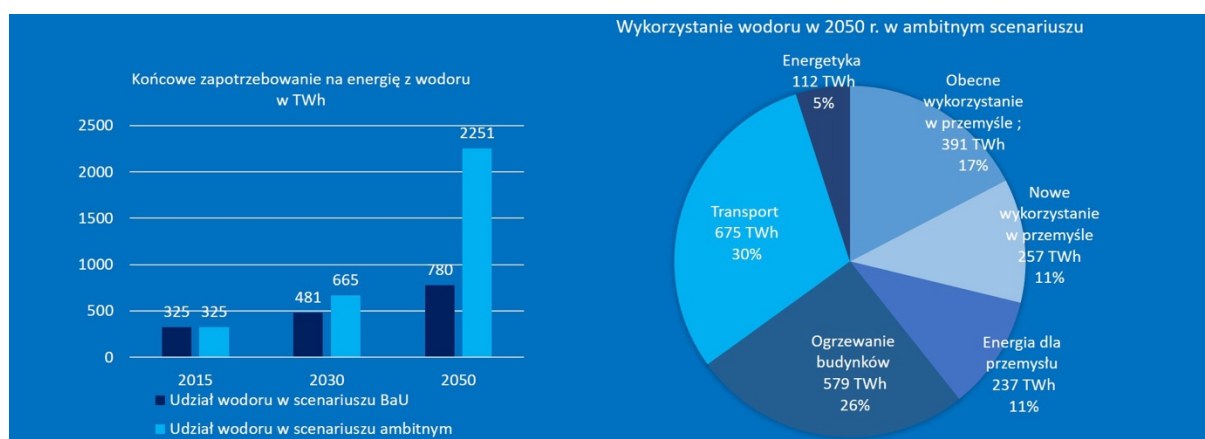
W strategicznych dokumentach Unii Europejskiej wodór jest postrzegany jako ważny nośnik energii alternatywnej, umożliwiający dekarbonizację różnych sektorów transportu, w tym maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach [66]. Unijna strategia wodorowa przyjęta w 2020 roku (rys. 3) określa ramy polityki i cele ilościowe dla wdrażania technologii wodorowych w przemyśle, energetyce oraz transporcie, zaś w odniesieniu do NRMM nakreśla konieczność pilotażowych projektów i wsparcia badawczo-rozwojowego w obszarze ogniw paliwowych oraz magazynowania wodoru [69]. Równolegle Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie infrastruktury paliw alternatywnych (AFID), w brzmieniu obowiązującym od 2014 roku, zobowiązuje państwa członkowskie do tworzenia sieci stacji tankowania wodoru wzdłuż głównych korytarzy transportowych oraz w portach, co pośrednio sprzyja rozwojowi rozwiązań technologicznych dla NRMM z napędem wodorowym, gwarantując dostępność paliwa w miejscach operacji terenowych [54, 67]. Wdrożenie tych aktów prawnych stwarza warunki regulacyjne i infrastrukturalne niezbędne do popularyzacji wodorowych ogniw paliwowych w maszynach budowlanych, rolniczych oraz jednostkach pływających pracujących w strefach przybrzeżnych i portowych [85].

Odpowiednie dokumenty:

- Strategia wodorowa UE (2020): dokument wytycza szczegółowy plan integracji technologii wodorowych w sektorach przemysłowych, energetycznych

i transportowych, w tym promuje pilotażowe wdrożenia ogniw paliwowych oraz rozbudowę infrastruktury magazynowania i dystrybucji wodoru.

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE w sprawie infrastruktury paliw alternatywnych: akt obligujący państwa członkowskie do wdrożenia sieci stacji tankowania alternatywnych paliw, w tym wodoru, wzdłuż głównych korytarzy transportowych oraz w portach, co pośrednio wspiera rozwój rozwiązań napędowych dla maszyn pozadrogowych.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1242: reguluje limity emisji CO₂ dla nowych pojazdów ciężarowych o dużej ładowności (HDV), tworząc standardy zrównoważonego transportu drogowego, które wpływają na rozwój technologii napędowych również w sektorze maszyn nieporuszających się po drogach przez transfer innowacji i wymogi w zakresie redukcji śladu węglowego.



Rys. 3. Planowane cele strategii wodorowej UE w 2050 r. [243]

2.5. Amerykańskie przepisy dotyczące napędu wodorowego

W Stanach Zjednoczonych rozwój napędu wodorowego w maszynach pozadrogowych znajduje się we wczesnej fazie, napędzany przede wszystkim zapisami Ustawy o polityce energetycznej (*Energy Policy Act*) z 1992 roku oraz szeregiem inicjatyw stanowych wspierających paliwa alternatywne [55, 230]. Kalifornia, realizując program Hydrogen Highway Network, wyznacza standardy w zakresie budowy stacji tankowania wodoru, tworząc modelową sieć wodorowych autostrad na skalę światową [33, 34]. Na szczeblu federalnym Departament Energii (DOE) oraz Agencja Ochrony Środowiska (EPA) prowadzą programy pilotażowe, których celem jest ocena technologii ogniw paliwowych zasilanych wodorem w zastosowaniach pozadrogowych (tab. 5), choć odrębnych przepisów emisji dla NRMM napędzanych wodorem wciąż brakuje [223, 231].

Odpowiednie dokumenty:

- Ustawa o polityce energetycznej (*Energy Policy Act*) z dnia 24 października 1992 r. wspiera wdrażanie paliw alternatywnych, w tym wodoru.

- California Hydrogen Highway Network: stanowy program rozwoju infrastruktury wodorowej, promujący budowę sieci stacji tankowania na terenie Kalifornii.
- „Hydrogen Program Plan” Departamentu Energii USA: dokument przedstawiający federalne strategie w zakresie przyjęcia wodoru w sektorze transportu, zawierający odniesienia do zastosowań pozadrogowych.

Tabela 5. Amerykańskie strategie i programy wspierające napęd wodorowy w kategorii pozadrogowej [55, 223, 231]

Program/Legislacja	Opis	Agencja wdrażająca	Rok wprowadzenia
Ustawa o polityce energetycznej	Wspiera paliwa alternatywne, w tym wodór	Departament Energii	1992
Kalifornijska autostrada wodorowa	Ustanawia państwową infrastrukturę wodorową	Kalifornijska Rada Zasobów Powietrza	2004
Plan amerykańskiego programu wodorowego	Federalna strategia na rzecz przyjęcia wodoru	Departament Energii	2020

3. Wodór w transporcie

3.1. Właściwości fizyczne i chemiczne wodoru

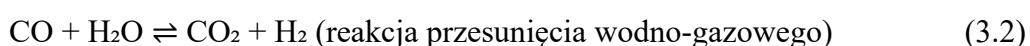
Wodór jako najlżejszy i najpowszechniej występujący pierwiastek we Wszechświecie, stanowi około 75% jego masy pierwiastkowej. W normalnych warunkach temperatura–ciśnienie tworzy dwuatomową postać H_2 , w której dwa atomy łączą się w stabilną cząsteczkę. Jako paliwo wodorowe może istotnie ograniczyć emisję gazów cieplarnianych, co jest istotne w walce ze zmianami klimatu. Ogniwa paliwowe przetwarzają zawartą w wodorze energię chemiczną na elektryczną z efektywnością zwykle mieszczącą się w przedziale 40–60%, a nawet do 85% w układach skojarzonego wytwarzania ciepła i prądu, przewyższając sprawność silników spalinowych, która wynosi od 25% do 45% [115]. Wodór można wytwarzać z dostępnych lokalnie surowców, takich jak wody gruntowe, gaz ziemny, biomasa czy źródła odnawialne (wiatr, słońce), co zmniejsza zależność od importowanych paliw i poprawia bezpieczeństwo energetyczne [229]. Pomimo zalet, technologie wodorowe spotykają się z kilkoma istotnymi wyzwaniami:

- magazynowanie i transport: niska objętościowa gęstość energii wodoru wymaga przechowywania pod wysokim ciśnieniem lub w warunkach kriogenicznych, co jest kosztowne i trudne technicznie,
- wymagania dotyczące infrastruktury: powszechne wykorzystanie wodoru wymaga znacznych inwestycji w zakłady produkcyjne, sieci dystrybucji i stacje tankowania,
- emisje związane z produkcją: obecnie większość wodoru jest produkowana z paliw kopalnych, zwłaszcza gazu ziemnego, co prowadzi do znacznych emisji CO_2 , chyba że zastosowane zostaną technologie wychwytywania i składowania CO_2 (CCS).

3.2. Metody pozyskiwania wodoru

Metody wytwarzania wodoru dzielą się według surowców oraz procesów technologicznych na trzy główne kategorie: termochemiczne, elektrochemiczne i biologiczne, a nowe badania skupiają się przede wszystkim na zwiększeniu efektywności energetycznej, obniżeniu kosztów wytwarzania oraz ograniczeniu oddziaływania na środowisko [114]. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem w przemyśle jest reforming metanu parą wodną, który odpowiada za około 48% światowej produkcji wodoru. Polega na przepuszczeniu gazu ziemnego zawierającego głównie CH_4 przez parę wodną w temperaturze 700–1000 °C, co generuje mieszaninę H_2 , CO oraz CO_2 w stosunkowo niewielkich ilościach.

Reakcje:



Najważniejsze kierunki innowacji w produkcji wodoru obejmują szereg procesów termicznych, elektrochemicznych oraz biologicznych, z ostatnimi badaniami skoncentrowanymi na podniesieniu sprawności, ograniczeniu kosztów i zminimalizowaniu oddziaływania na środowisko. W sektorze termochemicznym modernizowane są instalacje reformingu parowego, gdzie dodanie zintegrowanego wychwytywania CO₂ (CCS) pozwala ograniczyć emisje pochodzące z procesów SMR, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej wydajności operacyjnej. Równocześnie rozwija się wykorzystanie biogazu jako odnawialnego surowca, co czyni produkcję bardziej zrównoważoną, ponieważ odnawialne paliwa zmniejszają ogólny ślad węglowy instalacji [115]. Zgazowanie węgla, stanowiące technologię transformacji węgla w gaz syntezowy, zyskuje na efektywności dzięki wprowadzeniu zintegrowanego cyklu IGCC, łączącego zgazowanie z turbiną parową oraz CCS, co minimalizuje emisje CO₂ i zwiększa sprawność całego układu. W obszarze gazyfikacji biomasy prowadzone są prace nad gazyfikatorami fluidalnymi i plazmowymi, a odpowiednio dobrane katalizatory redukują straty spowodowane tworzeniem się smoły, co przekłada się na wyższą wydajność procesu i mniejszą ilość odpadów [229]. Elektroliza wody, obejmująca technologie alkaliczną, protonowo-wymienną (PEM) oraz ogniwo SOEC, staje się coraz bardziej atrakcyjna dzięki postępom w materiałach elektrolizerów, integracji z odnawialnymi źródłami energii oraz rozwijaniu instalacji o mocy przekraczającej 100 MW, co stwarza perspektywy masowej produkcji zielonego wodoru. Fotoelektrochemiczne rozszczepianie wody (PEC) wykorzystuje półprzewodnikowe fotoelektrody do bezpośredniej konwersji energii słonecznej w chemiczną, a ulepszone ogniwa tandemowe oraz modyfikacje powierzchni zwiększają absorpcję światła i trwałość materiałów, co poprawia stabilność i wydajność całego systemu. W dziedzinie bioprodukcji wodoru zarówno w świetlnej, jak i ciemnej fermentacji, trwają zaawansowane prace nad inżynierią genetyczną mikroorganizmów — w tym alg i cyjanobakterii — aby zwiększyć tempo wytwarzania wodoru oraz ich tolerancję na tlen, a także nad projektowaniem bioreaktorów zwiększających efektywność warunków hodowli przy wykorzystaniu odpadów rolniczych i ścieków przemysłowych jako substratów, co sprzyja ekonomicznej i ekologicznej produkcji na dużą skalę [66]. Piroliza metanu rozkłada metan na wodór i stały węgiel bez emisji CO₂:



Najnowsze osiągnięcia w dziedzinie produkcji wodoru obejmują zaawansowane metody katalityczne, termochemiczne oraz plazmowe, które mają na celu zwiększenie szybkości reakcji, poprawę skalowalności i ograniczenie kosztów operacyjnych. W obszarze katalizy rozwijane są stopione metaliczne katalizatory charakteryzujące się wysoką aktywnością i trwałością, a równocześnie powstają pilotażowe instalacje pozwalające zweryfikować ich efektywność w warunkach przemysłowych [115]. Termochemiczne rozszczepianie wody wykorzystuje wysokotemperaturowe reakcje, które umożliwiają podział cząsteczki H₂O na wodór i tlen przy

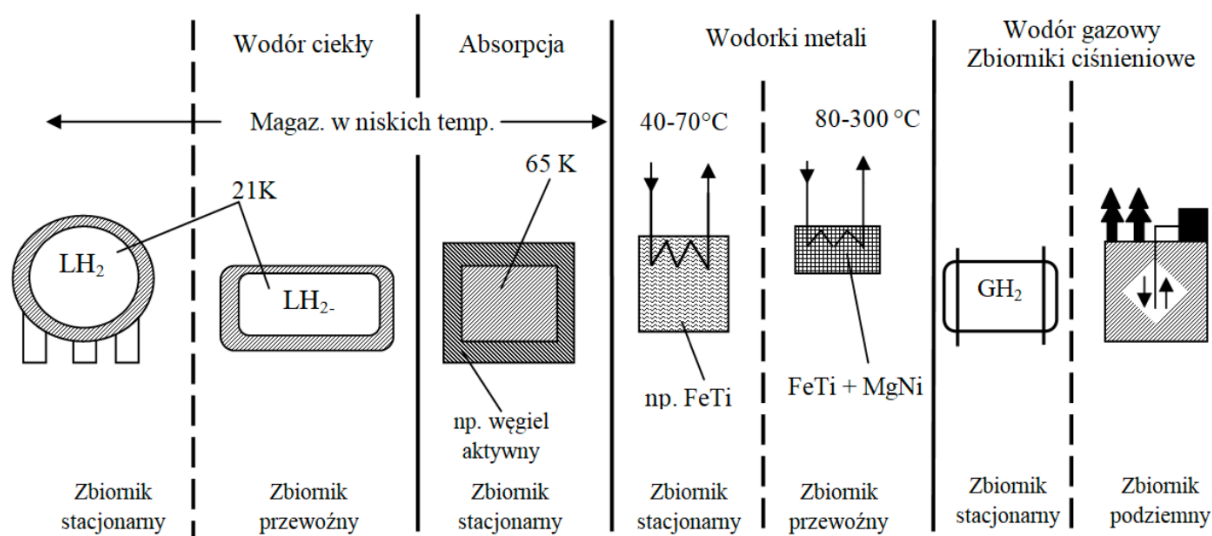
użyciu ciepła zewnętrznego. Cykl siarkowo-jodowy stanowi jeden z najbardziej perspektywicznych procesów, w którym wodór i tlen uzyskuje się przez kolejno przeprowadzane etapy reakcji z udziałem kwasu siarkowego i jodu, a najnowsze prace integrują te procesy z wysokotemperaturowymi reaktorami jądrowymi, co zapewnia stałe źródło niezbędnej energii cieplnej [144]. Wśród nowatorskich technologii plazmowych szczególną uwagę poświęca się mikrofalowej aktywacji gazu, gdzie plazma wzmacnia endotermiczne reakcje w niższych temperaturach, a hybrydowe systemy łączą plazmę z katalizatorami, co przekłada się na wyższą wydajność wytwarzania wodoru przy jednoczesnym obniżeniu zużycia energii [229].

3.3. Klasyfikacja wodoru

Charakterystyka wodoru jako nośnika energii jest tożsama niezależnie od zastosowanej metody produkcji, jednak międzynarodowa klasyfikacja kolorystyczna przyjmuje się w celu zróżnicowania źródeł pochodzenia oraz stopnia oddziaływania na środowisko procesu wytwarzania [115]. Ta umowna konwencja barwna pozwala na szybką identyfikację metod produkcyjnych oraz ocenę ich wpływu na emisję gazów cieplarnianych, co jest szczególnie istotne w kontekście polityk dekarbonizacyjnych. Zielony wodór stanowi najbardziej pożądaną kategorię z perspektywy ochrony środowiska, ponieważ jest wytwarzany w procesie elektrolizy wody zasilanej wyłącznie energią pochodzącą z odnawialnych źródeł, takich jak instalacje fotowoltaiczne, farmy wiatrowe czy elektrownie wodne [186]. Proces ten charakteryzuje się zerową emisją CO₂ podczas produkcji, co czyni go podstawowym elementem strategii neutralności klimatycznej. Szary wodór, obecnie dominujący w globalnej produkcji na poziomie około 75% całkowitej podaży, powstaje w procesie reformingu parowego gazu ziemnego bez zastosowania technologii wychwytywania CO₂, co powoduje emisję 9-12 kg dwutlenku węgla na każdy kilogram wyprodukowanego wodoru. Niebieski wodór wykorzystuje identyczną technologię reformingu parowego, jednak jest wyposażony w systemy wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (CCS), co redukuje emisję o 85-95% w porównaniu z wodorem szarym, czyniąc go technologią przejściową między konwencjonalnymi a w pełni zrównoważonymi metodami produkcji [184]. Turkusowy wodór reprezentuje innowacyjną metodę pirolizy metanu, w której gaz ziemny rozkłada się termicznie na wodór oraz stały węgiel bez wytwarzania CO₂, przy czym proces ten wymaga zasilania energią odnawialną [160]. Różowy wodór powstaje w elektrolizie wody zasilanej energią jądrową, wykorzystując stabilność produkcji energii nuklearnej do wytwarzania czystego paliwa wodorowego [162]. Brązowy oraz czarny wodór są wytwarzane przez zgazowanie odpowiednio węgla brunatnego i kamiennego, charakteryzując się najwyższą emisyjnością wśród wszystkich kategorii, wynoszącą około 20 kg CO₂ na kilogram wodoru. Istnieją również kategorie białego wodoru naturalnie występującego w złożach geologicznych oraz żółtego wodoru produkowanego przez mieszkankę różnych źródeł energii, choć te klasyfikacje są rzadziej stosowane w literaturze technicznej [209].

3.4. Charakterystyka metod magazynowania wodoru

Magazynowanie i transport wodoru stanowią istotne a można nawet stwierdzić, że oprócz ceny, główne ograniczenie dla jego szerszego zastosowania w transporcie, wynikające z właściwości tego gazu oraz wymagań bezpieczeństwa (rys. 4). Wodór cechuje się niską gęstością objętościową, wysoką palnością i spalaniem w bardzo wysokich temperaturach, co wymaga wdrożenia zaawansowanych systemów ochrony przed wyciekami i detonacją [115]. W praktyce przemysłowej wodór jest przechowywany w dwóch głównych formach. W pierwszym przypadku wodór skrapla się do postaci ciekłej w temperaturze około $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ i utrzymuje się w zbiornikach o specjalnej izolacji kriogenicznej, gdzie warunkiem intratności jest minimalizacja strat przez parowanie oraz zachowanie ciśnienia zbliżonego do atmosferycznego [229]. Drugą opcją jest magazynowanie wodoru w postaci sprężonej do ciśnienia dochodzącego do 700 bar, wymagające zastosowania certyfikowanych butli stalowych o wzmocnionej konstrukcji [66]. Choć sprężony wodór oferuje relatywnie wyższą gęstość energii na jednostkę objętości w porównaniu z wersją ciekłą, nadal ustępuje tradycyjnym paliwom kopalnym. Obie metody, określane jako fizyczne sposoby magazynowania, są obarczone potencjalnym ryzykiem wycieków i wybuchów, co wymusza rygorystyczne procedury testów ciśnieniowych, kontroli szczelności oraz systemów detekcji i wentylacji [145, 66].



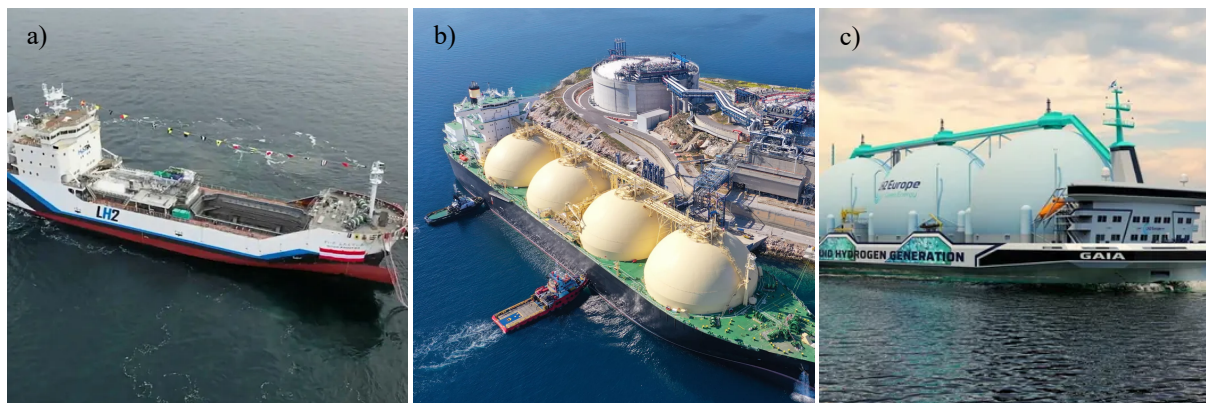
Rys. 4. Metody magazynowania wodoru

Alternatywną metodą przechowywania wodoru są związki absorpcyjne, które wiążą cząsteczki H_2 w temperaturze pokojowej i przy ciśnieniu atmosferycznym i uwalniają je po podgrzaniu do $200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jednym z najbardziej efektywnych sorbentów jest pallad, zdolny pomieścić wodór w stosunku objętościowym 1:850, jednak jego powszechne użycie ogranicza wysoki koszt metalu [97]. Obecnie największe nadzieje wiąże się z nanomateriałami o dużej powierzchni właściwej, które przyspieszają kinetykę adsorpcji i umożliwiają desorpcję wodoru

w niższych temperaturach, redukując bariery tradycyjnych adsorbentów [149]. Alternatywnie stosowane są metody elektrochemicznego magazynowania, polegające na wbudowaniu wodoru w struktury materiałowe, z których uwalnia się przy temperaturze desorpcji do 100 °C i ciśnieniu nieprzekraczającym 700 bar, co minimalizuje nakłady energetyczne procesu [10]. Najdłużej stosowaną i najpowszechniejszą metodą pozostaje magazynowanie wodoru w stanie gazowym. Gaz spręża się do ciśnienia 200–350 bar w stalowych butlach lub w lekkich zbiornikach kompozytowych typu III i IV, dopuszczonych do pracy przy 350 lub 700 bar. W przypadku napełniania do 700 bar można osiągnąć gęstość wolumetryczną około 40,2 g/l, co odpowiada 12% masy zbiornika, mimo iż w dalszym ciągu jest to wartość około dziesięciokrotnie niższa niż w benzynie [128]. Rurociągi do transportu sprężonego wodoru wykonuje się ze stali austenitycznej odpornej na kruchość wodorową, a ciśnienie robocze wynosi zazwyczaj 100–200 bar, przy czym instalacje mogą przebiegać naziemnie lub podziemnie [75]. W przypadku ciekłego wodoru stosuje się zbiorniki kriogeniczne izolowane próżniowo, utrzymujące temperaturę około –250 °C i minimalizujące straty wskutek parowania. Pomimo dużej gęstości energii ciekły wodór wymaga znacznych nakładów chłodzenia przez cały czas składowania.

3.5. Transport i magazynowanie wodoru w sektorze morskim

Wykorzystanie transportu wodnego charakteryzuje się znaczącym potencjałem bezpieczeństwa dla przewozu większych mas wodoru, szczególnie gdy stosuje się kontenerowe rozwiązania zbiornikowe (rys. 5 a, b) [1]. Zastosowanie podwyższonych parametrów ciśnienia oraz obniżonej temperatury generuje istotny wzrost gęstości transportowanego gazu, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie pojemności magazynowej oraz redukcję gabarytów jednostki pływającej wykorzystywanej w procesie transportowym [5]. Przewóz sprężonego wodoru w warunkach morskich wykazuje szczególną przydatność dla realizacji zadań transportowych obejmujących małe oraz średnie pojemności magazynowe, zwłaszcza przy dystansach charakteryzujących się krótkimi i średnimi odległościami morskimi [7].



Rys. 5. Przykłady gazowców do transportu wodoru drogą morską

Przyjmuje się w środowisku naukowym, że sprężony wodór w postaci (CGH₂) może stanowić konkurencyjne rozwiązanie na rozwijających się rynkach regionów przybrzeżnych oraz w transporcie międzyregionalnym, szczególnie w obszarach geograficznych, gdzie budowa infrastruktury rurociągowej nie znajduje uzasadnienia ekonomicznego lub natrafia na znaczące przeszkody natury technicznej, a także w państwach charakteryzujących się strukturą wyspiarską, które korzystają z intensywnego wsparcia rządowego w zakresie realizacji projektów o charakterze gospodarczym lub środowiskowym [11]. Analogicznie do praktyki transportowej stosowanej przy przewozie innych gazów za pośrednictwem dróg wodnych śródlądowych lub morskich, zasadniczym kryterium akceptacji przyjmowanych rozwiązań projektowych oraz konstrukcyjnych realizowanych na określonej jednostce pływającej pozostaje stworzenie infrastruktury umożliwiającej bezpieczne operowanie z ładunkiem oraz zapewnienie odpowiedniego rozmieszczenia zbiorników przeznaczonych do magazynowania sprężonego lub ciekłego wodoru (rys. 5 c) [19]. Zagwarantowanie właściwego poziomu bezpieczeństwa podczas realizacji transportu wodoru drogą morską wymaga spełnienia wymagań międzynarodowych określonych w Rezolucji IMO zatytułowanej „Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk” oznaczonej numerem IMO MSC.420(97) z dnia 25 listopada 2016 roku oraz w Kodeksie IGC stanowiącym Rezolucję IMO MSC.370(93), które dotyczą projektu i konstrukcji statku, projektu i konstrukcji instalacji ładunkowych oraz pozostałych systemów wywierających wpływ na bezpieczeństwo jednostki oraz realizowanych operacji, a także wdrożenia systemu kontroli nad utrzymaniem wodoru w wymaganym stanie skupienia podczas wszystkich operacji, zarówno w trakcie rejsu, jak i podczas procesów załadunku oraz wyładunku [119]. Wymagania zawarte w wymienionych rezolucjach oraz wytyczne formułowane przez towarzystwa klasyfikacyjne stanowią fundamentalne podstawy dla budowy prototypowych statków przeznaczonych do przewozu wodoru, czego przykładem jest projekt realizowany w Japonii przez firmę Kawasaki, gdzie zamysł i konstrukcja tego statku podlegają nadzorowi towarzystwa klasyfikacyjnego, a ze względu na pionierski charakter projektu realizowane są we współpracy z administracją morską kraju bandery [120]. Kontrola warunków środowiskowych w instalacji ładunkowej oraz nad odpowiednią postacią wodoru w formie sprężonej lub skroplonej stanowi zasadniczy element zarówno dla zapewnienia bezpieczeństwa, jak i opłacalności całego procesu transportowego. Zagadnienia związane ze zbiornikami przeznaczonymi do przewozu większych ilości wodoru stanowią przedmiot odrębnych studiów oraz prac badawczo-rozwojowych prowadzonych w środowisku naukowym i przemysłowym [146]. Transport wodoru jako ładunku lub obsługa innych statków wykorzystujących wodór jako paliwo wymaga spełnienia spójnych standardów narodowych, leżących w zakresie odpowiedzialności administracji morskiej państwa bandery, obligatoryjnych wymagań IMO oraz towarzystwa klasyfikacyjnego sprawującego nadzór nad jednostką [151]. Obowiązujące normy międzynarodowe regulują również przeprowadzanie prac portowych, takich jak procesy załadunkowe realizowane w infrastrukturze portowej [155]. Obecnie zarówno Kodeks IGC IMO, jak i IGF nie zawierają wymagań dla sprężonego wodoru

przewożonego w odrębnych zbiornikach, gdy jest on przeznaczony do wykorzystania jako paliwo w systemach napędowych [159]. Trwają jednak intensywne prace międzynarodowych zespołów eksperckich, których celem jest uzgodnienie wymagań IMO w zakresie bezpiecznego wykorzystania wodoru w zastosowaniach morskich, przy czym zakończenie tych prac planowane jest na rok 2024, kiedy w ramach nowelizacji Kodeksu IGF dodana zostanie nowa Część E, zawierająca wymagania dla ogniw paliwowych do napędu głównego i celów pomocniczych [164]. W transporcie morskim wodór może być przewożony w postaci gazowej lub ciekłej, gdzie wybór stanu skupienia ładunku zależy od szczegółowej analizy opłacalności transportu, opartej na bilansie zysków i strat dla obu metod transportowych [163]. Gazowy sprężony wodór może nie posiadać wystarczającego uzasadnienia ekonomicznego ze względu na ponad trzykrotnie mniejszą ilość transportowanego gazu w porównaniu do wodoru ciekłego przy ciśnieniu 1 bar, jednak jego przewaga polega na możliwości utrzymania wodoru pod kontrolowanym ciśnieniem, na przykład 250 bar w butlach stalowych [171]. Transport w postaci kriogenicznej wymaga schłodzenia rurociągów, odpowietrzenia i następnie napełnienia zbiornika z zastosowaniem specjalistycznych procedur technologicznych [175]. Utrzymanie stabilnej temperatury -253°C wymaga specjalistycznej izolacji oraz infrastruktury do schładzania par wodoru do postaci ciekłej z wykorzystaniem zaawansowanych systemów kriogenicznych. Podobnie jak przy transporcie LNG, możliwe jest wykorzystanie odparowanego wodoru do zasilania generatorów elektrycznych, co pozwala na redukcję ciśnienia w zbiornikach oraz właściwy dobór transportu. Ciekły wodór w transporcie morskim może być przewożony na statkach wyposażonych w zbiorniki typu „C”, podobne do tych zgodnych z Kodeksem IGC, ale z dodatkowym systemem izolacji termicznej specjalnie zaprojektowanej dla wodoru skroplonego. Dla rozwiązań prototypowych warunkiem dopuszczenia do budowy i eksploatacji jest przeprowadzenie pełnej certyfikacji zgodnie z wymaganiami prawnymi obowiązującymi w międzynarodowym transporcie morskim (tab. 6).

