



CZASOPISMO TECHNICZNE KTT

KWARTALNIK KRAKOWSKIEGO TOWARZYSTWA TECHNICZNEGO

Nr 197 Rok 144

Kraków 2024 r.

kwiecień-czerwiec

Nr Indeksu 334006

ISSN: 1425-8390



Pracownia Badań Strategicznych Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w partnerstwie z PRO AIR sp. z o.o. (Lider projektu) oraz High Flier sp. z o.o. w latach 2021 - 2024 realizuje projekt nr: POIR.04.01.04-00-0067/20 pt. Eko-efektywny wielopaliwowy układ napędowy z ogniwo wodorowym w jednostce pływającej typu katamaran. W ramach projektu opracowywany jest prototyp katamaranu z wielopaliwowym układem napędowym, wykorzystującym ogniwo wodorowe, generator zasilany olejem napędowym (ON), generator na paliwo gazowe LPG i układ paneli fotowoltaicznych. Wszystkie te elementy połączone są z zespołem baterii, w których magazynowana jest energia wykorzystywana zarówno do celów związanych z napędem jachtu (zasilanie silników elektrycznych), jak i do celów związanych z zapewnieniem funkcjonowania jego wyposażenia. Projekt obejmuje 6 etapów, w których realizowane są badania przemysłowe oraz prace rozwojowe. Badania przemysłowe dotyczą kształtowania koncepcji wielopaliwowego układu napędowego i wymagań jakie wynikają z jego zastosowania dla konstrukcji jachtu, którego koncepcje są również przedmiotem badań przemysłowych. W ramach prac rozwojowych realizowane są następujące zadania:

- projektowanie katamaranu i jego wyposażenia,
- opracowanie systemu zarządzania energią w obszarze wielopaliwowego układu napędowego i w całym katamaranie,
- projektowanie i wykonanie układu generowania i przetwarzania energii wraz z układem napędowym,
- wykonanie prototypu katamaranu i jego weryfikacja w warunkach rzeczywistych.

W wyniku realizacji projektu osiągnięte zostaną dwie innowacje produktowe: hybrydowy szeregowy wielopaliwowy układ napędowy oraz katamaran aluminiowy o konstrukcji przystosowanej do zainstalowania w nim nowego układu napędowego wraz z niezbędnymi dla jego funkcjonowania instalacjami, których pracą steruje adaptacyjny system zarządzania energią. Projekt wpisuje się w nurt poszukiwań nowych rozwiązań technicznych dotyczących rozwoju przyjaznych środowisku środków transportu. Posiada on ogromny potencjał wdrożeniowy na silnie rozwijającym się rynku morskich jednostek pływających.

Badania nad projektem zostały sfinansowane przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju - projekt badawczy w ramach programu Inteligentny Rozwój (umowa nr POIR.01.04.01.00-0067/20).



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego



RECENZOWANE ARTYKUŁY NAUKOWE

dr hab. inż. Anna Lewandowska¹⁾, dr hab. Joanna Kulczycka²⁾, dr inż. Jędrzej Kasprzak³⁾,
mgr Agnieszka Szperling³⁾, mgr inż. Natalia Generowicz – Caba²⁾,

1) Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu, Poznań

2) Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

3) Politechnika Poznańska, Poznań

Efektywność środowiskowa w cyklu życia jednostek pływających, w tym wodorowych – przegląd badań LCA

1. Wprowadzenie

Już od ponad 20 lat w literaturze naukowej [21] wskazywano, iż wodór może oferować znaczny potencjał jako paliwo morskie. Niższa masa paliwa w porównaniu z istniejącymi paliwami węglowodorowymi może zwiększyć ładowność, co z kolei korzystnie wpływa na ekonomikę transportu oceanicznego i zapewnia możliwość konkurencji na nowych rynkach. Potencjał praktycznego wyeliminowania zanieczyszczeń w miejscu użytkowania może okazać się znaczący w czasach, gdy emisje spalin z transportu morskiego stają się przedmiotem globalnego zainteresowania.

Pierwszym na świecie statkiem wyposażonym w układ napędowy z ogniwami paliwowymi, który wszedł do eksploatacji w 2003 r., był norweski statek dostawczy "Viking Lady". Od tego czasu w krajach wiodących w rozwoju statków napędzanych wodorowymi ogniwami paliwowymi, głównie w Europie, Ameryce,

Japonii i Korei Południowej, sukcesywnie wdrażano różne morskie projekty wodorowe [6]. Statki te wykorzystują zintegrowane źródła energii tj. wodorowe ogniwa paliwowe z bateriami litowymi, panelami słonecznymi i nie tylko.

Dobrym przykładem jest norweski prom MF Hydra o długości 82,4 m i szerokości 17,5 m, łączący ogniwo wodorowe, baterie litowo-jonowe i napęd diesla. Prom ten został zwodowany w 2021 r. i był testowany do początku 2023 r. Obecnie jest eksploatowany, a trasa promu przebiega pomiędzy Hjelmeland – Skipavik – Nesvik w Rogaland w Norwegii. Może pomieścić 299 pasażerów, a także 80 samochodów i 10 przyczep towarowych. Został on zaprojektowany tak, aby zużywać trzy tony ciekłego wodoru przez okres trzech tygodni. Jednostka została zbudowana przez norweską stocznię Westcon. Niemiecka firma Linde Engineering dostarczyła systemy wodorowe, natomiast duński Ballard opracował ogniwa paliwowe, które produkują energię elektryczną z wodoru. Westcon w Ølensvåg był odpowiedzialny za wyposażenie i wykończenie statku wraz z integratorem systemów SEAM z Karmøy. Seam dostarczył również automatykę dla systemu wodorowego, a Corvus Energy baterie [12]. Konstrukcja napędzana jest przez dwa silniki Shottela,

dwa generatory o mocy 440 kW i dwa ogniwa paliwowe 200 kW. Prom wyposażono też w zbiornik na paliwo, w którym może przechowywać do 80 m³ skroplonego wodoru. Zdaniem konstruktorów, jego użycie powinno obniżyć roczną emisję dwutlenku węgla nawet o 95% [8]. W budowie w Norwegii są też kolejne jednostki takie jak Ulstein SX190 o długości 99 m zaprojektowany do obsługi instalacji offshorowych, oraz Hydrogen Viking – prom pasażerski o długości 19,4 m (modernizacja statku Predatora), w Wielkiej Brytanii katamaran Searide 66 o długości 31 m, a w Szwecji w budowie jest statek wycieczkowy Gotland Horizon. Natomiast, we Francji eksploatowany jest statek H2R Evolution o długości 48 m, w którym następuje przekształcenie wody morskiej w gaz wodorowy (*hydrogen gas*) [25].

Pomimo, rozwoju technologicznego i działań proekologicznych, jak wykazano w raporcie z 2023 r. w *Review of Maritime Transport* [9] UNCTAD emisje gazów cieplarnianych w transporcie morskim stanowiące 3% globalnej emisji, wzrosły o 20% w ciągu ostatniej dekady. Bez podjęcia działań, emisje mogą osiągnąć 130% poziomu z 2008 r. do 2050 r. Wskazano też, iż paliwa alternatywne są obiecujące, ale ich przyjęcie pozostaje na wczesnym etapie, a 98,8% floty nadal pływa na paliwach kopalnych. Dobrą wiadomością jest to, że 21% zamówionych statków będzie działać na czystszych alternatywach, takich jak skroplony gaz ziemny, metanol i technologie hybrydowe.

W polityce i regulacji UE wraz z wprowadzeniem Europejskiego Zielonego Ładu, ponownie podkreślono potrzebę ograniczenia emisji przez przemysł żegludowy wprowadzając następujące wnioski ustawodawcze:

- wniosek dotyczący włączenia po raz pierwszy emisji pochodzących z żeglugi do unijnego systemu handlu uprawnieniami do emisji. Na posiedzeniu plenarnym Parlamentu zatwierdzono nowe przepisy i akty końcowe (dyrektywa (UE) 2023/959 i rozporządzenie (UE) 2023/957). Zostały one przyjęte w maju 2023 r.;
- wniosek dotyczący zmienionego rozporządzenia w sprawie infrastruktury paliw

alternatywnych (AFIR), które wymaga w szczególności, aby statki miały dostęp do czystej energii elektrycznej w głównych portach. Na sesji plenarnej Parlamentu zatwierdzono nowe przepisy, a 13 września 2023 r. przyjęto akt końcowy (rozporządzenie (UE) 2023/1804);

- wniosek w sprawie stosowania paliw odnawialnych i niskoemisyjnych w transporcie morskim (inicjatywa FuelEU Maritime) i zmieniający dyrektywę 2009/16/WE. Nowe przepisy zatwierdzono na sesji plenarnej Parlamentu w lipcu 2023 r. 13 września 2023 r. przyjęto akt końcowy (rozporządzenie (UE) 2023/1805). Przegląd obejmuje środki służące stopniowemu zmniejszaniu intensywności emisji gazów cieplarnianych z paliw stosowanych przez sektor żeglugi – o 2% do 2025 r. i aż o 80% do 2050 r. [11].

Wraz z rozwojem ustawodawstwa i technologii promujących rozwój przyjaznych dla środowiska rozwiązań oraz zwiększającej się opłacalności również dzięki wsparciu finansowemu dla rozwoju nowych alternatywnych rozwiązań wydaje się, iż zastosowanie wodoru w transporcie morskim ma szansę na dynamiczny rozwój również w Polsce. Niezbędne są jednak dalsze badania, a szczególnie włączenie metodyki oceny cyklu życia do identyfikacji punktów krytycznych (*hot spots*). Środowiska ocena cyklu życia (ang. Life Cycle Assessment, LCA) stanowi technikę zarządzania środowiskowego, która służy do oceny potencjalnego oddziaływania na środowisko w cyklach życiach produktów [4, 7]. Zgodnie z wytycznymi normy ISO 14040 [13], badanie LCA składa się z czterech faz: określenia celu i zakresu, analizy zbioru wejść i wyjść, oceny wpływu cyklu życia oraz interpretacji. W pierwszej fazie określa się najważniejsze założenia dotyczące celu badania, obiektu badania, zainteresowanych stron, funkcji i jednostki funkcjonalnej, granic systemu. W drugiej fazie następuje gromadzenie danych inwentarzowych obejmujących wejścia (zużycie surowców i materiałów itp.) oraz wyjścia (emisje do powietrza, wody, gleby, odpady, ścieki itp.). W trzeciej fazie wyniki inwentarzowe podlegają tzw. charakteryzowaniu w celu ilościowego określenia wpływu na środowisko. Ważnym elementem badań LCA jest interpretacja, która polega na analizowaniu wyników, formułowaniu wniosków i rekomendacji, a także ocenie niepewności wyników. Jedną z technik interpretacyjnych jest identyfikacja znaczących kwestii, która polega na określeniu głównych źródeł oddziaływania na środowisko.

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki przeglądu literatury (artykułów, monografii, raportów, prac dyplomowych) obejmującego przykłady analiz środowiskowej oceny cyklu życia (LCA) dla rekreacyjnych jednostek pływających. Celem przeglądu było uzyskanie odpowiedzi na pytanie: „*jakie środowiskowe punkty krytyczne zidentyfikowali autorzy poszczególnych prac w cyklach życia analizowanych*

jednostek pływających?”. Punktami krytycznymi mogą być nie tylko kategorie wpływu, etapy cyklu życia, ale także poszczególne procesy, materiały czy emisje [28]. Każdy z przykładów zostanie omówiony pod kątem głównych założeń analizy LCA (obiekty badań, granice systemu, jednostka funkcjonalna) oraz uzyskanych wyników.

