

dr hab. inż. Maciej Gućma prof. PM
Politechnika Morska w Szczecinie

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Aleksa Jagielskiego pt.

Napęd wodorowy w kategorii pozadrogowej

Podstawa prawna wykonania recenzji

Wykonując uchwałę Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu Politechniki Poznańskiej z dnia 16.12.2025 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów w przewodzie doktorskim Pana mgr inż. Aleksa Jagielskiego, o treści, której zostałem poinformowany pismem z dnia 17.12.2025 przedkładałem przedmiotową recenzję.

Charakterystyka rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska, obejmująca ponad 90 stron maszynopisu A4, charakteryzuje się poprawną strukturą redakcyjną z logicznym podziałem na część literaturową oraz eksperymentalną. Warstwa graficzna pracy została wzbogacona o liczne rysunki i zestawienia tabelaryczne, które w sposób syntetyczny obrazują analizowane zagadnienia techniczne oraz klasyfikację maszyn NRMM. Imponujący aparat bibliograficzny, obejmujący 246 pozycji, opiera się na aktualnych aktach prawnych, normach technicznych oraz literaturze przedmiotu, w tym źródłach z 2023 roku. **Dobór cytowanej literatury świadczy o doskonałej orientacji Autora w reprezentowanej dziedzinie wiedzy.** Całość wywodu prowadzona jest precyzyjnym językiem naukowym, właściwym dla nauk inżyniersko-technicznych, z zachowaniem rygoru terminologicznego w zakresie inżynierii transportu.

Wybór przedmiotu badań i tematu pracy

Podjęcie tematyki zastosowania napędów wodorowych w kategorii maszyn pozadrogowych (NRMM) stanowi niezwykle trafną odpowiedź na współczesne wyzwania związane z koniecznością dekarbonizacji sektora ciężkiego przemysłu i transportu. Autor słusznie zidentyfikował istotną lukę badawczą w obszarze maszyn „non-road”, które mimo znaczącego udziału w globalnej emisji zanieczyszczeń, są rzadziej niż pojazdy drogowe przedmiotem kompleksowych analiz wdrożeniowych w zakresie technologii wodorowych. Skoncentrowanie uwagi na ogniwach paliwowych jest merytorycznie uzasadnione specyfiką operacyjną analizowanych maszyn, dla których ograniczenia gęstości energii w klasycznych akumulatorach i akumulatorach Li-XX stanowią barierę nie do pokonania. Wybór jednostki pływającej (katamaranu) jako głównego obiektu badawczego pozwolił na przeprowadzenie unikalnej walidacji wielopaliwowego układu napędowego w wymagającym i zmiennym środowisku wodnym. Taka selekcja obiektu badań umożliwiła Autorowi zasadną ekstrapolację wyników na szersze spektrum urządzeń o wysokim zapotrzebowaniu na moc, takich jak koparki, spycharki czy ciężkie pojazdy użytkowe. Wartościowym aspektem doboru tematu jest jego wyraźna interdyscyplinarność, łącząca zagadnienia inżynierii transportowej (w tym transportu morskiego) ze szczegółową analizą skomplikowanego otoczenia legislacyjnego Unii Europejskiej oraz USA. Podjęta problematyka wykracza poza rozważania teoretyczne, adresując konkretne bariery inżynierskie, w tym krytyczne kwestie bezpieczeństwa magazynowania wodoru oraz braki w infrastrukturze tankowania (bunkrowania). Zestawienie parametrów pracy konwencjonalnych silników spalinowych z prototypowym układem wodorowym w warunkach rzeczywistych świadczy o dojrzałym i pragmatycznym podejściu do weryfikacji postawionych tez. Praca wnosi dzięki temu wymierny wkład w rozwój wiedzy na temat adaptacji technologii zeroemisyjnych w sektorach trudnych do elektryfikacji,

wypełniając istniejące deficyty w literaturze przedmiotu. Finalnie, wybór tak zdefiniowanego przedmiotu badań należy ocenić jako wysoce ambitny, aktualny i wpisujący się w strategiczne kierunki rozwoju nowoczesnej inżynierii transportu i ogólnie nauk inżynieryjno-technicznych.

W przedstawionym ujęciu wybór tematyki jest bardzo trafny: opracowane przez doktoranta podejście naukowe pozwoli na stworzenie zupełnie nowej, niwelującej luki w tym obszarze wiedzy technicznej, metody kompleksowej oceny emisji dla pojazdów w kategorii pozadrogowej.

Ocena ogólna rozwiązania zagadnienia

Cele główne rozprawy obejmują:

- *Analiza zasadności implementacji technologii wodorowej:* Ocena możliwości wykorzystania wodorowych ogniw paliwowych jako głównego źródła napędu w maszynach kategorii pozadrogowej (NRMM), ze szczególnym uwzględnieniem jednostek o wysokim zapotrzebowaniu na moc.
- *Weryfikacja efektywności energetycznej i ekologicznej:* Porównanie parametrów pracy napędu wodorowego z konwencjonalnymi silnikami spalinowymi (ZS) w aspekcie sprawności ogólnej, redukcji emisji szkodliwych składników spalin oraz obniżenia poziomu hałasu.
- *Identyfikacja barier wdrożeniowych:* Określenie ograniczeń technicznych (magazynowanie wodoru, infrastruktura), ekonomicznych (koszty inwestycyjne) oraz prawnych (luki w regulacjach dla sektora „non-road”) wpływających na adaptację ogniw paliwowych.
- *Ocena potencjału konwersji:* Wskazanie grup maszyn roboczych i jednostek pływających wykazujących największy potencjał do zastąpienia napędów spalinowych technologią wodorową.