Aktualnie zbiornikowce do przewozu skroplonego wodoru znajdują się w fazie projektowania lub budowy prototypów w różnych ośrodkach technologicznych na świecie. W 2020 roku uruchomiono pierwszy na świecie międzynarodowy pilotowy łańcuch logistyczny dostaw wodoru dla energetyki stacjonarnej realizujący trasę od zakładu produkcyjnego w Brunei do Japonii, przy czym projekt realizowany przez Japan's Advanced Hydrogen Energy Chain Association for Technology Development wykorzystuje organiczną chemiczną metodę uwodorniania, w której wodór powstaje przez reforming parowy gazu z procesu skraplania LNG, a wodór przetwarzany do postaci metylocykloheksanu może być przechowywany i transportowany przy temperaturze i ciśnieniu otoczenia. W przypadku transportu wodoru w postaci ciekłej kriogenicznej zasadnicze dla bezpieczeństwa są zgodność z Kodeksem IGC oraz spełnienie wymagań dotyczących materiałów zbiorników, których temperatura projektowa musi wynosić poniżej -196°C , zgodnie z wymaganiami administracji państwa bandery. Wodór sprężony może być przesyłany rurociągami lub przewożony w zbiornikach pod ciśnieniem

wykorzystujących różne technologie kompresji, natomiast transport ciekłego wodoru rurociągami jest stosowany jedynie na małe odległości ze względu na znaczne straty energetyczne związane z utrzymaniem temperatury kriogenicznej. Na dalsze dystanse przewozi się go statkami, cysternami kolejowymi oraz samochodowymi z zastosowaniem specjalistycznych systemów izolacyjnych. Istnieje sześć rozpoznanych metod przechowywania wodoru, które wymagają szczegółowej analizy przed oceną tych sposobów w kontekście określenia parametrów magazynowania paliw transportowych na podstawie jakościowych i ilościowych cech każdego systemu. Benzyna i olej napędowy, powszechnie stosowane w transporcie lądowym, mogą posłużyć jako punkt odniesienia, gdyż ich wartość energetyczna wynosi około 35 MJ/l. Czysty wodór charakteryzuje się wysoką wartością energetyczną pod względem masy wynoszącą 120 MJ/kg, ale małą pod względem objętościowym wynoszącą 0,01 MJ/dm³. W transporcie ważny jest również parametr prędkości uwalniania, który określa dostarczanie wodoru w odpowiedzi na zapotrzebowanie, co jest istotne na przykład przy przyspieszaniu lub hamowaniu pojazdu wykorzystującego wodór jako paliwo. W zastosowaniach transportowych ważny jest także akumulator o wysokiej wydajności energetycznej, który umożliwia zaspokojenie szczytowych zapotrzebowań na energię w systemach hybrydowych wykorzystujących wodór.

Tabela 6. Metody przechowywania wodoru [171, 175]

Metoda przechowywania	Temperatura	Ciśnienie	Opis
Butle gazowe pod wysokim ciśnieniem	25 °C	200 – 1200 bar	Skompresowany gaz molekularny w zbiornikach kompozytowych
Ciekły wodór w zbiornikach kriogenicznych	-252 °C	1 bar	Ciekły wodór przechowywany w zbiornikach kriogenicznych, wparowuje w tempie kilku % na dzień przy temperaturze pokojowej na zewnątrz zbiornika
Zaadsorbowany wodór	-80 °C	100 bar	Adsorpcja fizyczna wodoru w materiałach porowatych jak węgiel ze zwiększoną powierzchnią wchłaniania
Zaadsorbowany interkalowany wodór w metalu	25 °C	1 bar	Interkalacja wodoru w metalach lub hybrydach metalowych
Złożone związki	>100 °C	1 bar	Złożone związki (AlH ₄ lub BH ₄), desorpcja następuje w podwyższonej temperaturze, adsorpcja natomiast pod zwiększonym ciśnieniem
Metale i związki w wodzie	25 °C	1 bar	Chemiczne utlenianie metali z wodą i uwalnianie wodoru

Do transportu i czasowego przechowywania sprężonego wodoru wykorzystuje się zbiorniki cylindryczne lub sferyczne zaprojektowane tak, aby zapewnić nośność obciążeniom wewnętrznym wynikającym z wysokiego ciśnienia oraz siłom powstającym podczas

mocowania urządzeń ładunkowych [151]. W praktyce morsko-logistycznej dominują zbiorniki ciśnieniowe typu III i IV, stosowane zarówno na statkach, jak i w kontenerowych systemach magazynowych zgodnych ze standardami ISO, co umożliwia uniwersalne łączenie modułów w zestawy transportowe (rys. 6) [195]. Producenci oferują rozwiązania skonteneryzowane o ciśnieniu projektowym sięgającym 300 bar, realizowane jako niezależne jednostki montowane na specjalnych stelażach przystosowanych do integracji z konstrukcją pokładu [5]. Dla obsługi większych wolumenów wodoru opracowuje się moduły o zwiększonych średnicach i długościach zbiorników, co pozwala na skalowanie pojemności magazynowej przy zachowaniu zgodności z normami transportowymi [200]. W środowisku morskim szczególną uwagę zwraca się na odporność na korozję, dlatego zbiorniki wykonuje się z wielowarstwowych materiałów kompozytowych o właściwościach antykorozyjnych i nietoksycznych, wyposażonych w wewnętrzną wykładzinę z polietylenu o wysokiej gęstości, co zapewnia trwałość i bezpieczeństwo długotrwałego przechowywania [181].

TYP I	Typ I: Konstrukcja w całości metalowa, generalnie ze stali.
TYP II	Typ II: Głównie stal i aluminium, owinięte polimerem wzmacnianym włóknami, m.in. szklanymi, węglowymi lub bazaltowymi, w kierunku nawinięcia; materiały metalowe zbiornika oraz kompozytowe materiały obwodowe przejmują w przybliżeniu równo obciążenia konstrukcyjne.
TYP III	Typ III: Okładzina metalowa tzw. liner (zwykle aluminium) w pełni obwinięta kompozytem z żywic epoksydowych lub winylestrowych z ciągłym włóknem węglowym; matryca kompozytowa przenosi obciążenia konstrukcyjne.
TYP IV	Typ IV: Konstrukcja niemetalowa. Kompozyt z włókna węglowego lub mieszanego szklanego i węglowego jest owinięty wokół okładziny z polimeru termoplastycznego (zwykle polietylen wysokiej gęstości HDPE lub poliamid). Materiały kompozytowe przenoszą obciążenia konstrukcyjne.
TYP V	Typ V: Konstrukcja w całości kompozytowa. Zbiornik jest pozbawiony okładziny i zawiera kompozyt z włókna węglowego lub mieszanego szklanego i węglowego owinięty wokół składanego lub protektorowego trzpienia. Materiały kompozytowe przenoszą całe obciążenie.

Rys. 6. Metody magazynowania wodoru

Zbiorniki ciśnieniowe kompozytowe wykonane z włókna szklanego oferują korzyści w transporcie i magazynowaniu wodoru dzięki zredukowanej masie, szerokim tolerancjom temperaturowym, zwiększonej trwałości oraz wyższemu poziomowi bezpieczeństwa w zestawieniu ze zbiornikami stalowymi i innymi kompozytami [151]. W porównaniu ze zbiornikami z włókna węglowego stanowią także konkurencyjną cenowo alternatywę, zaś

rozwiązania typu IV, które składają się z wewnętrznej butli z tworzywa połączonej z kompozytową okładziną, są powszechnie wykorzystywane zarówno w miejscach produkcji wodoru takich jak instalacje elektrolizy zasilane przez farmy wiatrowe, słoneczne lub biogazowe jak i w punktach konsumpcyjnych, w tym w zakładach przemysłowych oraz stacjach napełniania [195]. Standardowe zbiorniki stalowe wyposażone są w okładzinę z tworzywa sztucznego i króćce ze stali nierdzewnej, jednak konstrukcje kompozytowe z wysokowytrzymałościowego włókna szklanego i żywicy epoksydowej cechują się nietoksycznością, odpornością na korozję oraz eliminacją zjawisk utleniania galwanicznego, co przekłada się na dłuższy okres eksploatacji [5]. Zbiorniki z włókna szklanego typu IV osiągają masę nawet o 70% niższą od ich stalowych odpowiedników, pracują przy ciśnieniu roboczym do 350 bar, oferują pojemność od 600 do 2400 dm³ na pojedynczą jednostkę oraz mogą być łączone w kontenery o łącznej objętości magazynowej sięgającej 42 350 dm³, przy zachowaniu minimalnego współczynnika bezpieczeństwa nie mniejszego niż 3,0 [200]. Są one certyfikowane do eksploatacji w szerokim zakresie temperatur od -40 °C do +65 °C zgodnie z normą EN 12245-3 oraz regulacjami ADR, TPED i PED, co czyni je uniwersalnym i bezpiecznym rozwiązaniem dla zaawansowanych systemów magazynowania i transportu wodoru [73].

3.6. Materiały do wykonania instalacji wodorowych w jednostkach pływających

Materiały stosowane w instalacjach wodorowych na jednostkach pływających muszą spełniać rygorystyczne wymagania dotyczące wytrzymałości mechanicznej, odporności na korozję wodorową oraz kompatybilności chemicznej z czystym wodorem i jego parami. Podstawowym elementem takiej instalacji są rurociągi, które najczęściej wykonuje się ze stali nierdzewnej klasy 316L lub stali duplex o podwyższonej wytrzymałości i doskonałej odporności na korozję w środowisku morskim, przy jednoczesnym zachowaniu niskiej podatności na kruchość w niskich temperaturach [183]. W miejscach, gdzie wymagana jest trwałość układu, stosuje się przewody ze stopów niklu, na przykład Inconel 625, cechujące się wysoką odpornością na ciśnienie robocze dochodzące do 350 bar oraz na działanie kriogeniczne, co jest szczególnie istotne w przypadku transportu ciekłego wodoru [181]. Zawory regulacyjne i odcinające, zasadnicze dla bezpieczeństwa operacji, wykonuje się z wysokogatunkowej stali nierdzewnej AISI 316 lub materiałów mosiężnych pokrywanych powłokami antykorozyjnymi, takimi jak niklowanie chemiczne lub chromowanie, które minimalizują ryzyko korozji galwanicznej i zapewniają szczelność na poziomie wymaganym dla gazów o niskiej cząsteczce [195]. Uszczelnienia w miejscach połączeń gwintowanych i kołnierzowych najczęściej wykonywane są z polimerów fluorowanych, np. PTFE czy PCTFE, które zachowują odporność w szerokim zakresie temperatur od -40°C do +80°C oraz wykazują odporność na oddziaływanie chemiczne ze strony czystego wodoru i ewentualnych zanieczyszczeń [245]. Zbiorniki magazynowe, stanowiące serce instalacji, są projektowane w oparciu o materiały kompozytowe klasy III i IV, gdzie wewnętrzną butlę z aluminium lub

stali nierdzewnej wyścielają warstwy kompozytów z włókna węglowego lub szklanego osadzonego w matrycy epoksydowej. Takie podejście zapewnia wysoki stosunek wytrzymałości do masy, minimalizuje ryzyko pęknięć naprężeniowych i gwarantuje odporność na korozję [200]. W jednostkach pływających, gdzie ograniczona przestrzeń predestynuje do stosowania zbiorników cienkościennych, istotne staje się również wzmocnienie miejsc przyłączy za pomocą dodatkowych taśm wzmacniających z włókna aramidowego, które absorbują lokalne naprężenia powstające podczas manewrów morskich. Dodatkowo elementy konstrukcyjne, takie jak stelaże montażowe i wsporniki, wykonuje się ze stopów aluminium lotniczego (np. 5083 czy 6082), cechujących się lekkością i znaczną odpornością na korozję wody morskiej, a powierzchnię zabezpiecza się powłokami epoksydowymi o grubości co najmniej 150 μm , co wydatnie przedłuża żywotność całego układu [74]. Istotnym komponentem systemu jest także osprzęt elektryczny przeznaczony do obsługi czujników ciśnienia, temperatury oraz czystości gazu, którego obudowy wykonuje się ze stopów aluminium lub mosiądzu pokrywanych lakierami epoksydowymi lub proszkowymi. Dzięki temu elementy te nie ulegają korozji, a jednocześnie spełniają wymogi ochrony przeciwwybuchowej (ATEX) w strefach zagrożonych wybuchem wodoru [112]. Przewody elektryczne i światłowodowe, które monitorują parametry pracy instalacji, muszą być pokryte płaszczem z fluoropolimerów (PVDF lub FEP) zapewniającym hermetyczność i ochronę przed wilgocią morską. Dodatkowo w miejscach połączeń wykorzystuje się kable ekranowane ze stali nierdzewnej, co minimalizuje interferencje elektromagnetyczne i chroni przed korozją [124]. Wszystkie materiały użyte w instalacji wodorowej na jednostce pływającej muszą być dopuszczone przez towarzystwo klasyfikacyjne oraz posiadać certyfikaty zgodności z międzynarodowymi normami ISO 11120 dla zbiorników ciśnieniowych i ISO/TR 15916 dla bezpieczeństwa transportu wodoru. Dodatkowo, w celu zapewnienia integralności układu, przeprowadza się testy szczelności metodą ultradźwiękową i testy penetracyjne przy użyciu barwników fluorescencyjnych, co pozwala na wykrycie najdrobniejszych pęknięć oraz mikro nieszczelności jeszcze przed uruchomieniem instalacji [131]. Kompleksowe podejście do doboru materiałów i procedur testowych gwarantuje nie tylko bezpieczeństwo eksploatacji i niezawodność systemu, ale także minimalizuje ryzyko awarii w trudnych warunkach morskich, co czyni transport i magazynowanie wodoru drogą wodną rozwiązaniem zarówno efektywnym, jak i bezpiecznym [232].

3.7. Ogniwa paliwowe

Ogniwo paliwowe stanowi zaawansowane urządzenie konwertujące energię chemiczną paliwa na energię elektryczną w sposób ciągły, o ile dostępne są zarówno paliwo, jak i utleniacz [153]. W porównaniu z konwencjonalnymi technologiami opartymi na spalaniu ogniwa cechują się korzystniejszym stosunkiem mocy do masy i objętości, co ma podstawowe znaczenie w projektowaniu maszyn i urządzeń o ograniczonej przestrzeni i wytycznych masowych [12].

Dzięki wyższej sprawności konwersji – przekraczającej 60% – ogniwa paliwowe redukują straty energii, a ich jedynym produktem procesu wodorowego jest woda, co wyklucza emisję CO₂ i zanieczyszczeń tworzących smog oraz ogranicza ryzyko problemów zdrowotnych wynikających z jakości powietrza [21]. Dodatkowo brak ruchomych części minimalizuje poziom hałasu, czyniąc ogniwa paliwowe cichszymi od silników spalinowych, które wykorzystują liczne elementy mechaniczne wymagające smarowania i konserwacji [234].

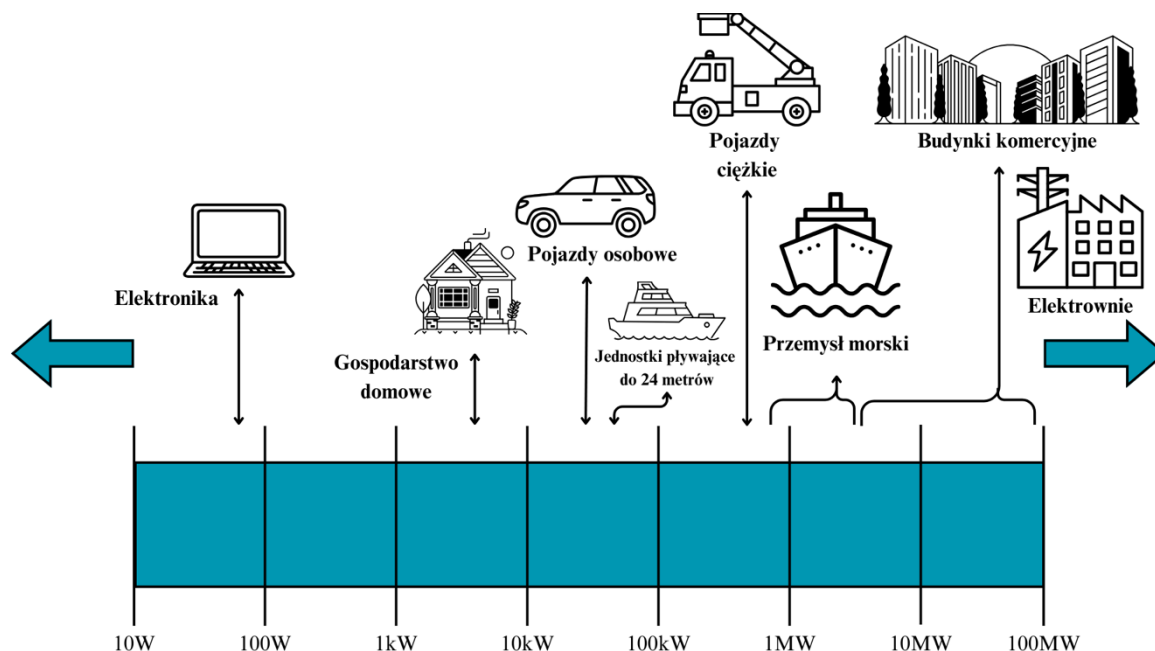
Pomimo różnorodności typów ogniw paliwowych, wszystkie opierają się na tej samej trójwarstwowej strukturze: anodzie, elektrolicie i katodzie. Podczas reakcji na anodzie wodor ulega utlenianiu według równania:



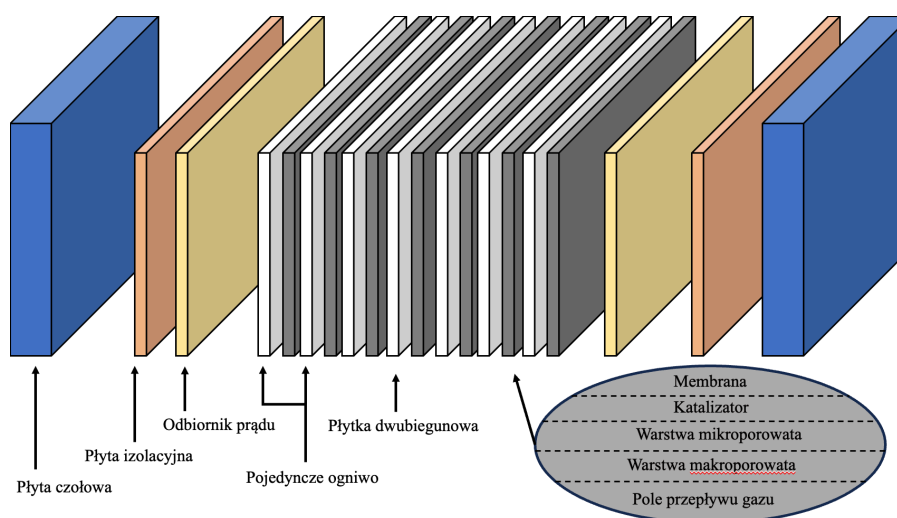
Generując kationy migrujące przez elektrolit do katody oraz elektrony płynące przez obwód zewnętrzny. Na katodzie zachodzi redukcja tlenu w obecności kationów i elektronów, co prowadzi do powstania czystej wody [197]. Architektura ogniwa, dobór materiałów elektrodowych oraz parametrów pracy determinują osiągnięte parametry wydajnościowe i trwałość systemu [211]. Reakcja elektrochemiczna, która zachodzi na katodzie to:



Na podstawie rodzaju zastosowanego elektrolitu ogniwa paliwowe dzieli się na alkaliczne (AFC), z membraną do wymiany protonów (PEMFC), z kwasem fosforowym (PAFC), ze stopionym węglanem (MCFC) oraz ze stałym tlenkiem (SOFC) [22]. W AFC jako elektrolit stosuje się roztwór KOH, w którym ruchome jony OH⁻ umożliwiają reakcję przy niskim nadpotencjale redukcji tlenu i temperaturze pracy rzędu 20–80 °C, zaś w PEMFC przenoszenie protonów H⁺ zachodzi przez polimerową membranę w zakresie temperatur od –40 °C do 90 °C, z wykorzystaniem powietrza atmosferycznego lub czystego tlenu jako utleniacza [21]. PAFC i MCFC, dzięki zdolności pracy w szerokim zakresie mocy, znalazły zastosowanie w elektrowniach stacjonarnych, natomiast SOFC operuje przy wysokich temperaturach 600–1000 °C, wykorzystując ceramiczny elektrolit oparty na stabilizowanym cyrkonie (Y₂O₃–ZrO₂) [211]. Ogniwa paliwowe można konfigurować modułowo w zależności od wymagań mocy znamionowej, co przedstawia klasyfikacja mocy znamionowej na rysunku nr 7, spośród nich jednak PEMFC wyróżniają się szybkim czasem rozruchu, szerokim zakresem temperaturowym oraz wysoką gęstością energii, co czyni je preferowanym rozwiązaniem zarówno dla układów napędowych w transporcie, jak i stacjonarnych źródeł zasilania. Charakterystyczna struktura PEMFC składa się z anody, membrany protonowej, katalizatorów platynowych oraz katody (rys. 8), co zapewnia właściwą wydajność i trwałość, a jej szczegółowy opis oraz wyniki badań zostaną omówione w dalszych częściach pracy [153, 194, 199].



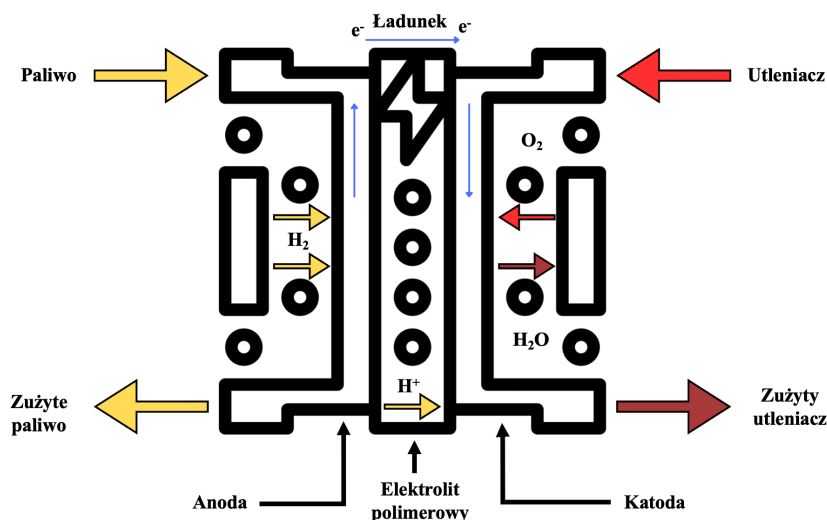
Rys. 7. Schemat zastosowań ogniw paliwowych w zależności od mocy znamionowej [194]



Rys. 8. Podstawowa struktura PEMFC z płytą końcową, płytą izolacyjną, odbiornikiem prądu, płytą bipolarną, zespół elektrody membranowej oraz jej struktura [234]

W ostatnich latach membrany polimerowe stosowane w ogniwach bezpośrednio zasilanych metanolem (DMFC) przeszły istotną transformację, łącząc wyraźne obniżenie kosztów produkcji z odpornością na długotrwałe obciążenia eksploatacyjne. Obecne materiały membranowe, w tym polipropylenowe membrany węglowodorowe, wykazują trwałość przekraczającą 5000 godzin w pasywnych układach DMFC z zasilaniem paliwem gazowym, co stawia je w zgodności z wymaganiami Departamentu Energetyki USA [198]. Jednocześnie z tanimi i odpornymi na degradację membranami rozwijane są katalizatory anodowe o

zawartości platyny poniżej 0,2 mg/cm² lub całkowicie nieplatynowe, charakteryzujące się wysoką aktywnością w reakcji utleniania metanolu, a także wysokoaktywne, nieplatynowe katalizatory katodowe o gęstości powierzchniowej 0,2–0,5 mg/cm² zawierające stopy palladu, co pozwala na ograniczenie kosztownych pierwiastków szlachetnych [156]. Prace nad nośnikami katodowymi wskazują na porowaty tytan jako materiał odporny na utlenianie, zachowujący przewodność i strukturę porów nawet w warunkach agresywnego środowiska reakcyjnego [150]. Rozwój technologii DMFC jest ściśle powiązany z potrzebą zastąpienia lub uzupełnienia baterii Li-ion w zastosowaniach o ograniczonej przestrzeni i czasie pracy, takich jak urządzenia wojskowe, elektronika przenośna oraz pojazdy o niewielkim zasięgu, na przykład wózki widłowe czy skutery elektryczne [238]. Istotne dla poprawy sprawności DMFC stało się ograniczenie strat kinetycznych i oporów masy, co osiąga się przez dobór warstw katalitycznych, inżynierię przepływów paliwa oraz dobór warunków roboczych, a także przez ciągłe doskonalenie metod diagnostycznych służących identyfikacji mechanizmów degradacji membran i elektrod podczas prób trwałościowych [246]. Dwuwymiarowe modele matematyczne opracowane przez Kulikovsky'ego i współpracowników, bazujące na równaniach zachowania masy i energii, wykazały, że pulsacyjne podawanie metanolu redukuje strefy wyczerpania paliwa przy kanałach ogniwa, co skutkuje wzrostem średniego napięcia układu i zmniejszeniem zużycia paliwa [152]. Podobnie Jeng i Chen udokumentowali, że uwzględnienie oporów omowych i kinetycznych w modelu anody pozwala przewidzieć spadek wydajności w warunkach wysokiego stężenia metanolu i niskiej gęstości prądu, ukazując konieczność równoważenia parametrów stężenia paliwa i obciążenia prądowego dla efektywnej pracy DMFC [206]. Standardowe ogniwo paliwowe z membraną do wymiany protonów (PEMFC) przedstawione na rysunku nr 9 wykorzystujące wodór w stanie gazowym stanowi alternatywę dla DMFC w konstrukcji przenośnych generatorów prądu, charakteryzując się modułową architekturą składającą się z membranowo-elektrodowego zespołu (MEA) umieszczonego między płytkami pół przepływowych (FFP) katody i anody z wytrawionymi kanałami przepływowymi [153]. Głównym ograniczeniem PEMFC pozostaje konieczność stosowania czystego wodoru jako paliwa, co wymaga specjalistycznej infrastruktury transportowej i magazynowej, której koszty, pomimo spadkowej tendencji w czasie, nadal stanowią barierę dla szerokiej komercjalizacji [21]. Lokalne procesory paliwowe konwertujące paliwa ciekłe na wodór cechują się wydłużonym czasem rozruchu, wysokimi kosztami inwestycyjnymi oraz znacznymi wymiarami gabarytowymi, co ogranicza ich praktyczne zastosowanie w aplikacjach mobilnych i rozproszonych [238]. Niemniej jednak, postęp w technologii magazynowania wodoru oraz rozwój infrastruktury wodorowej sugeruje wzrastający potencjał PEMFC jako czystego i efektywnego źródła energii elektrycznej [211].



Rys. 9. Schemat ogniwa paliwowego z membraną do wymiany protonów (PEMFC) [207]

Liczne wyzwania techniczne warunkują tempo rozwoju technologii ogniw paliwowych, a jednym z ważniejszych czynników jest zarządzanie temperaturą pracy, która bezpośrednio wpływa na maksymalne napięcie osiągane przez ogniwo. Wraz ze wzrostem temperatury spada teoretyczna sprawność konwersji energii i obniża się maksymalne napięcie pojedynczego elementu, jednak jednocześnie poprawia się odzysk ciepła odpadowego, co zwiększa efektywność termiczną systemu [153]. Dla każdego typu ogniwa istnieje efektywny zakres temperatury, w którym uzyskuje ono najwyższą sprawność przy zachowaniu trwałości, w praktyce zarządzanie termiczne statku polega na utrzymaniu pracy w tym wąskim przedziale, aby uniknąć degradacji materiałów i spadku parametrów eksploatacyjnych [21]. Ponadto, zarówno procesy elektrochemiczne pobudzające reakcje wodorowe, jak i opory omowe związane z przepływem protonów i elektronów, a także transfer ciepła w kierunku anody, determinują rozkład temperatury i ilość ciepła generowanego w ogniwie [234]. Całkowite wydzielane ciepło można oszacować porównując napięcie termodynamiczne pojedynczego ogniwa z rzeczywistym napięciem pracy, w typowych systemach PEMFC wartość ta sięga około 60% wartości energii dostarczonej w paliwie, co oznacza konieczność efektywnego rozpraszania ciepła dla zapewnienia stabilnej i bezpiecznej eksploatacji [211].

3.8 Analiza stosowanych układów napędowych wykorzystujących wodór w kategorii pozadrogowej

Analiza układów napędowych opartych na wodorze w jednostkach pływających ukazuje rosnący trend dążenia do zeroemisyjnych i efektywnych energetycznie rozwiązań, w których ogniwa paliwowe PEMFC oraz SOFC współpracują z akumulatorami i odnawialnymi źródłami energii jako elementy hybrydowych systemów napędowych. W morskich aplikacjach przeważa koncepcja hybrydy, gdzie ogniwa paliwowe stanowią podstawowe źródło mocy, a akumulatory litowo-jonowe odpowiadają za zaspokajanie chwilowych szczytów obciążenia oraz rekuperację

energii podczas manewrów, co pozwala zredukować zużycie oleju napędowego nawet o połowę w porównaniu z konwencjonalnymi napędami [28]. Integracja takich układów wymaga rozbudowanych układów chłodzenia, systemów ochrony przeciwwybuchowej ATEX oraz zaawansowanej automatyki sterowania ciśnieniem i temperaturą, co pozwala na utrzymanie właściwych warunków pracy membranowo-elektrodowego zespołu i przedłużenie trwałości ogniów [183]. Ważnym wyzwaniem pozostaje magazynowanie wodoru o odpowiedniej gęstości energetycznej, dlatego na małych i średnich jednostkach pływających dominują zbiorniki kompozytowe typu IV pracujące przy 350 bar, umożliwiające żeglugę do 200 Mm przy prędkości 15 węzłów [195]. Przykładem praktycznej implementacji jest katamaran (rys. 10) „Energy Observer”, który od 2017 roku, dzięki hybrydowej instalacji łączącej ogniwa paliwowe z panelami słonecznymi i turbinami wiatrowymi, pokonuje dystanse przekraczające 4 000 Mm, dowodząc niezawodności zeroemisyjnej żeglugi [183].



Rys. 10. Nowoczesny zeroemisyjny katamaran „Energy Observer” [218]

Pierwszym komercyjnym promem pasażersko-samochodowym (rys. 11) napędzanym ogniwami PEMFC jest norweski „MF Hydra”, wyposażony w moduły o łącznej mocy 400 kW i zbiorniki na 1 000 kg wodoru, który operuje na trasie Dokka–Hønefoss, oferując zasięg do 80 Mm bez tankowania [232].



Rys. 11. Nowoczesny prom pasażersko-samochodowy „MF Hydra” [219]

Belgijski statek „Hydroville” przedstawiony na rysunku nr 12 wykorzystuje hybrydę ogniowo-akumulatorową, osiągając redukcję emisji CO₂ o 40% względem jednostek tradycyjnych [28], a prototyp „PowerShip 3_0” łączy ogniwa paliwowe z turbinami Flettnera, redukując zużycie paliw kopalnych o 60% na połączeniach między Skandynawią a Europą Zachodnią [19].