2. Wpływ na środowisko w cyklu życia rekreacyjnych jednostek pływających – przykłady badań LCA

W niniejszym rozdziale zostaną zaprezentowane wyniki przykładowych badań LCA dla całych cykli życia jednostek pływających. W pierwszej kolejności zostaną omówione analizy dla jednostek z tymi samymi układami napędowymi, ale różniących się materiałami konstrukcyjnymi i/lub technologią wykonania. W dalszej części uwaga zostanie skupiona na badaniach obejmujących jednostki z różnymi układami napędowymi.

2.1. Porównawcze analizy LCA – różnice na etapie produkcji

Cucinotta i in. [2] przeprowadzili porównawcze badanie LCA dla jachtu z kadłubem kompozytowym wykonanym z zastosowaniem dwóch technologii – infuzji próżniowej (ang. *vacuum infusion proces, VIP*) oraz laminowania ręcznego (ang. *hand lay-up*). Autorzy poddali analizie LCA jacht o długości 18,66 m, maksymalnej prędkości 33 węzłów, przewidywanej żywotności 25 lat, z układem napędowym opartym na silnikach spalinowych na olej napędowy. Celem badania było określenie oddziaływania na środowisko w cyklu życia jachtu wykonanego w dwóch różnych technologiach. Granice systemu obejmowały cały cykl życia – od kołyski do grobu. Choć jednostki funkcjonalnej jednoznacznie nie wskazano w artykule, to można założyć, że obejmowała ona transport osób w pełnym okresie eksploatacyjnym. Autorzy przyjęli trzy poziomy intensywności użytkowania (wysoką 500h/rok, średnią 350h/rok, niską 200h/rok). Ocenę wpływu na środowisko wykonano dla 11 kategorii wpływu przy użyciu metody CML 2001 [7]. W zależności od technologii wykonania, jacht różnił się masą oraz nośnością. W przypadku ręcznego laminowania masa kadłuba, pokładu, nadbudówki i odlewów wewnętrznych (ang. *inner molding*) wynosiła 12,627 ton, z czego 54% przypadało na kadłub. W przypadku jachtu wykonanego w technologii inkluzji próżniowej masa ta wyniosła 9,49 ton, co oznacza, że technologia próżniowa pozwoliła na uzyskanie jednostki o niemal ¼ lżejszej. Nośność (DWT) w obu wersjach różniła się o ok. 9% i wynosiła: 34 284 kg (laminowanie ręczne) oraz 31 150 kg (infuzja). Różnice w konstrukcji miały przełożenie na zużycie paliwa, które było mniejsze o ok. 15% w przypadku lżejszego jachtu. Analizę przeprowadzono w trzech scenariuszach o odmiennej intensywności użytkowania. Uzyskane przez Cucinotta i in. wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Za wyjątkiem jednej kategorii wpływu (ubożenie zasobów abiotycznych), we wszystkich pozostałych przypadkach etap użytkowania okazał się najbardziej znaczącym źródłem oddziaływania z udziałem powyżej 97%. Materiały, produkcja i koniec życia posiadały łącznie kilkuprocentowy udział. Jedynie w przypadku ubożenia zasobów abiotycznych udział materiałów i produkcji sięgał 52,8% (laminowanie ręczne) i 60,1% (infuzja próżniowa);
- Wpływ na środowisko jednostki, której kadłub został wykonany w technologii infuzji próżniowej wykazało mniejsze oddziaływanie na środowisko w zakresie wszystkich 11 kategorii wpływu;
- Wykorzystanie infuzji próżniowej i zmniejszenie masy jachtu przyniosło trzy zasadnicze korzyści środowiskowe: mniejsze oddziaływanie związane z łańcuchami dostaw materiałów konstrukcyjnych, mniejsze oddziaływanie związane z łańcuchem dostaw paliwa (*well-to-tank*) oraz zredukowane emisje powstające podczas spalania paliwa (*tank-to-wheel*).

Kolejnym przykładem analizy LCA może być badanie przeprowadzone przez Olsson i Glaunsinger [19] dla trzech rodzajów rekreacyjnych jednostek pływających: Candela C-8 z napędem elektrycznym oraz dwóch łodzi z napędem spalinowym. Candela miała kadłub wykonany z CFRP (kompozytu polimerowego wzmocnionego włóknem węglowym), jedna z łodzi z napędem spalinowym z GFRP (kompozytu polimerowego wzmocnionego włóknem szklanym), a druga z aluminium. Analizie poddano pełen cykl życia jednostek. Przyjęto jednakową żywotność dla wszystkich jednostek na poziomie 30 lat. Jednostkę funkcjonalną zdefiniowano jako *korzystanie z 8-osobowej łodzi rekreacyjnej przez 50 godzin rocznie w okresie 30 lat*, ze średnią prędkością rejsową około 22 węzłów. Ocenę wpływu wykonano w zakresie zmiany klimatu, wyczerpywania zasobów mineralnych oraz skumulowanego zapotrzebowania na energię. W analizie [19] Autorzy uzyskali następujący wyniki:

- W perspektywie całego cyklu życia, w zakresie zmian klimatu najlepiej wypadła jednostka elektryczna Candela, której ślad węglowy był ponad 12-krotnie niższy od śladu węglowego jednostek spalinowych. I choć z punktu widzenia etapu produkcji (materiały i wytwarzanie) Candela wypadła najgorzej (ślad węglowy produkcji Candeli niemal o 40% wyższy w porównaniu do produkcji jednostki aluminiowej oraz ponad 60% wyższy od produkcji jednostki z GFRP), to w etapie użytkowania Candela uzyskała 135-krotnie niższy wynik wskaźnika od jednostek spalinowych. To zadecydowało, że w perspektywie całego cyklu życia elektryczna Candela wypadła najlepiej. Kluczową kwestią z punktu widzenia zmian klimatu okazał się etap użytkowania – system

napędowy

i powiązany z nim cykl życia paliwa;

- W zakresie skumulowanego zapotrzebowania na energię uzyskano podobne wyniki do tych dla zmian klimatu;
- Z perspektywy wskaźnika ubożenia zasobów mineralnych Candela wypadła najgorzej, co było bezpośrednio związane z materiałami konstrukcyjnymi i procesem produkcji. Najlepiej wypadła jednostka z GFRP. Z punktu widzenia ubożenia zasobów naturalnych, etap użytkowania odgrywa mniejszą rolę;
- Mimo, że proces produkcji łodzi Candela wiąże się z największym oddziaływaniem na środowisko spośród trzech analizowanych jednostek (najwyższe wyniki wskaźnika dla produkcji Candeli we wszystkich wspomnianych kategoriach wpływu), to z punktu widzenia emisji gazów cieplarnianych i zapotrzebowania na energię produkcja odgrywa wielokrotnie mniejszą rolę od etapu użytkowania. Z tego powodu skumulowane wskaźniki dla całego cyklu życia dla elektrycznej Candeli są dużo niższe od wskaźników dla jednostek spalinowych;

W badaniu LCA przeprowadzonym przez Cozijnsen [1] porównano oddziaływanie na środowisko jachtu z kadłubem stalowym i aluminiowym, z założeniem żywotności na poziomie 50 lat. Z punktu widzenia samej struktury materiałowej, jacht z kadłubem aluminiowym wykazał niższe o 18% oddziaływanie na środowisko w porównaniu do stalowego. Natomiast w perspektywie cyklu życia różnica ta się „niwelowała” i finalnie całkowite oddziaływanie na środowisko dla jachtu aluminiowego było o 1,8÷2,3% niższe (w zależności od scenariusza dotyczącego zawartości złota).

2.2. Porównawcze analizy LCA – różnice na etapie użytkowania

W badaniach LCA przeprowadzonych przez Munkvold [18] Autorka porównała oddziaływanie na środowisko w cyklu życia dwóch szybkich (*high speed*) pasażerskich (275 osób) katamaranów. Oba o długości 40,8 m, prędkości 34 węzłów, kadłubach z kompozytów (jeden z włókna szklanego z polistyrenem, drugi z włóknem węglowym i epoksydowymi żywicami winylowo-estrowymi z bisfenolem A), żywotności 15 lat oraz intensywności użytkowania na poziomie 1 632 rejsów rocznie (1 rejs na dystansie 95 mil morskich). Porównywane katamarany miały różne napędy. Jeden z nich wykorzystywał konwencjonalny system spalinowy na olej napędowy, a drugi miał system oparty na wodorowym ogniwie paliwowym. Analizę przeprowadzono w zakresie całego cyklu życia. Jednostka funkcjonalna została zdefiniowana jako *realizacja jednego rejsu pomiędzy Trondheim a Kristiansund*. Ocenę wpływu wykonano przy użyciu

metody ReCiPe midpoint. Rezultaty pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Porównanie oddziaływania na środowisko obu jednostek w perspektywie 18 kategorii wpływu wykazało, że katamaran z ogniwem paliwowym miał niższe wskaźniki środowiskowe (mniejsze oddziaływanie) w przypadku 11 na 18 kategorii;
- W przypadku katamaranu spalinowego etap użytkowania był znaczącym etapem cyklu życia w odniesieniu do: zmiana klimatu GWP (*Global Warming Potential*), ekotoksyczność wód morskich MEP (*Marine Ecotoxicity Potential*), PMFP (*Particulate Matter Formation Potential*), ubożenie warstwy ozonowej POFP (*Photochemical Ozone Formation Potential*) i TAP (*Terrestrial Acidification Potential*). Pozostałe kategorie wpływu były zdominowane przez produkcję paliwa;
- W przypadku katamaranu z ogniwem wodorowym we wszystkich kategoriach wpływu głównym źródłem oddziaływania była produkcja paliwa – wodoru;
- W zakresie zmiany klimatu oddziaływanie na środowisko w cyklu życia katamaranu z napędem spalinowym było ponad 8-krotnie większe od oddziaływania katamaranu z ogniwem wodorowym (5 396 kg CO₂ eq vs. 657 kg CO₂ eq);
- Głównym źródłem emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia katamaranu spalinowego był etap użytkowania i spalania oleju napędowego. Emisje z tego procesu odpowiedzialne były za 84% śladu węglowego w całym cyklu życia. W przypadku katamaranu z napędem wodorowym, emisje na etapie użytkowania są zerowe;
- Produkcja paliwa w przypadku katamaranu spalinowego wiązała się z oddziaływaniem na poziomie 839 kg CO₂ eq, natomiast produkcja wodoru uzyskała wskaźnik 607 kg CO₂ eq. Z perspektywy cyklu życia stanowiło to 15,5% dla spalinowego oraz aż 92% dla wodorowego;
- Produkcja jednostki (wraz z infrastrukturą paliwową) dla katamaranu spalinowego miała udział poniżej 1% (30 kg CO₂ eq), a w przypadku jednostki z wodorem 7,6% (50 kg CO₂ eq).

Cucinotta i in. [3] przeprowadzili analizę LCA dla dwóch promów wycieczkowych o kadłubach stalowych różniących się paliwem używanym w systemie napędowym – olej napędowy oraz skroplony gaz ziemny (LNG). Parametry jednostek były następujące: długość – 168,69 m, maksymalna prędkość – 21,5 węzłów, prędkość rejsowa – 20,5 węzłów, przepustowość – 1500 pasażerów i 600 pojazdów, nośność (DWT) – 3 551 ton, żywotność 25 lat. Jednostką funkcjonalną zdefiniowano jako *1 prom w całym okresie żywotności*. Do oceny wpływu użyto

metody ILCD 2018. Wyniki uzyskane przez Cucinotta i in. można sformułować następująco:

- Etap użytkowania ma krytyczne znaczenie z perspektywy cyklu życia (pełnej żywotności), etap produkcji odgrywa drugorzędną rolę;
- Spośród 17 analizowanych kategorii wpływu, prom wykorzystujący olej napędowy wypadł gorzej w 12 przypadkach (zmiana klimatu – biogeniczne, zmiana klimatu – zajmowanie terenu, zakwaszenie wód i gleb, eutrofizacja wód słodkich, eutrofizacja morska, eutrofizacja gleb, promieniowania jonizujące, ubożenie warstwy ozonowej, formowanie ozonu fotochemicznego, zaburzenia oddechowe, ubożenie paliwa kopalnych, użytkowanie terenu). Tylko w zakresie 5 kategorii wpływu stosowanie oleju napędowego zamiast LNG okazało się lepsze (zmiana klimatu – kopalne, zmiana klimatu – całkowity, ekotoksyczność wód słodkich, efekty nowotworowe, efekty nienowotworowe);
- Silniki LNG są ważną alternatywą dla oleju napędowego pod względem redukcji emisji i wpływu na środowisko, zwłaszcza w odniesieniu do wpływu na zdrowie ludzkie i wyczerpywanie się zasobów kopalnych;
- Choć ogólnie LNG wypadło lepiej, to jego stosowanie wykazuje także wpływ na środowisko – przede wszystkim ze względu na wyciek metanu, który ma istotny wpływ na zmiany klimatyczne, oraz na energię niezbędną do skraplania.