Cele te zrealizowano poprzez:

- *Kompleksowe studium literaturowe i legislacyjne:* Szczegółową analizę norm emisji spalin (UE, USA) oraz przepisów bezpieczeństwa dotyczących infrastruktury wodorowej.
- *Systematykę maszyn NRMM:* Klasyfikację maszyn pod kątem funkcji operacyjnych i cykli pracy, co pozwoliło wytypować jednostki kompatybilne z technologią ogniw paliwowych.
- *Badania eksperymentalne w warunkach rzeczywistych:* Przeprowadzenie testów na obiekcie badawczym (jacht motorowy/katamaran) wyposażonym w wielopaliwowy układ napędowy oraz porównanie ich z wynikami dla prototypu wodorowego.
- *Modelowanie matematyczne:* Opracowanie i walidację modelu zużycia energii dla zdefiniowanych cykli operacyjnych (manewry portowe, rejs na wodach otwartych).

Podział na części merytoryczne rozprawy:

- *Część teoretyczno-przeglądowa (Rozdziały 1–3):* Obejmuje charakterystykę sektora maszyn pozadrogowych, analizę właściwości fizykochemicznych wodoru, przegląd technologii ogniw paliwowych oraz szczegółowe omówienie uwarunkowań prawnych i normatywnych.
- *Część metodyczna (Rozdziały 4–6):* Definiuje cel i zakres pracy, opisuje obiekt badań (jednostka pływająca), aparaturę pomiarową, trasy badawcze oraz opracowane algorytmy sterowania układem napędowym.
- *Część badawczo-analityczna (Rozdziały 7–9):* Prezentuje wyniki badań w warunkach rzeczywistych, proces budowy i walidacji modelu zużycia energii, analizę wskaźników emisji oraz symulacje dla różnych scenariuszy eksploatacyjnych.
- *Część podsumowująca (Rozdział 10):* Zawiera syntezę wyników, wnioski końcowe oraz ocenę stopnia realizacji celów pracy.

Podział metodologiczny rozprawy:

- *Metody analityczne:* Analiza porównawcza aktów prawnych i literatury technicznej w celu zidentyfikowania stanu wiedzy i luki badawczej.

- *Metody eksperymentalne (empiryczne)*: Pomiary parametrów pracy układu napędowego w warunkach rzeczywistej eksploatacji, z wykorzystaniem aparatury badawczej zainstalowanej na jednostce pływającej.
- *Metody symulacyjne i modelowanie*: Tworzenie modeli matematycznych odwzorowujących zapotrzebowanie energetyczne jednostki w różnych fazach pracy oraz symulacja scenariuszy operacyjnych (port – akwen ograniczony, zatoka – akwen otwarty, farma wiatrowa – akwen ograniczony).
- *Walidacja*: Weryfikacja poprawności opracowanego modelu poprzez zestawienie wyników obliczeniowych z danymi uzyskanymi w drodze eksperymentu.

Tak dobrana sekwencja badawcza - wynik prac naukowych - pozwoliła na opracowanie kompletnej procedury badawczej dla w kategorii pozadrogowej w tym w warunkach rzeczywistych jako rekomendacji inżynierskiej przy jednoczesnym zdefiniowaniu zarysu dalszych badań. Wartość skonstruowanego rozwiązania podnosi fakt, że Autor nie poprzestał na analizie jakościowej. W ramach oceny ogólnej należy wyróżnić pracę wykonaną w obszarze parametryzacji zjawisk, w tym wyznaczenie rzeczywistych wskaźników emisji (Conformity Factors) dla specyficznych cykli pracy jednostki pływającej. Stanowi to unikalny materiał badawczy, wypełniający lukę w danych dla sektora NRMM. Równie istotnym elementem rozwiązania jest opracowanie i walidacja algorytmu zarządzania energią (EMS), który w warunkach eksperymentalnych potwierdził swoją skuteczność. **Te wymierne rezultaty stanowią o sile aplikacyjnej rozprawy.**

Ocena samodzielności rozwiązania

Oryginalność przedłożonej rozprawy polega na nowatorskim podejściu do problematyki dekarbonizacji sektora maszyn pozadrogowych (NRMM) poprzez adaptację technologii wodorowych w obszarze, który jest znacznie słabiej rozpoznany badawczo niż transport drogowy. **Unikalnym elementem pracy jest wykorzystanie jednostki pływającej jako mobilnego laboratorium do walidacji hybrydowych i wodorowych systemów napędowych, co pozwoliło na uzyskanie oryginalnych danych empirycznych w zmiennych warunkach środowiskowych.** Autor wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny poprzez opracowanie autorskich algorytmów sterowania przepływem energii oraz modeli symulacyjnych, które uwzględniają specyficzne cykle pracy dla jednostek morskich oraz potencjalnie maszyn ciężkich. Wartość poznawczą pracy podnosi również interdyscyplinarne połączenie analizy inżynierskiej z krytyczną oceną luk w regulacjach prawnych UE i USA, co stanowi kompleksową podstawę dla przyszłych wdrożeń przemysłowych.