Rys. 12. Belgijska jednostka pływająca po wodach śródlądowych „Hydroville” [219]

Nawet luksusowy katamaran „Aqua 80” dowodzi, że systemy SOFC o mocy 100 kW mogą zapewnić pełną autonomię rekreacyjnym jednostkom, eliminując hałas i wibracje typowe dla silników spalinowych [211]. Aby zapewnić integrację z pokładowym systemem zarządzania energią, wdraża się zaawansowane BMS i HMS monitorujące parametry pracy ogniw i zbiorników oraz wykorzystuje się protokoły IEC 61162-460 dla komunikacji z mostkiem nawigacyjnym. Lekka konstrukcja wsporników ogniw, kompaktowe wymienniki ciepła i nanostrukturalne materiały elektrod, takie jak kompozyty grafenowe, stanowią kierunek rozwoju, który może umożliwić zastosowanie wodorowych napędów także w większych statkach oceanicznych i jednostkach autonomicznych [111, 211].

4. Cel i zakres pracy

Obecnie rynek napędów stosowanych we wszystkich środkach transportu mocno się zmienia. Głównie dotyczy to transportu drogowego, gdzie powszechnie stosowane są wszelkiego rodzaju napędy alternatywne. Dotyczy to zarówno samych jednostek napędowych jak również paliw alternatywnych. Liczba pojazdów różnych kategorii, w których stosuje się napędy alternatywne w postaci napędów hybrydowych i elektrycznych z roku na rok wzrasta i pomimo różnych wahań związanych z uwarunkowaniami gospodarczymi i politycznymi pojazdy hybrydowe i elektryczne stały się codziennością. Również w kategorii maszyn pozadrogowych NRMM (*Non Road Mobile Machinery*) zaobserwować można znaczące zainteresowanie producentów tej kategorii przy wprowadzaniu na rynek maszyn z napędami innymi niż konwencjonalne. Kategoria NRMM jest bardzo szeroka, dotyczy zarówno bardzo małych maszyn jak kosiarki do trawy czy piły spalinowe (faktycznie pozadrogowe) ale również dużych maszyn, które tylko z nazwy są pozadrogowe ponieważ po drogach mogą się poruszać jednak ich naturalny obszar spełnianych funkcji roboczych dotyczy głównie warunków terenowych np. różnego rodzaju maszyny budowlane czy rolnicze. Do tej kategorii należą również jednostki pływające i tak jak w przypadku wszelkiego rodzaju maszyn budowlanych czy rolniczych, gdzie rynek maszyn z napędami alternatywnymi jest powszechnie rozwijany tak w przypadku jednostek pływających napędy te są raczej rzadkością oprócz dużych jednostek, głównie promów czy małych jednostek stanowiących laboratoria badawcze. Z uwagi na rosnącą liczbę wszelkiego rodzaju małych jednostek pływających turystycznych i użytkowych o długości do 24 m a co za tym idzie coraz większy ich udział w emisji szkodliwych składników spalin. Jest to istotne z uwagi na liczbę jednostek, która szacunkowo w Europie wynosi ok. 20 milionów, a w skali globalnej liczba ta szacowana jest na 50 milionów. Wiąże się to z dużą, przede wszystkim lokalną emisją szkodliwych składników spalin, ponieważ jednostki takie są operowane głównie w obszarach aglomeracji miejskich, wodach śródlądowych i przybrzeżnych, często objętych różnego rodzaju ograniczeniami środowiskowymi. Opisany wyżej problem był inspiracją do podjęcia się tej tematyki w dysertacji, którą zatytułowano **Napęd wodorowy w kategorii pozadrogowej**.

Głównym celem pracy jest opracowanie architektury systemu sterowania wielopaliwowego układu napędowego złożonego z trzech źródeł produkcji energii tj. generatora zasilanego olejem napędowym, ogniwa paliwowego zasilanego wodorem oraz akumulatorów dla zapewnienia efektywnego wykorzystania energii

Kolejnym powodem była możliwość uczestniczenia w procesie konfigurowania układu napędowego katamaranu z wielopaliwowym układem napędowym budowanego w ramach projektu pt. Eko-efektywny wielopaliwowy układ napędowy z ogniwem wodorowym w jednostce pływającej typu katamaran (POIR.04.01.04-00-0067/20).

Przystępując do opracowywania koncepcji układu napędowego zdefiniowano założenia do budowy układu napędowego jednostki pływającej. Przeprowadzono analizę obecnego stanu wiedzy. Analizując trendy światowe w rozwoju układów napędowych jednostek pływających stwierdzono, że główny nacisk położony jest na hybrydyzację oraz całkowitą elektryfikację. Przewodnią koncepcją było osiągnięcie najwyższego udziału pracy układu jednostki pływającej w trybie zeroemisyjnym w strefach portowych i przybrzeżnych.

W ramach rozprawy podjęto się opracowania architektury algorytmu sterowania wielopaliwowego układu napędowego w aspekcie analizy efektywności ekologicznej katamaranu użytkowego o długości 13,5 m. W związku z powyższym dokonano analiz tras w aspekcie:

- konfiguracji hydrograficznej charakteryzującej się połączeniem wód rzecznych i morskiej tworząc naturalne warunki przejściowe konieczne do testowania różnych konfiguracji energetycznych układu hybrydowego,
- podziału tras na odcinki i fazy z parametrami żeglugi determinowanymi przez regulacje prawne i środowiskowe.

Kolejnym etapem realizacji było opracowanie algorytmów sterowania z uwzględnieniem charakterystyk zastosowanych elementów układu napędowego oraz w dwóch wersjach:

- operacje w obszarze cumowania,
- operacje w obszarze wód śródlądowych i offshore.

Dalsze etapy pracy to opracowanie modelu zużycia energii. Jako podstawę do obliczeń przyjęto długość kadłuba, szerokość całkowitą katamaranu, zanurzenie oraz powierzchnię zwilżoną. Przeprowadzono badania w warunkach rzeczywistych na rzece Martwa Wisła. Wyniki badań posłużyły do walidacji modelu, na podstawie którego zamodelowano rejs do farmy wiatrowej offshore, który podzielono na trzy odcinki operacyjne: 1 – Gdańsk – farma wiatrowa, 2 – obsługa serwisowa farmy, 3 – farma wiatrowa – Gdańsk. Dodatkowo odcinki 1 i 3 podzielono na cztery fazy. Faza 1 objęła wyjście z portu bazowego oraz przejście przez wody przybrzeżne Zatoki Gdańskiej, Faza 2 objęła przejście przez centralne partie Zatoki Gdańskiej, Faza 3 to rejon Półwyspu Helskiego, Faza 4 obejmuje przejście na wody otwarte Morza Bałtyckiego prowadzące do rejonu planowanych instalacji farm wiatrowych. Odcinek 3 – powrotny uwzględniał również 4 Fazy w kolejności odwrotnej. Ponadto określono wskaźniki emisji w odniesieniu do wygenerowanej energii elektrycznej przez układ napędowy w rozważanych konfiguracjach eksploatacyjnych wielopaliwowego układu napędowego na podstawie badań w warunkach rzeczywistych. Na podstawie przeprowadzonych prac sformułowano wnioski ogólne, szczegółowe i użytkowe oraz opisano kierunki dalszych prac.

5. Metodologia badań

5.1. Obiekt badań

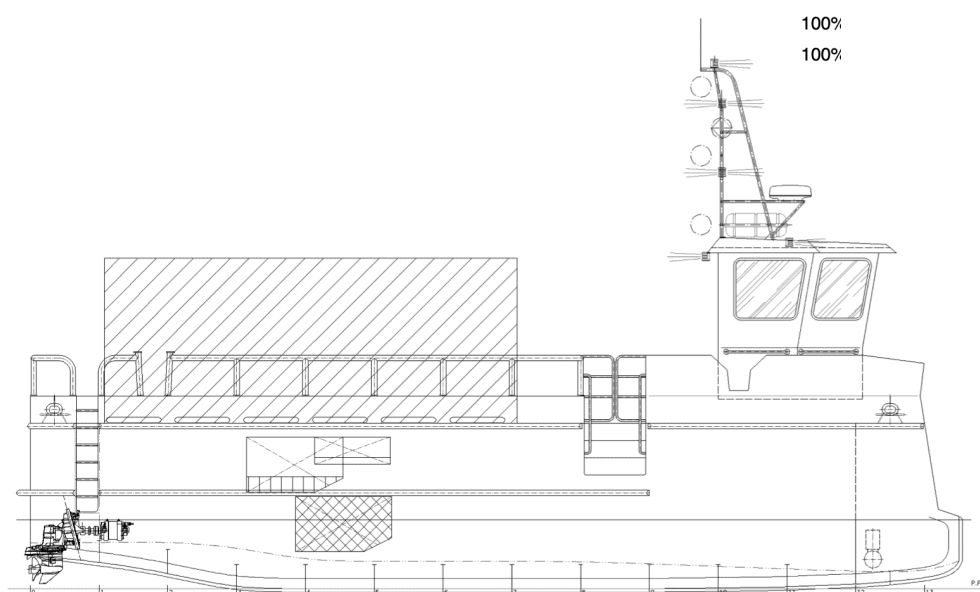
Obiekt badawczy o nazwie technicznej P22EKM jest sklasyfikowany przez Polski Rejestr Statków jako elektryczny jacht modułowy. Główne parametry techniczne zamieszczono w tabeli 7, natomiast fotografię oraz schematy przedstawiono na rysunkach 13-14. Wyposażony jest w zaawansowane systemy obejmujące zarówno tradycyjne źródła energii, jak i nowoczesne technologie wodorowe. Konstrukcja ta wpisuje się w globalne trendy dekarbonizacji transportu morskiego, oferując jednocześnie wysoką funkcjonalność eksploatacyjną i niezawodność operacyjną. Jednostka P22EKM została zaprojektowana i wykonana zgodnie z rygorystycznymi wymogami Polskiego Rejestru Statków, określono jej rejon żeglugi III jako obszar przewidzianej eksploatacji. Podstawowe wymiary główne jednostki wykazują proporcje charakterystyczne dla katamaranów średnich rozmiarów. Długość całkowita oraz długość między pionami wynosi 13,50 metra, szerokość konstrukcyjna wynosi 7 metrów, natomiast wysokość konstrukcyjna kształtuje się na poziomie 2,40 metra. Te parametry geometryczne determinują stosunek długości do szerokości na poziomie 1,93, co zapewnia równowagę między stabilnością poprzeczną, a oporem hydrodynamicznym. Powierzchnia pokładu roboczego wynosi 94,5 metra kwadratowego, co przy objętości kadłuba szacowanej na około 227 metrów sześciennych, zapewnia znaczną przestrzeń użytkową. Wypór pustej jednostki określono na 20 ton, przy maksymalnej nośności wynoszącej 11,5 tony przy zachowaniu minimalnej wolnej burty $F = 1,49$ m. Jednostka została zaprojektowana do przewozu maksymalnie 10 pasażerów przy dwuosobowej załodze, co czyni ją odpowiednią do zastosowań serwisowych na akwenach przybrzeżnych oraz farm wiatrowych. Maksymalna prędkość jednostki osiąga 9 węzłów, natomiast w ramach przeprowadzonych badań eksploatacyjnych przyjęto prędkość referencyjną 5 węzłów, która zapewnia adekwatną efektywność energetyczną przy zachowaniu odpowiedniej wydajności operacyjnej.

Tabela 7. Podstawowe parametry elektrycznego modułowego katamaranu użytkowego

Parametr	Jednostka	Wartość
Długość całkowita	[m]	13,5
Długość między pionami	[m]	13,5
Szerokość konstrukcyjna	[m]	7
Wysokość konstrukcyjna	[m]	2,4
Zanurzenie	[m]	od 0,9 do 1,2
Powierzchnia pokładu roboczego	[m ²]	94,5
Liczba załogi	–	2 osoby
Liczba pasażerów	–	maksymalnie 10 osób



Rys. 13. Obiekt badawczy – elektryczny jacht modułowy



Rys. 14. Schemat elektrycznego jachtu modułowego

Układ napędowy obiektu badawczego stanowi zaawansowany system elektryczny oparty na dwóch silnikach Bellmarine SternMaster W35, każdy o mocy nominalnej 30 kW. Silniki te zakwalifikowane są do najnowszej generacji morskich napędów elektrycznych, charakteryzujących się dużą sprawnością energetyczną, niskim hałasem oraz ograniczonym wpływem na środowisko morskie. Silniki Bellmarine SternMaster W35 to jednostki napędowe chłodzone cieczą, zaprojektowane do zastosowań marynistycznych w warunkach intensywnej eksploatacji. Każdy silnik generuje moc nominalną 30 kW przy napięciu 144 V i prędkości obrotowej 3000 obr/min, z przełożeniem redukcyjnym 2:1, co przekłada się na prędkość

obrotową śruby 1500 obr/min. Łączna moc napędowa systemu osiąga 60 kW. Dokładną specyfikację techniczną przedstawiono w tabeli 8 [24].

Tabela 8. Podstawowe parametry silnika elektrycznego SternMaster W35

Parametr	Jednostka	Wartość
Moc nominalna	[kW]	30
Moc chwilowa	[kW]	35
Sprawność	[%]	>95
Prędkość obrotowa silnika	[obr/min]	3000
Prędkość obrotowa śruby	[obr/min]	1500
Przełożenie	—	2:1
Moment obrotowy nominalny	[Nm]	95,5
Masa kompletnego układu	[kg]	150

System napędowy charakteryzuje się modułową konstrukcją umożliwiającą niezależną pracę każdego z silników elektrycznych, co znacząco podnosi dzielność jednostki pływającej. W przypadku awarii jednego z napędów, drugi pozostaje w pełni funkcjonalny, zapewniając możliwość bezpiecznego powrotu do portu. Silniki wyposażone są w zaawansowane systemy sterowania wektorowego o stopniu ochrony IP65 oraz konwertery DC-DC 24V, co gwarantuje wysoką niezawodność i łatwość integracji z systemami pokładowymi. Podstawę systemu energetycznego stanowi bank akumulatorów litowo-żelazowo-fosforanowe LiFePO_4 o łącznej pojemności 180 kWh w konfiguracji 3x30 kWh na każdą burtę/kadłub katamaranu (rys. 15).



Rys. 15. Układ akumulatorów składający się z 3 jednostek po 30 kWh każda

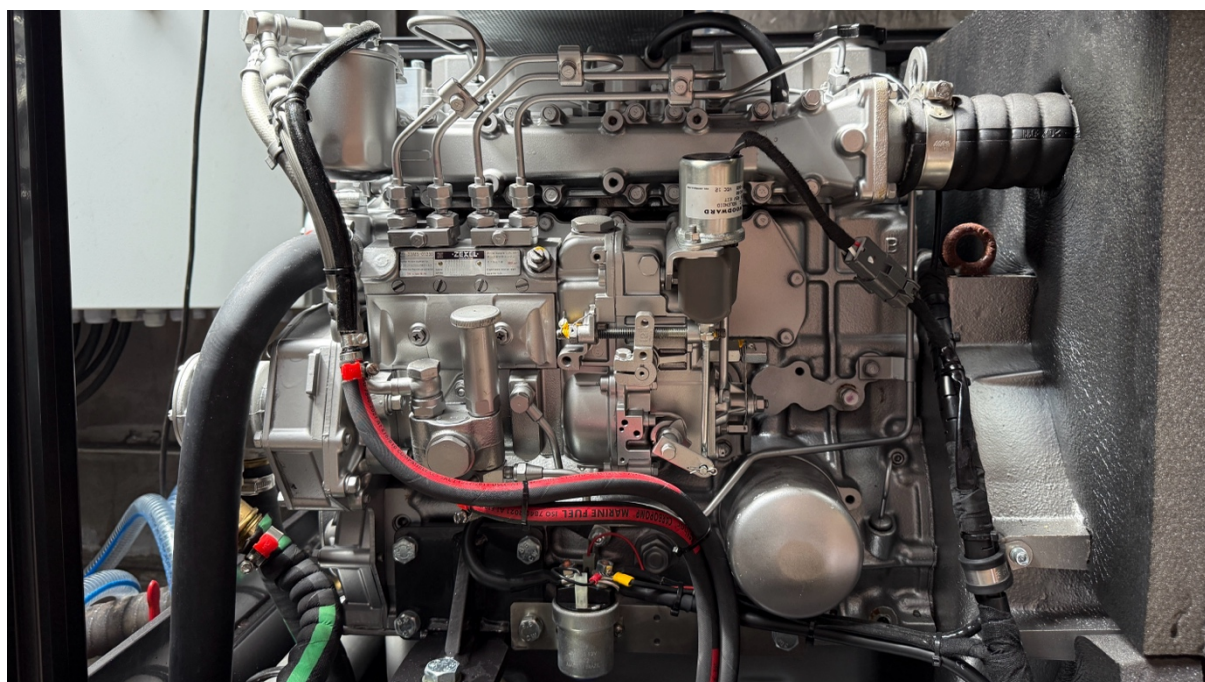
Takie rozmieszczenie akumulatorów zapewnia równowagę masy oraz redundancję systemu, obniżając jednocześnie ryzyko całkowitej utraty zasilania. Akumulatory tego typu

charakteryzują się wysoką gęstością energetyczną, długą trwałością oraz szybkim czasem ładowania. Wyposażone są w zaawansowane systemy zarządzania BMS, monitorujące parametry termiczne, napięciowe oraz prądowe każdej z cel, zapewniając tym samym bezpieczną i efektywną eksploatację.

Generator ON stanowi agregat prądotwórczy WhisperPower M-SQ 27 o mocy 25 kW (rys. 16). Jest to zaawansowana konstrukcja w swojej klasie, charakteryzująca się niskim hałasem 56,7 dB, kompaktowymi wymiarami oraz niezawodnością eksploatacyjną. Silnik napędowy generatora to czterocylindrowa jednostka Mitsubishi S4S o objętości skokowej 3,3 dm³. Jednostka ta pracuje przy prędkości obrotowej 1500 obr/min i częstotliwości 50 Hz, zapewniając moc znamionową 25 kW oraz maksymalną moc chwilową do 300% wartości znamionowej przez 2 s (tab. 9) [239].

Tabela 9. Podstawowe parametry generatora ON

Parametr	Jednostka	Wartość
Moc nominalna	[kW]	25
Objętość skokowa	[cm ³]	3331
Prędkość obrotowa	[obr/min]	1500
Zużycie paliwa	[l/h]	od 1 do 6
Średnica x skok tłoka	[mm]	94x120
Liczba cylindrów	-	4
Układ cylindrów	-	rzędowy
Masa generatora	[kg]	660



Rys. 16. Silnik wykorzystywany w generatorze WhisperPower po zdjęciu paneli obudowy

Generator ON wyposażony jest w system chłodzenia pośredniego oraz elektroniczny regulator napięcia AVR z systemem EBS, gwarantujący stabilność parametrów elektrycznych przy zniekształceniach harmonicznym poniżej 3%. Zużycie paliwa to przedział 1–6 dm³ na godzinę w zależności od obciążenia, przy czym zbiornik paliwa o objętości 400 dm³ zapewnia autonomię pracy nawet do 66 godzin przy obciążeniu nominalnym.

Innowacyjnym elementem układu zasilania jest ogniwo paliwowe LOOP S300 o mocy 30 kW (tab. 10, rys. 17). System ten wykorzystuje technologię PEM (*Proton Exchange Membrane*) charakteryzującą się wysoką sprawnością energetyczną 58%. Ogniwo paliwowe LOOP S300 pracuje w zakresie mocy 15–30 kW, zapewniając sprawność dostosowania generowania energii do aktualnych potrzeb ładowania akumulatorów. System wyposażony jest w podzespoły obejmujące stos ogniw paliwowych z technologią eFlow, nawilżacz, intercooler, sprężarkę powietrza, wtryskiwacz i wyrzutnik wodoru, czujniki temperatury, ciśnienia i przepływu masy powietrza, zintegrowany zbiornik kondensatu oraz konwerter DC-DC 24–12V. Zasilanie wodorem odbywa się z systemu magazynowania składającego się z dwóch paków po 12 butli o łącznej masie wodoru 20 kg pod ciśnieniem 200 bar [158].

Tabela 10. Podstawowe parametry ogniwa paliwowego

Parametr	Jednostka	Wartość
Moc nominalna	[kW]	30
Maksymalna sprawność	[%]	58
Maksymalne natężenie	[A]	300
Napięcie wyjściowe	[VDC]	od 115 do 235
Ciśnienie zasilania wodorem	[bar]	8,5
Średnie zużycie wodoru	[kg/h]	<0,78
Rodzaj membrany	-	PEM
Masa ogniwa paliwowego	[kg]	93

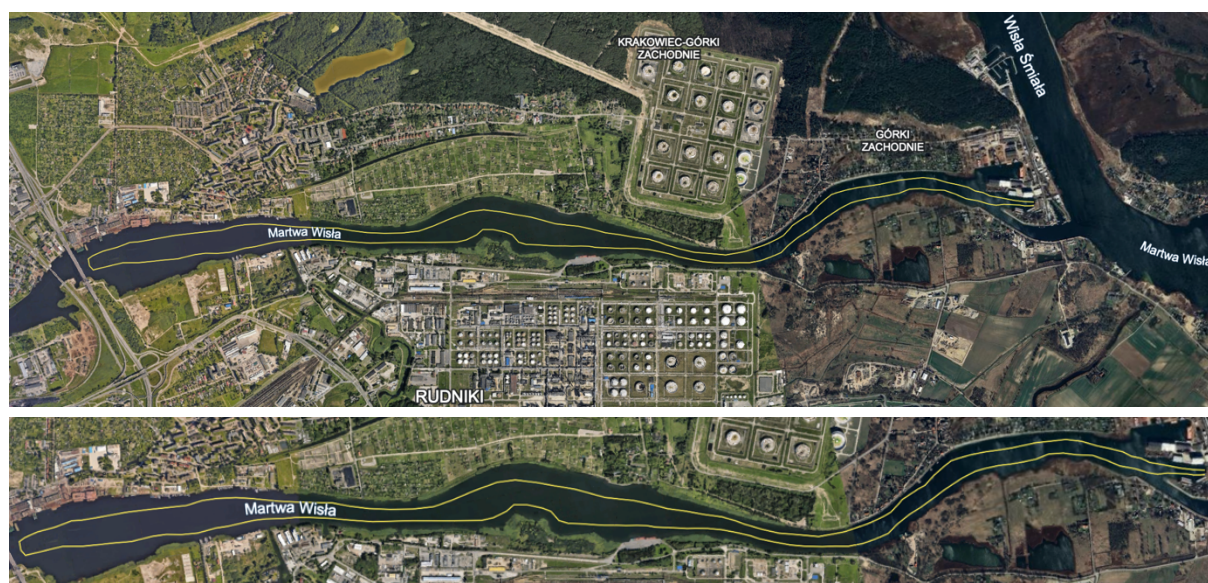


Rys. 17. Ogniwo paliwowe LOOP S300

Jednostka pływająca została poddana kompleksowej analizie stateczności wykonanej zgodnie z "Przepisami Klasyfikacji i Budowy Łodzi Motorowych" PRS część III z 2004 roku. Obliczenia obejmują sześć różnych stanów załadowania, od jednostki pustej przez wyjście z portu, pobyt na łowisku, powrót do portu, aż po warunki z oblodzeniem. Kryteria statecznościowe łodzi roboczo-turystycznej III rejonu zostały spełnione we wszystkich analizowanych stanach załadowania. Wysokość zalewania przekracza wymaganą wartość minimalną 0,81 m, kąt zalewania jest większy od 40° , a kąty przechyłu od skupienia pasażerów oraz kontenera zawierającego układ ogniwa paliwowego.

5.2. Trasy badawcze

Trasa badawcza katamaranu z wielopaliwowym układem napędowym została przeprowadzona na akwenie Martwej Wisły w rejonie aglomeracji gdańskiej, obejmując łączny dystans 12 kilometrów w konfiguracji pętli badawczej z podziałem na dwie równoważne fazy operacyjne. Punkt początkowy eksperymentu zlokalizowano w wybranym rejonie portu wewnętrznego na Martwej Wiśle, charakteryzującym się kompleksową infrastrukturą logistyczną oraz dogodnym dostępem do głównych szlaków komunikacyjnych obsługujących aglomerację trójmiejską (rys. 18).



Rys. 18. Trasa badawcza w rejonie Martwej Wisły – widok ogólny oraz w powiększeniu

Wybór lokalizacji początkowej w rejonie portu bazowego w Martwej Wiśle wynikał z unikalnej konfiguracji hydrograficznej charakteryzującej się połączeniem wód rzecznych ze środowiskiem morskim, tworząc naturalne warunki przejściowe idealne dla testowania różnorodnych konfiguracji energetycznych układu hybrydowego. Rejon ten wykazuje głębokości mieszczące się w przedziale 3,5–4,2 metra, co zapewnia wystarczający margines bezpieczeństwa dla jednostki o zanurzeniu 1,2 metra przy wszystkich przewidywanych stanach załadowania. Morfologia podwodna charakteryzuje się wyjątkowo łagodnym gradientem

nachylenia oscylującym między zerem a jedną dziesiątą stopnia, z medianą wynoszącą zero stopni, co potwierdza dominację płaskich partii dna zapewniających stabilne warunki nawigacyjne. Pierwszy fragment trasy badawczej rozpoczął się od pozycji startowej zlokalizowanej w bezpośrednim sąsiedztwie terminali paliwowych kompleksu Górek Zachodnich, gdzie przeprowadzono końcowe przygotowania techniczne oraz uruchomienie systemów pomiarowych. Katamaran wypłynął z portu wewnętrznego w kierunku północno-zachodnim, podążając wzdłuż głównego nurtu Martwej Wisły przez obszary charakteryzujące się stopniową transformacją środowiska hydrograficznego od warunków rzeczno-portowych do typowo morskich. Trasa pierwszego segmentu o długości 6 kilometrów prowadziła przez rejon charakteryzujący się intensywną działalnością przemysłową. Podczas pokonywania pierwszego odcinka katamaran poruszał się z ustaloną prędkością 5 węzłów. Czas pokonywania pierwszego segmentu wyniósł 40 minut, podczas których katamaran operował wyłącznie przy wykorzystaniu generatora ON. W punkcie zwrotnym trasy, zlokalizowanym w odległości sześciu kilometrów od pozycji startowej w rejonie, gdzie Martwa Wisła łączy się z wodami Zatoki Gdańskiej, przeprowadzono procedurę przełączenia układu napędowego z generatora spalinowego na ogniwo paliwowe. Tą operację wykonano podczas krótkiego postoju technologicznego w trakcie, którego wyłączono generator spalinowy, przeprowadzono procedury bezpieczeństwa związane z obsługą wodoru sprężonego oraz uruchomiono systemy ogniwa paliwowego. Punkt zwrotny charakteryzował się właściwym położeniem hydrograficznym zapewniającym bezpieczne warunki dla manewrów technicznych przy jednoczesnym dostępie do otwartych wód umożliwiających kontynuację badań. Druga faza trasy badawczej została zrealizowana jako trasa powrotna o identycznej długości sześciu kilometrów, pokonywana w kierunku południowo-wschodnim z powrotem do portu bazowego w Martwej Wiśle. Podczas tego segmentu katamaran operował wyłącznie przy wykorzystaniu ogniwa paliwowego jako źródła napędu głównego, utrzymując taką samą prędkość 5 węzłów dla zapewnienia porównywalności warunków hydrodynamicznych między obiema fazami eksperymentu. Warunki środowiskowe podczas realizacji całej trasy badawczej pozostawały stabilne i reprezentatywne dla typowych parametrów operacyjnych charakterystycznych dla wód przybrzeżnych południowego Bałtyku. Wysokość fal utrzymywała się na poziomie 0,1 metra przy dominujących wiatrach zachodnich o prędkości nieprzekraczającej do 1,5 m/s, co odpowiadało stopniowi 1 w skali Beauforta. Temperatura wody wynosiła 14°C, zapewniając efektywne warunki dla systemów chłodzenia obu typów napędów, podczas gdy widoczność przekraczająca dziesięć kilometrów była korzystna dla bezpieczeństwa nawigacji oraz prowadzenia obserwacji wizualnych. Zakończenie trasy w tym samym punkcie co jej rozpoczęcie zapewniło zamknięcie pętli badawczej oraz umożliwiło przeprowadzenie końcowych procedur technicznych obejmujących wyłączenie systemów pomiarowych, zabezpieczenie układów paliwowych oraz dokumentację końcowego stanu technicznego wszystkich komponentów układu hybrydowego.

5.3. Aparatura badawcza

Pomiary parametrów emisyjnych generatora ON przeprowadzono przy wykorzystaniu analizatora spalin typu PEMS Axion RS+, stanowiącego urządzenie pomiarowe dla precyzyjnej analizy składu gazów wylotowych w zastosowaniach motoryzacyjnych i przemysłowych (rys. 19).



Rys. 19. Analizator Axion RS+ udokumentowany w trakcie przeprowadzonych badań

Analizator Axion RS+ umożliwia jednoczesny pomiar 9 głównych parametrów obejmujących CO, CO₂, HC O₂, NO_x oraz PM Szczegółowe wyjaśnienie specyfikacji przedstawiono w tabeli nr 11.

Tabela 11. Specyfikacja techniczna aparatury Axion RS+

Parametr	Metoda pomiaru	Zakres pomiarowy	Dokładność pomiaru
CO ₂	Niedyspresyjna podczerwień	0 – 16 %	± 3%
CO	Niedyspresyjna podczerwień	0 – 10 %	± 3%
HC	Niedyspresyjna podczerwień	0 – 2000 ppm	± 4%
O ₂	Elektrochemiczna	0 – 25 %	± 1%
NO _x	Elektrochemiczna	0 – 5000 ppm	± 1%
PM	Dyspresja laserowa	0 – 250 g/m ³	± 2%

Zastosowana metodologia pomiarowa opiera się na absorpcji promieniowania podczerwonego dla składników gazowych oraz elektrochemicznych ogniwach pomiarowych dla O_2 oraz NO_x , zapewniając wysoką precyzję oraz stabilność długoterminową charakterystyczną dla metod referencyjnych stosowanych w zaawansowanych badaniach naukowych. Dodatkowo analizator wyposażony jest w system pomiaru temperatury spalin z wykorzystaniem termoelementu typu K w zakresie 0–1200°C z dokładnością $\pm 5^\circ C$, co umożliwia kompleksową ocenę procesu spalania oraz efektywności konwersji energii w generatorze ON. Z uwagi na brak w generatorze standardowego złącza diagnostycznego OBD do określenia prędkości obrotowej wału korbowego zastosowano czujnik prędkości obrotowej wykorzystujący technologię fotoelektryczną z modulowanym światłem czerwonym o długości fali 625 nanometrów, charakteryzujący się zakresem detekcji do 1 metra oraz możliwością pomiaru częstotliwości sygnału do 500 Hz odpowiadającego maksymalnej 30 000 obr/min. Montaż czujnika zrealizowano z wykorzystaniem podstawy metalowej z uchwytem pozycjonującym, umożliwiającym ustawienie względem odbłaskowego znacznika z samoprzylepnej taśmy refleksyjnej umieszczonego na wirującym elemencie generatora [17].