Innym przykładem może być analiza wykonana w ramach projektu “BoatCycle” [10], której celem było określenie oddziaływania na środowisko różnych rekreacyjnych jednostek pływających – żaglówki (długość 12 m, żywotność 25 lat), jachtu (długość 5,57 m, żywotność 25 lat) i sztywnej łodzi pontonowej (długość 5m, żywotność 15 lat). Granice systemu obejmowały cały cykl życia. Jednostka funkcjonalna została zdefiniowana jako *jedna godzina żeglowania w rekreacyjnej jednostce w celach rekreacyjnych*. Liczbę godzin spędzonych na żeglowaniu przyjęto w tym badaniu jako: dla żaglówki – 603 rocznie, 15083 w okresie żywotności, dla jachtu – 248 rocznie, 6208 w okresie żywotności oraz dla łodzi pontonowej – 201 rocznie, 2350 w okresie żywotności. W badaniu tym uzyskano następujące wyniki [10]:

- W kontekście zmian klimatu, w przypadku każdej analizowanej jednostki etap użytkowania był odpowiedzialny za większość emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia. Etap użytkowania został podzielony na dwa obszary: żeglowanie (*sailing*) i utrzymanie (*maintenance*). W przypadku jachtu emisje powiązane z oboma tymi obszarami stanowiły 93% całego śladu węglowego (87% żeglowanie, 6% utrzymanie). Dla żaglówki całe użytkowanie wykazywało

udział na poziomie 64%, a łodzi pontonowej 82%;

- W przypadku jachtu, łańcuchy dostaw materiałów (komponentów) konstrukcyjnych oraz wytwarzanie jachtu odpowiedzialne były za ok 5,4% całego śladu węglowego. W przypadku żagłówki udział ten wynosił ok. 31%, a łodzi pontonowej ok. 14%.

W publikacji Wang i in. [22] dokonano przeglądu badań wykonanych metodą LCA dla jednostek pływających zasilanych wodorem wykazując możliwość znaczącego ograniczenia wpływu na środowisko. Dotyczyło to w szczególności publikacji wydanych w latach 2016-2023 tj.:

- Trillos, Wilken [20] przeprowadzili LCA dla promu zasilanego zielonym wodorem (tj. H₂ produkowanym przy użyciu energii odnawialnej) w porównaniu z konwencjonalnym promem z silnikiem diesla, co wykazało do 89% redukcję emisji gazów cieplarnianych w 30-letnim okresie eksploatacji.
- Ling-Chin i Roskilly [16] przeprowadzili badanie LCA w celu zweryfikowania technologii modernizacji silników w porównaniu z konwencjonalnym systemem zasilania i wykazali, że zużyto mniej paliwa i uwolniono mniej emisji.
- Gilbert, Walsh [5] przeprowadzili LCA dla emisji do powietrza alternatywnych paliw żeglugowych, a zielony wodór był jednym z najbardziej obiecujących rozwiązań pod względem redukcji emisji dwutlenku węgla.
- Ling-Chin i Roskilly [17] przeprowadzili LCA w celu oceny wpływu nowego systemu hybrydowego zaprojektowanego dla statków towarowych typu roll-on/roll-off na środowisko, zdrowie ludzi i zasoby naturalne.
- Kanchiralla, Brynolf [15] przeprowadzili LCA dla potencjalnych rozwiązań dekarbonizacji, takich jak wodór elektrolityczny, elektroamoniak, elektrometanol i energia elektryczna, w różnych układach napędowych, takich jak silniki, ogniwa paliwowe i technologie wychwytywania dwutlenku węgla, pod względem wpływu na środowisko i kosztów. Jego badanie zawierało szczegółową ocenę różnych ścieżek dekarbonizacji z perspektywy cyklu życia, a największa część kosztów była związana z paliwem, z wyjątkiem przypadku akumulatorów elektrycznych.
- Wang i in. [23] opracowali kompleksowe ramy oceny cyklu życia dla statków napędzanych wodorem. Oceniany typ statku był małym statkiem pasażerskim i towarowym eksploatowanym i obsługiwany na morzach wokół Chin.

- Jang i in. [14] zastosowali parametryczną ocenę cyklu życia (PT-LCA) dla tysięcy statków wykorzystujących wodorowe ogniwa paliwowe. Zależności między emisjami a charakterystyką statku zostały przedstawione wraz z korzyściami/szkodliwościami wodoru w cyklu życia i zaleceniami dotyczącymi właściwego wykorzystania wodoru jako paliwa morskiego.
- Wang i in. [24] ocenili wpływ na środowisko różnych alternatywnych paliw niskoemisyjnych dla super jachtu przy użyciu LCA. W badaniu przeanalizowano morski olej napędowy (MGO), skroplony gaz ziemny (LNG), metanol, biodiesel i wodór oraz zalecono wodór z produkcji odnawialnej jako rozwiązanie dekarbonizacyjne dla tego konkretnego typu statku.

3. Wnioski końcowe

Pomimo dynamicznie zwiększającej się liczby publikacji dotyczących oceny cyklu życia LCA w transporcie morskim, w tym dla jednostek o napędzie wodorowym, brak jest wciąż dobrych praktyk, publikacji i rozwiązań w Polsce. Z prezentowanego przeglądu literatury wynika, iż stosowanie wodoru pozwala na istotną redukcję emisji gazów cieplarnianych na etapie użytkowania, w porównaniu do jednostek z napędem spalinowym. Przy braku emisji bezpośrednich ze spalania paliwa podczas eksploatacji, większego znaczenia nabierają inne elementy w cyklu życia. Głównymi źródłami oddziaływania stają się: łańcuch dostaw wodoru (well-to-tank) oraz materiały konstrukcyjne i produkcji łodzi. Zatem w przypadku stosowania wodoru, kluczową kwestią jest pochodzenie tego paliwa i proces jego produkcji.

Zastosowanie LCA pozwala również na skwantyfikowanie takiego wpływu, a także wspiera proces ekoprojektowania w tym zakresie, szczególnie w doborze materiałów. Dodatkową zaletą może być zastosowanie wyników LCA do procesu certyfikacji, co potwierdza:

- wypracowywany w Europie od 2016 r. z inicjatywy Komisji Europejskiej i finansowany przez Clean Hydrogen Partnership certyfikat CertifHy™ wspierający rozwój i stosowanie zrównoważonego wodoru poprzez umożliwienie śledzenia pochodzenia wodoru i jego właściwości środowiskowych.
- system ustanowiony w China Hydrogen Alliance, który opracował normy oraz trzy etykiety i opracowując kryteria ilościowe i mechanizm oceny dla niskoemisyjnego wodoru, czystego wodoru i wodoru odnawialnego. Zgodnie z normą, pod względem jednostkowej emisji dwutlenku węgla, poziom progowy dla wodoru niskoemisyjnego wynosi 14,51 kgCO₂e/kgH₂, a dla czystego wodoru

i wodoru odnawialnego wynosi 4,9 kgCO₂e/kgH₂. Ponadto wodór odnawialny musi być produkowany z odnawialnych źródeł energii.

W Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 zapisano, iż jednostki transportu morskiego charakteryzują wysokie wymagania w zakresie zużycia paliwa i ograniczone możliwości redukcji emisji CO₂. Zastosowanie technologii opartych na wodorze i amoniaku może przyczynić się do osiągnięcia celów środowiskowych. Jednostki pływające napędzane wodorem mogą stanowić zaplecze do obsługi planowanych polskich farm wiatrowych na Morzu Bałtyckim oraz morskiego transportu przybrzeżnego. Obecnie wykorzystanie wodoru w obszarze żeglugi jest ograniczone do małych projektów demonstracyjnych, lecz podążając w kierunku idei green port, zarządy niektórych portów aktywnie angażują się w tworzenie infrastruktury umożliwiającej świadczenie usług. W ten trend dobrze wpisują się inicjatywy mające na celu upowszechnienie opartych na wodorze układów napędowych dla jednostek pływających. Przykładem może być projekt „Eko-efektywny wielopaliwowy układ napędowy z ogniwem wodorowym w jednostce pływającej typu katamaran” realizowany przez Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, PRO AIR oraz High Flier sp. z o.o. (POIR.04.01.04-00-0067/20).

Finansowanie

Badania zostały sfinansowane przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju - projekt badawczy w ramach programu Inteligentny Rozwój (umowa nr POIR.01.04.01.00-0067).



Literatura

1. Cozijnsen E.J.: The footprint of yacht production. Defining a framework for the Yacht Environmental Transparency Index. Master Thesis, Technische Universiteit Delft, 2019.
2. Cucinotta F., Guglielmino E., Sfravara F.: Life cycle assessment in yacht industry: A case study of comparison between hand lay-up and vacuum infusion Journal of Cleaner Production, 2016; pp.142 (4):3822-383.
3. Cucinotta F., Raffaele M., Salmeri F., Sfravara F.: A comparative Life Cycle Assessment of two sister cruise ferries with Diesel and Liquefied Natural Gas machinery systems. Applied Ocean Research, 2021; pp. 112, 102705.
4. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. ILCD International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook –

General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance, 1st ed.; Publisher: Office of the European Union, Luxembourg, 2010; pp. 1-417. Available online: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>.