Opis zawartości rozdziałów i ich wartość naukowa

Rozdział 1: Wprowadzenie Rozdział ten definiuje obszar badawczy, dokonując systematyzacji maszyn kategorii pozadrogowej (NRMM). Wartość naukowa tej części polega na precyzyjnej taksonomii maszyn według ich funkcji operacyjnych, parametrów nośności oraz środowiska pracy, co pozwala na wyodrębnienie grupy urządzeń o największym potencjale do konwersji na napęd wodorowy.

Rozdział 2: Wybrane przepisy dotyczące emisji związków szkodliwych Autor przeprowadza tu dogłębną analizę komparatystyczną norm emisji spalin (Stage/Tier) w Unii Europejskiej, USA oraz innych kluczowych rynkach. Istotą naukową rozdziału jest identyfikacja asymetrii w wymaganiach prawnych między sektorem drogowym a pozadrogowym oraz wskazanie barier legislacyjnych hamujących rozwój technologii wodorowych w tym specyficznym segmencie.

Rozdział 3: Wodór w transporcie Część ta stanowi techniczne kompendium wiedzy na temat właściwości fizykochemicznych wodoru, metod jego pozyskiwania, magazynowania oraz konwersji w ogniach paliwowych. Wartość merytoryczna koncentruje się na ocenie przydatności konkretnych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych (np. zbiorników) w trudnych warunkach eksploatacji morskiej i przemysłowej.

Rozdział 4: Cel i zakres pracy Rozdział typowo metodologiczny, który precyzuje hipotezy badawcze oraz granice analizy. Jego wartością jest jasne zdefiniowanie problemu naukowego, jakim jest weryfikacja efektywności energetycznej i ekologicznej napędu wodorowego w kontrze do konwencjonalnych rozwiązań w maszynach o dużym zapotrzebowaniu na moc.

Rozdział 5: Metodologia badań Autor szczegółowo opisuje warsztat badawczy: obiekt badań (jednostka pływająca), aparaturę pomiarową (PEMS, analizatory) oraz zdefiniowane trasy testowe. Kluczowym wkładem jest tu opracowanie procedury badawczej umożliwiającej wiarygodne pomiary w warunkach rzeczywistej eksploatacji, co jest istotą w badaniach jednostek prototypowych.

Rozdział 6: Opracowanie algorytmu sterowania Rozdział ten prezentuje autorskie koncepcje strategii zarządzania energią w zależności od trybu pracy jednostki (cumowanie, rejs, manewry). Wartość naukowa leży w stworzeniu logiki sterowania, która optymalizuje współpracę ogniw paliwowych z innymi elementami układu napędowego, maksymalizując sprawność i bezpieczeństwo.

Rozdział 7: Badania w warunkach rzeczywistych Część empiryczna pracy, zawierająca wyniki pomiarów zużycia paliwa/energii oraz emisji szkodliwych substancji uzyskane podczas testów terenowych. Dostarcza ona twardych danych eksperymentalnych, które stanowią punkt odniesienia (baseline) dla oceny efektywności proponowanych rozwiązań wodorowych.

Rozdział 8: Wyniki obliczeń na podstawie modelu – walidacja Autor dokonuje tu weryfikacji poprawności opracowanego modelu matematycznego poprzez zestawienie wyników symulacji z danymi empirycznymi. Wartością naukową jest wyznaczenie wskaźników emisji (ang. Conformity Factors) oraz potwierdzenie, że stworzony model wiernie odwzorowuje rzeczywiste procesy fizyczne zachodzące w układzie napędowym.

Rozdział 9: Modelowanie warunków rzeczywistych Rozdział ten rozszerza zakres badań poprzez symulacje komputerowe dla różnych scenariuszy operacyjnych (port, akwen otwarty, farma wiatrowa). Jego wkład polega na predykcji zachowania układu wodorowego w warunkach trudnych do odtworzenia w pojedynczym eksperymencie, co pozwala na ocenę uniwersalności proponowanego rozwiązania.

Rozdział 10: Wnioski i podsumowanie Synteza uzyskanych wyników, zawierająca ocenę techniczną, ekonomiczną i ekologiczną badanego rozwiązania. Wartość naukowa rozdziału objawia się w sformułowaniu końcowych rekomendacji dotyczących kierunków rozwoju napędów wodorowych w maszynach NRMM oraz wskazaniu obszarów wymagających dalszych prac badawczych i legislacyjnych. Wnioski podzielono na grupy (ogólną, szczegółową, metodyczną, utylitarną i prognostyczną) co daje szybki wgląd w wyniki uzyskane na drodze badawczej.

Praca w całości posiada znamiona pracy twórczej o dużej wartości naukowej i jako taka mieści się w kategorii dysertacji doktorskiej.