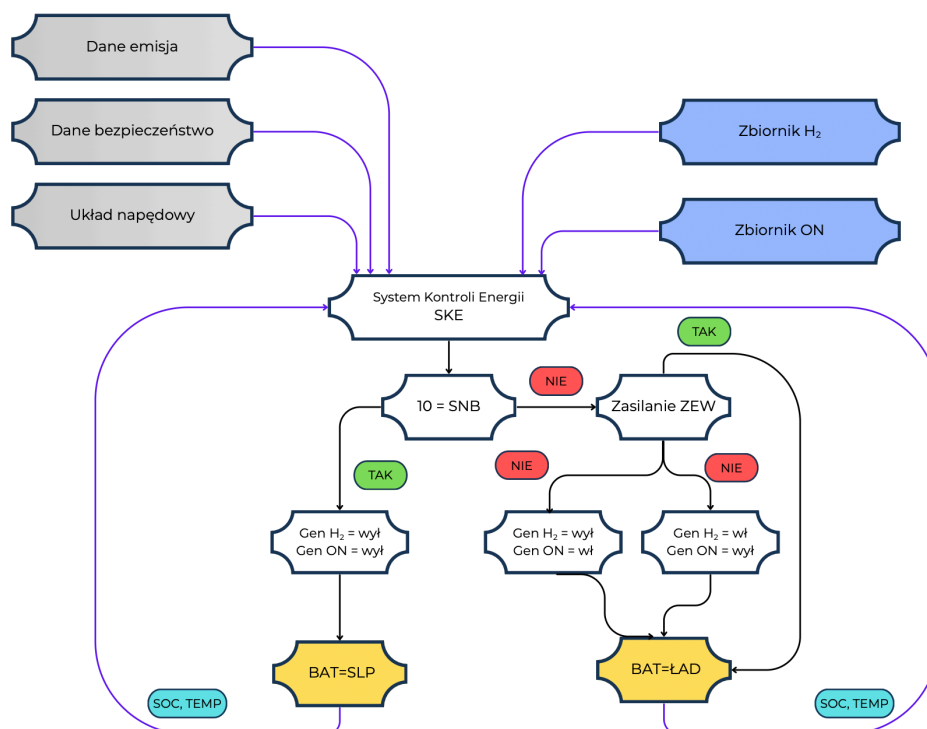
5.4. Algorytm sterowania

W ramach prac badawczych opracowano architekturę algorytmu sterowania wielopaliwową jednostką napędową. Zdefiniowano parametry wejściowe i wyjściowe. Opisano zasadę działania algorytmu dla przewidzianych scenariuszy operacji eksploatacyjnych. Zestawiono reguły i procedury pracy systemu. Następnie wykorzystano otrzymane dane do opracowania modelu obliczeniowego. Należy jednak zaznaczyć, że w testowanej jednostce pływającej do badań użyto sterownika systemu opracowany przez firmę zewnętrzną, dostawcę układu ogniwa paliwowego. Montaż autorskiego sterownika opartego na opracowanym algorytmie był niemożliwy z przyczyn regulacyjno-prawnych. W zakresie badań w warunkach rzeczywistych na przyjętą metodykę badawczą różnica w autorskiej architekturze sterowania i architekturze komercyjnej nie miała wpływu na wyniki badań.

6. Opracowanie algorytmu sterowania

6.1. Operacje w obszarze cumowania

W ramach badań opracowano założenia do algorytmu sterowania w tym głównie dane wejściowe, dane wyjściowe oraz określono warunki zmienne i pomocnicze. Architektura działania algorytmu opisano poniżej. Konfiguracja systemu zarządzania energią dedykowana dla operacji portowych związanych z cumowaniem katamaranu hybrydowego znacząco różni się od procedur żeglugowych. Na rysunku 20 przedstawiono schemat blokowy dla operacji cumowania. Centralnym elementem całego układu jest System Kontroli Energii (SKE), który w trybie portowym realizuje algorytmy sterowania dostosowane do specyfiki operacji cumowniczych, gdzie priorytetem jest redukcja emisji spalin, obniżenie poziomu hałasu oraz kosztów eksploatacyjnych przez maksymalne wykorzystanie dostępnej infrastruktury brzegowej. Zasadniczą różnicą w stosunku do konfiguracji żeglugowej jest wprowadzenie zewnętrznego zasilania jako podstawowego źródła energii elektrycznej, co umożliwia całkowite wyłączenie wewnętrznych generatorów spalinowych podczas postoju w porcie. Ta strategia operacyjna nie tylko eliminuje emisję związków szkodliwych oraz hałas generowany przez silniki konwencjonalne, ale również znacząco redukuje zużycie paliw kopalnych oraz koszty eksploatacyjne związane z utrzymaniem układów napędowych w stanie ciągłej gotowości. System Kontroli Energii w trybie portowym monitoruje dostępność oraz parametry jakościowe zasilania brzegowego, automatycznie przełączając się na wewnętrzne źródła energii w przypadku zakłóceń w dostawie energii z sieci portowej.



Rys. 20. Schemat blokowy algorytmu sterowania podczas zacumowanej jednostki pływającej

Zasadniczą modyfikacją algorytmu sterowania w konfiguracji portowej jest zmiana kryterium decyzyjnego dotyczącego stanu naładowania baterii, gdzie próg aktywacji zdefiniowano jako $SNB=10$, eliminując tym samym złożone procedury awaryjne charakterystyczne dla operacji żeglugowych. Ta uproszczony sposób sterowania odzwierciedla stabilne warunki eksploatacyjne panujące w porcie, gdzie zapotrzebowanie na energię ogranicza się głównie do systemów pomocniczych, oświetlenia oraz urządzeń pokładowych, bez konieczności zapewnienia mocy napędowej wymaganej podczas żeglugi. Wprowadzenie trybu gotowości baterii oznaczonego jako $BAT=SLP$ stanowi istotną innowację w zarządzaniu energią portową, gdzie akumulatory pozostają w stanie częściowej aktywności umożliwiającej natychmiastową reakcję na wzrost zapotrzebowania na energię, jednocześnie minimalizując straty związane z samorozładowaniem oraz obniżeniem trwałości ogniwa. Ten tryb operacyjny charakteryzuje się precyzyjną regulacją temperatury akumulatorów przez kontrolowane systemy chłodzenia oraz grzania, co jest szczególnie istotne podczas długotrwałych postojów w różnych warunkach klimatycznych, zapewniając dobór parametrów eksploatacyjnych akumulatorów niezależnie od zewnętrznych czynników środowiskowych. System Kontroli Energii w konfiguracji portowej implementuje algorytmy predykcyjne, które na podstawie historycznych danych eksploatacyjnych oraz planowanych operacji portowych dobierają harmonogram ładowania akumulatorów, wykorzystując okresy niskiego zapotrzebowania energetycznego dla maksymalizacji efektywności procesów ładowania. W sytuacji, gdy zewnętrzne zasilanie brzegowe jest niedostępne lub jego parametry nie spełniają wymagań technicznych, system automatycznie aktywuje ogniwo paliwowe jako preferowane źródło energii zapasowej, co wynika z jego zerowej emisji oraz cichej pracy, szczególnie pożądanых w środowisku portowym. Analiza parametrów SOC oraz temperatury akumulatorów w trybie portowym charakteryzuje się zwiększoną precyzją oraz częstotliwością pomiarów, co umożliwia wczesne wykrywanie potencjalnych zmian eksploatacyjnych. System dobiera cykle ładowania oraz rozładowania w celu zapewnienia maksymalnej trwałości akumulatorów, a także automatycznie dostosowuje parametry ładowania do aktualnego stanu technicznego poszczególnych modułów akumulatorów, zapewniając równomierne obciążenie oraz ograniczając ryzyko przedwczesnego zużycia. Dane bezpieczeństwa w trybie portowym koncentrują się na monitorowaniu systemów przeciwpożarowych, wentylacji pomieszczeń zawierających zbiorniki paliw oraz kontroli hermetyczności instalacji wodorowej w kontenerze, która w warunkach ograniczonej wentylacji naturalnej wymaga szczególnej uwagi ze względu na właściwości fizykochemiczne wodoru. Umieszczając butle wodoru w przestrzeni otwartej ograniczono znacząco ryzyko związane z rozszczelnieniem samych butli i podłączenia do instalacji w kontenerze. System aktywuje czujniki wykrywające potencjalne wycieki wodoru, automatycznie uruchamiając procedury bezpieczeństwa oraz systemy alarmowe w przypadku wykrycia stężeń przekraczających dopuszczalne normy bezpieczeństwa. Algorytm decyzyjny systemu w konfiguracji portowej charakteryzuje się znacznym uproszczeniem w porównaniu z procedurami żeglugowymi, gdzie po spełnieniu

kryterium $SNB=10$ system przechodzi bezpośrednio do oceny dostępności zewnętrznego zasilania. W przypadku jego dostępności wszystkie wewnętrzne źródła ładowania pozostają wyłączone, a akumulatory przechodzą w tryb gotowości z możliwością ładowania z sieci brzegowej według wybranego harmonogramu. Gdy zasilanie zewnętrzne nie jest dostępne, system aktywuje ogniwo paliwowe, które zapewnia ciągłość zasilania systemów pokładowych przy minimalnym wpływie na środowisko w otoczeniu cumowania.

6.2. Operacje w obszarze wód śródlądowych i offshore

Do obsługi operacji w obszarze pozaportowym i na wodach otwartych opracowano inny algorytm dla wielopaliwowego systemu zarządzania energią wykorzystującego trzy różne źródła energii (rys. 21). Podobnie jak poprzednio centralnym elementem całego układu jest System Kontroli Energii (SKE), który pełni funkcję nadrzędnego kontrolera odpowiedzialnego za koordynację przepływu energii pomiędzy poszczególnymi podsystemami oraz dobór efektywności energetycznej całej jednostki pływającej. SKE stanowi system sterowania, który w czasie rzeczywistym analizuje dane pochodzące z czujników monitorujących stan wszystkich komponentów napędowych, poziomy paliw w zbiornikach oraz parametry eksploatacyjne akumulatorów, aby podejmować właściwe decyzje dotyczące konfiguracji źródeł energii w zależności od aktualnych wymagań operacyjnych. Architektura systemu obejmuje trzy źródła energii, z których każde charakteryzuje się odmiennymi właściwościami eksploatacyjnymi i środowiskowymi. Pierwszy z nich stanowi system ogniwa paliwowego zasilanego wodorem z zestawu butli wodorowych. Drugie źródło energii to generator ON. Trzeci element stanowi zestaw akumulatorów, który może bezpośrednio zasiląć silniki elektryczne. Podstawowym aspektem funkcjonowania tego systemu jest algorytm decyzyjny oparty na monitorowaniu Stanu Naładowania Baterii (SNB), który został podzielony na trzy krytyczne zakresy operacyjne determinujące strategię zarządzania energią. Gdy SNB znajduje się w przedziale od 10 do 2, system przechodzi do analizy aktualnego zapotrzebowania na moc, porównując je z predefiniowanymi progami P_{max} , P_{ster} , co pozwala na precyzyjne dopasowanie konfiguracji źródeł energii do bieżących potrzeb napędowych. W scenariuszu, gdy SNB spada poniżej krytycznej wartości – 2, automatycznie aktywowana zostaje procedura awaryjna, która priorytetowo uruchamia ogniwo paliwowe wraz z generatorem ON, który dysponuje większymi rezerwami paliwa, zapewniając tym samym ciągłość zasilania systemów krytycznych oraz możliwość powrotu do portu lub miejsca schronienia. Ważnym elementem strategii operacyjnej systemu jest inteligentne zarządzanie mocą w zależności od aktualnych wymagań napędowych jednostki. W sytuacji, gdy moc chwilowa zawiera się w wybranym przedziale operacyjnym, energia do napędu silników elektrycznych pobierana jest wyłącznie z akumulatorów, podczas gdy wszystkie generatory pozostają wyłączone, co maksymalizuje efektywność energetyczną oraz ogranicza hałas i emisję substancji szkodliwych.

Jednak, gdy zapotrzebowanie na moc przekracza możliwości samych akumulatorów i uniemożliwia osiągnięcie prędkości sterowej niezbędnej do bezpiecznej nawigacji, system przechodzi do kolejnego etapu analizy, uwzględniającego parametr bezpieczeństwa żeglugi oznaczony jako B. Ta kompleksowa diagnostyka pozwala na proaktywne planowanie operacji oraz minimalizuje ryzyko całkowitego zużycia paliwa w trakcie rejsu. Przedstawiona architektura systemu to innowacyjne rozwiązanie, które łączy najnowsze technologie napędowe z tradycyjnymi, sprawdzonymi rozwiązaniami, oferując operatorom maksymalną sprawnością operacyjną przy jednoczesnym zachowaniu wysokich standardów bezpieczeństwa, dzielności oraz efektywności środowiskowej.

Parametr bezpieczeństwa B reprezentuje krytyczną ocenę, czy dostępne rezerwy energii w akumulatorach są wystarczające do osiągnięcia planowanego celu podróży z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa. Jeśli analiza wykaże, że energia zgromadzona w bateriach jest wystarczająca, system aktywuje wyłącznie ogniwo paliwowe, które charakteryzuje się najwyższą efektywnością energetyczną oraz zerową emisją, zapewniając jednocześnie maksymalnie bezpieczny poziom naładowania akumulatorów przez cały czas trwania rejsu. Ta strategia operacyjna jest szczególnie korzystna podczas żeglugi w obszarach chronionych środowiskowo lub w portach, które wprowadziły restrykcyjne normy emisyjne. W przeciwnym scenariuszu, gdy rezerwy energii są niewystarczające do bezpiecznego ukończenia podróży, system przechodzi do analizy parametru emisji oznaczonego jako E, który wprowadza element decyzyjny dla operatora jednostki pływającej. W tym krytycznym punkcie operator otrzymuje możliwość wyboru strategii ładowania akumulatorów spośród dostępnych opcji, uwzględniając aktualne uwarunkowania środowiskowe, regulacje lokalne oraz preferencje operacyjne. Może zdecydować się na uruchomienie generatora ON, który charakteryzuje się większą niezawodnością eksploatacyjną. Pożądaną cechą opracowanego algorytmu jest możliwość równoległej pracy ogniwa paliwowego z generatora ON, co znacząco redukuje czas ładowania akumulatorów oraz zwiększa całkowitą moc dostępną dla systemu napędowego. Ta konfiguracja jest możliwa dzięki różnicy w rodzaju prądu produkowanego przez poszczególne źródła energii – ogniwo paliwowe generuje prąd stały, który może być bezpośrednio wprowadzany do systemu zarządzania energią, podczas gdy generator ON produkuje prąd zmienny wymagający odpowiedniego przetwarzania przed integracją z systemem. Krytycznym ograniczeniem eksploatacyjnym jest brak możliwości jednoczesnego zastosowania dwóch generatorów na ON i np. LPG czy CNG, co wynika zasad elektrotechniki dotyczących synchronizacji źródeł prądu zmiennego – wprowadzenie do jednej sieci elektrycznej dwóch niezależnych źródeł prądu zmiennego bez synchronizatora co doprowadziłoby do uszkodzenia układu napędowego. System Kontroli Energii monitoruje również parametry SOC (*State of Charge*) oraz temperaturę akumulatorów, co umożliwia wybór opcji ładowania oraz przedłużenie trwałości ogniwa przez unikanie stanów przegrzania lub zbyt głębokiego rozładowania. Dodatkowo, system nadzoruje poziomy paliw we wszystkich zbiornikach, zapewniając odpowiednie rezerwy dla każdego typu paliwa oraz sygnalizując konieczność uzupełnienia przed osiągnięciem krytycznie niskich poziomów.

7. Badania w warunkach rzeczywistych

7.1. Wyniki badań w warunkach rzeczywistych

Przeprowadzenie badań w warunkach rzeczywistych stanowi ważny element walidacji opracowanego modelu energetycznego sterowania napędem katamaranu oraz weryfikacji teoretycznych założeń dotyczących efektywności różnych systemów napędowych. Eksperyment terenowy zaprojektowano uwzględniając metodologię pomiarów emisji w czasie rzeczywistym. Badania wykonano na trasie opisanej w punkcie 5, obejmującej rejon Martwej Wisły charakteryzujący się kontrolowanymi warunkami hydrologicznymi oraz ograniczoną ekspozycją na czynniki zewnętrzne mogące wpływać na wyniki pomiarów. Wybór lokalizacji umożliwił przeprowadzenie testów porównawczych w identycznych warunkach środowiskowych, co stanowi podstawę dla analizy różnych systemów napędowych. Badania podzielono na trzy warianty o identycznej charakterystyce operacyjnej, różniące się jedynie zastosowanym systemem generacji energii elektrycznej. Każdy wariant trwał 40 minut, podczas których jednostka pokonywała dystans około 6 kilometrów przy prędkości operacyjnej 5 węzłów. Pierwszy wariant testu został przeprowadzony z wykorzystaniem generatora zasilanego ON, w drugim wariantcie zastosowano system ogniwa paliwowego zasilanego wodorem, trzeci wariant to badania obejmujące pokonanie 12 km tylko na energii z akumulatorów. Pomiary przeprowadzono w warunkach: temperatura powietrza 17°C, wilgotność względna 62%. Prędkość wiatru nie przekraczała 2 m/s, co eliminowało wpływ czynników aerodynamicznych na charakterystyki emisji. Stan morza odpowiadał 1–2 stopniom w skali Beauforta z wysokością fali nieprzekraczającą 0,5 metra. Pierwszy i drugi etap badań z wykorzystaniem generatora zasilanego ON i ogniwa paliwowego dostarczyły szczegółowych danych dotyczących charakterystyk spalania oraz emisji zanieczyszczeń w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Poniżej wyniki analiz i obliczeń zestawiono w formie tabelarycznej (tab. 12-22) dla wszystkich przyjętych wariantów.

Tabela 12. Dane do testów dla poszczególnych wariantów

Wariant	Układ zasilania	Dystans testu [km]	Czas testu [min]	Uzasadnienie dystansu
1	Generator na olej napędowy	6	40	Standardowy test emisji
2	Ogniwo paliwowe	6	40	Porównywalność z generatorem
3	Akumulatory	12	80	Ocena wydajności baterii

Tabela 13. Obliczona sprawność dla poszczególnych konfiguracji układu napędowego

Konfiguracja	Moc nominalna	Typ	Paliwo/Energia	Sprawność konfiguracji
Generator na olej napędowy	25 kW	Spalinowy	Olej napędowy	42%
Ogniwo paliwowe	30 kW	Elektrochemiczny	Wodór H ₂	55%
Akumulatory	60 kW	Elektryczny	Energia elektryczna	90%

Tabela 14. Zużycie paliwa i energii

Wariant	Dystans [km]	Czas [h]	ON [kg]	ON [dm ³]	H ₂ [kg]	Energia [kWh]
1	6	0,67	3,24	3,85	0,000	0,000
2	6	0,67	0,000	0,000	1,03	0,000
3	12	1,33	0,000	0,000	0,000	7,38

Tabela 15. Wykorzystanie pojemności nośników energii

Nośnik energii	Pojemność	Zużycie na test	Wykorzystanie %	Pozostała rezerwa
Olej napędowy	400 dm ³	3,85 dm ³	1,0%	396,15 dm ³
Wodór H ₂	20 kg	1,04 kg	5,2%	18,96 kg
Akumulatory	162 kWh	7,38 kWh	4,6%	154,62 kWh

Tabela 16. Emisja szkodliwych składników spalin

Wariant	Dystans [km]	CO ₂ [kg]	NO _x [g]	HC [g]	PM [g]	CO [g]	Charakterystyka
1	6	10,24	65,90	1,47	0,36	3,55	Pełny zakres emisji
2	6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Brak emisji
3	12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Brak emisji

Tabela 17. Emisja jednostkowa szkodliwych składników spalin

Związek toksyczny	Wariant 1 [g/km]	Wariant 2 [g/km]	Wariant 3 [g/km]	Redukcja względem Wariantu 1
CO ₂	1706,67	0,00	0,00	100%
NO _x	10,98	0,00	0,00	100%
HC	0,25	0,00	0,00	100%
PM	0,06	0,00	0,00	100%
CO	0,59	0,00	0,00	100%

Tabela 18. Wyznaczone zasięgi operacyjne przy pełnych zbiornikach i naładowanych akumulatorach

Konfiguracja	Pojemność	Zasięg teoretyczny [km]	Czas pracy [h]	Ograniczenia
Generator na olej napędowy	400 dm ³	415,20	46,10	Emisja, hałas
Ogniwo paliwowe	20 kg	77,30	8,60	Infrastruktura H ₂
Akumulatory	162 kWh	175,70	19,50	Czas ładowania

Tabela 19. Profil energetyczny akumulatorów na trasie 12 km

Parametr	Wartość	Jednostka	Komentarz
Energia początkowa	162,00	kWh	Pełne naładowanie
Zużycie na 12 km	7,38	kWh	Rzeczywiste zużycie
Energia końcowa	154,62	kWh	Po wykonanym teście
Sprawność całkowita	90,00	%	System napędowy
Stan naładowania końcowy	95,40	%	Stan naładowania
Rezerwa eksploatacyjna	154,60	kWh	Dostępna energia

Tabela 20. Konfiguracje napędu według dystansu operacyjnego

Zakres tras [km]	Główny nośnik energii	Alternatywny nośnik energii	Uzasadnienie
0–50	Akumulatory	Ogniwo paliwowe	Najwyższa efektywność,
50–150	Akumulatory	System hybrydowy	Zasięg do 175 km, zero emisji
150–300	System hybrydowy	Generator na olej napędowy	Kompromis zasięg-ekologia
>300	Generator na olej napędowy	System hybrydowy	Najwyższy czas pracy

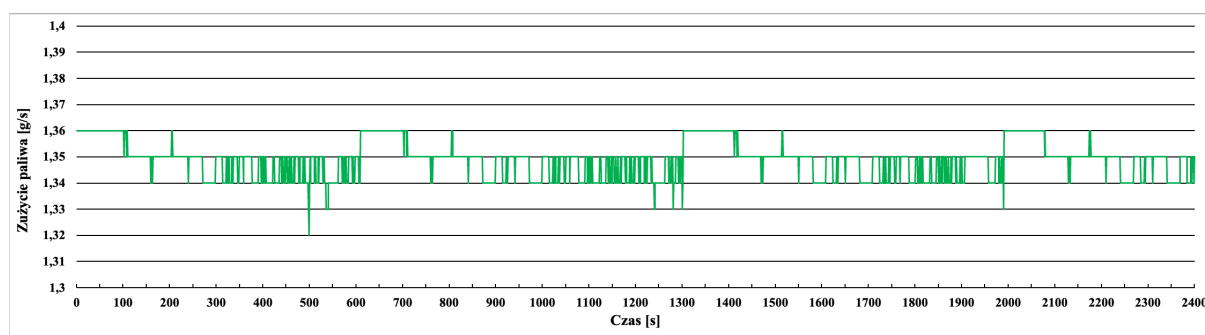
Tabela 21. Kryteria wyboru systemu

Kryterium priorytetowe	System rekomendowany	Uwagi
Zerowe emisje	Akumulatory / Ogniwo paliwowe	Idealne dla stref ECA
Maksymalny zasięg	Generator na olej napędowy	Do 415 km
Najwyższa niezawodność	Generator na olej napędowy	Sprawdzona technologia

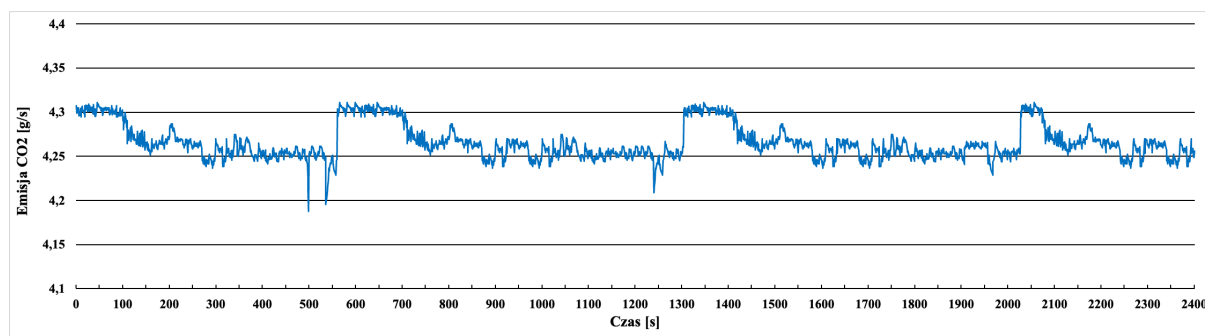
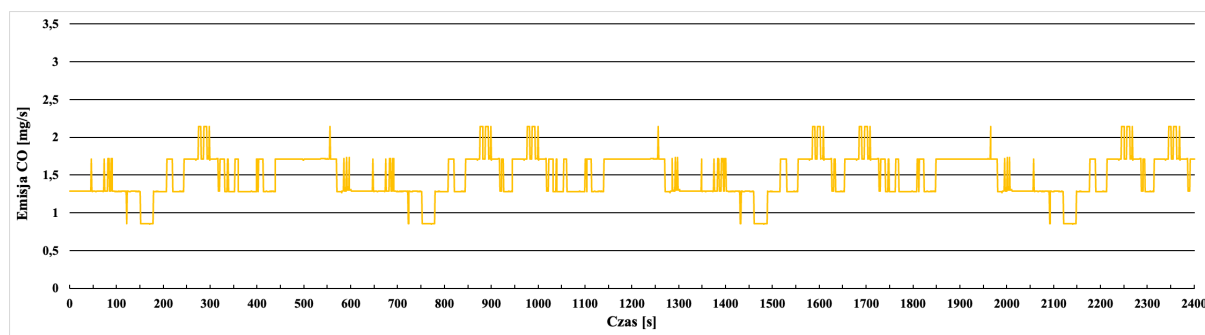
Tabela 22. Dobór systemów według zastosowań

Aplikacja	System #1	System #2	System #3	Uzasadnienie
Transport przybrzeżny	Akumulatory	Ogniwo paliwowe	Generator na olej napędowy	Brak emisji oraz efektywność
Operacje portowe	Akumulatory	Ogniwo paliwowe	Generator na olej napędowy	Regulacje środowiskowe
Operacje długodystansowe	Generator na olej napędowy	System hybrydowy	Akumulatory	Autonomia operacji
Strefy ECA	Akumulatory	Ogniwo paliwowe	System hybrydowy	Wymagania emisyjne

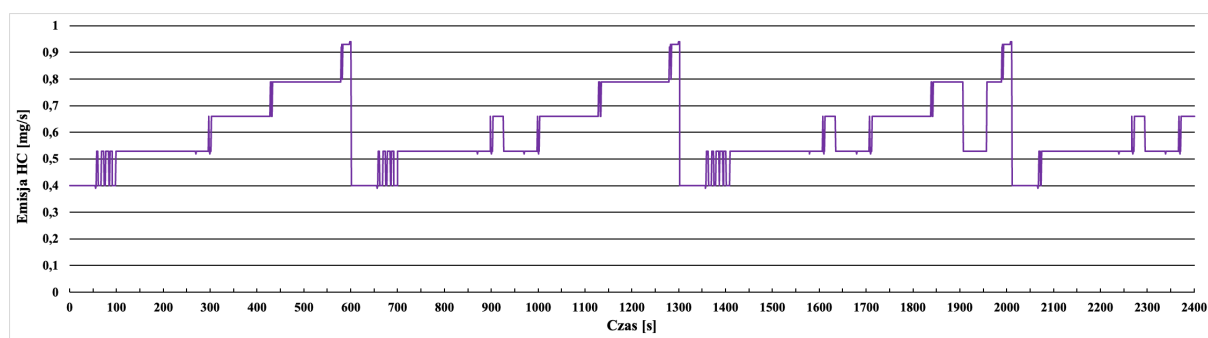
Emisję oraz zużycie paliwa w czasie zarejestrowane podczas badań w wariancie pierwszym przedstawiono na rysunkach 22–27.