5. Gilbert P., Walsh C., Traut M., Kesieme U., Pazouki K., Murphy A.: Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. J. Clean. Prod. 2018; pp. 172, 855–866.
6. Gomez Trillos J.C., Wilken D., Brand U., Vogt T.: HySeas III: The World's First Sea-Going Hydrogen-Powered Ferry—A Look at its Technical Aspects, Market Perspectives and Environmental Impacts. In Nutzung Regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik 2019, ELMAR/26. REGWA Symposium 2019, Stralsund, Germany, 6–8 November 2019; HOST—Hochschule Stralsund: Stralsund, Germany, 2019; pp. 57–80.
7. Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., Koning A., de Oers L., van Wegener Sleswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., Bruijn H., de Duin R., van Huijbregts M.A.J.: Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. III: Scientific background, 1st ed.; Publisher: Kluwer Academic Publishers, Dordrech, The Netherlands, 2002; pp. 1-314.
8. <https://h2poland.com.pl/pl/aktualnosci/mf-hydra-pierwszy-wodorowy-prom-juz-plywa/>.
9. <https://unctad.org/topic/transport-and-trade-logistics/review-of-maritime-transport>.
10. <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE08-ENV-E-000158/management-recycling-and-recovery-of-wastes-of-recreational-boat-scrapping>.
11. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pl/sheet/124/transport-morski-podejscie-strategiczne>.
12. <https://www.gospodarkamorska.pl/70142>.
13. ISO 14040. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework; Publisher: The International Organisation for Standardization, Brussels, Belgium, 2006.
14. Jang H., Jeong B., Zhou P., Ha S., Park C., Nam D., Rashedi A.: Parametric trend life cycle assessment for hydrogen fuel cell towards cleaner shipping. J. Clean. Prod. 2022; pp. 372, 133777.
15. Kanchiralla F.M., Brynolf S. Malmgren E., Hansson J., Grahn M.: Life-Cycle Assessment and Costing of Fuels and Propulsion Systems in Future Fossil-Free Shipping. Environ. Sci. Technol. 2022; pp. 56, 12517–12531.
16. Ling-Chin J., Roskilly A.P.: A comparative life cycle assessment of marine power

- systems. *Energy Convers. Manag.* 2016; pp. 127, 477–493.
17. Ling-Chin J., Roskilly A.P.: Investigating the implications of a new-build hybrid power system for Roll-on/Roll-off cargo ships from a sustainability perspective—A life cycle assessment case study. *Appl. Energy* 2016; pp. 181, 416–434.
 18. Munkvold, M.K.S.: Comparative Life Cycle Assessment of a hydrogen fuel cell and dieselpowered high-speed passenger catamaran. Master Thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), 2020.
 19. Olsson D., Glaunsinger F.: Comparative Life Cycle Assessment of Electric Hydrofoil Boats and Fossil Driven Alternatives. Degree Project in Industrial Ecology, KTH Royal Institute of Technology. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1681728/FULLTEXT01.pdf>.
 20. Trillos J.C.G., Wilken D., Brand U., Vogt T.: Life cycle assessment of a hydrogen and fuel cell ropax ferry prototype. In *Progress in Life Cycle Assessment 2019*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; pp. 5–23.
 21. Veldhuis I.J.S., Richardson R.N., Stone H.B.J.: Hydrogen fuel in a marine environment, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 32, Issue 13, 2007; pp. 2553–2566.
 22. Wang H., Aung M.Z., Xu X., Boulougouri E.: Life Cycle Analysis of Hydrogen Powered Marine Vessels—Case Ship Comparison Study with Conventional Power System, *Sustainability* 2023, 15 (17), 12946; <https://doi.org/10.3390/su151712946>.
 23. Wang Y., Maidment H., Boccolini V., Wright L.: Life cycle assessment of alternative marine fuels for super yacht. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2022; pp. 55, 102525.
 24. Wang Z., Zhao F., Dong B., Wang D., Ji Y., Cai W., Han F.: Life cycle framework construction and quantitative assessment for the hydrogen fuelled ships: A case study. *Ocean Eng.* 2023; pp. 281, 114740.
 25. Wang, Z., Li, M., Zhao, F., Ji, Y., Han, F.: Status and prospects in technical standards of hydrogen-powered ships for advancing maritime zero-carbon transformation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 62, 925–946.
 26. ZALECENIE KOMISJI (UE) 2021/2279 z dnia 15 grudnia 2021 r. w sprawie stosowania metod oznaczania śladu środowiskowego do pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji oraz informowania o niej <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32021H279>.

Streszczenie

Artykuł wpisuje się w obszar zarządzania cyklem życia (ang. Life Cycle Management) i prezentuje przykłady stosowania techniki zarządzania środowiskowego – LCA (ang. Life Cycle Assessment). Problem oddziaływań środowiskowych związanych z realizacją procesów transportowych w środowisku wodnym – zwłaszcza morskim – jest od wielu lat szeroko dyskutowany. Jakkolwiek transport morski odpowiada za ponad 13% wszystkich emisji gazów cieplarnianych pochodzących z sektora transportu w UE, ten rodzaj transportu wypada zdecydowanie najkorzystniej w porównaniu z innymi (np. transportem lotniczym czy drogowym).

W artykule skupiono się na krytycznym przeglądzie źródeł traktujących o wpływie na środowisko cykli życia jednostek pływających, w tym również realizowanych przez nie procesów transportowych. Przegląd obejmował rozmaite jednostki pływające, różniące się (1) wielkością – od prawie 170 m długości w przypadku promów wycieczkowych do małych jednostek rekreacyjnych o długości kilku metrów, (2) konstrukcją – jednostki jednokadłubowe i katamarany, (3) użytymi materiałami konstrukcji kadłubów – stal, aluminium, kompozyty GFRP, CFRP, oraz (4) systemami zasilania – ON, LNG, wodorowe i elektryczne. W każdym przypadku zidentyfikowano raportowane przez autorów publikacji źródłowych „punkty krytyczne” charakterystyczne dla prowadzonych analiz.

Z przeglądu wynika, iż większość autorów zgodnie diagnozuje etap eksploatacji jako silnie dominujący ze względu na poziom obciążeń środowiskowych. W tym obszarze obiecującą alternatywą wydaje się wykorzystanie wodoru – zwłaszcza zielonego – jako paliwa w generatorach spalinowych oraz surowca do produkcji energii elektrycznej. W zakresie produkcji jednostek pływających wyniki badań wykazują korzyści środowiskowe związane ze stosowaniem materiałów metalowych (stal, aluminium) w porównaniu z kompozytami tworzywowymi, zwłaszcza wykorzystującymi włókna węglowe. Te aspekty stają się szczególnie istotne w przypadku stosowania wodoru, gdyż bezpośrednie oddziaływania etapu użytkowania są w tym przypadku niższe, co uwydatnia rolę spektrum oddziaływań produkcyjnych.

Słowa kluczowe: zarządzanie cyklem życia, jednostka pływająca, oddziaływania środowiskowe, LCA, wodór

Abstract

Environmental efficiency in the life cycle of vessels, including hydrogen-powered ones – a review of LCA studies
The paper is in the field of life cycle management and examples of using the environmental management technique – life cycle assessment (LCA) have been presented. The problem of environmental impacts related to the implementation of water – especially sea – transport processes has been widely discussed for many years. Although maritime transport is responsible for over 13% of all greenhouse gases emissions from the transport sector in the EU, this mode of transport is definitely the most environmentally friendly compared to others (e.g. air or road).

The paper focuses on a critical review of publications describing the environmental impacts of the life cycles of vessels, including the transport processes implemented. The review refers to various vessels, differing in (1) size – from almost 170 m of length in the case of cruise ferries to small recreational boats with a length of several meters, (2) construction – single-hull vessels and catamarans, (3) hull construction materials used – steel, aluminum, GFRP, CFRP and other composites, and (4) power systems - diesel, LNG, hydrogen and electric. In case of each analysis, the hotspots reported by the authors of the source publications are identified and described.

The review shows that most authors unanimously diagnose the use phase stage as being strongly dominant in relation to the level of environmental burdens. In this area, the use of hydrogen (especially “green” hydrogen), equally as a fuel in powertrains and a raw material for the production of electricity in generators, seems to be an environmentally promising alternative. In the field of watercraft production, the results of all research show environmental benefits related to the use of metal materials (steel, aluminum) compared to plastic composites, especially those using carbon fibers. These aspects become particularly important when using hydrogen, because the direct impacts of the use phase are lower in this case, which highlights the role of the spectrum of production-related loads.

Keywords Vessel, life cycle management, environmental impacts, LCA, hydrogen.

dr hab. inż. Andrzej Ziółkowski¹⁾ prof. dr hab. inż. Paweł Fuc¹⁾, dr hab. inż. Łukasz Rymaniak, prof. PP¹⁾, dr inż. Michał Dobrzyński¹⁾, dr inż. Maciej Siedlecki¹⁾, mgr inż. Aleks Jagielski¹⁾

¹⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Napędów, ul. Piotrowo 3, 60-695 Poznań

Wodorowe układy napędowe stosowane w jednostkach pływających

1. Wprowadzenie

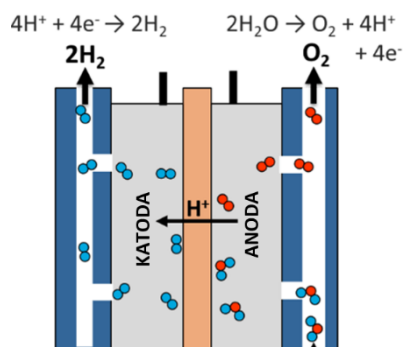
Znaczący wzrost rozwoju gospodarczego i liczby ludności na całym świecie jest przyczyną zwiększonego zapotrzebowania na energię. Wytwarzanie energii elektrycznej stanowi istotny aspekt w rozwoju przemysłowym każdego kraju. Paliwa kopalne pokrywają znaczną część tego rosnącego zapotrzebowania na energię, lecz posiadają ograniczenia, które dotyczą wielkości zasobów. Jedną z wad stosowania paliw kopalnych jest emisja CO₂ oraz innych związków szkodliwych i toksycznych, które wpływają między innymi na globalne ocieplenie [1]. Źródła odnawialne są bardziej korzystne od konwencjonalnych zasobów ze względu na coraz bardziej restrykcyjną politykę dotyczącą ochrony środowiska. Rosnąca emisja gazów cieplarnianych (GHG), problemy środowiskowe i globalny wzrost temperatury stanowią o konieczności globalnego przejścia z konwencjonalnych na odnawialne źródła energii. Energia odnawialna, a mianowicie: energia słoneczna, wiatrowa, wodna, geotermalna, oceaniczna termiczna konwersja energii (OTEC) i źródła biomasy mają największe szanse na zastąpienie paliw kopalnych [2]. Ze względu na nieciągłość niektórych korzystnych odnawialnych źródeł energii, takich jak słońce i wiatr, wodór można w pełni wykorzystać jako alternatywne źródło energii i może on być stosowany także jako nośnik energii i magazyn energii. Wodór może również odegrać istotną rolę w dekarbonizacji dominujących sektorów w celu osiągnięcia zerowej emisji CO₂ do 2050 r. [3]. Paliwa kopalne stanowią 81,2% w globalnej podaży energii, a następnie 13,8% udziału mają odnawialne źródła energii (9,3% z biopaliw, 2,0% z wiatrowych/solarnych itp. oraz 2,5% wodnych) oraz 4,9% z energii jądrowej [4]. Wodór zyskuje coraz większe uznanie na świecie jako rozwiązanie energetyczne i potencjalne paliwo, między innymi ze względu na niską emisję zanieczyszczeń bądź emisję zerową w przypadku jego wykorzystania do zasilania ogniw paliwowych. Ponadto istniejąca infrastruktura transportowa, która jest używana do innych paliw chemicznych może być również wykorzystana do magazynowania i transportu wodoru. Do produkcji czystego wodoru wykorzystywana jest energia jądrowa, gaz ziemny, zgazowanie węgla oraz zasoby energii odnawialnej. Wyróżnić należy: energię słoneczną, wiatrową, geotermalną, wodną oraz biomasę. Na całym świecie pojawia się coraz więcej projektów, w ramach

których wykorzystywany jest wodór. Na przykład, konsorcjum OYSTER otrzymało dofinansowanie w wysokości 5 mln euro, aby opracować technologię pozwalającą na produkcję wodoru na morzu [5]. Nieregularny charakter odnawialnych źródeł energii - słonecznej i wiatrowej, zwiększa zapotrzebowanie na magazyny do przechowywania energii, a wodór może być wykorzystywany do wielu celów takich jak paliwo czy nośnik energii. Udział pojazdów napędzanych wodorowymi ogniwami paliwowymi FCHEV (*Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle*) będzie wzrastał. Uwarunkowane jest to coraz bardziej restrykcyjnymi normami dotyczącymi emisji zanieczyszczeń. Pomimo zalet w zakresie efektywności, pojawiają się problemy dotyczące dostępnych technik magazynowania wodoru [6]. Technologie magazynowania wymagają ulepszeń w zakresie chemii akumulatorów, gęstości mocy elektrycznej, żywotności, bezpieczeństwa i kosztów akumulatorów. Szybkie upowszechnienie ogniw paliwowych w pojazdach FCHEV zależy od znacznej poprawy parametrów akumulatorów i obniżenia kosztów produkcji.