W opinii recenzenta dysertacja jest pewnego rodzaju rozbudowanym raportem badawczym **co nie zmienia jednak jego rangi twórczej w zakresie nauk technicznych**. Sam podział z jednej strony ułatwia czytanie (jak typowa monografia) z drugiej strony tworzy niepotrzebny nadmiar co prowadzi do rozdrobnienia czy utrudniania opisywanych zjawisk (brzytwa Ockhama). Szczególnie widoczne jest to w nadmiernej „atomizacji” treści, która skutkuje podziałem niespełna stustronicowego opracowania na aż dziesięć rozdziałów głównych. Taka konstrukcja, choć przejrzysta w spisie treści, w lekturze sprawia wrażenie szatkowania wywodu naukowego na autonomiczne, niekiedy zbyt ogólne fragmenty. Przykładem tego jest wyodrębnienie Rozdziału 4 („Cel i zakres pracy”), który zajmuje zaledwie dwie strony. Zgodnie z dobrymi praktykami redakcyjnymi prac dysertacyjnych, zdefiniowanie celu, tezy i zakresu badań stanowi integralną część Wstępu, a nadawanie tym treściom rangi osobnego rozdziału jest zabiegiem sztucznym, potęgującym wrażenie „sprawozdawczości” kosztem płynności narracji naukowej. Podobne zastrzeżenia budzi relacja między Rozdziałami 5, 6 i 7. Rozdzielenie metodologii,

opracowania algorytmu sterowania oraz badań w warunkach rzeczywistych na trzy osobne byty strukturalne wymusza na czytelniku ciągłe łączenie faktów, które naturalnie stanowią jeden ciąg przyczynowo-skutkowy. Algorytm sterowania (Rozdział 6) jest de facto elementem metodyki lub przygotowania do badań, a jego separacja sprawia, w opinii Recenzenta że warstwa analityczna traci na spójności. W efekcie otrzymujemy sekwencję krótkich bloków technicznych, przypominającą dokumentację wdrożeniową projektu inżynierskiego, a nie klasyczną monografię naukową, w której poszczególne etapy powinny płynnie wynikać jedno z drugich. **Trzeba jednak wyraźnie podkreślić, że taka struktura – choć odbiegająca od akademickiego kanonu – wiernie odzwierciedla rzeczywisty proces inżynierski (ang. Design-Build-Test). Dzięki temu praca zyskuje unikalny walor użyteczny, stanowiąc gotowy algorytm postępowania dla zespołów wdrożeniowych, co w przypadku doktoratu technicznego jest istotnym atutem równoważącym niedostatki redakcyjne.**

Pewne zastrzeżenia budzi również proporcja między częścią literaturowo-przeglądową a badawczą. Rozbudowane rozdziały wprowadzające (1-3), choć merytorycznie poprawne i bogate w analizę legislacyjną, zrównują się objętościowo z kluczowymi dla doktoratu rozdziałami analitycznymi i weryfikacyjnymi. Skondensowanie części teoretycznej pozwoliłoby na silniejsze wyeksponowanie autorskiego wkładu badawczego, który w obecnym układzie, poprzez rozbieżność na wiele drobnych podrozdziałów (np. w Rozdziale 8 i 9), ulega pewnemu rozmyciu.

Należy tu dostrzec trud włożony przez autora na całościowym ujęciu tego wieloaspektowego problemu i próbie opisanego całkiem nowego zagadnienia związanego z ilościowym ujęciem systemu zasilania opartego innowacyjnym podejściu inżynierskim.

Pracę jak i rozwiązanie jednak zdecydowanie należy uznać za samodzielne – logika wywodu oraz kolejność szczegółowo zaplanowanego eksperymentu nie budzi wątpliwości.

Uwagi i wątpliwości

Zagadnienia formalne i warsztatowe

Wnikliwa analiza warstwy edytorskiej i warsztatowej przedłożonej rozprawy nasuwa uwagi, które, wpływają na komfort jej odbioru oraz ostateczną ocenę jakości prezentacji wyników naukowych.

- **Przeładowanie aparatu przypisowego:** Liczba przypisów przekraczająca 230 pozycji na niespełna 100 stronach tekstu świadczy o dużej skrupulatności Autora, jednak w wielu miejscach prowadzi do zachwiania płynności narracji. Zauważalna jest tendencja do nadmiernego cytowania aktów prawnych i norm w trybie przypisowym, podczas gdy w pracach technicznych tego typu odwołania powinny być częściej syntetyzowane w tekście głównym lub przenoszone do zbiorczego wykazu literatury. Miejskami przypisy dominują nad treścią merytoryczną strony, co odwraca uwagę od autorskiego wywodu. Niektóre przypisy np. 92, 182 i 244 (oraz inne) prowadzą do wartościowych jednak nie do końca uznanych naukowych źródeł. O ile ich wartość jest potencjalnie duża a uzasadnienie ich użycia wynika z braku innych „twardych źródeł” dotyczących nowych rozwiązań technologicznych, to samo cytowanie niektórych zawartych tam kwestii wymaga dużej ostrożności. Przykładem jest powołanie się autora na źródło 92 (strona www.green-sail.com) w tekście rozprawy na stronie 16 (ostatni akapit na stronie): „*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]*”. Jest to zdanie niepoprawne w założeniu (ergo „jedyną ścieżkę”) natomiast ocena podmiotu zdania (przemysł jachtowy) w „kontekście oczekiwań właścicieli” moim zdaniem nie jest do końca poprawne naukowo. Trzeba jednak podkreślić że Autor przyłożył dużą wagę do badania literatury i w mojej opinii przedstawił w rozprawie znakomitą większość niezbędnych źródeł.