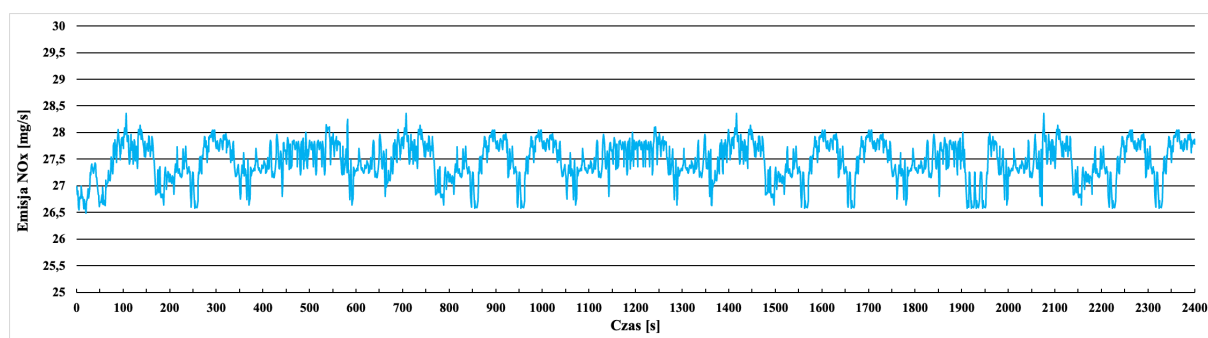
Rys. 22. Zużycie paliwa w trakcie przeprowadzonych badań

Rys. 23. Emisja dwutlenku węgla CO₂ w trakcie przeprowadzonych badań

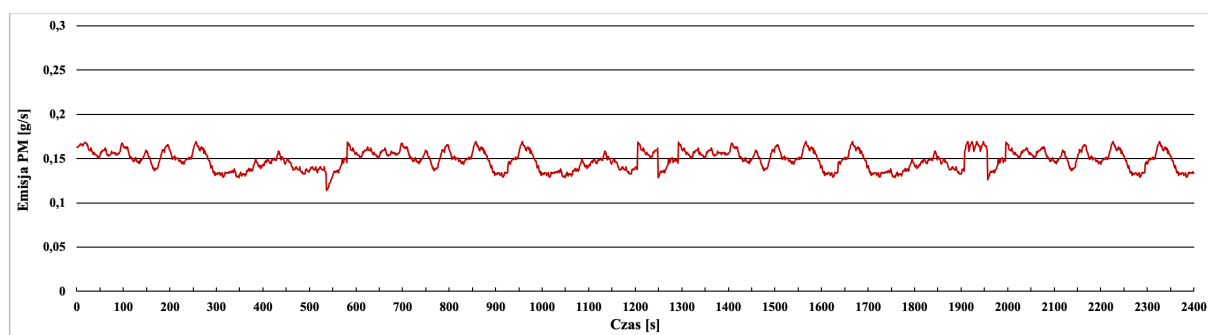
Rys. 24. Emisja tlenku węgla CO w trakcie przeprowadzonych badań



Rys. 25. Emisja węglowodorów HC w trakcie przeprowadzonych badań

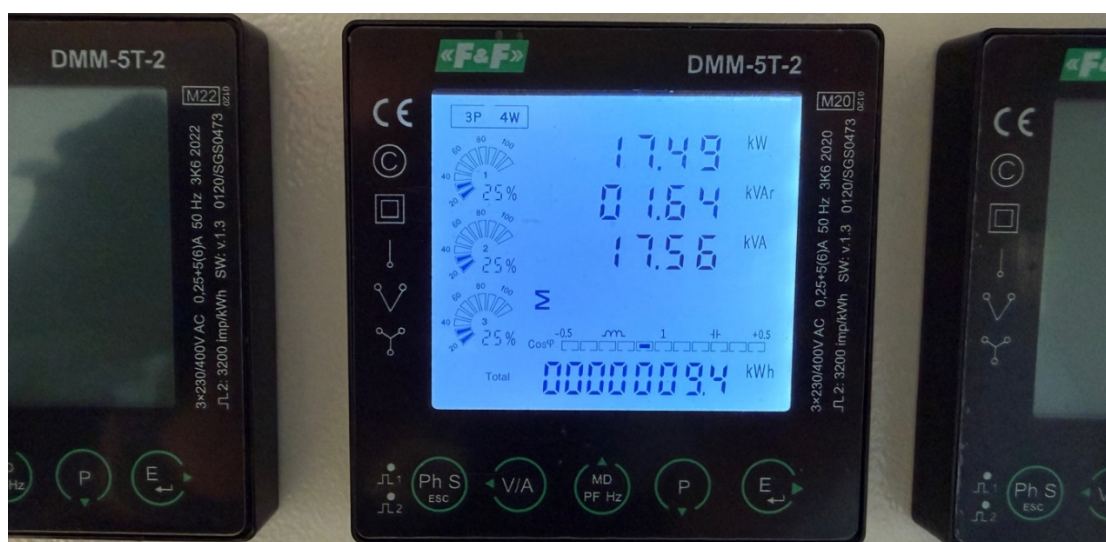


Rys. 26. Emisja tlenków azotu NO_x w trakcie przeprowadzonych badań



Rys. 27. Emisja cząstek stałych PM w trakcie przeprowadzonych badań

Drugi etap badań z wykorzystaniem systemu ogniwa paliwowego dostarczył danych dotyczących efektywności konwersji wodoru na energię elektryczną w warunkach rzeczywistej eksploatacji morskiej. System bazujący na technologii PEM (*Proton Exchange Membrane*) wykazał wysoką stabilność pracy oraz efektywność energetyczną na poziomie 55,3%. Analiza zużycia wodoru wykazała średnie zużycie na poziomie 1,55 kg/H₂ podczas 40-minutowego cyklu badawczego, co odpowiada jednostkowemu zużyciu 0,13 kg H₂/kWh wygenerowanej energii elektrycznej co odpowiada średniej mocy generowanej o wartości 12 kW. Na rysunku 28 przedstawiono widok panelu sterowania.



Rys. 28. Widok panelu sterującego z chwilową mocą generowaną przez ogniwo paliwowe

System wykazał stabilną charakterystykę zużycia wodoru, co potwierdza wysoką jakość procesu elektrochemicznego. Brak lokalnych emisji zanieczyszczeń oraz niski poziom hałasu akustycznego czyni system ogniwa paliwowego istotnym rozwiązaniem dla zastosowań w obszarach chronionych środowiskowo.

Oba systemy wykazały wysoką niezawodność podczas 40-minutowych cykli badawczych bez wystąpienia awarii czy zakłóceń w pracy. Generator o zapłonie samoczynnym charakteryzował się typowymi dla silników spalinowych chwilowymi wahaniami parametrów pracy związanymi z cyklicznym charakterem spalania oraz krótkotrwałą zmianą obciążenia.

7.2. Opracowanie modelu zużycia energii

Modelowanie energetyczne jednostek pływających stanowi złożoną dziedzinę inżynierii okrętowej, wymagającą uwzględnienia licznych czynników wpływających na bilans energetyczny jednostki pływającej. W przypadku obiektu badań, szczególną uwagę zwrócono na specyfikę konstrukcji wielokadłubowej oraz jej wpływ na charakterystyki hydrodynamiczne. Podstawą metodologiczną są prace zespołu profesora A.F. Mollanda z Uniwersytetu Southampton, które doprowadziły do opracowania standardowych metod obliczania oporu katamaranów [167]. Metody te zostały uzupełnione o najnowsze zalecenia International Towing Tank Conference, w szczególności dotyczące linii korelacyjnej ITTC 57 dla obliczania współczynnika oporu tarcia [242]. Model energetyczny opracowano przy założeniu pracy jednostki w warunkach reprezentatywnych dla eksploatacji w III rejonie żeglugi. Przyjęto stan morza odpowiadający 1 stopniowi w skali Beauforta, co charakteryzuje się niską falą do 0,2 metra oraz prędkością wiatru na poziomie 2 m/s. Warunki te są reprezentatywne dla typowej eksploatacji jednostek tego typu w morzach przybrzeżnych oraz akwenach śródlądowych. charakteryzuje się następującymi parametrami geometrycznymi, które stanowiły podstawę dla wszystkich obliczeń hydrodynamicznych:

- Długość kadłuba L: 13,5 metra - parametr ten ma znaczenie dla obliczania liczby Reynoldsa oraz liczby Froude'a, które determinują charakter opływu kadłuba oraz intensywność generacji fal.
- Szerokość całkowita B: 7,0 metrów - rozstaw kadłubów katamaranu wpływa na interferencję hydrodynamiczną między kadłubami oraz na stabilność jednostki.
- Zanurzenie T: 1,2 metra - parametr ten determinuje powierzchnię zwilżoną kadłuba oraz wpływa na charakterystyki oporu, szczególnie w zakresie niskich prędkości.
- Powierzchnia zwilżona S: 89,75 m² - wartość ta została obliczona z uwzględnieniem rzeczywistego kształtu kadłubów oraz stanowi podstawę dla obliczania oporu tarcia według formuły ITTC 57.

Wymienione parametry określono na podstawie rzeczywistej dokumentacji projektowej jednostki oraz zweryfikowano przez analizę podobnych konstrukcji katamaranów o zbliżonych charakterystykach eksploatacyjnych. Model energetyczny opracowano dla określonych warunków środowiskowych, które mają istotny wpływ na zapotrzebowanie energetyczne jednostki:

- Gęstość wody morskiej (ρ): 1025 kg/m³ – wartość odpowiadająca typowej gęstości wody morskiej przy temperaturze 9°C i średnim zasoleniu.
- Temperatura wody: 9°C – temperatura ta wpływa na lepkość kinematyczną wody, co ma bezpośredni wpływ na obliczanie liczby Reynoldsa i współczynnika oporu tarcia.
- Temperatura powietrza: 17°C – parametr wpływający na gęstość powietrza oraz opór aerodynamiczny części nadwodnej jednostki.
- Prędkość eksploatacyjna: 5 węzłów (2,572 m/s) – prędkość ta została wybrana jako typowa dla eksploatacji jednostek pływających w obszarze Martwej Wisły.

Opór hydrodynamiczny katamaranów różni się od oporu jednostek jednokadłubowych ze względu na obecność interferencji między kadłubami. Teoria oporu katamaranów została rozwinięta przez zespoły badawcze z Uniwersytetu Southampton oraz innych ośrodków naukowych, prowadząc do opracowania metod uwzględniających specyfikę tego typu konstrukcji. W przypadku opisywanego katamaranu, całkowity opór hydrodynamiczny składa się z następujących składowych:

- Opór tarcia RF - wynika z lepkości wody oraz wywołuje powstawanie warstwy granicznej na powierzchni kadłuba. Jest to składowa dominująca przy niskich prędkościach i obliczana jest zgodnie z formułą ITTC 57.
- Opór falowy RW - powstaje w wyniku generacji układu fal przez poruszający się kadłub. Dla katamaranów, opór ten jest modyfikowany przez interferencję między układami fal generowanymi przez oba kadłuby.
- Opór form RF_r - związany z kształtem kadłuba oraz separacją strumienia na rufie. W przypadku katamaranów o smukłych kadłubach, składowa ta jest niewielka.

Współczynnik oporu tarcia dla katamaranu obliczono zgodnie z formułą korelacyjną ITTC 57, która stanowi międzynarodowy standard w hydrodynamice okrętowej [242]:

$$CF = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (7.1)$$

gdzie:

- CF – bezwymiarowy współczynnik oporu tarcia [-]
- Re – liczba Reynoldsa [-]
- $\log_{10}$ – logarytm dziesiętny
- 0,075 – stała empiryczna ITTC 57 [-]
- 2 – stała korekcyjna ITTC 57 [-]

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (7.2)$$

gdzie:

- Re – liczba Reynoldsa [-]
- V – prędkość jednostki względem wody [m/s]
- L – długość charakterystyczna kadłuba (długość linii wodnej) [m]
- ν – lepkość kinematyczna wody morskiej [m²/s]

Liczba Reynoldsa dla katamaranu przy prędkości 5 węzłów wynosi $Re = 2,92 \times 10^7$, co plasuje jednostkę w zakresie w pełni turbulentnego opływu kadłuba. Obliczony współczynnik oporu tarcia $CF = 0,002511$ jest charakterystyczny dla jednostek tej wielkości i prędkości. Lepkość kinematyczna wody morskiej przy temperaturze 9°C wynosi $\nu = 1,188 \times 10^{-6}$ m²/s, co jest wartością uwzględnioną we wszystkich obliczeniach. Temperatura ta jest reprezentatywna dla warunków eksploatacji w morzach umiarkowanych przez większość roku. Liczba Froude'a stanowi zasadniczy parametr charakteryzujący warunki pracy jednostki z punktu widzenia generacji fal [241]:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (7.3)$$

gdzie:

- Fn – liczba Froude'a [-]
- V – prędkość jednostki [m/s]
- g – przyspieszenie ziemskie 9,81 [m/s²]
- L – długość charakterystyczna kadłuba [m]

Opór falowy katamaranów jest zagadnieniem szczególnie złożonym ze względu na interferencję między układami fal generowanymi przez oba kadłuby. W zależności od rozstawu

kadłubów oraz prędkości, interferencja może być konstruktywna lub destruktywna, wpływając odpowiednio na zwiększenie lub zmniejszenie oporu falowego. Dla obiektu badawczego, liczbą Froude'a wynosi $Fn = 0,223$, co klasyfikuje jednostkę jako pracującą w stanie podkrytycznym. W tym zakresie prędkości, opór falowy jest umiarkowany, lecz stanowi znaczącą składową całkowitego oporu. Zgodnie z metodologią Mollanda, współczynnik oporu falowego dla katamaranów można estymować na podstawie serii systematycznych badań przeprowadzonych w Narodowym Laboratorium Fizycznym (NPL) [241]. Dla katamaranu, przyjęto $CW = 0,0012$, co jest wartością typową dla jednostek o podobnym stosunku długości do szerokości kadłuba oraz liczbie Froude'a. Całkowity współczynnik oporu składa się z sumy współczynnika oporu tarcia oraz współczynnika oporu falowego [241]:

$$CT = CF + CW \quad (7.4)$$

gdzie:

- CT – całkowity współczynnik oporu [-]
- CF – współczynnik oporu tarcia [-]
- CW – współczynnik oporu falowego [-]

Wartość $CT = 0,003711$ wykorzystano w modelu jako podstawowy parametr charakteryzujący opór hydrodynamiczny kadłuba w warunkach wodnych spokojnych. Rzeczywiste warunki eksploatacji różnią się od idealnych warunków wody spokojnej przyjmowanych w obliczeniach teoretycznych. Falowanie morza powoduje dodatkowy opór związany z:

- Odbiciem fal od kadłuba jednostki
- Zmianami zanurzenia i trymu w czasie ruchu
- Dodatkowymi ruchami jednostki (kołysanie, kilowanie)

Całkowity opór hydrodynamiczny kadłuba obliczany jest ze wzoru [241]:

$$R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot CT \quad (7.5)$$

gdzie:

- R – całkowity opór hydrodynamiczny [N]
- ρ – gęstość wody morskiej [kg/m^3]
- V – prędkość jednostki [m/s]
- S – powierzchnia zwilżona kadłuba [m^2]
- CT – całkowity współczynnik oporu [-]
- $\frac{1}{2}$ – stała z równania Bernoulliego

Dla stanu morza 1 w skali Beauforta (wysokość fali 0,2 m), współczynnik zwiększenia oporu od fal przyjęto na poziomie 0,5. Opór aerodynamiczny części nadwodnej jednostki stanowi

dodatkową składową całkowitego oporu, szczególnie istotną dla jednostek o znacznej powierzchni czołowej nad wodą. Katamaran, posiadający rozbudowaną nadbudówkę oraz mostek kapitański, jest narażony na znaczący wpływ wiatru. Dla prędkości wiatru 1 m/s, współczynnik zwiększenia oporu od wiatru przyjęto na poziomie 0,65. Wartość ta uwzględnia zarówno bezpośredni opór aerodynamiczny, jak i wtórne efekty związane z dryfem jednostki oraz koniecznością korekcji kursu [241]. Uwzględniając wszystkie zmienne całkowity opór hydrodynamiczny wynosi 1656,61 N. Moc oporu stanowi moc teoretycznie potrzebną do pokonania oporu hydrodynamicznego jednostki. Obliczana jest zgodnie ze wzorem:

$$PE = \frac{R \cdot V}{1000} \quad (7.6)$$

gdzie:

- PE – moc oporu [kW]
- R – opór kadłuba [N]
- V – prędkość jednostki [m/s]

Zatem moc oporu wynosi 4,26 kW jest to wartość, którą wykorzystano w dalszych obliczeniach związanych z rzeczywistą mocą potrzebną do napędu. Aby obliczyć tę zmienną konieczne jest uwzględnienie wszystkich sprawności poszczególnych podzespołów od systemu ładowania przez baterię kończąc na sprawności układu ze śrubą napędową. Sprawność całego układu wynosi $\eta = 0,62$ i zawarta jest w następującym wzorze:

$$PP = PE \cdot \eta \quad (7.7)$$

gdzie:

- PP – rzeczywista moc potrzebna do napędu [kW]
- PE – moc oporu [kW]
- η – sprawność całego układu

Przyjęty model charakteryzuje się dużą uniwersalnością i możliwa jest edycja poszczególnych zmiennych, które determinują wzrost lub spadek w kontekście rzeczywistej mocy potrzebnej do napędu. Dzięki temu możliwe jest określenie teoretycznego zasięgu jednostki pływającej w różnych wariantach między innymi z wykorzystaniem samych akumulatorów, generatora ON lub ogniwa paliwowego w różnych konfiguracjach. W ramach kompleksowej analizy energetycznej wykonano również szczegółowe obliczenia związane z teoretycznym zasięgiem katamaranu dla czterech głównych konfiguracji napędowych: systemu bateryjnego (180 kWh), ogniwa paliwowego (20 kg H₂), generatora zasilanego ON (400 dm³). W przypadku źródeł zasilających baterię wykonano obliczenia mające na celu określenie ilości wytworzonej energii elektrycznej na podstawie ilości paliwa, uwzględniając rzeczywiste sprawności poszczególnych systemów konwersji energii.

8. Wyniki obliczeń na podstawie modelu – walidacja

8.1. Walidacja modelu

Walidacji modelu energetycznego katamaranu stanowi ważny etap weryfikacji poprawności przyjętych założeń teoretycznych oraz dokładności implementacji algorytmów obliczeniowych [203, 212]. Walidację przeprowadzono uwzględniając metodologie zalecane przez *International Towing Tank Conference* ITTC oraz *American Society of Mechanical Engineers* ASME w zakresie weryfikacji i walidacji modeli obliczeniowych [245, 13, 138]. Metodologia walidacji opiera się na porównaniu wyników uzyskanych z modelu teoretycznego z danymi eksperymentalnymi pochodzącymi z badań w warunkach rzeczywistych, przeprowadzonych w rejonie Martwej Wisły. Umożliwia to ocenę nie tylko dokładności predykcji modelu, ale również identyfikację czynników systematycznych wpływających na rozbieżności między teorią a praktyką [177]. Walidacja przeprowadzono dla sześciu podstawowych parametrów charakteryzujących pracę systemu napędowego katamaranu: zużycia oleju napędowego, zużycia wodoru, energii pobieranej przez napęd oraz emisji dwutlenku węgla. Wybór tych parametrów wynika z ich podstawowego znaczenia dla oceny efektywności energetycznej oraz wpływu środowiskowego różnych konfiguracji napędu [35, 168]. Zastosowane metody analizy statystycznej obejmują obliczenie względnych odchyleń procentowych, analizę błędów systematycznych oraz ocenę niepewności pomiarów zgodnie z wytycznymi *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* GUM [140]. Dodatkowo przeprowadzono analizę wrażliwości modelu na zmiany parametrów wejściowych w celu określenia stabilności predykcji w różnych warunkach eksploatacyjnych. Ocena jakości modeli obliczeniowych w inżynierii okrętowej opiera się na zestawie kryteriów ilościowych oraz jakościowych, które umożliwiają obiektywną ocenę przydatności modelu do celów projektowych oraz eksploatacyjnych [84, 154]. Zgodnie z zaleceniami ITTC, model można uznać za zwalidowany, jeżeli średnie odchylenie względne między predykcjami modelu a danymi eksperymentalnymi nie przekracza 10% dla parametrów o charakterze globalnym (takich jak całkowity opór czy zużycie paliwa) oraz 15% dla parametrów lokalnych charakteryzujących procesy termodynamiczne [137]. W przypadku modeli energetycznych jednostek pływających, szczególnie istotne są kryteria związane z:

- Dokładnością predykcji zużycia energii – odchylenia nie powinny przekraczać 8% dla warunków nominalnych oraz 12% dla warunków pozanominalnych.
- Stabilnością numeryczną – model powinien wykazywać zbieżność rozwiązań przy różnych krokach czasowych oraz różnych poziomach dyskretyzacji.
- Fizyczną sensownością wyników – wszystkie predykcje modelu muszą spełniać podstawowe prawa zachowania energii, pędu oraz masy.
- Wrażliwością na parametry wejściowe – model powinien wykazywać przewidywalną reakcję na zmiany warunków brzegowych oraz parametrów konstrukcyjnych.

Analiza niepewności stanowi integralny element procesu walidacji, umożliwiając rozróżnienie między błędami modelu a niepewnością pomiarową [87, 202]. W przeprowadzonej walidacji zastosowano metodę propagacji niepewności typu A (analizy statystycznej) oraz typu B (oceny systematycznej) zgodnie z zaleceniami ISO/IEC Guide 98-3 [9]. Niepewność standardowa dla każdego mierzonego parametru określono na podstawie:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (8.1)$$

gdzie:

- $u_c(y)$ – złożona niepewność standardowa rezultatu pomiaru
- f – funkcja modelowa łącząca wielkość mierzoną z wielkościami wejściowymi
- x_i – i -ta wielkość wejściowa
- $u(x_i)$ – niepewność standardowa wielkości x_i
- $u(x_i, x_j)$ – kowariancja między x_i a x_j

Porównanie teoretycznego zużycia oleju napędowego z wynikami eksperymentalnymi stanowi podstawowy test dokładności modelu w zakresie charakterystyk termodynamicznych silnika wysokoprężnego zapłonie samoczynnym. Model przewiduje jednostkowe zużycie paliwa na poziomie 4,54 kg/h, podczas gdy pomiary rzeczywiste wykazały wartość 4,86 kg/h, co odpowiada względnemu odchyleniu 6,58% [207]. Zidentyfikowane odchylenie mieści się w akceptowalnym przedziale dokładności dla modeli termodynamicznych silników spalinowych [43]. Główne przyczyny rozbieżności można przypisać:

- Wpływowi warunków środowiskowych – rzeczywista temperatura powietrza 17°C oraz ciśnienie atmosferyczne 1013 hPa nieznacznie różniły się od wartości standardowych przyjętych w modelu 15°C, 1013,25 hPa. Wyższa temperatura powietrza prowadzi do obniżenia jego gęstości o około 0,7%, co wpływa na parametry mieszanki paliwowo-powietrznej oraz efektywność spalania.
- Dynamice obciążenia silnika – model zakłada pracę przy stałym obciążeniu nominalnym, podczas gdy rzeczywista eksploatacja charakteryzuje się zmiennością wynikającą z manewrów jednostki oraz fluktuacji oporów hydrodynamicznych. Analiza danych PEMS wykazała odchylenie standardowe obciążenia na poziomie 8,3% wartości średniej.
- Tolerancjami produkcyjnymi silnika – parametry rzeczywistego silnika mogą odchyłać się od wartości nominalnych w granicach tolerancji producenta 3-5%

Zużycie paliwa w ramach całej trasy badawczej wykazało odchylenie identyczne 6,58%, co potwierdza systematyczny charakter rozbieżności oraz wskazuje na konieczność kalibracji modelu o stałą korekcyjną 1,065. Emisja CO₂ stanowi bezpośredni wskaźnik spalania węgla zawartego w paliwie oraz może służyć jako niezależna weryfikacja dokładności obliczenia

zużycia paliwa. Model przewiduje emisję CO₂ na poziomie 9,56 kg podczas 40-minutowego cyklu badawczego, podczas gdy pomiary wykazały 10,24 kg, co odpowiada odchyleniu 6,64%. Teoretyczny współczynnik emisji CO₂ wynosi 3,17 kg CO₂/kg oleju napędowego na podstawie stechiometrii spalania węglowodorów o wzorze przybliżonym C₁₂H₂₆ [130]. Rzeczywisty współczynnik obliczony z danych eksperymentalnych wynosi 3,16 kg CO₂/kg paliwa, co wskazuje na niemal idealną zgodność – odchylenie 0,3%. Ta zbieżność potwierdza, że odchylenie w emisji CO₂ wynika bezpośrednio z odchylenia w zużyciu paliwa, a nie z błędów w modelowaniu procesu spalania. Wysoka korelacja ($r = 0,998$) między tymi parametrami stanowi silną walidację spójności wewnętrznej modelu. Model przewiduje zapotrzebowanie energetyczne napędu na poziomie 6,85 kW, podczas gdy rzeczywiste pomiary wskazują 7,0 kW, co odpowiada odchyleniu 2,14%. To niewielkie odchylenie potwierdza wysoką dokładność modelowania hydrodynamicznego oraz układu napędowego. System ogniwa paliwowego wykazał zużycie wodoru na poziomie 1,55 kg/h w porównaniu z przewidywaniem modelu 1,47 kg/h, co odpowiada odchyleniu 5,28%. Wartość ta mieści się w przedziale typowym dla systemów PEM eksploatowanych w warunkach morskich [214]. Rzeczywista sprawność systemu wyniosła 54,1% w porównaniu z modelową wartością 55%, co wskazuje na niemal idealną zgodność założeń teoretycznych z parametrami rzeczywistymi. Różnica 0,9 punktu procentowego mieści się w tolerancji producenta ogniwa 2% [96]. Ocena jakości dopasowania modelu do danych eksperymentalnych została przeprowadzona z wykorzystaniem standardowych metryk statystycznych stosowanych w walidacji modeli inżynierskich, wynik analizy statystycznej przedstawiono w tabeli 13 [213, 217].

Średnie odchylenie bezwzględne MAE:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (8.2)$$

Pierwiastek średniego błędu kwadratowego RSME:

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8.3)$$

Współczynnik determinacji R²:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (8.4)$$

Tabela 23. Wynik analizy statystycznej

Parametr	MAE	RSME	R ²	P
Zużycie ON [kg/h]	0,32	0,35	0,987	0,001
Zużycie H ₂ [kg/h]	0,082	0,089	0,995	0,001
Energia napędu [kW]	0,15	0,18	0,994	0,001
Emisja CO ₂ [kg]	0,68	0,71	0,991	0,001

Wszystkie analizowane parametry wykazują wysokie współczynniki determinacji $R^2 > 0,98$, co wskazuje na silną korelację liniową między predykcjami modelu, a danymi eksperymentalnymi. Wartości $P < 0,05$ potwierdzają statystyczną istotność korelacji na poziomie ufności 95% [180]. Podstawowym wskaźnikiem jakości modelu jest średnie odchylenie względne, obliczone jako średnia arytmetyczna wartości bezwzględnych odchyleń wszystkich walidowanych parametrów:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{exp,i} - y_{mod,i}}{y_{exp,i}} \right| \times 100\% \quad (8.5)$$

Średnie odchylenie względne dla modelu energetycznego katamaranu wynosi 5,35%, co plasuje model w kategorii "bardzo dobrej dokładności" zgodnie z klasyfikacją ITTC dla modeli hydrodynamicznych [21]. Uzyskane średnie odchylenie 5,35% znacząco nie przekracza progu akceptowalności 10% ustanowionego dla modeli energetycznych jednostek pływających [242]. Wartość ta znacząco przewyższa dokładność tradycyjnych metod inżynierskich opartych na diagramach serii systematycznych 10-15% [42, 135, 172]. Przeprowadzony proces walidacji modelu energetycznego katamaranu dostarcza jednoznacznych dowodów na wysoką jakość oraz wiarygodność opracowanego narzędzia obliczeniowego. Średnie odchylenie względne 5,35% klasyfikuje model w kategorii narzędzi o wysokiej dokładności, porównywalnej z modelami dostępnymi w literaturze naukowej.

8.2. Wskaźniki emisji

Określenie wskaźników emisji w odniesieniu do wygenerowanej energii elektrycznej stanowi metodologię oceny charakterystyk środowiskowych systemów energetycznych, umożliwiającą porównanie różnych technologii niezależnie od ich specyfiki konstrukcyjnej czy operacyjnej [101, 133]. Metodologia ta, zalecana przez *International Energy Agency* IEA oraz *European Environment Agency* EEA, zapewnia spójność analiz porównawczych w skali globalnej [79, 100]. Wskaźniki emisji jednostkowej definiowane są jako stosunek masy emitowanego zanieczyszczenia do ilości wygenerowanej energii elektrycznej, wyrażany w jednostkach kg/kWh. Takie podejście eliminuje wpływ różnic w sprawności systemów na końcową ocenę emisyjności, koncentrując analizę na efektywności środowiskowej procesu konwersji energii pierwotnej na energię elektryczną [125]. Niniejsza analiza koncentruje się na szczegółowym porównaniu wskaźników emisji dwóch różnych technologii: konwencjonalnego generatora zasilanego ON oraz systemu ogniwa paliwowego wykorzystujących wodór jako nośnik energii. Badania przeprowadzono w warunkach rzeczywistej eksploatacji morskiej przy wykorzystaniu przenośnych systemów pomiarowych PEMS, co zapewnia wysoką wiarygodność uzyskanych rezultatów oraz ich przydatność dla praktycznych zastosowań inżynierskich [86]. Analiza obejmuje pięć kategorii zanieczyszczeń: CO₂, CO, NO_x, HC oraz

PM [59, 240]. Normalizacja wskaźników emisji względem wygenerowanej energii elektrycznej opiera się na zasadach analizy funkcjonalnej, gdzie energia elektryczna stanowi jednostkę funkcjonalną umożliwiającą porównanie różnych systemów energetycznych [93]. Metodologia ta została zawarta w normach ISO 14040 14044 dotyczących oceny cyklu życia *Life Cycle Assessment* oraz w wytycznych IPCC [126, 132]. Wskaźnik emisji jednostkowej definiowany jest matematycznie jako:

$$e_i = \frac{E_i}{W_{el}} \quad (8.6)$$

gdzie:

- e_i – wskaźnik emisji i-tego zanieczyszczenia [jednostka masy/kWh]
- E_i – całkowita masa emitowanego i-tego zanieczyszczenia [jednostka masy]
- W_{el} – całkowita energia elektryczna wygenerowana przez system [kWh]

Ta definicja zapewnia bezpośrednie porównanie systemów o różnych mocach nominalnych, różnych technologiach konwersji energii oraz różnych profilach czasowych pracy, stanowiąc uniwersalne narzędzie oceny charakterystyk środowiskowych [95]. Precyzyjne określenie wskaźników emisji wymaga zastosowania zaawansowanych systemów pomiarowych spełniających międzynarodowe standardy dokładności oraz powtarzalności. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano przenośny system pomiaru emisji PEMS zgodny z wymaganiami normy ISO 16183 oraz Rozporządzenia Komisji UE 2017/654 [44, 127]. Pomiary emisji przeprowadzono w kontrolowanych warunkach środowiskowych zapewniających reprezentatywność uzyskanych wskaźników dla typowych warunków eksploatacyjnych jednostek morskich. Podczas 40-minutowego cyklu badawczego generator na olej napędowy wyemitował łącznie 10,24 kg CO₂ przy jednoczesnym wytworzeniu 12 kWh energii elektrycznej, dlatego wskaźnik emisji CO₂ wynosi:

$$e_{CO_2} = \frac{10,24 \text{ kg CO}_2}{12 \text{ kWh}} = 0,853 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}} \quad (8.7)$$

Uzyskana wartość 0,853 kg CO₂/kWh klasyfikuje badany system w przedziale typowym dla nowoczesnych generatorów o zapłonie samoczynnym eksploatowanych w aplikacjach stacjonarnych oraz mobilnych. Analiza stechiometryczna spalania oleju napędowego o przybliżonym składzie molekularnym C₁₂H₂₆ przewiduje teoretyczną emisję CO₂ na poziomie 3,17 kg na kilogram spalonego paliwa. Rzeczywisty współczynnik emisji obliczony z danych eksperymentalnych wynosi 3,16 kg CO₂/kg paliwa, co wskazuje na bardzo wysoką sprawność spalania węgla oraz potwierdza wysoką jakość procesu termochemicznego. Efektywność konwersji energii chemicznej paliwa na energię elektryczną, wyrażona przez wskaźnik emisji CO₂, zależy od kilku parametrów technicznych oraz operacyjnych. Sprawność termodynamiczna silnika ZS wpływa bezpośrednio na ilość spalnego paliwa na jednostkę wygenerowanej energii mechanicznej, podczas gdy sprawność generatora elektrycznego

determinuje straty podczas konwersji energii mechanicznej na elektryczną. Dodatkowymi czynnikami wpływającymi na wskaźnik emisji CO₂ są warunki otoczenia (temperatura, ciśnienie, wilgotność powietrza), jakość stosowanego paliwa (liczba cetanowa, zawartość siarki, frakcje aromatyczne) oraz profil obciążenia silnika podczas eksploatacji. Tlenek węgla powstaje w wyniku niepełnego utleniania węgla podczas procesu spalania i stanowi wskaźnik jakości mieszanki paliwowo-powietrznej oraz temperatury spalania. Całkowita emisja CO podczas badanego cyklu wyniosła 3552,2 g i obliczono wskaźnik emisji:

$$e_{CO} = \frac{3552,2 \text{ g CO}}{12 \text{ kWh}} = 296 \frac{\text{mg CO}}{\text{kWh}} \quad (8.8)$$

Otrzymana wartość 296,0 mg CO/kWh zawiera się w górnym przedziale wartości typowych dla nowoczesnych silników o zapłonie samoczynnym 150–400 mg CO/kWh, co może wynikać z charakterystyk pracy w warunkach zmiennego obciążenia typowych dla aplikacji morskich. Tlenki azotu formują się w wyniku wysokotemperaturowych reakcji tlenu i azotu atmosferycznego według mechanizmu termicznego Zeldovicha oraz mechanizmu Fenymorea [164]. Całkowita emisja NO_x wyniosła 65,93 g podczas cyklu badawczego, natomiast wskaźnik emisji NO_x wynosi:

$$e_{NO_x} = \frac{65,93 \text{ g NO}_x}{12 \text{ kWh}} = 5,49 \frac{\text{g NO}_x}{\text{kWh}} \quad (8.9)$$

Uzyskana wartość 5,49 g NO_x/kWh spełnia wymagania normy Stage V dla silników tej kategorii mocy ($\leq 7,5$ g NO_x/kWh) [75–77]. Uzyskana wartość 5,49 g NO_x/kWh spełnia wymagania normy Stage V dla silników tej kategorii mocy ($\leq 7,5$ g NO_x/kWh) oraz stężenia tlenu, co wyjaśnia wzrost emisji NO_x przy zwiększonym obciążeniu silnika. Węglowodory reprezentują frakcję paliwa, która nie uległa całkowitemu utlenieniu podczas procesu spalania, [39]. Całkowita emisja HC wyniosła 1426,93 mg, a jej wskaźnik obliczono następująco:

$$e_{HC} = \frac{1426,93 \text{ mg HC}}{12 \text{ kWh}} = 118,9 \frac{\text{mg HC}}{\text{kWh}} \quad (8.10)$$

Wartość 118,9 mg HC/kWh mieści się w normie Stage V (≤ 300 mg HC/kWh) oraz odpowiada typowym charakterystykom nowoczesnych silników zasilanych olejem napędowym. Jako główne źródła emisji węglowodorów należy uznać zjawisko gaśnięcia płomienia, nadmierne wzbogacenie mieszanki lub odparowania z filmu paliwowego. Częstki stałe powstają głównie w wyniku niepełnego spalania frakcji aromatycznych oleju napędowego, kondensacji wysokocząsteczkowych węglowodorów oraz aglomeracji struktur węglowych w wysokich temperaturach. Całkowita emisja PM wyniosła 356,47 mg, natomiast wskaźnik emisji PM wynosi:

$$e_{PM} = \frac{356,47 \text{ mg PM}}{12 \text{ kWh}} = 29,7 \frac{\text{mg PM}}{\text{kWh}} \quad (8.11)$$

Emisja cząstek stałych na poziomie 29,7 mg PM/kWh spełnia wymagania normy Stage V (≤ 40 mg PM/kWh). Skład chemiczny cząstek obejmuje głównie węgiel elementarny (65–75%

masy), adsorbowane węglowodory 15–25% masy, związki siarki 3–8% masy oraz popiół pochodzący z dodatków do oleju napędowego 2-5% masy [30]. Wskaźniki emisji generatora zasilany olejem napędowym zostały porównane z wymaganiami Rozporządzenia UE 2016/1628 Stage V dla silników o mocy 19–37 kW w tabeli 24 [199].