2. Metody otrzymywania oraz magazynowania wodoru

Obecnie 96% wodoru wytwarza się bezpośrednio z paliw kopalnych – głównie gazu ziemnego, następnie węgla oraz ropy naftowej. W przeważającej mierze wykorzystuje się proces reformingu parowego, w którym jednym z produktów jest dwutlenek węgla. Na świecie produkuje się rocznie około 70 milionów ton wodoru, głównie do produkcji nawozu amoniakalnego i chemikaliów, takich jak metanol oraz do usuwania zanieczyszczeń podczas rafinacji ropy naftowej. Badacze wskazują, że zastosowanie wodoru jako paliwa, wpłynie w znaczący sposób na dekarbonizację innych sektorów, w tym samochodów ciężarowych, lotnictwa i przemysłu ciężkiego. Ponad 60% produkowanego wodoru powstaje w dedykowanych instalacjach do jego produkcji, zaś w pozostałych przypadkach wodór jest tylko produktem ubocznym. Około 76% produkowanego wodoru powstaje w procesie reformingu parowego opierającego się na wykorzystaniu gazu ziemnego, pozostałą część produkuje się z węgla (w procesie gazyfikacji węgla). Zaledwie 0,1% wodoru powstaje w procesie elektrolizy wody, w którym wykorzystuje się energię elektryczną do rozbicia cząstek wody na atomy wodoru i tlenu.

Zasada działania polega na wykorzystaniu ruchu elektronów, które są wspomagane przez układ zewnętrzny. Elektrolizery alkaliczne, z membraną polimerową i stałotlenkowe, są kluczowymi technologiami elektrochemicznej produkcji wodoru (rys. 1).



Rys. 1 Schemat procesu elektrolizy

źródło: Advanced Sustainable Systems Volume 3, 2019

Sprawność ogniwa elektrolizera jest obliczana w oparciu o teoretyczną i rzeczywistą energię potrzebną do przeprowadzenia reakcji. Katalizatory są stosowane w celu zwiększenia gęstości prądu i szybkości reakcji elektrolizy. Platyna jest jednym z najczęściej stosowanych katalizatorów heterogenicznych naniesionych na powierzchnię elektrod. Katalizatory homogeniczne mogą być również wykorzystywane podczas elektrolizy ze względu na dużą wydajność reakcji, ponadto katalizatory homogeniczne są tańsze od heterogenicznych [7]. Ponieważ elektrolizery (zwłaszcza elektrolizery Proton Exchange Membrane, PEM) są wysoce wrażliwe na czystość wody, przed rozpoczęciem procesu elektrolizy należy zastosować procesy odsalania i demineralizacji, aby rozpocząć elektrolizę. Na przykład, jeśli solanka (lub woda morska) jest dostarczana do elektrolizera, jest bardziej prawdopodobne, że będzie ona produkować chlor niż tlen. Reforming parowy, częściowe utlenianie i autotermiczny reforming to trzy główne technologie reformowania paliw kopalnych do produkcji wodoru. Reforming parowy generalnie wymaga zewnętrznego źródła ciepła, ale nie wymaga tlenu do przebiegu procesu. Ma niższą temperaturę pracy i wyższy stosunek H_2/CO niż częściowe utlenianie i autotermiczne reformowanie. W procesie częściowego utleniania węglowodory są częściowo utleniane tlenem w celu wytworzenia wodoru. Źródłem ciepła do przebiegu tego procesu jest reakcja częściowego utleniania (spalania). W przypadku częściowego utleniania nie jest wymagany katalizator i jest ono bardziej tolerancyjne na siarkę niż reforming parowy i autotermiczny. Wymóg ciśnienia w przypadku reformingu autotermicznego jest niższy niż w przypadku częściowego utleniania. Autotermiczne reformowanie i częściowe utlenianie nie potrzebują zewnętrznego źródła ciepła. Jednakże oba te procesy wymagają zasilania czystym tlenem, co zwiększa złożoność i koszt poprzez dodanie jednostek separacji tlenu. W porównaniu z innymi technologiami reformowania paliw kopalnych, reformowanie parowe

(w szczególności parowe reformowanie metanu) jest najmniej kosztowną i najbardziej rozpowszechnioną metodą produkcji wodoru [8]. W procesie zgazowania węgiel jest częściowo utleniany parą wodną i O_2 w reaktorze o wysokiej temperaturze i ciśnieniu, a produktami są głównie H_2 , CO oraz CO_2 (syngaz). Produkt gazowy może być przetwarzany i oczyszczany w przypadkach, gdy istnieje potrzeba odzyskania siarki elementarnej lub kwasu siarkowego. Część syngazu może być dalej przetwarzana i wykorzystywana w turbinach gazowych do wytwarzania energii elektrycznej. Pomimo pewnych zalet zgazowania węgla, ze względu na wysoką zawartość węgla w węglu, metoda ta powoduje wyższą emisję CO_2 w porównaniu z innymi dostępnymi technologiami produkcji wodoru. W celu rozwiązania tego problemu opracowywane są obecnie technologie wychwytywania i składowania dwutlenku węgla. Obecnie, koszt produkcji wodoru ze zgazowania węgla jest nieco wyższy niż koszt reformingu parowego gazu ziemnego. Jednakże, techniki zgazowania węgla są gorzej zdefiniowane niż te stosowane w reformingu parowym gazu ziemnego. Pod względem ekonomicznym wytwarzanie wodoru z węgla różni się od innych paliw kopalnych: jednostkowe koszty surowców są niższe, natomiast jednostkowe koszty kapitałowe są wyższe w przypadku instalacji zgazowania węgla [9]. Kolejną metodą wytwarzania wodoru jest fotoelektroliza, w której heterogeniczne fotokatalizatory nakładane są na jedną lub obie elektrody. Oprócz ekspozycji na promieniowanie słoneczne, aby przeprowadzić fotoelektrolizę, ogniwo elektrolizy powinno być wspomagane energią elektryczną [10]. Dlatego w fotoelektrolizie zarówno energia fotoniczna, jak i

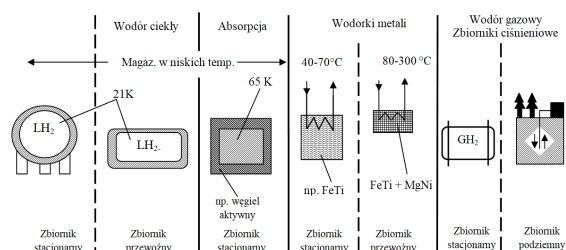
elektryczna są przekształcane w energię chemiczną. Mechanizm fotoelektrolitycznego wytwarzania wodoru obejmuje następujące etapy:

- generacja pary elektron-dziura za pomocą fotonu o odpowiednio wysokiej energii (wyższej niż przerwa pasmowa złącza piórkowego),
- przepływ elektronów od anody do katody generujący prąd elektryczny,
- rozkład wody na jony wodorowe i gazowy tlen,
- redukcja jonów wodorowych na katodzie w celu utworzenia wodoru w postaci gazowej,
- rozdzielenie gazów,
- przetworzenie i przechowywanie.

Wydajność systemu fotoelektrolitycznego zależy od rodzaju materiałów absorbujących fotony, ich struktury krystalicznej, właściwości powierzchniowych, odporności na korozję i reaktywności. Zwykle istnieje kompromis pomiędzy stabilnością fotoelektrody, a wydajnością konwersji fotonów do wodoru: wysoko wydajne fotoelektrody zazwyczaj mają słabą stabilność w elektrolitach, podczas gdy stabilne chemicznie fotoelektrody wykazują niską wydajność rozszczepiania wody.

Magazynowanie wodoru oraz jego transport są głównymi problemami ograniczającymi wykorzystywanie tego pierwiastka w przemyśle. Do pierwszego z nich muszą być zachowane wszystkie

normy dotyczące bezpieczeństwa, gdyż przy mieszance z tlenem staje się bardzo wybuchowy i w momencie zapłonu emituje znaczną ilość ciepła. Również jego charakterystyka jako cząsteczki znacząco utrudnia proces przechowywania, co skutkuje wysokimi kosztami wytwarzania odpowiednich zbiorników wodoru. Z dotychczas zgromadzonych analiz wynika, że paliwo wodorowe może być gromadzone w następujących stanach: stan ciekły magazynowany w temperaturze -253°C , co wymaga zbiornika o szczególnej izolacji, w którym ciśnienie jest równe atmosferycznemu oraz stan gazowy, gdzie wodór magazynowany jest przy bardzo wysokim ciśnieniu, dochodzącym do 700 bar, co wymaga zastosowania stalowego zbiornika w postaci butli [11]. Dlatego obecnie do magazynowania paliwa wodorowego stosuje się zbiorniki kriogeniczne lub wysokociśnieniowe (rys. 2). Przechowywanie wodoru w zbiornikach ciśnieniowych zapewnia dużą gęstość przechowywania, lecz nie można porównać jej do innych paliw wykorzystywanych do zasilania jednostek napędowych. Należy mieć na uwadze fakt, iż istnieje pewne niebezpieczeństwo z nimi związane, ponieważ



Rys. 2 Metody magazynowania wodoru
źródło: Journal of Energy Storage 40, 2021

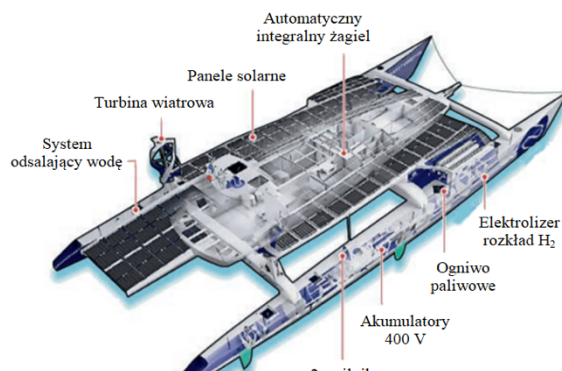
jest możliwość wycieku lub wybuchu, jeżeli sposób jego przechowywania będzie niezgodny z obowiązującymi normami.

Kolejnym sposobem na magazynowanie lub przechowywanie wodoru są związki chemiczne pełniące rolę pochłaniaczy. Związki te są w stanie pochłaniać wodór w temperaturze pokojowej i pod ciśnieniem atmosferycznym, co więcej są w stanie uwolnić ten pierwiastek w wyższych temperaturach np. $200-300^{\circ}\text{C}$. Pallad jest jednym z metali, który bardzo dobrze pochłania wodór, gdyż jest to stosunek 1:850 objętości. Nie jest on jednak powszechnie stosowany, ze względu, iż jest dosyć drogim surowcem. Magazynowanie chemiczne wydają się być zatem bardziej wydajną i bezpieczną metodą. Kolejną z metod jest możliwość użycia węglowodorów zawierających aromatyczne i nienasycone pierścienie, oraz innych związków chemicznych jak wodorki boru lub metali, lecz według badaczy jest to mało przyszłościowe rozwiązanie. Uważa się, że najbardziej perspektywicznym aktualnie rozwiązaniem na magazynowanie wodoru są nanomateriały. Metoda wykorzystująca powyższe rozwiązanie wyklucza główne bariery charakterystyczne dla konwencjonalnych substancji. Dotyczą one temperatury uwalniania wodoru, czyli desorpcji oraz szybkości adsorpcji. Następnym również bardzo przyszłościowym rozwiązaniem jest możliwość

magazynowania wodoru poprzez zastosowanie energii elektrycznej, które nazwano elektrochemicznym. Przyjmuje się, że potencjalnym magazynem wodoru może być dana substancja, której temperatura desorpcji oscyluje w granicach 100°C i której ciśnienie dla adsorpcji będzie mniejsze od 700 barów. Na podstawie wymienionych metod można zauważyć jak obecnie przedstawia się sytuacja związana z metodami magazynowania wodoru oraz jak wiele należy uwzględnić aspektów w celu jego bezpiecznego przechowywania.