- **Jakość i opis materiału ilustracyjnego:** Choć praca jest bogato ilustrowana, warstwa opisowa rysunków i wykresów pozostawia pewien niedosyt. Podpisy pod rysunkami są często zbyt lakoniczne i pełnią jedynie funkcję identyfikacyjną, nie dostarczając czytelnikowi klucza do interpretacji prezentowanych danych. Brakuje w tekście głównym pogłębionej analizy zamieszczonych wykresów – Autor często ogranicza się do stwierdzenia „wyniki przedstawiono na rysunku X”, zamiast wskazać na konkretne trendy, anomalie czy punkty zwrotne widoczne na grafice. Taka praktyka jest charakterystyczna dla raportów technicznych, natomiast w dysertacji doktorskiej oczekuje się szerszego komentarza autorskiego wyjaśniającego naturę obserwowanych zjawisk. **Analiza samego materiału ilustracyjnego jest pozytywna – autor zawarł niezbędne diagramy, rysunki i wykresy dla postawionych celów.**
- **Stylistyka i warsztat pisarski:** Język pracy jest poprawny i precyzyjny terminologicznie, jednak miejscami zbyt hermetyczny i sprawozdawczy. Nadmierne stosowanie wyliczeń punktowych (bullet points) w rozdziałach analitycznych sprawia, że wywód traci charakter ciągłej argumentacji naukowej na rzecz formy specyfikacji technicznej. W kilku fragmentach zauważalne są również drobne niekonsekwencje w zapisie jednostek fizycznych (np. brak spacji między wartością liczbową a jednostką) oraz literówki w terminologii anglojęzycznej, co sugeruje konieczność ponownej, starannej korekty redakcyjnej w przypadku gdyby praca miała być wydana w formie zwartej.
- **Struktura objaśnień:** Wprowadzenie do pracy skrótów i akronimów (których w tematyce wodorowej i legislacyjnej jest mnóstwo) jest niezbędne, jednak Autor nie zawsze konsekwentnie rozwija je przy pierwszym użyciu. Wymusza to na czytelniku konieczność cofania się do wykazu skrótów, co zaburza percepcję tekstu. Ponadto niektóre są używane zamiennie – nie każdy silnik (typowo jachtowy zwłaszcza) będzie o zapłonie samoczynnym (oznaczone jako ZS) nie sposób się doszukać też niektórych skrótów w spisie (np. generator ON). Sugerowałbym również większą dbałość o jednolitość formatowania opisów osi na wykresach – w obecnej formie różnią się one wielkością czcionki i stylem, co obniża estetykę odbioru części eksperymentalnej.
- **Jednostki SI i nazewnictwo specjalistyczne:** W pracy w wielu miejscach autor podaje wartości długości/dystansu w jednostkach SI i pochodnych [m-km] jednak w kilku opisach pojawią się mile morskie. Przy opisywaniu podróży na morzu zdecydowanie zalecane jest używanie mil morskich co jednak stoi w sprzeczności z praktyką inżynierską (SI). Podobnie z jednostkami prędkości, jednostki morskie opisuje się w węzłach (Mm/h). Pojawiła się w rozprawie również skala Beuforta, która w przypadku żeglugi po wodach portowych (Martwa Wisła) raczej nie jest stosowana (jest to skala opisowa stanu morza) a zabrakło np. opisu fali charakterystycznej na morzu. W kilku miejscach pominięto także kierunku i siłę (prędkość) wiatru. Nazewnictwo specjalistyczne zwłaszcza w ujęciu transportu morskiego także pozostawia w niektórych paragrafach pewien niedosyt. Mieszane są pojęcia jednostka pływająca i pojazd (np. masa, prędkość pojazdu) i o ile prędkość faktycznie możemy zmierzyć o tyle masa nie jest miarodajna – należałoby stosować wyporność, tonaż itp. Inne przykłady to „cykl jezdny”, „ruszanie” i „hamowanie” statki de facto wykonują te operacje jednak ich charakter i przyjęta nazwa w nomenklaturze technicznej jest inna. Inne przykłady błędne terminologicznie to np.: pełne morze, wody osłonięte, żegluga offshore, obszar cumowania, manewry precyzyjne, protokół AIS, mazut, system wsparcia operacyjnego, dziedzina inżynierii okrętowej i inne. **Autor jednak podjął trud doprecyzowania każdej operacji (zwłaszcza z kategorii krytycznych) a z kontekstu można wywnioskować cel i znacznie określonych terminów.**
- **Opisy akwenów:** Autor postarał się opisać maksymalnie szczegółowo wykonane próby jednostką morską. Autor skupił się w niektórych momentach na parametrach całkowicie

nieistotnych z punktu widzenia manewrowania, jednak utrzymując narrację naukową i wyjaśniając swoje motywacje.