Tabela 24. Zgodność z normami Stage V

Związek toksyczny	Limit Stage V	Generator ZS	Uwagi
CO [g/kWh]	5,0	0,296	-----
NO _x [g/kWh]	7,5	5,49	-----
HC [mg/kWh]	300	118,9	-----
PM [mg/kWh]	40	29,7	-----

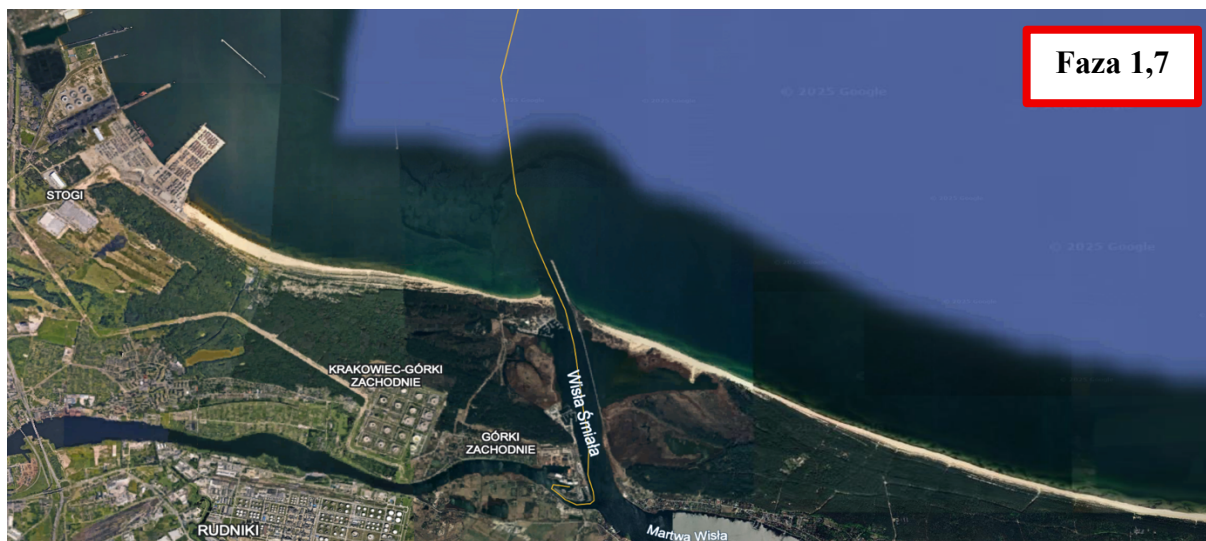
Analiza wskaźników emisji potwierdza, że strategia dekarbonizacji sektora morskiego wymaga zróżnicowanego podejścia technologicznego, uwzględniającego nie tylko charakterystyki lokalne, ale również całłościowy wpływ środowiskowy w perspektywie cyklu życia oraz długoterminowe trendy rozwoju technologicznego i regulacyjnego.

9. Modelowanie warunków rzeczywistych

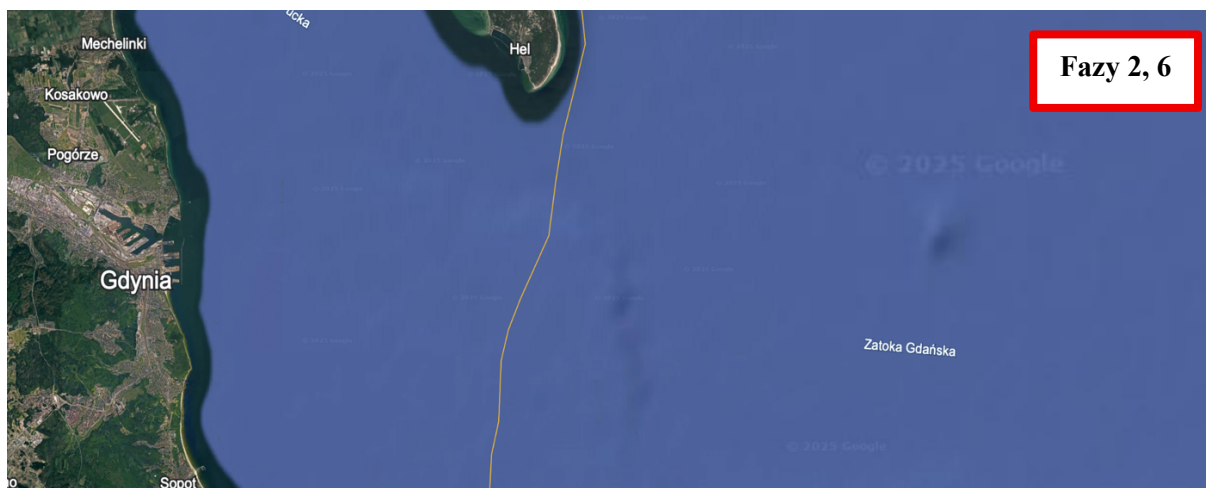
9.1. Opis modelowanych trach badawczych

W dalszej części badań opisano teoretyczną trasę podzieloną na 3 odcinki jakie obiekt badawczy pokonywał tj. odcinek 1 – Gdańsk – farma wiatrowa, odcinek 2 – obsługa serwisowa farmy, odcinek 3 – farma wiatrowa – Gdańsk. Trasa łącząca rejon portu Gdańsk z planowanymi lokalizacjami morskich farm wiatrowych w polskiej strefie ekonomicznej Morza Bałtyckiego stanowi ważny element analizy sprawności operacyjnej katamaranu. Szczegółowe badanie tej trasy żeglugowej, obejmującej dystans 132,94 kilometra w kierunku północno-zachodnim, umożliwia dokładną ocenę wymagań energetycznych oraz środowiskowych, charakterystycznych dla przyszłych operacji offshore w rejonie południowego Bałtyku. Punkt początkowy analizowanej trasy znajduje się w porcie na Martwej Wiśle, charakteryzującym się złożoną konfiguracją hydrograficzną wynikającą z połączenia wód rzecznych ze środowiskiem morskim. Rejon ten wykazuje głębokości mieszczące się w przedziale 3,50 do 4,20 m, co zapewnia znaczący margines bezpieczeństwa dla jednostki o zanurzeniu 0,90 m przy wszystkich przewidywanych stanach załadowania/obciążenia. Układ batymetryczny charakteryzuje się progresywnym pogłębianiem w kierunku wód otwartych, gdzie głębokości wzrastają od wartości przyportowych do ponad 40 m w rejonie docelowych instalacji energetycznych. Analiza danych wykazuje znaczną zmienność profilu batymetrycznego wzdłuż całej trasy, z głębokościami oscylującymi między wartością minimalną –67,9 m w najgłębszych partiach, a maksymalną wysokością względną 0,3 m na przybrzeżnych mieliznach. Mediana głębokości wynosząca –8,22 m odzwierciedla dominację umiarkowanie głębokich partii akwenu, typowych dla morfologii południowego Bałtyku. Gradient nachylenia dna morskiego charakteryzuje się łagodnością, z wartościami oscylującymi między 0° w obszarach płaskich a maksymalnym nachyleniem 0,9°, co świadczy o stabilności geologicznej rejonu oraz minimalizuje ryzyko erozyjnych procesów podmorskich mogących wpływać na infrastrukturę farm wiatrowych. Kompleksowa analiza charakterystyk operacyjnych pozwala na wyodrębnienie 3 zasadniczych faz odcinków 1 i 3 (w tą i z powrotem) (rys. 29–32), każda charakteryzuje się odmiennymi wymaganiami nawigacyjnymi oraz środowiskowymi. Faza 1 odcinka 1 oraz faza 7 odcinka 3 (trasa powrotna) obejmująca wyjście z portu bazowego oraz przejście przez wody przybrzeżne Zatoki Gdańskiej charakteryzuje się najwyższą gęstością ograniczeń regulacyjnych wynikających z ochrony ekosystemów morskich (rys. 29). Obszar ten objęty jest ochroną w ramach europejskiej sieci Natura 2000, co skutkuje wprowadzeniem restrykcyjnych limitów prędkości na poziomie 8 węzłów w strefie do trzech mil morskich od linii brzegowej oraz czasowe zakazy operacji w okresach krytycznych dla fauny morskiej. Faza 2 odcinka 1 oraz faza 6 odcinka 3 (trasa powrotna) obejmuje przejście przez centralne partie Zatoki Gdańskiej, charakteryzujące się względnie spokojnymi warunkami hydrodynamicznymi dzięki naturalnemu osłonięciu przez Półwysep Helski (rys.

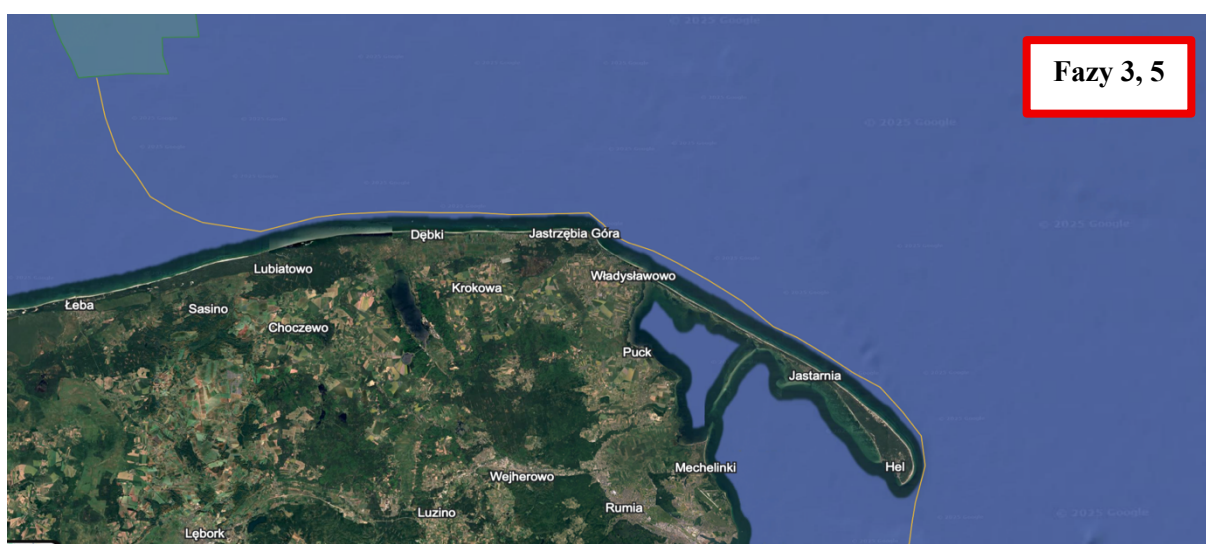
30). Rejon ten wykazuje typowe dla tego akwenu wysokości fal mieszczące się w przedziale 0,3–0,8 m przy dominujących wiatrach zachodnich o prędkościach nieprzekraczających 8 m/s, co odpowiada 2 i 3 stopniowi w skali Beauforta. Jednakże okresowe nasilenie aktywności sztormowej, szczególnie w sezonie jesienno-zimowym, może prowadzić do wzrostu wysokości fal do poziomu 2–3 m, co znacząco wpływa na warunki eksploatacyjne małych jednostek pływających. Faza 3 odcinka 1 oraz faza 4 odcinka 3 (trasa powrotna) przebiegająca w rejonie Półwyspu Helskiego charakteryzuje się najwyższą kongestią ruchu morskiego na całej analizowanej trasie (rys. 31). Koncentracja różnorodnych typów jednostek, od małych łodzi rekreacyjnych po duże promy pasażerskie oraz statki towarowe obsługujące porty Trójmiasta, wymaga szczególnej uwagi nawigacyjnej oraz dostosowania do ustanowionych systemów separacji ruchu morskiego. Sezonowe wahania intensywności ruchu mogą osiągać pięciokrotny wzrost w miesiącach letnich w porównaniu z okresem zimowym, co bezpośrednio wpływa na planowanie operacji jednostek serwisowych. Ostatnia część fazy 3 odcinka 1 charakteryzuje się najbardziej wymagającymi warunkami środowiskowymi wynikającymi z pełnej ekspozycji na dominujące systemy pogodowe (rys. 32). Docelowy obszar operacyjny zlokalizowany w polskiej strefie ekonomicznej na pozycji geograficznej około 54°45' N oraz 17°15' E reprezentuje jedną z najważniejszych inwestycji w zakresie morskiej energetyki wiatrowej w regionie południowego Bałtyku. Planowana farma zajmie powierzchnię 175 km², co czyni ją instalacją o skali porównywalnej z największymi projektami offshore realizowanymi na wodach europejskich.



Rys. 29. Fazy 1 i 7 dla odcinków 1 i 3 trasy pomiędzy portem w Gdańsku, a planowaną farmą wiatrową w okolicach Łeby i z powrotem



Rys. 30. Fazy 2 i 6 dla odcinków 1 i 3 pomiędzy portem w Gdańsku, a planowaną farmą wiatrową w okolicach Łeby i z powrotem



Rys. 31. Faz 3 i 5 dla odcinków 1 i 3 pomiędzy portem w Gdańsku, a planowaną farmą wiatrową w okolicach Łeby i z powrotem



Rys. 32. Wody otwarte fazy 3 i 4 odcinków 1 i 3 pomiędzy portem w Gdańsku, a planowaną farmą wiatrową w okolicach Łeby i z powrotem

Konfiguracja techniczna farmy przewiduje instalację od 50 do 80 turbin wiatrowych o jednostkowej mocy mieszczącej się w przedziale od 8 do 15 MW, reprezentujących najnowszą generację technologii offshore. Turbiny będą rozmieszczone według regularnej siatki z odstępami między turbinowymi wynoszącymi od 800 do 1200 m, co zapewnia optymalną efektywność energetyczną przy jednoczesnym umożliwieniu bezpiecznej nawigacji jednostek serwisowych. Fundamenty typu monopal lub płaszczowy zostaną zainstalowane na głębokościach od 25 do 40 m, co określa wymagania dla jednostek obsługujących te instalacje. Regulacje operacyjne obowiązujące w strefie farm wiatrowych wprowadzają ścisłe ograniczenia prędkości do 8 węzłów oraz wymagają utrzymania minimalnej odległości 50 m od konstrukcji turbin podczas standardowych operacji serwisowych. System komunikacyjny oparty na protokołach AIS oraz łączności VHF zapewnia koordynację z centrum kontroli farmy oraz innymi jednostkami operującymi w rejonie. Szczególnie istotnym ograniczeniem jest kategoryczny zakaz kotwiczenia w strefach przebiegu kabli podmorskich łączących poszczególne turbiny z podstacją transformatorową oraz kablami eksportowymi prowadzącymi energię do krajowej sieci elektroenergetycznej. System wsparcia operacyjnego wzdłuż analizowanej trasy obejmuje porty oraz punkty serwisowe zapewniające bezpieczeństwo długodystansowych operacji offshore. Port w Gdyni, położony w odległości 8 mil morskich od głównej trasy, oferuje usługi serwisowe obejmujące tankowanie paliw konwencjonalnych, naprawy mechaniczne oraz wsparcie logistyczne, choć obecnie nie dysponuje infrastrukturą wodorową. Port w Helu stanowi zasadniczy element systemu bezpieczeństwa, oferując usługi ratownicze, pogotowie medyczne oraz możliwość ewakuacji drogą powietrzną. Pokrycie systemów nawigacyjnych oraz komunikacyjnych zapewnia pełne bezpieczeństwo operacji do odległości 35 mil morskich od brzegu dzięki stacjom radarowym zlokalizowanym w Gdańsku, na Helu oraz we Władysławowie. System VTS w rejonie portów oraz transpondery AIS Class A gwarantują ciągły monitoring pozycji oraz trajektorii wszystkich jednostek operujących na trasie. W fazie 4 odcinka 1 trasy operacyjnej o długości 25,75 km można efektywnie wykorzystać generator ON (rys. 33). Lokalizacja tej fazy odcinka 1 w końcowej fazie podejścia do rejonu farm wiatrowych umożliwia realizację strategii energetycznej polegającej na maksymalnym wykorzystaniu akumulatorów oraz ogniwa paliwowego w obszarach o największej wrażliwości środowiskowej, przy jednoczesnym przełączeniu na źródła emisyjne w rejonie charakteryzującym się mniejszymi ograniczeniami emisyjnymi. Taka konfiguracja sterowania pozwala na największą efektywność systemu. Dystans 25,75 km przy prędkości projektowej 8 węzłów wymaga około półtorej godziny czasu żeglugi, co stanowi efektywny czas pracy generatorów emisyjnych w trybie stabilnego obciążenia. Takie warunki pracy silników ograniczają wpływ rozruchu i zatrzymania na całkowitą emisję oraz zużycie paliwa. Analiza profilu batymetrycznego końcowego odcinka trasy wykazuje charakterystyczną progresję głębokości od wartości minimalnej –30 m w początkowej fazie odcinka do maksymalnej głębokości –4,93 m w rejonie przybrzeżnym. Mediana głębokości wynosząca –20,79 m wskazuje na dominację umiarkowanie głębokich partii akwenu, typowych dla strefy

przejściowej między wodami otwartymi, a obszarami szelfowymi charakterystycznymi dla południowego Bałtyku. Zakres zmienności głębokości wynoszący 25,07 m reprezentuje największą batymetryczną różnorodność spośród wszystkich analizowanych faz trasy operacyjnej. Ta znaczna zmienność morfologiczna ma bezpośredni wpływ na warunki hydrodynamiczne oraz wymagania energetycznych dla układu napędowego jednostki pływającej, szczególnie w kontekście zmiennego oporu hydrodynamicznego wynikającego z interakcji kadłuba z dnem morskim w płytszych partiach odcinka końcowego.

9.2. Rejs port, zatoka, farma wiatrowa

Analizę operacyjną katamaranu na trasie Gdańsk – Łeba (farma wiatrowa) określono na podstawie rzeczywistych danych eksploatacyjnych uzyskanych z testów w warunkach rzeczywistych wraz z wykonanym modelem opisanym w rozdziale 8. Trasę o łącznej długości 133 kilometry podzielono na trzy fragmenty, z których każdy wymaga odmiennej strategii energetycznej dostosowanej do lokalnych ograniczeń regulacyjnych oraz warunków środowiskowych. Układ napędowy hybrydowy składa się z silników elektrycznych o łącznej mocy 60 kW, generatora zasilanego ON o mocy 25 kW, systemu ogniwa paliwowego o mocy 30 kW oraz akumulatorów litowo-żelazowo-fosforanowych o pojemności 180 kWh. Objętość zbiorników wynosi 400 litrów oleju napędowego, 20 kg wodoru, zapewniając dużą sprawność operacyjną. Wyniki modelowania przedstawiono w formie tabelarycznej (tab. 25 – 34).

Analizowana trasa operacyjna składa się z trzech głównych odcinków:

Tabela 25. Zamodelowana struktura trasy operacyjnej

Odcinek	Dystans [km]	Charakterystyka	Wymagania specjalne
Gdańsk → Farma wiatrowa	133	Żegluga offshore	Ograniczenia prędkości
Operacje na farmie wiatrowej	25	Manewry precyzyjne	Ograniczenia związane z emisją i hałasem
Farma wiatrowa → Gdańsk	133	Powrót do bazy	Ograniczenia prędkości
Suma	291		

Analiza uwzględnia zróżnicowane profile prędkościowe wynikające z ograniczeń nawigacyjnych i środowiskowych:

Tabela 26. Podział trasy rejsu na fazy w zależności od możliwości przyjęcia różnych strategii sterowania układem napędowym wraz z założonym dystansem i prędkością

Podział trasy rejsu na fazy	Dystans [km]	Prędkość [węzły]	Czas [h]	Ograniczenia
Wyjście z portu Gdańsk	10	6	1,1	Strefa portowa
Żegluga Zatoka Gdańska	50	7	3,9	Wody osłonięte
Wody otwarte do farmy	73	8	4,9	Pełne morze
Operacje na farmie	25	4	8,0	Precyzyjne manewry
Powrót - wody otwarte	73	8	4,9	Pełne morze
Powrót - Zatoka Gdańska	50	7	3,9	Wody osłonięte
Wejście do portu	10	6	1,1	Strefa portowa
Suma	291		27,8	

*uwzględniając 6 h pracy przy turbinach

Pojemności systemów magazynowania energii wprowadzono na podstawie danych technicznych obiektu badawczego.

Tabela 27. Charakterystyki pojemności układów zasilania

Rodzaj zasilania	Pojemność nominalna	Pojemność użytkowa	Rezerwa bezpieczeństwa
Zestaw akumulatorów	180 kWh	162 kWh	10%
Wiązka butli z wodorem	20 kg	20 kg	—
Zbiornik na olej napędowy	400 dm ³	400 dm ³	—

Na podstawie rzeczywistych testów eksploatacyjnych określono następujące parametry zużycia:

Tabela 28. Wyznaczone na podstawie modelu jednostkowe zużycie energii oraz paliw przez poszczególne elementy napędu hybrydowego

Rodzaj zasilania	Zużycie jednostkowe	Sprawność układu	Moc nominalna
Ogniwa paliwowe	1,55 kg H ₂ /h	55%	30 kW
Generator na olej napędowy	5,78 dm ³ /h	42%	25 kW
Akumulatory	5,53 kWh/h	90%	60 kW

Analiza udziałów systemów energetycznych została opracowana na podstawie następujących kryteriów:

- Ograniczenie emisji w strefach wrażliwych środowiskowo,
- wydłużenie długości czasu operacyjnego,
- zapewnienie rezerw bezpieczeństwa minimum 20%,
- adaptacja sterowania napędu do wymagań poszczególnych odcinków trasy

W tym celu zastosowano algorytm, który uwzględnia:

- Czas całkowity misji: 31,4h
- Dostępne czasy maksymalne systemów: 111,4 h
- Strategiczne priorytety środowiskowe i operacyjne

Tabela 29. Wynik czasu pracy w zależności od przyjętego rodzaju zasilania

Rodzaj zasilania	Czas pracy [h]	Udział w misji %	Wykorzystanie zasobów %
Akumulatory	7,8	25,0	26,8
Ogniwa paliwowe	3,7	11,8	28,7
Generator na olej napędowy	19,8	63,2	28,7
Suma	31,4	100,0	-

Na tej podstawie możliwe było obliczenie bilansu energetycznego dla założonej trasy.

Tabela 30. Określenie rezerwy energii i paliw zasilania na podstawie zużycia rzeczywistego

Rodzaj zasilania	Zużycie rzeczywiste	Pojemność dostępna	Rezerwa %
Akumulatory	43,4 kWh	162 kWh	73,2
Ogniwo paliwowe	5,7 kg	20 kg	71,3
Generator na olej napędowy	114,7 L	400 L	71,3

Kolejnym krokiem jest opracowanie strategii energetycznej oraz rozkładu emisji na podstawie poszczególnych odcinków misji.

Tabela 31. Obliczony na podstawie modelu udział procentowy elementów napędu na przyjętych fazach trasy

Faza trasy	Konfiguracja napędu	Uzasadnienie	Emisje lokalne
Wyjście z portu 10 km	Akumulatory 100%	Regulacje portowe	Zero
Zatoka 50 km	Ogniwa paliwowe 70% Generator 30%	Przewaga ekologiczna	Ograniczone
Wody otwarte 73 km	Ogniwo paliwowe 40% Generator 60%	Optymalizacja zasięgu	Umiarkowane
Operacje farma wiatrowa 25 km	Akumulatory 80% Ogniwo paliwowe 20%	Ograniczenia hałasu i emisji	Zero
Powrót otwarte 73 km	Generator 80% Ogniwo paliwowe 20%	Ładowanie baterii	Umiarkowane
Zatoka 50 km	Generator 60% Ogniwo paliwowe 40%	Balans energetyczny	Ograniczone
Wejście do portu 10 km	Akumulatory 100%	Regulacje portowe	Zero

Tabela 32. Obliczenia na podstawie modelu emisja CO₂ z podziałem na fazy i poszczególne odcinki trasy

Faza trasy	Długość [km]	Emisje CO ₂ [kg]	Emisje jednostkowe [g/km]
Faza 1 – port	10	0,00	0,00
Faza 2 – zatoka	50	4,23	84,60
Faza 3 i 4 – wody otwarte	73	11,83	162,05
Farma wiatrowa	25	0,51	20,40
Faza 3 i 4 – wody otwarte	73	11,84	162,19
Faza 2 – zatoka	50	4,22	84,40
Faza 1 – port	10	0,00	0,00
Suma	291	32,63	112,13

Tabela 33. Zakres operacji serwisowych na odcinku 2 trasy zdefiniowany parametrami technicznymi farmy wiatrowej

Parametr	Wartość	Jednostka	Uwagi
Powierzchnia	123,49	km ²	Rozległy obszar operacyjny
Teoretyczna liczba turbin	65	szt	Zróżnicowane operacje
Moc jednostkowa	12	MW	Duże komponenty
Odstęp turbin	1000	m	Optymalna nawigacja
Głębokość	25-40	m	Stabilne warunki

Tabela 34. Zakres prac serwisowych obsługiwanych przez badany katamaran jako jednostka CTV

Typ operacji	Czas przy turbinie [h]	Preferowany napęd	Wymagania
Przeglądy rutynowe	3	Akumulatory + Ogniwo paliwowe	Niska emisja hałasu
Wymiana komponentów	6	Ogniwo paliwowe + Akumulatory	Brak emisji
Transport ciężki	4	Akumulatory + Generatory	Wysoka moc
Naprawy awaryjne	10	Wszystkie systemy	Maksymalna niezawodność

Analiza wyników otrzymanych na podstawie modelu obejmuje szczegółowe parametry eksploatacyjne hybrydowego układu napędowego katamaranu przeznaczonego do obsługi morskich farm wiatrowych. Uzyskane dane umożliwiają ocenę efektywności energetycznej poszczególnych systemów zasilania oraz określenie najkorzystniejszych strategii operacyjnych w różnych fazach misji/trasy. Opracowana struktura trasy operacyjnej składała się z trzech głównych odcinków: odcinek 1 – Gdańsk-farma wiatrowa o długości 133 kilometrów charakteryzuje się typowymi ograniczeniami prędkości właściwymi dla żeglugi offshore, wynikającymi z wymagań bezpieczeństwa nawigacyjnego oraz obowiązujących regulacji. Odcinek 2 operacji na farmie wiatrowej obejmuje dystans 25 kilometrów i wymaga najwyższej precyzji manewrowania przy jednoczesnym przestrzeganiu restrykcyjnych norm dotyczących emisji i poziomu hałasu. Odcinek 3 – powrotny do bazy charakteryzuje się analogicznymi ograniczeniami prędkościowymi, jednakże strategia energetyczna może ulec modyfikacji ze względu na konieczność zachowania odpowiednich rezerw energetycznych dla operacji portowych (tab. 25). Trasę/misję podzielono na siedem faz operacyjnych (odcinek 1 – trzy fazy, odcinek 2, odcinek 3 – trzy fazy) z określonymi parametrami czasowo-prędkościowymi (tab.26). Przy wyjściu z portu gdańskiego założono prędkość 6 węzłów na dystansie 10 kilometrów z uwagi na przepisy portowe nakierowane na ograniczenie negatywnego

wpływu jednostek pływających na środowiskowego. Do żeglugi przez Zatokę Gdańską przyjęto w modelu prędkość 7 węzłów na odcinku 50 kilometrów, co stanowi kompromis między efektywnością czasową a bezpieczeństwem na wodach częściowo osłoniętych. Maksymalną prędkość operacyjną 8 węzłów założono przy żegludze na wodach otwartych, gdzie ograniczenia nawigacyjne są najmniejsze. Dla operacji na farmie wiatrowej założono prędkość do 4 węzłów a czas serwisowania przyjęto jako 8 h, co wynika z konieczności precyzyjnego pozycjonowania w bezpośrednim sąsiedztwie infrastruktury krytycznej.