3. Zastosowanie technologii wodorowych w morskich środkach transportu

Sukcesywnie postępujący rozwój tego paliwa w przemyśle transportu drogowego spowodował, że z powodzeniem stosuje się go również w statkach morskich, łodziach i motorówkach. Ogniwa wodorowe mają duży potencjał rozwojowy, ponieważ ich sprawność wytwarzania energii elektrycznej przewyższa sprawność silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym, jednocześnie nie emitując emisji zanieczyszczeń. W technice jachtowej metoda pozyskiwania wodoru poprzez elektrolizę ma największy potencjał. Głównym podejściem jest stosowanie wodoru zielonego, czyli produkowanie go ze źródeł odnawialnych, dzięki temu współczynnik *EroEL* (*Energy returned on Energy Invested* – zwrot energii wobec energii zainwestowanej) będzie wynosić ponad 1. Kolejną zaletą zastosowania metody elektrolizy wody jest fakt, że może zostać zastosowana w prawie każdej jednostce pływającej [12]. Pierwszą jednostką poruszającą się po wodach w sposób samowystarczalny wykorzystujący wodór do napędu jest statek Energy Observer (rys. 3), który opłynął świat i nadal jest eksploatowany w celach badawczych. Analizując układ napędowy można zauważyć, iż jednostka składa się z dwóch silników elektrycznych o łącznej mocy 82 kW. Posiada akumulatory 400 V, elektrolizer oraz ogniwo paliwowe. Na pokładzie Energy Observer znajduje się instalacja przystosowana do produkcji wodoru w sposób bezemisyjny, gdyż zostały zastosowane turbiny wiatrowe, panele solarne czy generator pływowy. W związku z powyższym wszystkie te urządzenia w czasie zacumowania bądź pływania wytwarzają energię elektryczną, która później wykorzystywana jest do produkcji wodoru [12].

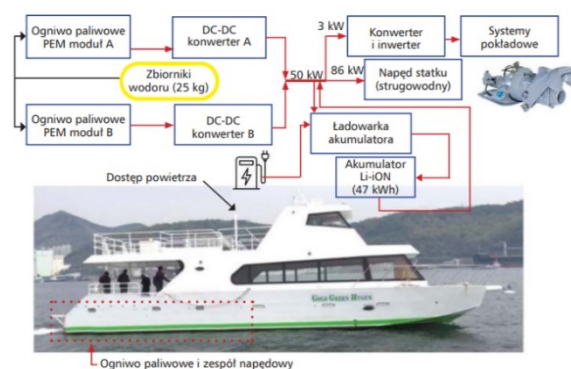


Rys. 3 Energy Observer – schemat układu napędowego
źródło: <https://www.energy-observer.org>

Nadatek wytworzonego wodoru zostaje zmagazynowany w zbiornikach, które są w stanie pomieścić ok. 62 kg. Następnie w ten sposób wytworzony wodór wykorzystywany jest do produkcji energii elektrycznej. W razie większego zapotrzebowania energetycznego zostaje uwolniony zapas wodoru składowany w butli w celu dalszej produkcji energii elektrycznej. Za pomocą metody elektrolizy otrzymywany jest wodór o czystości powyżej 99,9% [12]. Konstrukcja opisywanego statku pozwoliła na zrezygnowanie z konwencjonalnego tankowania, co daje możliwość ciągłego rejsu po otwartych wodach. Jest to możliwe także dzięki wodorowemu ogniwo paliwowemu, które na skutek odpowiednich reakcji zamienia energię chemiczną na energię elektryczną. Ogniwo paliwowe typu PEM (*Proton Exchange Membrane*) sprawdza się w przypadku tej jednostki dobrze, ponieważ ma krótki czas rozruchu oraz jest przystosowane do pracy przy zmiennych obciążeniach. W ramach jego pracy, generowana jest znaczna ilość ciepła, która jest efektem niepożądanym dla optymalnej pracy układu. Otrzymana energia elektryczna przekazywana jest do akumulatora, w którym jest magazynowana, a następnie wykorzystywana do zasilania silników elektrycznych. Należy mieć na uwadze fakt, iż do elektrolizera wykorzystywana jest woda, która została poddana procesowi odsalania. Dodatkowym źródłem prądu są panele solarne o powierzchni 512 m², które generują moc 21 kW. Wadą jest powierzchnia jaką zajmuje to rozwiązanie, jednakże jest to konieczne w celu uzyskania odpowiedniej ilości energii, ponieważ dzięki temu systemowi zasilana jest część instalacji elektrycznej, a wyprodukowany nadmiar energii magazynowany jest w akumulatorach. [12, 13]. Kolejną jednostką pływającą wykorzystującą wodór jako paliwo jest statek turystyczny wyprodukowany dla koreańskiego przedsiębiorstwa (rys. 4) specjalizującego się w przejazdach turystycznych. Dodanie jej do floty miało na celu wskazanie innym firmom kierunek rozwoju morskiego transportu publicznego. Analizując schemat układu napędowego wspomnianej łodzi można zauważyć, że jest to jednostka hybrydowa w której ogniwo paliwowe PEM (*Proton Exchange Membrane*) zintegrowane jest z akumulatorem litowo-jonowym. Układ zasilania zbudowany jest z dwóch podsystemów wyposażonych w tożsame moduły ogniwo paliwowych oraz przetworników DC-DC. W przypadku awarii jednego z podsystemów, jednostka dzięki takiej konfiguracji umożliwi działanie drugiemu podsystemowi. Ogniwa paliwowe dostarczają łącznie 50 kW do pozostałych podzespołów wymagających energii elektrycznej. Ogniwo paliwowe PEM jest w stanie wygenerować około 28 kW jako pojedynczy moduł, poprzez elektrochemiczną reakcję wodoru i tlenu. Stosowany moduł ogniwa paliwowego nie jest w stanie wytworzyć napięcia prądu do wartości w przedziale 240-370V, dlatego w tym celu zastosowano przetwornicę DC-DC. Wodór magazynowany jest pod ciśnieniem 350 bar w zbiornikach wysokociśnieniowych o pojemności 25 kg, a następnie jest dostarczany jako paliwo do ogniwa

PEM. Jeżeli układ napędowy wymaga większej mocy, a moduły ogniwo paliwowych nie są w stanie same dostarczyć energii jaką wymaga łódź, zostaje ona pobrana

z magazynów energii w postaci akumulatorów, których pojemność wynosi 47 kWh. Powyższa konfiguracja pozwala na pracę z wykorzystaniem pełnej mocy przez około godzinę. Wszystkie zestawy akumulatorów litowo-jonowych są wyposażone w oddzielny system zarządzania, co zapewnia ich bezpieczną i zoptymalizowaną pracę. W skład układu napędowego wchodzi między innymi ładowarka, dzięki której podczas zacumowania jest możliwość ładowania akumulatorów z zewnętrznego źródła prądu trójfazowego i napięciu 380 V. Na pokładzie statku znajdują się również chłodnice kulowe, ich zadaniem jest rozpraszanie ciepła przy pomocy wody morskiej, aby zapobiec ewentualnemu przegrzaniu się stosu ogniwo paliwowych. Stos ogniwo ma niekonwencjonalną konstrukcję, gdyż jest podzielony barierami na cztery



Rys. 4 Schemat hybrydowego układu pływającej jednostki turystycznej z napędem wodorowym
źródło: <https://www.komarine.com>

etapy. Wodór jako paliwo musi zostać przetransportowany przez cztery stopnie w sposób kaskadowy, natomiast powietrze przechodzi przez niepodzielną stronę. Z tego względu elektrody, które posiada ta jednostka są wielostopniowe i znajdują się w jednym stosie.

Zarówno stopnie anody jak i katody są połączone ze sobą elektrycznie, co umożliwia swobodne przenoszenie elektronów. Strona wodorowa stosu działa w trybie tzw. martwym, aby zapobiec spadkowi napięcia ogniwa poniżej wartości minimalnej. Woda otrzymana z reakcji zachodzącej w ogniwie jest usuwana przez separatory [14]. Maksymalna prędkość opisywanej jednostki turystycznej to ok. 14 km/h. Uzyskana wartość jest niższa w stosunku do podobnego rodzaju łodzi, co związane jest między innymi z dużą masą poszczególnych elementów układu hybrydowego, które łącznie wynoszą około 2.2 t., co więcej oprócz masy zmniejszeniu uległa powierzchnia pokładowa, gdyż łączna powierzchnia instalacji wynosi ponad 7 m³.

4. Podsumowanie

Podsumowując na przestrzeni ostatnich lat zanotowano znaczny rozwój technologii wytwarzania wodoru. Oprócz tych najbardziej powszechnych jak reforming gazowy, zaczęto stosować między innymi

elektrolizery, które umożliwiają jego produkcję w sposób bezemisyjny przy uwzględnieniu, iż energia do ich zasilania pochodzi z odnawialnych źródeł energii. Co więcej postępujący rozwój tego paliwa w przemyśle transportu drogowego spowodował, że zaczęto go stosować w statkach morskich, łodziach i motorówkach. Aktualnie jeszcze nie jest to zbyt powszechna metoda, ale jak zostało to przedstawione na przykładzie Energy Observer pojawia się możliwość na pozyskiwanie wodoru z wody morskiej, co rozwiązuje problem częstego tankowania paliwa w poszczególnych portach. Ponadto takie rozwiązania mają znaczący wpływ na rozwiązanie problemu z emisją zanieczyszczeń z gazów wylotowych w przemyśle morskim, który obecnie jest znacznie uzależniony od konwencjonalnych rozwiązań w dziedzinie układów napędowych. Należy mieć również na uwadze fakt, iż coraz więcej instytucji odpowiedzialnych za regulacje związane z dekarbonizacją poszczególnych sektorów transportu stosuje ulgi oraz dofinansowania na stosowanie alternatywnych układów napędowych jak opisywane ogniwa paliwowe. Przedstawione powyżej wniosku stanowiły czynnik determinujący do opracowania innowacyjnego projektu wielopaliwowego układu napędowego wykorzystującego ogniwo wodorowe do napędu jednostki pływającej typu katamaran. Niniejsza praca jest wstępem do szerszej analizy wykorzystania wodoru jako paliwa stosowanego do napędu jednostek pływających.

Finansowanie

Badania zostały sfinansowane przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju - projekt badawczy w ramach programu Inteligentny Rozwój (umowa nr POIR.01.04.01.00-0067/20).



Literatura

- Franta, Benjamin. "Early oil industry disinformation on global warming." *Environmental Politics* 30.4 (2021): 663-668.
- Montoya, Rudy. *Shifting from Fossil Fuel Reliance to Green Energy Sovereignty: Ute Mountain Ute Tribe*. No. SAND2022-16503. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2022.
- Tian, Xuelin, Chunjiang An, and Zhikun Chen. "The role of clean energy in achieving decarbonization of electricity generation, transportation, and heating sectors by 2050: A meta-analysis review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 182 (2023): 113404.
- Wolniak, Radosław, and Bożena Skotnicka-Zasadzień. "Development of Photovoltaic Energy in EU Countries as an Alternative to Fossil Fuels." *Energies* 15.2 (2022): 662.
- Oyster H2 Project, dostępne online: <https://www.oysterh2.eu> (data dostępu 02 luty 2024).
- Tarhan, Cevahir, and Mehmet Ali Çil. "A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods." *Journal of Energy Storage* 40 (2021): 102676.
- Advanced Sustainable Systems Volume 3, Issue 5 1800161 Full Paper Unified Catalyst for Efficient and Stable Hydrogen Production by Both the Electrolysis of Water and the Hydrolysis of Ammonia Borane Yuan Liu, Xue Yong, Zhongyi Liu, Zhimin Chen, Zhenhui Kang, Siyu Lu First published: 08 February 2019 <https://doi.org/10.1002/adsu.201800161>
- Jiyuan Sui, Zhennan Chen, Chen Wang, Yueyang Wang, Jianhong Liu, Wenjia Li, Efficient hydrogen production from solar energy and fossil fuel via water-electrolysis and methane-steam-reforming hybridization, *Applied Energy*, Volume 276, 2020, 115409, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115409>.
- Adnan Midilli, Haydar Kucuk, Muhammed Emin Topal, Ugur Akbulut, Ibrahim Dincer, A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 50, 2021, Pages 25385-25412, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088>.
- Zhang, Xianhu Liu, Yiguo Su, Lei Wang, Ultrastable and high-performance seawater-based photoelectrolysis system for solar hydrogen generation, *Applied Catalysis B: Environmental*, Volume 304, 2022, 120883, ISSN 0926-3373, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120883>.
- Feldensztajn A., Pacuła L., Pusz J. (2003). *Wodór paliwem przyszłości*, Instytut Wdrożeń Technicznych INTECH, Gdańsk.
- Energy Observer, dostępne online: <https://www.energy-observer.org> (data dostępu 22 stycznia 2024).
- Pagliaro M. (2020). 18 – Hydrogen-powered boats and ships. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes, New Perspectives on Hydrogen Production, Separation, and Utilization*, p. 411-419
- Fuel Cell Leisuer Boat, dostępne online: <https://www.komarine.com> (data dostępu 29 stycznia 2024).