Wskazane powyżej nieścisłości terminologiczne są bezpośrednim skutkiem wysoce interdyscyplinarnego charakteru pracy. Autor, wchodząc głęboko w zagadnienia inżynierii i energetyki wodorowej, potraktował środowisko morskie jako poligon badawczy, a nie główny przedmiot analizy w zakresie teorii okrętu. Niedoskonałości te, choć wymagają korekty w publikacjach powiązanych, nie wpływają na poprawność samych obliczeń energetycznych ani na wiarygodność wyników pomiarowych układu napędowego. **Podkreślam iż pomimo powyższych uwag praca nosi wszelkie znamiona oryginalności twórczej.**

Zagadnienia merytoryczne

Mimo wysokiej oceny ogólnej koncepcji pracy, szczegółowa analiza warstwy badawczej i wnioskowania nasuwa pewne pytania natury merytorycznej, które warto poddać dyskusji:

- **Zasadność ekstrapolacji wyników z jednostki pływającej na maszyny lądowe:** Kluczową wątpliwość budzi stopień, w jakim charakterystyka obciążenia układu napędowego katamaranu (opór hydrodynamiczny, relatywnie płynne zmiany zapotrzebowania na moc) jest reprezentatywna dla maszyn roboczych ciężkich (np. koparek, spycharek). Maszyny lądowe NRMM charakteryzują się gwałtownymi, skokowymi zmianami obciążenia (tzw. *transient loads*) wynikającymi z oporu gruntu czy podnoszenia ładunku. Autor zakłada analogię między tymi zastosowaniami, jednak w pracy zabrakło pogłębionej analizy, czy zaproponowany układ ogniów paliwowych i bufor baterijny poradziłyby sobie z taką dynamiką zmian bez uszczerbku dla żywotności ogniwa, co jest wyzwaniem znacznie większym (a w zasadzie o innej charakterystyce) niż napęd jednostki pływającej.
- **Dobór punktu odniesienia (Baseline) dla silnika spalinowego:** W analizie porównawczej emisji i sprawności, pewien niedosyt pozostawia definicja układu referencyjnego. Czy porównania dokonywano względem najnowocześniejszych jednostek diesla spełniających rygorystyczne normy Stage V (wyposażonych w DPF/SCR), czy też starszych konstrukcji? Jeśli punktem odniesienia był silnik starszej generacji, wykazane zyski ekologiczne mogą być w rzeczywistości mniejsze w konfrontacji z nowoczesną technologią konwencjonalną. Brak precyzyjnego zdefiniowania „konkurenta” technologicznego utrudnia obiektywną ocenę przewagi rozwiązania wodorowego.
- **Pominięcie analizy w ujęciu „Well-to-Wake” (LCA):** Autor koncentruje się na emisyjności lokalnej (Tank-to-Wake), wykazując zeroemisyjność układu w miejscu pracy jednostki pływającej. Z punktu widzenia naukowego, w dysertacji o tak szerokim spektrum, zasadne byłoby choćby szacunkowe odniesienie się do śladu węglowego samego paliwa wodorowego. Jeśli wodór użyty do symulacji pochodziłby z reformingu parowego gazu ziemnego (tzw. szary wodór), globalny efekt ekologiczny mógłby być dyskusyjny. Brak tego kontekstu zawęża perspektywę badawczą wyłącznie do aspektu eksploatacyjnego, pomijając kluczowy w dzisiejszej energetyce łańcuch dostaw. Dostrzegam tu jednak fakt iż nie było to bezpośrednim celem rozprawy.
- **Marginalizacja aspektów ekonomicznych (TCO):** Choć praca ma charakter techniczny, wdrożenie technologii wodorowych w sektorze komercyjnym (NRMM) jest ściśle skorelowane z kosztami. Wnioski końcowe pracy brzmią optymistycznie, jednak brakuje w nich krytycznego spojrzenia na Całkowity Koszt Posiadania (TCO – Total Cost of Ownership). Wysoki koszt ogniów, krótka żywotność w trudnych warunkach oraz cena zielonego wodoru to bariery, które w pracy doktorskiej aspirującej do miana aplikacji przemysłowej powinny zostać wyraźniej zaakcentowane jako czynniki limitujące.

- **Zarządzanie energią w warunkach ekstremalnych:** Opracowany algorytm sterowania został zweryfikowany w określonych warunkach testowych. Wątpliwość budzi jednak zachowanie systemu w warunkach skrajnych, typowych dla maszyn *off-road* – np. przy bardzo niskich temperaturach otoczenia (problem zamarzania wody będącej produktem reakcji w ogniwie) lub przy silnym zapyleniu i wibracjach. Praca w niewielkim stopniu odnosi się do odporności (robustness) zaproponowanego rozwiązania na te specyficzne czynniki środowiskowe, które są krytyczne dla niezawodności maszyn roboczych. Dostrzegam tu jednak fakt iż nie było to bezpośrednim celem rozprawy.

Należy wyraźnie zaznaczyć, że powyższe uwagi mają na celu zainicjowanie dyskursu naukowego ukierunkowanego na poszukiwanie obiektywnych wskaźników, a nie na podważanie głównych tez Autora.