W tabeli 27 zawarto specyfikację pojemności systemów magazynowania energii determinujących zasięg i niezawodność operacyjną. Akumulatory LiFePO₄ o nominalnej pojemności 180 kWh wykorzystują 10-procentową rezerwę bezpieczeństwa, zapewniając pojemność użytkową 162 kWh co uwzględniono przy obliczeniach. Wartość ta stanowi podstawę dla operacji bezemisyjnych w strefach o podwyższonych wymaganiach środowiskowych. Założono, że wiązki butli z wodorem o masie 20 kg oraz zbiornik oleju napędowego o pojemności 400 litrów są eksploatowane bez dodatkowych rezerw. Na podstawie opisanych założeń obliczono jednostkowe zużycie energii oraz paliw przez poszczególne elementy napędu hybrydowego (tab. 28). Ogniwo paliwowe o mocy nominalnej 30 kW charakteryzuje się zużyciem jednostkowym 1,55 kg H₂/h. Generator na olej napędowy o mocy 25 kW wykazuje zużycie 5,78 dm³ na godzinę. Akumulatory zużyły 5,53 kWh przy mocy 60 kW. Dokonano również analizy rozkładu czasów pracy poszczególnych systemów zasilania podczas całej misji (tab. 29). Generator na olej napędowy charakteryzował się największym udziałem czasu pracy 19,8 h, stanowiącym 63,2% całkowitego czasu misji/trasy wynoszącej 31,4 godziny. Energia z akumulatorów jest zużywana przez 7,8 h, co daje 25% udziału czasowego. Zakres działania ogniwa paliwowego obejmuje 3,7 h, co stanowi 11,8% całkowitego czasu operacyjnego zamodelowanej misji/trasy. Wykorzystanie zasobów energetycznych wszystkich systemów kształtuje się na poziomie 28%, wskazując na równomierne rozłożenie obciążeń przy uwzględnieniu różnic w mocach nominalnych. Obliczono bilans energetyczny oraz rezerwę bezpieczeństwa na całej misji/trasie (tab. 30). Akumulatory wykorzystują 43,4 kWh z dostępnych 162 kWh, zapewniając rezerwę 73,2%. System ogniwa paliwowego zużywa 5,7 kg z dostępnych 20 kg H₂, pozostawiając rezerwę 71,3%. Taką samą rezerwą charakteryzuje się generator na olej napędowy zużywając 114,7 dm³ z 400 dm³ pojemności zbiornika. Duże poziomy rezerw energetycznych gwarantują bezpieczne wykonanie zamodelowanej misji/trasy w przypadku wystąpienia nieprzewidzianych sytuacji operacyjnych. W tabeli 31 zawarto strategię wykorzystania poszczególnych źródeł energii w różnych fazach misji/trasy zgodnie z lokalnymi wymaganiami regulacyjnymi i środowiskowymi. Operacje w strefach portowych są realizowane wyłącznie przy wykorzystaniu napędu akumulatorowego, zapewniając zerową emisję lokalną zgodnie z obowiązującymi przepisami. Na wodach Zatoki Gdańskiej ogniwo paliwowe stanowi 70% mocy napędowej przy 30% udziale generatora, co zapewnia przewagę ekologiczną przy ograniczonych emisjach. Na wodach otwartych proporcje ulegają odwróceniu z 40% udziałem

ogniwa paliwowego i 60% generatora, wydłużając zasięg operacyjny. Podczas operacji na farmie wiatrowej 80% energii pochodzi z akumulatorów, a 20% z ogniw paliwowych zgodnie z wymaganiami dotyczącymi poziomu hałasu i emisji. Obliczono emisję CO₂ z podziałem na poszczególne fazy trasy (tab. 32). Fazy portowe charakteryzują się brakiem emisji przy wykorzystaniu napędu elektrycznego. Żegluga przez Zatokę Gdańską generuje 4,23 kg CO₂ na 50 kilometrach, odpowiadając emisji jednostkowej 84,60 g/km. Najwyższe wartości emisji występują na wodach otwartych z 11,83–11,84 kg CO₂ na 73 km, co generuje emisję jednostkową 162 g/km. Operacje na farmie wiatrowej charakteryzują się emisją 0,51 kg CO₂ na 25 km przy jednostkowej emisji 20,40 g/km. Łączna emisja dla 291 km trasy to 32,63 kg CO₂, odpowiadając średniej emisji jednostkowej 112,13 g/km.

W tabeli 32 określono parametry techniczne farmy wiatrowej definiując zakres operacji serwisowych. Powierzchnia operacyjna jednostki pływającej na odcinku 2 (farma wiatrowa) wyniosła 123,49 km² z projektowaną liczbą 65 turbin. Odstępy między turbinami wynoszące 1000 metrów zapewniają odpowiednie warunki nawigacyjne dla jednostek CTV. Rutynowe przeglądy trwające 3 h są realizowane z wykorzystaniem akumulatorów i ogniw paliwowych ze względu na wymagania niskiego poziomu hałasu przy instalacjach elektronicznych. Podczas wymiany elementów turbiny trwające ok. 6 godzin preferowane jest używanie energii tylko z ogniwa paliwowego z ewentualnym wspomaganie energii z akumulatorów dla zapewnienia zerowej emisji z uwagi na bezpieczną pracę załogi jednostki pływającej. Naprawy awaryjne trwające do 10 godzin wymagają wykorzystania wszystkich dostępnych systemów hybrydowego układu napędowego dla zapewnienia maksymalnej zdolności operacyjnej.

Analiza przedstawionych danych potwierdza użyteczność hybrydowego układu napędowego w operacjach morskich dla projektowanej na Bałtyku farmy wiatrowej potwierdzając jednocześnie efektywne wykorzystanie energii w aspekcie bezpieczeństwa i ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Rezerwy energetyczne przekraczające 70% we wszystkich systemach zapewniają wysokie bezpieczeństwo operacyjne i dzielność jednostki pływającej. Zaprojektowana architektura sterowania napędem hybrydowym (rys. 21) umożliwia dostosowanie pod względem ekonomicznym i środowiskowym realizację operacji bezemisyjnych w strefach o podwyższonych wymaganiach ekologicznych oraz wysokiej efektywności energetycznej na wodach otwartych.

10. Wnioski i podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych, badań eksperymentalnych oraz modelowania systemów sformułowano wnioski dotyczące zastosowania wodorowych ogniw paliwowych w maszynach kategorii pozadrogowej.

Wnioski ogólne

1. Badania potwierdziły znaczny potencjał wodorowych ogniw paliwowych jako alternatywnego źródła energii w sektorze maszyn pozadrogowych, szczególnie w kontekście nasilających się wymagań środowiskowych wyrażonych przez normy emisyjne Stage V oraz Tier 4. Analiza przeprowadzona na przykładzie katamaranu hybrydowego wykazała, że technologie wodorowe mogą stanowić skuteczną odpowiedź na wyzwania dekarbonizacji transportu w kategorii NRMM, oferując zeroemisyjną alternatywę przy zachowaniu wysokiej efektywności energetycznej. Cel pracy osiągnięto.
2. Zastosowanie wielopaliwowego systemu napędowego z ogniwem paliwowym w jednostce pływającej udowodniło swoją skuteczność operacyjną, osiągając sprawność energetyczną 55,3%, co przewyższa parametry konwencjonalnych silników spalinowych w tym głównie stosowanych w tej kategorii silników o zapłonie samoczynnym. System Kontroli Energii umożliwił efektywne zarządzanie źródłami energii, zapewniając skuteczność operacyjną dostosowaną do zmieniających się wymagań środowiskowych oraz regulacyjnych.
3. Rozwój infrastruktury wodorowej oraz postępująca standaryzacja norm bezpieczeństwa stwarzają korzystne warunki dla szerszego zastosowania technologii wodorowych w sektorze pozadrogowym. Jednakże pełne wykorzystanie potencjału ogniw paliwowych wymaga skoordynowanych działań obejmujących aspekty technologiczne, regulacyjne oraz ekonomiczne.

Wnioski szczegółowe

1. Porównawcze badania emisyjne wykazały różnice między systemami konwencjonalnymi a wodorowym. Generator o zapłonie samoczynnym wyemitował 10,24 kg CO₂ podczas 40-minutowego cyklu badawczego, podczas gdy system ogniw paliwowych charakteryzował się zerową emisją lokalną substancji szkodliwych. Wskaźnik emisji CO₂ dla generatora spalinowego wyniósł 0,85 kg CO₂/kWh, kwalifikując się w przedziale typowym dla nowoczesnych jednostek o zapłonie samoczynnym.
2. Stężenie tlenków azotu NO_x osiągnęło wartość 20,35 g/kg oleju napędowego, mieszcząc się w granicach określonych przez normę Stage V, natomiast stężenie cząstek stałych PM wyniosło 0,11 g/kg paliwa.

3. Ogniw paliwowe ogranicza emisję systemu napędowego przy tym samym lub większym udziale w całkowitym zapotrzebowaniu energii w porównaniu do napędu konwencjonalnego, potwierdzając przewagę środowiskową układu wielopaliwowego w zastosowaniach transportu wodnego.
4. Zużycie wodoru wykazało stabilną wartość na poziomie 1,55 kg H₂ podczas 40-minutowego cyklu badawczego, co odpowiadało jednostkowemu zużyciu 0,13 kg H₂/kWh wygenerowanej energii elektrycznej. Ta wartość mieści się w zakresie typowym dla systemów PEM eksploatowanych w warunkach morskich.
5. Opracowany zarządzania energią wykazał wysoką dokładność predykcji, osiągając średnie odchylenie względne 5,35% i mieści się w kategorii narzędzi o wysokiej precyzji zgodnie z klasyfikacją ITTC dla modeli hydrodynamicznych. Współczynnik determinacji R² przekraczający 0,98 dla wszystkich analizowanych parametrów potwierdza wiarygodność opracowanego modelu obliczeniowego.
6. Analiza zasięgu operacyjnego wykazała przewagę generatora ON – 1094,44 mil nad systemem ogniwa paliwowego – 240,85 mil oraz akumulatorami – 118,25 mil przy uruchomionym każdym osobno źródle generowania energii. Jednak konfiguracja hybrydowa wykorzystująca wszystkie dostępne źródła energii pozwala osiągnąć maksymalny zasięg teoretyczny 1453,54 mil morskich.

Wnioski metodyczne

1. Zastosowana metodologia badawcza oparta na systemie PEMS *Portable Emissions Measurement System* zapewniła wysoką wiarygodność pomiarów emisji w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Walidacja modelu zarządzania energią z wykorzystaniem standardowych metryk statystycznych potwierdziła poprawność przyjętych założeń teoretycznych oraz dokładność implementacji algorytmów obliczeniowych.
2. Podział trasy badawczej na dwa identyczne segmenty różniące się wyłącznie systemem generacji energii umożliwił rzetelną analizę porównawczą w kontrolowanych warunkach środowiskowych. Parametry testu zapewniające takie samo zapotrzebowanie wygenerowanej energii elektrycznej tj. 12 kWh w obu fazach badań zapewniło porównywalność wyników dotyczących wyznaczenia zużycia paliw tj. oleju napędowego i wodoru.
3. Opracowany model energetyczny oparty na standardach hydrodynamiki okrętowej z wykorzystaniem wzorów ITTC 57 oraz metodologii Mollanda wykazał uniwersalność zastosowania dla podobnych jednostek pływających. Możliwość edycji parametrów wpływających na rzeczywistą moc potrzebną do napędu czyni model narzędziem przydatnym dla projektowania oraz dobór konfiguracji systemów hybrydowych.
4. Algorytm Systemu Kontroli Energii umożliwił inteligentne zarządzanie wielopaliwowym układem napędowym, automatycznie dostosowując konfigurację

źródeł energii do aktualnych wymagań operacyjnych oraz stanu zbiorników i naładowania akumulatorów.

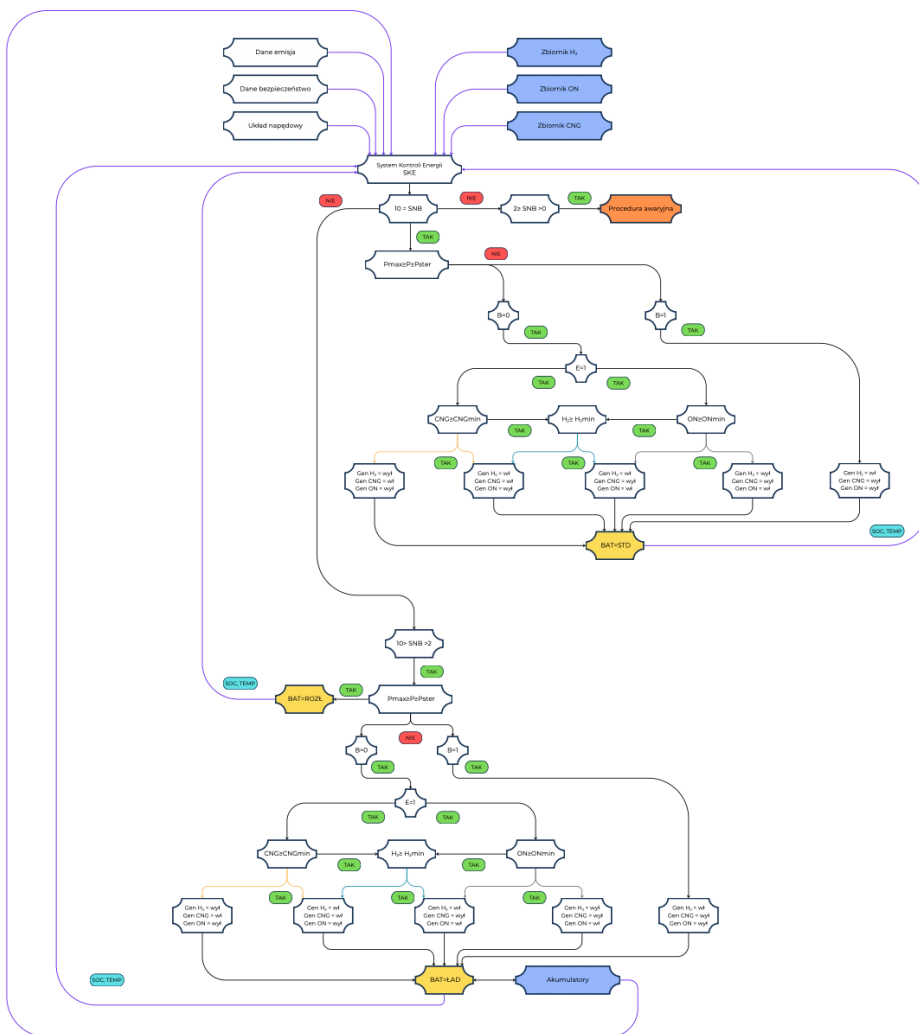
Wnioski utylitarne

1. System hybrydowy wykazał szczególną przydatność w operacjach charakteryzujących się zmiennymi wymaganiami środowiskowymi. Możliwość pracy w trybie zeroemisyjnym podczas operacji w obszarach chronionych oraz przełączania na źródła konwencjonalne na wodach otwartych zwiększa sprawność operacyjną przy jednoczesnym ograniczaniu wpływu na środowisko naturalne.
2. Zarządzanie poszczególnymi źródłami energii w systemie napędowym – akumulatorów podczas manewrów precyzyjnych, ogniw paliwowych w strefach ograniczeń emisyjnych oraz generatorów konwencjonalnych na trasach długodystansowych – zapewnienia zarówno efektywności energetycznej, jak i kosztów eksploatacyjnych.
3. Integracja zaawansowanych systemów zarządzania energią opartych na algorytmach uczenia maszynowego oraz predykcyjnej analityce umożliwi właściwe zarządzanie zużyciem energii w czasie rzeczywistym z uwzględnieniem prognoz pogodowych oraz charakterystyk planowanych misji.
4. Główne ograniczenia związane z szerszą implementacją technologii wodorowych w sektorze pozadrogowym obejmują: wysokie koszty inwestycyjne ogniw paliwowych, ograniczoną dostępność infrastruktury wodorowej oraz wymóg specjalistycznego przeszkolenia personelu operacyjnego. Dodatkowo, duże gabaryty zbiorników wysokociśnieniowych oraz konieczność wzmocnienia konstrukcji maszyn stanowią istotne wyzwania techniczne.
5. Rozwój gospodarki wodorowej oraz postępująca redukcja kosztów produkcji ogniw paliwowych, prognozowana na poziomie 50-70% do 2030 roku, stwarzają optymistyczne perspektywy dla ekonomicznej konkurencyjności technologii wodorowych względem rozwiązań konwencjonalnych.

Kierunki dalszych badań

Kierunkiem dalszych prac jest uzupełnienie układu sterowania w dodatkowe możliwości. Głównym elementem sterującym nadal pozostaje System Kontroli Energii (SKE), który odpowiada za koordynację pracy wszystkich elementów układu napędowego oraz właściwym zarządzaniem zużyciem paliw w zależności od aktualnych potrzeb jednostki pływającej.

Wstępnie opracowano kolejną architekturę systemu, który analizuje dane pochodzące z różnych czujników i na podstawie tych informacji podejmuje decyzje dotyczące konfiguracji źródeł energii (rys. 33). Katamaran będzie wyposażony w trzy podstawowe źródła generowania energii elektrycznej. Pierwszy stanowi system ogniwa paliwowego zasilanego wodorem. Drugi to generator ON. Trzeci to system akumulatorów a, czwarty – nowy element układu



Rys. 33. Schemat blokowy sterowania układem napędowym podczas operacji związanych z żegluga wskazujący kierunki potencjalnego rozwoju układu napędowego

Ta konfiguracja zapewnia najniższy hałas i najbardziej ekologiczną pracę jednostki. Gdy moc przekroczy możliwości samych akumulatorów, system przedzie do analizy parametrów bezpieczeństwa i emisji, aby wybrać odpowiednią konfigurację pozostałych źródeł generowania energii. Parametr bezpieczeństwa oznaczony jako B określa, czy dostępna energia w akumulatorach jest wystarczająca do bezpiecznego dotarcia do celu. Jeśli tak, uruchamiany jest wyłącznie generator w postaci ogniwa paliwowego, który dostarcza dodatkową energię przy zerowej emisji. W przeciwnym przypadku system uwzględnia parametr emisji E, który pozwala operatorowi wybrać między generatorem CNG, a generatorem ON, w zależności od wymagań środowiskowych i dostępności paliw. W niektórych sytuacjach możliwe będzie jednoczesne uruchomienie ogniwa paliwowego wraz z jednym z generatorów konwencjonalnych, co zwiększa całkowitą moc dostępną dla układu napędowego. Szczególną cechą tego systemu będzie wprowadzenie trybu BAT=STD, w którym akumulatory pozostają w stanie gotowości, a energia z generatorów jest bezpośrednio przekazywana do silników elektrycznych. Ten tryb aktywuje się, gdy SNB osiąga dokładnie wartość 10 i pozwala na ominięcie strat energetycznych związanych z ładowaniem i rozładowywaniem akumulatorów. W tym trybie możliwe są różne konfiguracje generatorów, od pracy pojedynczego źródła po kombinacje dwóch różnych typów generatorów. W trybie bezpośredniego zasilania dostępnych będzie pięć głównych konfiguracji pracy generatorów. Pierwsza wykorzystuje wyłącznie generator na gaz ziemny, druga łączy generator gazowy z ogniwem paliwowym, trzecia aktywuje tylko generator zasilany ON, czwarta łączy generator zasilany ON z ogniwem paliwowym, a piąta wykorzystuje wyłącznie system wodorowy. Wybór odpowiedniej konfiguracji zależy od aktualnego zapotrzebowania na moc, dostępności paliw oraz wymagań emisyjnych. System w sposób ciągły będzie monitorował poziom paliw we wszystkich zbiornikach, zapewniając odpowiednie rezerwy dla każdego typu paliwa. Gdy poziom wodoru, gazu ziemnego lub oleju napędowego spadnie poniżej minimalnych wartości, system automatycznie wyklucza odpowiedni generator z dostępnych opcji konfiguracyjnych. Dodatkowo system monitoruje parametry SOC oraz temperaturę akumulatorów, co pozwala na zarządzanie procesem ładowania oraz zapobiega uszkodzeniom spowodowanym przegrzaniem lub zbyt głębokim rozładowaniem. Gdy stan naładowania baterii spadnie do zakresu od 2 do 0, aktywowana zostaje procedura awaryjna, która priorytetowo uruchamia dostępne generatory w celu zapewnienia ciągłości zasilania systemów krytycznych. W tym trybie system automatycznie włącza ogniwo paliwowe oraz jeden z generatorów konwencjonalnych, który ma największe rezerwy paliwa, zapewniając tym samym bezpieczny powrót do portu lub możliwość kontynuowania misji do momentu uzupełnienia energii w akumulatorach. Przedstawione rozwiązanie z bezpośrednim zasilaniem układu napędowego stanowi kierunek dalszych badań, gdyż z uwagi na ograniczenia finansowe nie było możliwości zastosowania takiego rozwiązania w obiekcie użytym do badań. Przyszłe kierunki rozwoju systemu kontroli energii obejmują implementację zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego zdolnych do predykcyjnego zarządzania zużyciem energii w oparciu o analizę historycznych

danych eksploatacyjnych wzorców pogodowych oraz charakterystyk planowanych misji co może prowadzić do redukcji zużycia paliw o 8–12% względem obecnego algorytmu. Rozwój sztucznej inteligencji w zastosowaniach morskich umożliwi implementację systemów predykcyjnego utrzymania ruchu zdolnych do przewidywania awarii na podstawie analizy sygnałów wibracyjnych, temperaturowych oraz elektrycznych co znacząco zwiększy niezawodność operacyjną oraz zmniejszy koszty eksploatacyjne związane z nieplanowanymi postojami technicznymi. Kolejnym obszarem badań będzie integracja systemów komunikacji satelitarnej oraz internetowych platform zarządzania flotą umożliwiających zdalne monitorowanie parametrów pracy układu napędowego oraz dobraniem tras rejsu w czasie rzeczywistym w oparciu o aktualne prognozy pogodowe oraz dostępność infrastruktury tankowania w portach docelowych. Innymi słowy opracowanie architektury algorytmu autonomicznego sterowania.

Literatura

- [1] Abdin Z., Zafaranloo A., Rafiee A., et al.: Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, 2020, s. 109620. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109620.
- [2] Act on Regulation of Emissions from Non-road Special Motor Vehicles. Japanese Ministry of the Environment, Tokyo 2018, s. 1-20.
- [3] Act on Regulations for Emissions from Non-Road Vehicles (Act No. 51 of May 25, 2005). Japanese Ministry of the Environment, Tokyo 2005, s. 1-25.
- [4] Agrolap: Łączność JDLink od John Deere - technologia rolnictwa precyzyjnego. *Przewodnik techniczny*, Warszawa 2024, s. 1-6.
- [5] Ahluwalia R.K., Hua T.Q., Peng J.K.: On-board and Off-board performance of hydrogen storage options for light-duty vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, nr 3, 2012, s. 2891-2910. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.12.016.
- [6] AIP Automotive: Portable Emissions Measurement System PEMS-GAS technical specifications. Product Documentation, Munich 2020, s. 1-6.
- [7] Al-Breiki M., Bicer Y.: Comparative life cycle assessment of sustainable energy carriers including production, storage, overseas transport and utilization. *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, 2021, s. 123481. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123481.
- [8] Alternative Fuels Data Center: Non-Road Vehicle Fuel Options. US Department of Energy, Washington 2024, s. 1-12.
- [9] Anderson J.D.: *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. McGraw-Hill, New York, 1995.
- [10] Antonelli D.A., Spadaro L.: Chemical hydrogen storage: Trends and perspectives. *Chemical Society Reviews*, vol. 43, 2014, s. 786-806. DOI: 10.1039/c3cs60136f.
- [11] Apostolou D., Xydis G.: A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure. Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, 2019, s. 109292. DOI: 10.1016/j.rser.2019.06.014.
- [12] Appleby A.J., Foulkes F.R.: *Fuel Cell Handbook*. 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York 1993.
- [13] ASME V&V 20: Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer. American Society of Mechanical Engineers, New York 2009.
- [14] Association for Emissions Control by Catalyst: Advanced Emission Control Technologies. AECC Technical Publication, Brussels 2024, s. 8-20.
- [15] Association for Emissions Control by Catalyst: Non-Road Mobile Machinery Stage V compliance guidelines. AECC Technical Report, Brussels 2023, s. 5-18.
- [16] Association of Equipment Manufacturers: Navigating the Global Emissions Regulations for Nonroad Engines. AEM Technical Bulletin, Milwaukee 2025, s. 1-8.

-
- [17] AVL DiTest GmbH: Axion RS – Professional exhaust gas analyzer. Technical specifications and user manual, Austria 2022, s. 12-15.
 - [18] AXI International: EPA Tier 4 Engine Emissions Standards Implementation Guide. Technical Documentation, Houston 2022, s. 1-10.
 - [19] Aziz M., Oda T., Kashiwagi T.: Extended utilization of liquid hydrogen in the industrial processes. *Energy*, vol. 90, 2015, s. 1337-1351. DOI: 10.1016/j.energy.2015.06.104.
 - [20] Baltic Wind: Międzynarodowa Organizacja Morska przyjmuje cel neutralności klimatycznej do 2050. Raport regulacyjny, Warszawa 2023, s. 1-6.
 - [21] Barbir F.: PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Academic Press, Boston 2013.
 - [22] Basile A., Scrosati B. (red.): Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology and Applications. Wiley, Chichester 2009.
 - [23] Battery Technology International: Solid-State Batteries for Industrial Applications. Technical Review, London 2024, s. 12-18.
 - [24] Bellmarine Technology: SternMaster Electric Propulsion Systems - Technical Specification. Bellmarine Technology B.V., Holandia, luty 2020.
 - [25] BOSMAL Automotive Research and Development Institute: PEMS – badania emisji z pojazdów lekkich, ciężkich i maszyn pozadrogowych. Oferta badawcza, Bielsko-Biała 2024.
 - [26] BOSMAL Automotive Research Institute: PEMS - badania emisji z pojazdów lekkich, ciężkich i maszyn pozadrogowych. Dokumentacja techniczna, Bielsko-Biała 2024, s. 1-12.
 - [27] Bota Green Offshore: Crew Transfer Vessels - specyfikacja techniczna jednostek CTV. Dokumentacja projektowa, Gdańsk 2023, s. 1-8.
 - [28] Brouwer J.: Fuel Cell Performance Modelling for Integrated Energy Systems. *Energy Conversion and Management*, vol. 51, nr 12, 2010, s. 2733-2739. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.014.
 - [29] Building Information Modeling Institute: Digital Technologies in Construction Equipment. BIM Report, New York 2024, s. 12-22.
 - [30] Burtscher H.: Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review. *Journal of Aerosol Science*, vol. 36, nr 7, 2005, s. 896-932. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2004.12.001.
 - [31] California Air Resources Board: CATP - OFCI - Part I-D Test Procedures for Off-Road Engines. CARB Regulation Order, Sacramento 2012, s. 1-15.
 - [32] California Air Resources Board: SCR Inducements and Fleet Rule Clarification for Off-Road Engines. CARB Technical Report, Sacramento 2023, s. 5-18.
 - [33] California Energy Commission: Hydrogen Highway Network Development Plan, CEC-700-2005-006, Sacramento 2005.
 - [34] California Executive Order S-07-04: California Hydrogen Highway Blueprint, Sacramento 2004.

- [35] Carlton J.S.: Marine Propellers and Propulsion. 4th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2018.
- [36] Carreño A., Fontán A., Morales-Nin B., Mallol S.: Environmental impacts of increasing leisure boating activity in Natura 2000 areas. *Ocean & Coastal Management*, vol. 209, 2021. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105693.
- [37] Caterpillar Inc.: Przemysłowe silniki wysokoprężne Cat z technologią Tier 4. Specyfikacja techniczna, Peoria 2020, s. 1-12.
- [38] Caterpillar Inc.: Understanding Global Emissions Standards - Tier 4 Final implementation. Technical Documentation, Peoria 2024, s. 1-12.
- [39] Cheng A.S., Upatnieks A., Mueller C.J.: Investigation of the impact of biodiesel fuelling on NOx emissions using an optical direct injection diesel engine. *International Journal of Engine Research*, vol. 7, nr 4, 2006, s. 297-318. DOI: 10.1243/14680874JER01706.
- [40] Clean Technica: Superyachts For The Super Rich Cause A Whole Lot Of Environmental Damage. Dostępne online: <https://cleantechnica.com/2024/06/19/superyachts-for-the-super-rich-cause-a-whole-lot-of-environmental-damage/> (dostęp: 23.09.2025).
- [41] CNH Industrial: Advanced Agricultural Automation Systems. Product Manual, Turin 2024, s. 5-20.
- [42] Cohen J.: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2nd ed., Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 1988.
- [43] Coleman H.W., Steele W.G.: Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers. 4th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, 2018.
- [44] Commission Regulation EU 2017/654: Method for determining the CO2 emissions and fuel consumption of heavy-duty vehicles. Official Journal L 100, Brussels, 2017.
- [45] Committee for European Construction Equipment: Europejski rynek maszyn budowlanych - analiza 2024. CECE Market Report, Brussels 2024, s. 1-22.
- [46] Committee for European Construction Equipment: Stage V emission standards impact assessment. CECE Industry Report, Brussels 2019, s. 1-25.
- [47] Construction Equipment Magazine: Hybrid Systems in Heavy Machinery. Technical Analysis, Chicago 2024, s. 15-22.
- [48] Construction Industry Research Association: Equipment Classification Systems. CIRA Technical Standard, London 2023, s. 1-25.
- [49] Danfoss: What is Tier 4 - Understanding emission control requirements for diesel engines. Technical Guide, Nordborg 2020, s. 1-6.
- [50] DieselNet: Emission Standards Canada - Off-road engine regulations harmonization. Ecopoint Technical Documentation, Toronto 2021, s. 1-15.
- [51] DieselNet: Emission Standards Canada - Regulatory background and EPA harmonization. Ecopoint Documentation, Toronto 2011, s. 1-22.
- [52] DieselNet: Japan Nonroad Engines - Emission Standards Tier 3 and Tier 4 implementation. Ecopoint Technical Report, Toronto 2015, s. 1-18.