Streszczenie

Zmiany klimatyczne stanowią wyzwanie dla naukowców na całym świecie. Alternatywne źródła energii są obecnie opracowywane przy użyciu technologii zapewniających maksymalną wydajność i niską emisję zanieczyszczeń. Coraz więcej producentów pojazdów, maszyn czy urządzeń rezygnuje z konwencjonalnych układów napędowych i zastępuje je alternatywnymi rozwiązaniami wykorzystującymi np. energię elektryczną lub wodór. Ponadto, od kilku lat produkowane są samochody napędzane wodorowymi ogniwami paliwowymi, w których wodór łączony jest z tlenem, a w wyniku reakcji chemicznej wytwarzana jest energia elektryczna zasilająca silniki elektryczne. Analogiczną sytuację można zaobserwować w przemyśle morskim. Obecnie projektanci starają się opracować nowe rozwiązania w celu zwiększenia wydajności, upraszczając konstrukcję ogniw paliwowych. Technologia wykorzystująca wodór jako źródło energii stosowana jest głównie w samochodach dostawczych oraz jednostkach pływających do przewozu ludzi. Analizując kierunki światowych trendów, można stwierdzić, że za kilka lat znaczący rozwój nastąpi w transporcie ciężkim. W niniejszym artykule dokonano przeglądu metod produkcji wodoru jego przechowywania oraz rozwiązań stosowanych w transporcie morskim.

Słowa kluczowe: wodór, napęd wodorowy, metody wytwarzania wodoru, transport morski

Hydrogen powertrains systems used in floating units

Abstract

The climate change is challenging scientists around the world. Alternative energy sources are now being developed using technologies that ensure maximum efficiency and low toxic emissions into the atmosphere. More and more manufacturers of vehicles, machinery or equipment are abandoning conventional propulsion systems and replacing them with alternatives using, for example, electricity or hydrogen. In addition, hydrogen fuel cell-powered cars, in which hydrogen is combined with oxygen and a chemical reaction produces electricity to power electric motors, have been produced for several years, and an analogous situation can be observed in the marine industry. Currently, designers are trying to develop new solutions to increase efficiency by simplifying the design of fuel cells. At present, technology using hydrogen as an energy source is mainly used in commercial vehicles and vessels for transporting people. Analyzing the direction of global trends, it can be concluded that in a few years, significant development will take place in heavy-duty transportation. This article reviews methods for producing hydrogen its storage and solutions used in marine transportation

Keywords: hydrogen, hydrogen propulsion, hydrogen production methods, maritime transport

Analiza ryzyka i bezpieczeństwa dla wielonapędowych jednostek pływającej z wykorzystaniem oceny jakości kompleksowej

Wprowadzenie

Jednostki pływające typu katamaran podzielić można w ujęciu funkcjonalnym. Należą do nich zarówno jednostki pływające rekreacyjnie, jak i jednostki robocze o bardzo szerokim zastosowaniu. Eksploatowane są one w akwenach mocno obciążonych ruchem, a w przypadku rejsów morskich transport jest realizowany zarówno na otwartym morzu, jak i blisko linii brzegowej. Istotny w aspekcie emisji hałasu i spalin jest również ruch wewnątrz portów przy przejściach, wyjściach i wejściach oraz „zimne rozruchy” silników spalinowych w portach. Dlatego też bezpieczeństwo na morzu jest głównym elementem polityki w dziedzinie transportu morskiego mającej na celu zapewnienie ochrony pasażerów, załóg oraz środowiska morskiego i regionów przybrzeżnych. Ze względu na światowy wymiar transportu morskiego Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) opracowała jednolite normy międzynarodowe. Do podstawowych międzynarodowych umów należą:

- Międzynarodowa konwencja o zapobieganiu zanieczyszczenia morza przez statki (MARPOL) [1],
- Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu (SOLAS) [2],
- Międzynarodowa konwencja o wymaganiach w zakresie wyszkolenia marynarzy, wydawania im świadectw oraz pełnienia wacht (STCW) [3].

Włączanie do transportu morskiego nowych jednostek o napędzie wodorowym powinno być nie tylko przyjazne dla środowiska, ale także całkowicie bezpieczne dla człowieka. Zestawiając charakterystykę pracy ogniw paliwowych, generatorów oraz ogniw fotowoltaicznych odpowiednio z parametrami silników elektrycznych, przez odpowiednie opracowanie sterowania można znacząco obniżyć maksymalną moc ogniw paliwowych, ich masę i rozmiary zapewniając zbliżony moment obrotowy do klasycznego silnika spalinowego. Jednym z kryteriów właściwego sterowania napędem jest minimalizacja emisji związków szkodliwych oraz zapewnienie maksymalnego zasięgu katamaranu. Cel ten realizowany może być przez odpowiednie wytwarzanie energii w układzie, w zależności od zaistniałych warunków, np. wykorzystanie tylko ogniw paliwowych w obszarach wymagających ograniczonej emisji, wykorzystanie dwóch lub trzech źródeł (ogniwa

i generatory LPG i ON) w warunkach konieczności zwiększenia zasięgu [4].

W artykule takie nowe rozwiązania dla jednostki pływającej typu katamaran poddano ocenie ryzyka i bezpieczeństwa obejmującej:

- sformułowanie strategii bezpieczeństwa i ochrony katamaranu,
- przeprowadzenie oceny ryzyka,
- opracowanie planu zarządzania i ograniczania zidentyfikowanego ryzyka.

Metodą zastosowaną do oceny ryzyka i bezpieczeństwa analizowanego systemu była ocena jakości kompleksowej, pozwalająca jakościowo scharakteryzować systemy i urządzenia w procesie produkcji katamaranu [5]. W artykule zaprezentowano główne wyniki dla prototypu katamaranu z wielopaliwowym układem napędowym, wykorzystującym ogniwo wodorowe, generator zasilany olejem napędowym (ON), generator na paliwo gazowe LPG i układ paneli fotowoltaicznych. Wszystkie te elementy zostały połączone z zespołem baterii, w których magazynowana energia jest wykorzystywana zarówno do celów związanych z napędem jachtu (zasilanie silników elektrycznych), jak i do celów związanych z zapewnieniem funkcjonowania jego wyposażenia.

1. Metoda oceny ryzyka dla zdrowia i bezpieczeństwa

Pięć etapów oceny ryzyka bezpieczeństwa obejmuje określenie wykonywanych na danym etapie czynności i identyfikację zagrożeń, a przede wszystkim określenie bieżących kontroli ryzyka i wstępnych punktów jego kontroli, ocenę ryzyka, określenie działań mających na celu zmniejszenie ryzyka. Metody oceny przedsięwzięć są od dawna przedmiotem rozważań w ramach planowania i realizacji inwestycji. W ich wyniku powstało wiele wartościowych koncepcji, metod i technik oceny przedsięwzięć inwestycyjnych. W przyjętej metodologii ocenę ryzyka przeprowadziły kilkusobowe zespoły ekspertów w zakresie bezpieczeństwa, zarządzania i oceny ryzyka związanego z inwestycją. Dobór ekspertów był celowy i uwarunkowany kompetencjami i kwalifikacjami. Aby zidentyfikować zagrożenia związane z danym zakresem zadań, osoby przeprowadzające ocenę ryzyka brały pod uwagę: czas trwania zagrożeń, częstotliwość, zakres

niebezpiecznych interakcji z innymi czynnościami, istniejące procedury dotyczące wykonania systemów pracy, instrukcje producenta (w przypadku sprzętu roboczego), używane materiały i substancje. Identyfikacja zagrożeń i bieżąca kontrola ryzyka objęła identyfikację zagrożeń na każdym etapie procesu produkcji katamaranu. Dla każdego zidentyfikowanego zagrożenia określono istniejące środki kontroli.

Ryzyko określa się poprzez oszacowanie potencjalnej dotkliwości szkody i prawdopodobieństwa wystąpienia szkody w przypadku danego zagrożenia [6]. Aby oszacować wagę szkody, należy rozważyć jej wpływ na daną osobę i wynikające z tego tytułu szkody.

Dotkliwość i prawdopodobieństwo wystąpienia szkody określają dane poziomy (tab.1).

Tabela 1. Szacowanie poziomu szkód związanych z bezpieczeństwem i prawdopodobieństwo ich wystąpienia na etapie produkcji katamaranu

Szacowany poziom szkody			
Poziom	Niski	Średni	Wysoki
Zdrowie	Dokuczliwość i podrażnienie prowadzące do przejściowego złego stanu zdrowia	Częściowy ubytek słuchu, zapalenie skóry, astma, zły stan zdrowia prowadzący do trwałej, lekkiej niepełnosprawności	Ostre choroby śmiertelne, ciężkie choroby skracające życie prowadzące do trwałego, znacznego inwalidztwa
Bezpieczeństwo	Powierzchniowe urazy, drobne skaleczenia i siniaki, podrażnienie oczu przez kurz	Rany szarpane, oparzenia, wstrząśnienia mózgu, poważne skręcenia, drobne złamania	Urazy śmiertelne, amputacje, wielokrotne urazy, poważne złamania
Prawdopodobieństwo wystąpienia danego poziomu zagrożenia			
Typowe zjawisko	Zwykle doświadczane raz w ciągu życia jednostki	Zwykle doświadczane raz na pięć lat przez osobę	Zwykle doświadczane co najmniej raz na sześć miesięcy przez osobę

Zródło: opracowanie własne

2. Zastosowany system oceny jakości kompleksowej ryzyka i bezpieczeństwa procesu dla wielopaliwowego układu

połączeń z ogniwami wodorowymi w jednostce pływającej typu katamaran

Analiza ryzyka i bezpieczeństwa przeprowadzona została w następujących etapach:

- sformułowanie strategii bezpieczeństwa i ochrony,
- przeprowadzenie oceny ryzyka,
- opracowanie planu zarządzania i ograniczania zidentyfikowanego ryzyka.

Metodologią zastosowaną do oceny bezpieczeństwa analizowanego systemu była ocena jakości kompleksowej, pozwalająca jakościowo scharakteryzować oceniane systemy i urządzenia [7,8,9].

Ocena jakości kompleksowej wyrobu/procesu produkcyjnego obejmuje cechy jakościowe („n” może być dowolną liczbą). Jedna liczba wypadkowa może określić podmiot charakteryzujący się wieloma cechami jakościowymi. Jakość kompleksowa (Q) jest zatem funkcją zmiennych cech jakościowych:

$$Q = f(W_i) = f(W_1, W_2, \dots, W_n)$$

(1)

gdzie: Q jakość kompleksowa, $W_1 \dots$

W zmienne cechy jakościowe.