Inne uwagi szczegółowe

- **Str. 15-16:** Autor przedstawia dane dotyczące emisji CO₂ z jachtów powyżej 24 m wyposażonych w silniki o zapłonie samoczynnym (niestety nie powołując się na źródła naukowe, np. pozycje bibliograficzne 92, 182, 244). Następnie dokonuje porównania tych emisji do jednostek mniejszych oraz wskazuje na ich dysproporcje względem floty handlowej. Taki tok rozumowania, niepoparty twardymi danymi statystycznymi, jest metodologicznie nieuprawniony, a przyczyny wskazywanych różnic mogą wynikać z zupełnie innych uwarunkowań operacyjnych.
- **Str. 28-29:** W opisie porównawczym zbiornika ciśnieniowego na wodór brakuje jednak wzorów oraz syntetycznego zestawienia danych (np. w tabeli). Autor zestawia gęstość wolumetryczną wodoru z masą zbiornika oraz gęstością energetyczną benzyny.
- **Str. 29 (Rys. 5b):** Autor opisuje ilustrację jako „jednostkę kontenerowego rozwiązania zbiornikowego na wodór”. Przedstawiona jednostka to w rzeczywistości gazowiec LNG (metanowiec) z systemem ładunkowym typu sferycznego (Moss Rosenberg) do przewozu skroplonego gazu ziemnego. Jednostki te mają pojemność rzędu 140–170 tys. m³, podczas gdy największe obecnie projektowane jednostki do transportu wodoru (LH2) osiągają pojemność ok. 40 tys. m³. Zastrzeżenie to świadczy to o niewystarczającej weryfikacji materiału ilustracyjnego w części przeglądowej. **Należy jednak z całą mocą zaznaczyć, że jest to błąd w warstwie teoretyczno-poglądowej, który nie rzutuje na warstwę badawczą a wynika zapewne z dużego podobieństwa tych jednostek. Autor w swoje pracy badał rzeczywisty katamaran i rzeczywiste zbiorniki, a niefortunny dobór zdjęcia ilustracyjnego w rozdziale wstępnym nie podważa autentyczności przeprowadzonych eksperymentów.**
- **Str. 30:** Stwierdzenie „Przyjmuje się w środowisku naukowym [...]” oparte jest na jednym artykule naukowym. Jest to kontrowersyjna teza, gdyż w literaturze przedmiotu oraz w praktyce inżynierskiej wskazuje się, że technologie wodorowe w żegludze posiadają obecnie więcej barier (technicznych, ekonomicznych, bezpieczeństwa itp.) niż bezpośrednich implementacji, i (prawdopodobnie) nie stanowią uniwersalnego rozwiązania wszystkich problemów sektora. **Trzeba zauważyć, iż opisywana technologia wymaga szeregu przełomów technologicznych do pełnej implementacji, a Autor przykłada swoją rękę do tego dzieła.**
- **Str. 30:** Autor powołuje się na tymczasowe rekomendacje IMO dotyczące przewozu wodoru, traktując je jako finalny kodeks. Dokument ten (Interim Recommendations) ma charakter wstępny i pilotażowy, co zostało wyraźnie zaznaczone w jego wstępie. **Błąd ten może wynikać z tłumaczenia sformułowań IMO (Międzynarodowej Organizacji Morskiej), która operuje językiem prawniczym.**