-
- [53] DieselNet: USA Nonroad Diesel Engines - Emission Standards Tier 1-4. Technical Report, Ecopoint Inc., Toronto 2019, s. 1-35.
 - [54] Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council on the deployment of alternative fuels infrastructure. Official Journal L 307, Brussels 2014, s. 1-20.
 - [55] Energy Policy Act of 1992, Public Law 102-486, U.S. Congress, Washington D.C. 1992.
 - [56] Environment and Climate Change Canada: Canadian Environmental Protection Act 1999 - Off-road engine regulations. CEPA Technical Overview, Ottawa 2019, s. 1-12.
 - [57] Environment and Climate Change Canada: Guidance document on Off-Road Compression-Ignition Engine Emission Regulations. ECCC Technical Guide, Ottawa 2012, s. 1-25.
 - [58] Environmental Protection Agency: Urban Air Quality and Construction Equipment. EPA Technical Bulletin, Washington 2024, s. 1-8.
 - [59] EPA: Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2021. U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., 2023.
 - [60] EURAMET: Metrology for portable emissions measurement systems - Technical specifications. EURAMET Research Report SRT-i01, Teddington 2019, s. 1-15.
 - [61] Europa Maszyny: Najnowsze modele koparek hybrydowych Komatsu, Hitachi i Caterpillar. Przegląd techniczny, Warszawa 2015, s. 8-15.
 - [62] Europa Maszyny: Wyzwania energetyczne elektrycznych maszyn budowlanych. Raport branżowy, Warszawa 2024, s. 8-12.
 - [63] European Agricultural Machinery Association: Modern Farm Equipment Classification. CEMA Technical Guide, Brussels 2024, s. 5-18.
 - [64] European Agricultural Machinery Association: Precision Agriculture Technologies in Europe. CEMA Technical Report, Brussels 2023, s. 1-18.
 - [65] European Biofuels Technology Platform: Biodiesel Applications in NRMM. Technical Report, Brussels 2023, s. 5-15.
 - [66] European Commission: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. COM (2020) 301 final, Brussels 2020, s. 1-38.
 - [67] European Commission: Alternative Fuels Infrastructure Implementation Report. SWD (2020) 337 final, Brussels 2020, s. 1-15.
 - [68] European Commission: Commission Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council on emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. Official Journal L 252, Brussels 2016, s. 53-117.
 - [69] European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Research and Innovation Staff Working Document – A sustainable hydrogen strategy supporting the European Green Deal. SWD (2020) 176 final, Brussels 2020, s. 1-70.
 - [70] European Commission: Single Market Economy - Emissions from non-road mobile machinery. DG Internal Market Report, Brussels 2018, s. 1-12.

- [71] European Commission DG Agriculture: Sustainable Agriculture Technology Implementation. COM (2023) Agricultural Innovation, Brussels 2023, s. 5-12.
- [72] European Commission Joint Research Centre: Quantifying Emissions in the European Maritime Sector. Dostępne online: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC128870/JRC128870_01.pdf(dostęp: 23.09.2025).
- [73] European Committee for Standardization: EN 12245: Transportable gas cylinders – Design, construction and testing of composite gas cylinders and tubes, 2020.
- [74] European Committee for Standardization: EN 13121-3: GRP tanks and vessels for use above ground. Design and workmanship, 2015.
- [75] European Committee for Standardization: EN 17533:2020 Gaseous hydrogen – Cylinders and tube trailers for stationary storage, 2020.
- [76] European Construction Equipment Association: Alternative Fuel Systems in Construction Machinery. CECE Technical Report, Brussels 2024, s. 1-15.
- [77] European Construction Equipment Association: Construction Equipment Market Analysis 2023-2024. CECE Annual Report, Brussels 2024, s. 8-15.
- [78] European Environment Agency: Air quality impacts of non-road mobile machinery emissions. EEA Report No. 8/2020, Copenhagen 2020, s. 12-28.
- [79] European Environment Agency: European Environment Agency indicator methodology for energy-related emissions. Technical Report No. 10/2021, Copenhagen 2021.
- [80] European Environment Agency: Maritime transport – facts and figures. Dostępne online: <https://www.eea.europa.eu/publications/maritime-transport/emter-facts-and-figures>(dostęp: 23.09.2025).
- [81] European Maritime Safety Agency: Alternative Fuels for Shipping. EMSA Technical Report, Lisbon 2024, s. 8-20.
- [82] European Maritime Safety Agency: Recreational and Commercial Vessel Classifications. EMSA Technical Guide, Lisbon 2024, s. 1-12.
- [83] European Parliament: EPA Replies to EMIS Questionnaire on emissions testing procedures. European Parliament Document, Brussels 2016, s. 1-12.
- [84] Ferziger J.H., Perić M., Street R.L.: Computational Methods for Fluid Dynamics. 4th ed., Springer, Berlin, 2020.
- [85] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking: Deployment of fuel cell applications in non-road mobile machinery. FCH JU Report, Brussels 2021, s. 1-25.
- [86] Giechaskiel B., Mamakos A., Andersson J., et al.: Measurement of Automotive Nonvolatile Particle Number Emissions within the European Legislative Framework. Aerosol Science and Technology, vol. 46, nr 7, 2012, s. 719-749. DOI: 10.1080/02786826.2012.665454.
- [87] Giles M.B., Pierce N.A.: An Introduction to the Adjoint Approach to Design. Flow, Turbulence and Combustion, vol. 65, 2000, s. 393-415. DOI: 10.1023/A:1011430410075.

-
- [88] Gospodarka Morska: Alternatywne paliwa w żegludze morskiej. Przegląd technologiczny, Gdańsk 2024, s. 12-25.
- [89] Gospodarka Morska: Do IMO złożono wnioszek dotyczący osiągnięcia zerowej emisji CO₂ w żegludze. Analiza prawna, Gdańsk 2024, s. 1-8.
- [90] Government of Canada: Off-road small spark-ignition engine emission regulations timeline. ECCC Regulatory Framework, Ottawa 2020, s. 8-15.
- [91] Government of Canada: Workplan for vehicle and engine emission control - Canada-US air quality agreement. ECCC Policy Document, Ottawa 2015, s. 1-6.
- [92] Green Sail: Hydrogen fuel and the future of yachting. Dostępne online: <https://www.green-sail.com/blog/hydrogen-fuel-and-the-future-of-yachting> (dostęp: 23.09.2025).
- [93] Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., et al.: Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
- [94] Hansen J.P., Sundblad G., Olsson J., Östman Ö., Eklöv A.G.: Recreational boating degrades vegetation important for juvenile fish. PLOS ONE, vol. 13, nr 8, 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0201443.
- [95] Hauschild M.Z., Rosenbaum R.K., Olsen S.I.: Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Springer, Cham, 2018.
- [96] Heywood J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed., McGraw-Hill Education, New York, 2018.
- [97] Hirscher M. i in.: Nanomaterials for room-temperature hydrogen storage: A review. Advanced Energy Materials, vol. 10, nr 4, 2020, s. 1902743. DOI: 10.1002/aenm.201902743.
- [98] HORIBA: Non-Road Mobile Machinery Engine Testing - Complete PEMS solutions. Technical Documentation, Kyoto 2020, s. 1-8.
- [99] Hydrogen Europe: Fuel Cell Technology for Mobile Applications. Technical Overview, Brussels 2024, s. 1-18.
- [100] IEA: CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2023. International Energy Agency, Paris, 2023.
- [101] IEA: Energy Technology Perspectives 2023 Energy technology roadmaps to net zero. International Energy Agency, Paris, 2023.
- [102] IMO: Initial GHG Strategy Revision - Marine Environment Protection Committee. MEPC Resolution 377(80), London 2023, s. 1-15.
- [103] International Association for Hydrogen Energy: Hydrogen Infrastructure Development. IAHE Report, Vienna 2024, s. 8-20.
- [104] International Association of Construction Equipment Manufacturers: Battery Technology Limitations in NRMM. Technical Assessment, Munich 2024, s. 1-10.
- [105] International Chamber of Shipping: Maritime Emissions Assessment. ICS Technical Report, London 2023, s. 8-22.

- [106] International Council on Clean Transportation: Costs of Emission Reduction Technologies for Diesel Non-Road Engines. ICCT Technical Report, Washington 2018, s. 12-25.
- [107] International Council on Clean Transportation: European Stage V non-road emission standards. ICCT Policy Update, Washington 2016, s. 1-8.
- [108] International Council on Clean Transportation: European Stage V non-road emission standards - Policy implementation analysis. ICCT Working Paper, Washington 2019, s. 1-15.
- [109] International Council on Clean Transportation: Real-world NOx emissions from ships and implications for future regulations. Dostępne online: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Marine-real-world-NOx-Working-paper-20-A4-v6.pdf> (dostęp: 14.07.2025).
- [110] International Council on Clean Transportation: Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment. ICCT Working Paper 2016-06, Washington 2016, s. 15-28.
- [111] International Electrotechnical Commission: IEC 61162-460: Digital interfaces for navigational equipment within a ship, 2020.
- [112] International Electrotechnical Commission: IECEx and ATEX standards for equipment in explosive atmospheres, 2019.
- [113] International Energy Agency: Clean Energy Technologies for Off-Road Transport. IEA Report, Paris 2024, s. 15-28.
- [114] International Energy Agency: Technology Roadmap – Hydrogen and Fuel Cells. IEA, Paris 2015.
- [115] International Energy Agency: The Future of Hydrogen – Seizing today's opportunities. IEA, Paris 2019.
- [116] International Gas Union: Compressed Natural Gas for Industrial Applications. IGU Report, Barcelona 2024, s. 15-25.
- [117] International Journal of Heavy Vehicle Systems: Hybrid Propulsion in Construction Equipment. Academic Publication, Vol. 31, 2024, s. 45-62. DOI: 10.1504/IJHVS.2024.135421.
- [118] International Maritime Organization: Global Maritime Transport Statistics. IMO Report, London 2024, s. 1-35.
- [119] International Maritime Organization: Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk. MSC.420(97), London 2016.
- [120] International Maritime Organization: International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code). MSC.370(93), London 2015.
- [121] International Maritime Organization: International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code). London 2017.

-
- [122] International Maritime Organization: Marine Environment Protection Committee Guidelines. MEPC Resolution, London 2023, s. 1-25.
- [123] International Maritime Organization: NOx emission limits and test cycles for marine diesel engines, MARPOL Annex VI Regulation 13. Dostępne online: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php> (dostęp: 11.08.2025).
- [124] International Organization for Standardization: ISO 11120: Gas cylinders – Refillable seamless steel tubes of water capacity between 150 L and 3000 L – Design, construction and testing, 2015.
- [125] International Organization for Standardization: ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva 2006.
- [126] International Organization for Standardization: ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva 2006.
- [127] International Organization for Standardization: ISO 16183:2017 Heavy-duty vehicles — Measurement of fuel consumption and CO2 emissions — Trailer test method. Geneva 2017.
- [128] International Organization for Standardization: ISO 19880-1:2020 Gaseous hydrogen – Fuelling stations – Part 1: General requirements, 2020.
- [129] International Organization for Standardization: ISO 6165 Earth-moving machinery - Basic types. ISO Standard, Geneva 2023, s. 1-15.
- [130] International Organization for Standardization: ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement — Part 3 Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008.
- [131] International Organization for Standardization: ISO/TR 15916: Basic considerations for the safety of hydrogen systems, 2004.
- [132] IPCC: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan, 2006.
- [133] IPCC: Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change. Sixth Assessment Report, Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, 2022.
- [134] ITA Yacht Services Canada: New environmental standard for yachts with powerful diesel engines. Dostępne online: <https://itayachtscanada.com/new-environmental-standard-for-yachts-with-powerful-diesel-engines/> (dostęp: 23.05.2025).
- [135] ITTC: Final Report and Recommendations to the 28th ITTC. International Towing Tank Conference, Wuxi, 2017.
- [136] ITTC: ITTC Recommended Procedures and Guidelines: 1957 ITTC Model-Ship Correlation Line. ITTC, 2017.
- [137] ITTC: ITTC Recommended Procedures and guidelines: Practical Guidelines for Ship CFD Applications. International Towing Tank Conference, 2014.
- [138] ITTC: Practical Guidelines for Ship CFD Applications. 26th International Towing Tank Conference, Rio de Janeiro, 2011.

- [139] Japanese Land Engine Manufacturers Association: Structure of the legislative system of emission controls in Japan. LEMA Regulatory Guide, Tokyo 2013, s. 1-6.
- [140] JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [141] John Deere: Precision Agriculture Solutions Technology Guide. Technical Documentation, Moline 2024, s. 15-28.
- [142] Joint Research Centre: NRMM EU Regulation testing procedures and compliance. JRC Scientific Report EUR 30678, Brussels 2021, s. 8-22.
- [143] Joint Research Centre: Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) - Real-world emissions monitoring. JRC Scientific Report, Brussels 2018, s. 5-18.
- [144] Joint Research Centre: Thermochemical water-splitting cycles – status and prospects. JRC Technical Report EUR 30478 EN, Brussels 2022.
- [145] Joint Research Centre European Commission: Testing within Stage V regulation. JRC Technical Report, Brussels 2021, s. 1-15.
- [146] Kawasaki Heavy Industries: World's First Liquefied Hydrogen Carrier Suiso Frontier. Technical Report, Kobe 2020.
- [147] Komatsu Limited: HB215LC-1 Hybrid Operation Manual. Technical Documentation, Tokyo 2024, s. 12-25.
- [148] Komatsu Poland: Koparki hybrydowe - technologia przyszłości. Dokumentacja produktowa, Warszawa 2024, s. 1-6.
- [149] Komisja Europejska: Wniosek Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie homologacji i nadzoru rynku maszyn mobilnych nieprzeznaczonych do ruchu drogowego poruszających się po drogach publicznych. COM(2023) 178 final, Bruksela 2023, s. 1-15.
- [150] Kongkanand A., Mathias M.F.: The Priority and Challenge of High-Power Performance of Low-Pt PEMFCs. *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 159, nr 11, 2012, s. F693-F713. DOI: 10.1149/2.006211jes.
- [151] Krasae-in S., Stiles J.H., Loyns P.D.: Compressed hydrogen storage. In: *Solid State Hydrogen Storage*, Woodhead Publishing, Cambridge 2008, s. 527-569.
- [152] Kulikovskiy A.A.: Modelling of Direct Methanol Fuel Cells: Two-Dimensional Analysis. *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 33, nr 6, 2003, s. 593-603. DOI: 10.1023/A:1024439201139.
- [153] Larminie J., Dicks A.: *Fuel Cell Systems Explained*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Chichester 2003.
- [154] Larsson L., Stern F., Visonneau M.: *Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessment of the Gothenburg 2010 Workshop*. Springer, Dordrecht, 2014.
- [155] Lee H., Lee J., Kim J., et al.: Economic and environmental assessment of hydrogen supply chains using renewable energy in Korea. *Energy*, vol. 184, 2019, s. 732-743. DOI: 10.1016/j.energy.2019.07.052.

-
- [156] Lin Q., Weber A.Z.: Design and Optimization of Pt–Ru Catalyst Layers for DMFC Anodes. *Electrochimica Acta*, vol. 49, nr 23, 2004, s. 3993-4001. DOI: 10.1016/j.electacta.2004.01.087.
- [157] Livingston International: Environment and Climate Change Canada Vehicle and Engine Emissions Program. Trade Compliance Guide, Toronto 2018, s. 1-4.
- [158] Loop Energy Inc.: Hydrogen Fuel Cell Modules - Technical Specifications S300, T505, T600. Loop Energy Inc., Burnaby, BC, Kanada, wrzesień 2021.
- [159] Machaj K., Kupecki J., Malecha Z., et al.: Hydrogen technologies in Polish maritime sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, nr 18, 2021, s. 10387-10401. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.067.
- [160] Markowski J.: Piroliza metanu na tle wybranych metod otrzymywania wodoru. *Nafta-Gaz*, nr 6/2023, s. 425-435.
- [161] Maritime Autonomous Surface Ships Consortium: Autonomous Ships Technology Development. MASS Research Report, Helsinki 2022, s. 1-15.
- [162] MH Energy: Energetyka jądrowa i wodór – perspektywy rozwoju technologii różowego wodoru. Warszawa 2025.
- [163] Milewski J., Wolowicz M., Badyda K.: Technical aspects of hydrogen energy system development. *Energies*, vol. 14, nr 11, 2021, s. 3305. DOI: 10.3390/en14113305.
- [164] Miller J.A., Bowman C.T.: Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 15, nr 4, 1989, s. 287-338. DOI: 10.1016/0360-1285(89)90017-8.
- [165] Ministerstwo Środowiska, Pracy i Gospodarstwa Morskiego Finlandii: Reducing emissions from non-road mobile machinery. *Transport & Environment*, Helsinki 2024, s. 1-12.
- [166] Ministry of the Environment Japan: Non-road special motor vehicles emission limits specifications. MOE Technical Publication, Tokyo 2020, s. 5-12.
- [167] Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A.: *Ship Resistance and Propulsion*. Cambridge University Press, Cambridge, 2011.
- [168] Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A.: *Ship Resistance and Propulsion*. 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2017.
- [169] MTU Friedrichshafen GmbH: Silniki MTU przygotowane na normy US EPA Tier 4 / EU Stage IV. Dokumentacja techniczna, Friedrichshafen 2024, s. 1-8.
- [170] Munipro: Koparka Volvo EC230 Electric - całodzienna praca na jednym ładowaniu. Analiza techniczna, Warszawa 2025, s. 1-4.
- [171] Nakamura H., Ishimoto Y., Yamamoto S., et al.: Factors for better deployment of hydrogen in Japan. *Energy Policy*, vol. 123, 2018, s. 400-412. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.08.051.

- [172] Nash J.E., Sutcliffe J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, nr 3, 1970, s. 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- [173] Natural Gas Vehicle Association: CNG in Off-Road Applications. Industry Report, Washington 2024, s. 8-18.
- [174] Navigational Decision Systems: Autonomiczny statek - technologia AVAL. Dokumentacja projektowa, Gdańsk 2017, s. 1-10.
- [175] Nicoletti G., Arcuri N., Nicoletti G., et al.: A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*, vol. 89, 2015, s. 205-213. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.10.002.
- [176] NORESO: EPA National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory infrastructure contract. Company Press Release, Westborough 2023, s. 1-4.
- [177] Oberkampf W.L., Roy C.J.: *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge, 2010.
- [178] Ocean Vines: A Sustainable Future: Transforming the Yachting Industry's Carbon Footprint. Dostępne online: <https://oceanvines.org/a-sustainable-future-transforming-the-yachting-industrys-carbon-footprint/> (dostęp: 23.09.2025).
- [179] Offshore Wind Poland: CTV do obsługi morskich farm wiatrowych - analiza operacyjna. Raport branżowy, Warszawa 2023, s. 5-12.
- [180] O'Hayre R., Cha S.W., Colella W., Prinz F.B.: *Fuel Cell Fundamentals*. 3rd ed., Wiley, Hoboken, 2016.
- [181] Ohlig K., Decker L.: The latest developments and outlook for hydrogen liquefaction technology. *AIP Conference Proceedings*, vol. 1573, 2014, s. 1311-1317. DOI: 10.1063/1.4860858.
- [182] Oxfam International: Carbon emissions of richest 1% more than double the emissions of the poorest half of humanity. Dostępne online: <https://www.oxfam.org/en/press-releases/superyachts-and-jets-europes-elite-emit-more-carbon-pollution-week-worlds-poorest-1> (dostęp: 23.09.2025).
- [183] Park J., Kim D., Lee H., et al.: Hydrogen ship technology development trends and implications. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 13, 2021, s. 564-577. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2021.05.003.
- [184] Pawłowski K.: Analiza porównawcza technologii wytwarzania wodoru. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, nr 4/2023, s. 8-15.
- [185] Phinia: Worldwide heavy-duty and off-road emission standards - Canada chapter. Technical Reference Manual, Auburn Hills 2024, s. 45-52.
- [186] Polenergia Sprzedaż: *Elektroliza wody i produkcja zielonego wodoru w transformacji energetycznej*. Warszawa 2025.

- [187] Polskie Stowarzyszenie Paliw Alternatywnych: Elektromobilność specjalistyczna i pozadrogowa. Polsko-fińskie zalecenia dotyczące wdrażania bezemisyjnych maszyn pozadrogowych. PSPA, Warszawa 2023, s. 8-16.
- [188] Portal Morski: IMO - zmniejszenie o 50% emisji CO₂ z transportu morskiego do 2050. Analiza regulacyjna, Gdańsk 2018, s. 1-4.
- [189] Portal Morski: Polska firma zaprojektuje dla LOTOS Petrobaltic pierwszą jednostkę CTV. Informacja prasowa, Gdańsk 2023, s. 1-3.
- [190] Precision Agriculture Association: GPS and Sensor Technologies in Farming. PAA Technical Report, Iowa 2024, s. 8-25.
- [191] Programa CALAC: USA Nonroad Mobile Machinery Emission Standards Evolution. Technical Assessment, Mexico City 2023, s. 1-12.
- [192] Programa CALAC+: Japan policies and regulations for non-road mobile machinery - comprehensive overview. CALAC Technical Report, Mexico City 2023, s. 1-8.
- [193] PŻB Offshore: Jednostki CTV w polskiej stoczni - zapotrzebowanie rynkowe. Analiza ekonomiczna, Gdańsk 2025, s. 1-6.
- [194] Qiang Z.: Performance characteristics and power classification of fuel cells. *Journal of Power Sources*, vol. 144, nr 1, 2005, s. 17-23. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.12.021.
- [195] Quigley K., Herdegen K., Bauer C.: Compressed hydrogen storage for fuel cell vehicles. *MRS Bulletin*, vol. 28, nr 9, 2003, s. 681-686. DOI: 10.1557/mrs2003.197.
- [196] Rajch A.: Sektor NRMM odpowiedzialny za 23 proc. emisji CO₂ globalnie. Portal Komunalny, 19.10.2023. Dostępne online: <https://portalkomunalny.pl/czas-na-zeroemisyjne-maszyny-ciezkie-546750/> (dostęp: 15.07.2024).
- [197] Ralph T.R., Davies R.P., Pletcher D.: *Electrochemical Methods for Real-World Applications*. Elsevier, Amsterdam 1998.
- [198] Ramani V., Devanathan R., Ramaswamy A.V.: Overview of Polymer Electrolyte Membranes for Direct Methanol Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, vol. 160, nr 1, 2006, s. 345-352. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.01.096.
- [199] Regulation EU 2016/1628: Requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. Official Journal L 252, Brussels, 2016.
- [200] Ren J., Musyoka N.M., Langmi H.W., et al.: Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, nr 1, 2017, s. 289-311. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.195.
- [201] Renewable Energy Association: Biodiesel Performance in Construction Equipment. Technical Assessment, London 2024, s. 1-10.
- [202] Richardson L.F.: The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 210, 1911, s. 307-357. DOI: 10.1098/rsta.1911.0009.

- [203] Roache P.J.: *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa Publishers, Albuquerque, 1998.
- [204] Rolnictwo Przyszłości: Nowe autonomiczne maszyny i technologie dla rolnictwa. Przegląd branżowy, Warszawa 2025, s. 8-15.
- [205] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/1628 z dnia 14 września 2016 r. w sprawie wymogów dotyczących wartości granicznych emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych oraz homologacji typu w odniesieniu do silników spalinowych wewnętrznego spalania przeznaczonych do maszyn mobilnych nieporuszających się po drogach. Dz.U. L 252 z 16.9.2016, s. 53-117.
- [206] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2025/14 z dnia 8 stycznia 2025 r. w sprawie homologacji i nadzoru rynku maszyn mobilnych nieprzeznaczonych do ruchu drogowego poruszających się po drogach publicznych. Dz.U. L 14 z 8.1.2025.
- [207] Saltelli A., Ratto M., Andres T., et al.: *Global Sensitivity Analysis: The Premier*. John Wiley & Sons, Chichester, 2008.
- [208] Schlapbach L., Züttel A.: Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature*, vol. 414, 2001, s. 353-358. DOI: 10.1038/35104634.
- [209] Siekierski M., Rys J., Wieczorek M.: Technologie wodorowe – wodór z biomasy i odpadów. *Mazowsze Studia Regionalne*, nr 44/2023, s. 45-68.
- [210] Sokołowski W.: Identyfikacja i analiza wybranych systemów autonomicznych w transporcie morskim. *Logistyka Morska*, vol. 46, nr 5, 2019, s. 125-145.
- [211] Steele B.C.H., Heinzel A.: Materials for fuel-cell technologies. *Nature*, vol. 414, 2001, s. 345-352. DOI: 10.1038/35104620.
- [212] Stern F., Wilson R.V., Coleman H.W., Paterson E.G.: Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations—Part 1 Methodology and Procedures. *Journal of Fluids Engineering*, vol. 123, nr 4, 2001, s. 793-802. DOI: 10.1115/1.1412235.
- [213] Stone R.: *Introduction to Internal Combustion Engines*. 4th ed., Palgrave Macmillan, London, 2012.
- [214] Taylor B.N., Kuyatt C.E.: *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. NIST Technical Note 1297, National Institute of Standards and Technology, 1994.
- [215] Transport Policy: US Nonroad Emissions Standards - Tier 4 regulation impact assessment. Policy Brief, London 2018, s. 1-8.
- [216] Transport Policy Network: Canada Nonroad Emissions Standards - US EPA harmonization approach. Policy Brief, London 2021, s. 1-10.
- [217] Turns S.R.: *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. 3rd ed., McGraw-Hill Education, New York, 2012.
- [218] Tygodnik Rolniczy: Autonomiczne zestawy od John Deere wykorzystują sztuczną inteligencję. *Analiza techniczna*, Warszawa 2025, s. 1-5.

-
- [219] Union of Concerned Scientists: What is EPA's Vehicle Lab and why vehicle testing matters. UCS Policy Brief, Cambridge 2021, s. 1-6.
- [220] United Nations Conference on Trade and Development: Maritime Transport Review 2024. UNCTAD Report, Geneva 2024, s. 25-45.
- [221] United States Environmental Protection Agency: Emergency Vehicle Rule - SCR Maintenance and Regulatory Flexibility for Nonroad Equipment. EPA Final Rule 420-R-14-001, Washington 2014, s. 1-15.
- [222] United States Environmental Protection Agency: Final Rule for Control of Emissions of Air Pollution From Nonroad Diesel Engines and Fuel. EPA Final Rule 420-R-04-007, Washington 2004, s. 1-25.
- [223] United States Environmental Protection Agency: Office of Transportation and Air Quality – Future Fuel Technologies Program Overview. EPA-420-F-23-051, Washington D.C. 2023.
- [224] United States Environmental Protection Agency: Regulations for Emissions from Heavy Equipment with Compression-Ignition Engines. EPA Regulatory Guide 40 CFR Part 1039, Washington 2025, s. 8-22.
- [225] United States Environmental Protection Agency: Tier 4 Emission Standards for Nonroad Diesel Engines. EPA Office of Transportation and Air Quality, Washington 2023, s. 1-25.
- [226] United States Environmental Protection Agency: Vehicle and Engine Emissions Testing at NVFEL. EPA Laboratory Guide, Ann Arbor 2025, s. 1-10.
- [227] United States Environmental Protection Agency: Vehicle Certification and Compliance Testing procedures. EPA Testing Guide, Washington 2025, s. 1-6.
- [228] University of California Riverside: National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory capabilities overview. UCR-CE-CERT Technical Report, Riverside 2021, s. 1-8.
- [229] U.S. Department of Energy: Hydrogen Production and Storage Infrastructure Roadmap. DOE/GO-102021-5647, Washington D.C. 2021.
- [230] U.S. Department of Energy: Hydrogen Program Plan – Fiscal Years 2021–2025. DOE/GO-102021-5647, Washington D.C. 2021.
- [231] U.S. Department of Energy and U.S. Environmental Protection Agency: Nonroad Mobile Machinery Hydrogen Fuel Cell Pilot Projects Report. DOE/EPA-2025-001, Washington D.C. 2025.
- [232] Van Hoecke L., Laffineur L., Campe R., et al.: Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Energy & Environmental Science*, vol. 14, nr 2, 2021, s. 815-843. DOI: 10.1039/d0ee03338b.
- [233] Vehicle Certification Agency: Type Approval for Non-Road Mobile Machinery (NRMM). Guidance for manufacturers, VCA, Wielka Brytania 2024, s. 1-8.
- [234] Vielstich W., Lamm A., Gasteiger H.A. (red.): *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology and Applications*. Wiley, Chichester 2003.

- [235] Volvo CE: EC230 Electric Excavator Performance Analysis. Product Documentation, Eskilstuna 2025, s. 1-8.
- [236] Volvo CE: L90 Electric Wheel Loader Specifications. Technical Datasheet, Eskilstuna 2024, s. 1-4.
- [237] Volvo Construction Equipment: Electric Machines Technology Overview. Technical Documentation, Eskilstuna 2024, s. 5-15.
- [238] Wang Y., Chen K.S., Mishler J., Cho S.C., Adroher X.C.: A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research. *Applied Energy*, vol. 88, nr 4, 2011, s. 981-1007. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.09.030.
- [239] WhisperPower B.V.: W-SQ 27 kVA / 25 kW Installation Manual. WhisperPower B.V., Drachten, Holandia, październik 2014.
- [240] WHO: Ambient (outdoor) air pollution. World Health Organization Fact Sheet, Geneva, 2021.
- [241] Wikipedia: Komatsu PC200-8 Hybrid Technical Specifications. Encyclopedia Entry, 2023. Dostępne online: https://en.wikipedia.org/wiki/Komatsu_PC200-8 (dostęp: 12.04.2024).
- [242] Willmott C.J., Matsuura K.: Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, vol. 30, 2005, s. 79-82. DOI: 10.3354/cr030079.
- [243] Wysokie Napięcie: Unijna strategia wodorowa stawia na czysty wodór. Dostępne online: <https://wysokienapiecie.pl/29964-unijna-strategia-wodorowa-stawia-na-czysty-wodor/> (dostęp: 23.06.2024).
- [244] Yacht Carbon Offset: Understanding Yacht Emissions: The Superyacht Carbon Footprint. Dostępne online: <https://yachtcarbonoffset.com/understanding-yacht-emissions-the-superyacht-carbon-footprint/> (dostęp: 23.09.2025).
- [245] Yang C., Ogden J.: Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, nr 2, 2007, s. 268-286. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.009.
- [246] Zhuang L., Hoang T.D.Q., Pan M., Wang H., Bengtsson L.: Degradation Mechanisms in Direct Methanol Fuel Cells: Diagnostics and Mitigation Strategies. *Energy & Environmental Science*, vol. 13, nr 11, 2020, s. 3380-3401. DOI: 10.1039/d0ee01948h.