- **Str. 33:** Autor argumentuje stosowanie kompozytowych zbiorników na wodór głównie ich odpornością na korozję w środowisku morskim. Jest to uproszczenie. Jednak kluczowym czynnikiem determinującym użycie kompozytów w tym zastosowaniu jest stosunek wytrzymałości do masy (gęstość grawimetryczna magazynowania) oraz odporność na zjawisko kruchości wodorowej i degradacji wodorowej stali czego nie uwypuklono. Nie zmienia to jednak sensu zapisu.
- **Cel pracy:** W sformułowanym celu pracy wymieniono akumulatory jako „źródło produkcji energii”. Z punktu widzenia elektrotechniki i termodynamiki przyjmuje się raczej iż akumulator jest magazynem energii, a nie jej źródłem wytwórczym. **To jednak moim zdaniem nie zmienia sensu ani zakresu celu pracy.**
- **Str. 44:** Autor definiuje badaną jednostkę jako „elektryczny jacht modułowy”, a w innych miejscach (np. str. 2) jako „jacht motorowy”. Zgodnie z przepisami PRS oraz Dyrektywą RCD (2013/53/UE), jacht to jednostka rekreacyjna. Jednocześnie praca pozycjonuje obiekt w kategorii NRMM (maszyny robocze). To niekonsekwencja terminologiczna – badana jednostka, pełniąc funkcje robocze (workboat), powinna być precyzyjnie sklasyfikowana, aby uniknąć niejasności co do wymogów prawnych. **Należy podkreślić, iż przyczyną niekonsekwencji jest także chaos w przepisach polskiego klasyfikatora PRS (raz opisują jednostki jako „robocze” innym razem wrzucają do kategorii „inne”).**
- **Str. 46:** Autor stawia tezę, że modułowa konstrukcja napędu „znacząco podnosi dzielność jednostki pływającej”. Dzielność morska jest pojęciem znacznie szerszym i nie wynika wyłącznie z redundancji napędu. Również użycie sformułowania o „bezpieczeństwie w aspekcie powrotu do portu” (nawiązujące do konwencyjnego *Safe Return to Port*) w kontekście małej jednostki badawczej jest „niezręczne” terminologicznie. **Jednak autor dość precyzyjnie w następnych akapitach tłumaczy swoją metodykę i stojąca za nią określenia.**
- **Str. 53:** Autor wspomina o „procedurach żeglugowych” różniących się od operacji portowych, nie definiując jednak tego pojęcia. Opisany system zarządzania energią nie wykazuje innowacyjności względem rozwiązań stosowanych na istniejących jednostkach. **Dalej jednak autor wskazuje już poprawny sposób prowadzenia nawigacji na akwenie ograniczonym.**
- **Str. 61 (Tab. 22):** Autor zauważa, że w strefach kontroli emisji (ECA) możliwe jest użycie wyłącznie zasilania akumulatorowego lub wodorowego. W strefach ECA dopuszczalne jest stosowanie paliw konwencjonalnych, pod warunkiem spełnienia limitów zawartości siarki (paliwa nisko-siarkowe, ULSFO/VLSFO) lub np. stosowania systemów oczyszczania spalin (scrubbery). **Błąd najpewniej wynika z tłumaczenia dość skomplikowanego języka IMO (Międzynarodowej Organizacji Morskiej), która operuje językiem prawniczym.**
- **Str. 83 (Tab. 33-34):** Przedstawione kryteria pracy dla operacji serwisowych (np. „teoretyczna liczba turbin”, „odstęp turbin”) są niejasne i sprawiają wrażenie parametrów wirtualnych, nieznajdujących odzwierciedlenia w rzeczywistej eksploatacji farm wiatrowych. Wnioskowanie o wymogach napędowych na podstawie czasu spędzonego przy turbinie, bez uwzględnienia warunków hydrometeorologicznych czy specyfiki operacji (CTV vs SOV), powinno być doprecyzowane.
- **Str. 85:** Postulat używania wyłącznie ogniw paliwowych podczas prac serwisowych przy turbinie pomija kluczowy aspekt techniczny – konieczność pozycjonowania dynamicznego (DP). Utrzymanie pozycji jednostki przy turbinie wymaga dużej mocy i dynamiki zmian obciążenia, co w przypadku ogniw paliwowych (cechujących się dużą bezwładnością) jest wyzwaniem. Argumentacja o „bezpieczeństwie załogi” w tym kontekście jest nie do końca dla mnie jasna z punktu widzenia inżynierii ruchu morskiego.

Pomimo powyższych uwag rozprawa doktorska nosi znamiona bardzo dużej samodzielności naukowej, a wartość przedstawionej tematyki znakomicie przewyższa pewne niedostatki aparatu opisowego. **Brak precyzji opisów zwłaszcza w terminologii morskiej, wynika z interdyscyplinarności tematyki (bardzo pożądaney w rozwoju naukowym) i nie wpływa na charakter poznawczy i inżynierski recenzowanej pracy.**

Podsumowując listę uwag krytycznych, pragnę jednoznacznie stwierdzić, że mają one dwojaki charakter. Po pierwsze – warsztatowy (błędy redakcyjne, terminologia morska, opis rysunków), wynikający z szerokiego spektrum poruszanych zagadnień. Po drugie – dyskusyjny (metodyka ekstrapolacji, dobór punktu odniesienia), co jest naturalną cechą prac o charakterze pionierskim.

W mojej opinii, ciężar gatunkowy zrealizowanych badań eksperymentalnych – w tym unikalna walidacja napędu wodorowego na rzeczywistej jednostce pływającej – zdecydowanie przeważa nad wskazanymi niedoskonałościami. Autor udowodnił, że potrafi rozwiązać złożony problem inżynierski, a zidentyfikowane usterki nie dewaluują głównego osiągnięcia naukowego, jakim jest opracowanie i weryfikacja metody oceny emisji dla napędów nowej generacji.

Podsumowanie recenzji

Podsumowując całą dysertację podkreślam wysoką wartość rozprawy, wymienione w recenzji uwagi i komentarze nie umniejszają oceny ogólnej. Rozprawa cechuje się dużą wartością merytoryczną, jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, a opisane autorskie badania są dorobkiem naukowym Doktoranta. Co ważne, są to badania oparte **o eksperyment rzeczywisty a włożony wysiłek naukowy w modelowanie oraz realizację badań traktuję jako unikalną wartością tej rozprawy.** Należy także zauważyć wagę problemu podjętego w pracy na tle zmieniającego się świata transportu. Na podstawie wykonanych analiz i badań należy stwierdzić, że Doktorant jest bardzo dobrze przygotowany merytorycznie do pracy naukowej, posiada dużą wiedzę oraz znajomość zagadnień z zakresu transportu. **Praca doskonale wpisuje się w dyscyplinę naukową: inżynieria lądowa, geodezja i transport.**

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana praca spełnia merytoryczne a także formalne wymogi stawiane pracom doktorskim i z tego względu wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Aleksa Jagielskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony przedłożonej dysertacji doktorskiej.

Maciej Gućma