Ocena jakości wskaźników bezpieczeństwa wymaga w pierwszej kolejności selekcji opcji charakteryzujących oceniane systemy produkcyjne należące do nich;

- *Bezpieczeństwo rozwiązania technicznego* (ST)
- *Bezpieczeństwo środowiskowe* (ES)
- *Bezpieczeństwo społeczne* (SS)
- *Sposób ograniczenia ryzyka* (RR)

Zestaw opcji wybranych do oceny poszczególnych wskaźników jakości przedstawia tab. 2.

Tabela 2. Zestawienie opcji do oceny jakości kompleksowej

Podział na grupy opcji zależny od rodzaju ryzyka	Symbol opcji	Charakterystyka opcji jak źródła ryzyka
1. Bezpieczeństwo rozwiązań technicznych/technologicznych (ST)	ST1	Stopień nowości technicznej urządzenia/procesu
	ST2	Poziom trudności techniki/procesu
	ST3	Zmniejszenie zużycia energii
	ST4	Zmniejszenie materiałochłonności
	ST5	Stosowanie energii odnawialnej i/lub bioenergii
	ST6	Poprawa jakości i stabilności wyrobu/procesu

	ST7	Sterowanie napędem mogące można znacząco obniżyć maksymalną konieczną moc ogniw paliwowych	
	ST8	Zgodność z metodologią czystszej produkcji	
	ST9	Zgodność z zasadami zrównoważonego rozwoju	
	ST10	Zapewnienie monitorowania w czasie rzeczywistym i kontroli zużycia baterii	
	ST11	Projektowanie pod kątem możliwości naprawy, renowacji, recyklingu itp.	
	ST12	System zawiera zaawansowane algorytmy monitorowania i kontrolowania ładowania i rozładowywania baterii	
		ST13	Poprawa stosunków z konsumentami
	ST14	Poprawa stosunków z otoczeniem	
	2. Bezpieczeństwo ekologiczne (ES)	ES1	Zeroemisyjny napęd motorowy łodzi rekreacyjnych
		ES2	Odpowiednie instrukcje obsługi
		ES3	Sterowania napędem skutkujące minimalizacją emisji związków szkodliwych
		ES4	Ograniczenie emisji CO ₂
		ES5	Ograniczenie emisji związków toksycznych
		ES5	Czas uzupełniania źródeł energii zużywanych do napędu katamaranu
ES6		Obieg zamknięty w całym cyklu życia	
ES7		Ograniczenie emisji hałasu	
ES8	Opracowanie systemu zarządzania energią		

3. Bezpieczeństwo społeczne (SS)	SS1	Udział w nowych formach konsumpcji (np. dzielenie się, itp.)
	SS2	Utrzymanie najwyższej wartości materiałów i produktów
	SS3	Wpływ na dystrybucję między różnymi grupami dochodowymi
	SS4	Zmniejszone zagrożenie dla zdrowia ludzkiego
	SS5	Zmiana wzorców konsumpcji - konsumenci odpowiedzialni społecznie
	SS6	Pozytywny wpływ wyższej jakości produktu na zdrowie ludzkie
	SS7	Sterowanie napędem
4. Bezpieczeństwo procesu (BS) <i>Prace konserwacyjne i pomocnicze</i>	BS1	Upadki, potknięcia
	BS2	Ryzyko porażenia elektrycznego
	BS3	Wdychanie związków lotnych
	BS4	Ryzyko upadku
	BS5	Kontakty termiczne
	BS6	Ryzyko upadku
<i>Prace na wysokości $\geq 2m$ (przy braku zabezpieczeń zbiorowych)</i> <i>Upadek na płaski teren lub z wyższego piętra na niższe</i>	BS7	Nierówne podłogi we wszystkich obszarach
	BS8	Poruszanie się po schodach w górę i w dół
	BS9	Śliska podłoga w toalecie
	BS10	Pośpiech, nieuwaga
<i>Kontakty termiczne</i>	BS11	Zapobieganie oparzeniom
5. Ocena bezpieczeństwa obsługi (SW)	SW1	Niewłaściwa organizacja pracy
	SW2	Niezgodność z procesem technologicznym
	SW3	Niestosowanie środków ochrony indywidualnej i zbiorowej
<i>Zagrożenia ze strony elementów mechanicznych</i>	SW4	Pośpiech w działaniu
	SW5	Nieostrożność w pracy
	SW6	Nieprzestrzeganie zasad BHP

	SW7	Nadmierna koncentracja sprzętu, materiałów itp. w miejscu pracy
	SW8	Zablokowane przejścia
<i>Przeciążenie układu ruchu na skutek wymuszonej pozycji ciała</i>	SW9	Długotrwałe stanie
	SW10	Brak przerw w pracy
<i>Ekspozycja oka</i>	SW11	Praca bez okularów ochronnych
	SW12	Nieostrożność
<i>Porażenie prądem</i>	SW13	Uszkodzona instalacja elektryczna
	SW14	Uszkodzone kable zasilające
	W15	Uszkodzone elementy ochronne urządzeń technicznych
<i>Poparzenia</i>	W16	Pośpiech, nieuwaga przy przygotowywaniu gorących napojów
<i>Temperatura</i>	SW18	Nieodpowiednia temperatura powietrza w pomieszczeniu
<i>Hałas/głośność</i>	SW19	Normalna praca maszyn i urządzeń
	SW20	Uszkodzony sprzęt mechaniczny lub elektryczny
	SW21	Hałas zewnętrzny
<i>Pożar</i>	SW22	Incydenty w instalacjach elektrycznych
	SW23	Duża ilość łatwopalnych przedmiotów
	SW24	Palenie w obszarach zabronionych
	SW25	Pracownicy nieprzeszkoleni w zakresie działań związanych z bezpieczeństwem przeciwpożarowym
	SW26	Ręczny sprzęt gaśniczy bez bieżącej konserwacji i przeglądu
<i>Choroby</i>	SW27	Kontakt z odpadami
	SW28	Wdychanie toksycznych gazów, toksyn

	SW29	Ekspozycja na zmienne warunki pogodowe
6.Sposoby zmniejszenia ryzyka (RR)	RR1	Dbanie o właściwą organizację pracy
	RR2	Stosowanie środków ochrony indywidualnej i zbiorowej
	RR3	Przeprowadzanie pomiarów środowiska pracy
	RR4	Używanie sprzętu zgodnie z jego przeznaczeniem
	RR5	Wyposażenie stanowisk pracy w instrukcje BHP
	RR7	Właściwa organizacja wszystkich stanowisk pracy
	RR8	Stopień bezpieczeństwa dla człowieka
	RR9	Stosowanie ergonomicznych rozwiązań w miejscu pracy
	RR10	Używanie okularów ochronnych itp.
	RR11	Używanie urządzeń powszechnego użytku zasilanych energią elektryczną zgodnie z ich przeznaczeniem
	RR12	Terminowe wykonywanie pomiarów przeciwporażeniowych instalacji elektrycznych
	RR13	Zwiększenie współczynnika bezpieczeństwa dzięki redundancji źródeł zasilania układu napędowego
	RR14	Utrzymywanie optymalnej temperatury w pomieszczeniu
	RR15	Montaż klimatyzacji
	RR16	Ciągły serwis maszyn i urządzeń
	RR17	System oferuje połączenie zaawansowanych algorytmów

	RR18	Organizowanie szkoleń i próbnych ewakuacji
	RR19	Systematyczna konserwacja i serwisowanie sprzętu gaśniczego
	RR20	Wykonywanie przeglądów technicznych instalacji elektrycznych
	RR21	Identyfikacja zagrożeń, jakie są konsekwencją stosowania na jachcie jednocześnie różnych rodzajów paliw wykorzystywanych do generowania energii
	RR22	Rygorystyczne przestrzeganie procesów technologicznych i przepisów przeciwpożarowych

Źródło: opracowanie własne

2. Klasyfikacja i ocena ryzyka

Klasyfikację ryzyka i priorytety działań, które należy podjąć, definiuje się określając poziomy zagrożenie jako:

Bardzo niski – Nie wymaga ustanawiania dodatkowych środków kontrolnych

Niski – Wymaga kontroli i wdrożenia prostych rozwiązań

Średni – Wymaga okresowego sprawdzania skuteczność środków kontrolnych i poprawy działań zapobiegawczych w perspektywie średnioterminowej. Jeżeli konsekwencje są bardzo poważne, termin należy skrócić i, w stosownych przypadkach, przeprowadzić szczegółową ocenę w celu dokładniejszego ustalenia informacji niezbędnych do przyjęcia środków.

Wysoki – Wymaga wdrożenia środków mających na celu zmniejszenie ryzyka w krótkim okresie. Jeżeli skutki są bardzo poważne lub śmiertelne, termin należy skrócić i w stosownych przypadkach, przeprowadzić szczegółową ocenę w celu dokładniejszego ustalenia informacji niezbędnych do przyjęcia środków.

Bardzo wysoki – Jeżeli praca jest stale wykonywana, należy zastosować natychmiastowe środki tymczasowe i ostateczne w celu zmniejszenia ryzyka w bardzo krótkim okresie. Jeśli praca nie jest wykonywana regularnie, nie należy jej rozpoczynać do czasu zmniejszenia ryzyka i oceny po zastosowaniu środków.

Poszczególne kryteria przedstawione w tab. 2 oceniają punktację pojedynczej opcji w sposób jakościowy. Oceniane opcje zostały poddane ocenie 5 ekspertów. Skala ocen punktacji wynosiła od 0 do 10 punktów w ramach każdej z pojedynczych opcji. Skala ta powstała na podstawie oceny „Wartości poziomu bezpieczeństwa [punkty]” dla pojedynczego wyniku według kolejnych założeń [w punktach]:

Bardzo wysoki - 8-10

Wysoki - 6-7

Średni - 4-5

Niski - 2-3

Bardzo niski - 0-1

Średnia arytmetyczna punktów przyznanych przez ekspertów dała jednopunktową ocenę S. Metoda uwzględnia dodatkowo stopień ważności opcji a_j , do oceny cząstkowych wskaźników SI. Stopień ważności a_j sześciu opcji grup bezpieczeństwa jest następujący:

- Bezpieczeństwo rozwiązań technicznych/technologicznych $SI_{ST} - a_j = 3$;
- Bezpieczeństwo ekologiczne $SI_{ES} - a_j = 4$;
- Bezpieczeństwo socjalne - $a_j = 2$;
- Bezpieczeństwo procesu $SI_{BS} - a_j = 2$;
- Ocena bezpieczeństwa obsługi $SI_{SW} - a_j = 1$;
- Stopień redukcji ryzyka $SI_{RR} - a_j = 3$.

Wartości stopnia ważności zostały zaproponowane przez zespół ekspertów i będą dostosowywane do lokalnych warunków analizowanych systemów.

Wartość pojedynczej opcji $S^*_{a_j}$ uwzględniający stopień ważności oblicza się wg. równania 2.

$$S^*_{a_j} = S \cdot a_j \quad (2)$$

gdzie: $S^*_{a_j}$ – wartość pojedynczej opcji $S^*_{a_j}$ uwzględniający stopień ważności; S – wartość pojedynczej opcji (0-10 pkt); a_j – stopień ważności pojedynczej opcji.

Stąd też równanie (1)

$$Q = f(W_i) = f(W_1, W_2, \dots, W_n) \quad (1)$$

przyjmie postać przedstawioną w równaniu 3.

$$SI = \sum SI_{ST} \cdot a_j + \sum SI_{ES} \cdot a_j + \sum SI_{SS} \cdot a_j + \sum SI_{BS} \cdot a_j + \sum SI_{SW} \cdot a_j + \sum SI_{RR} \cdot a_j \quad (3)$$

Gdzie SI to wskaźnik wartości kompleksowej, a odpowiednie wskaźniki cząstkowe to:

$\sum SI_{ST} \cdot a_j$ - Bezpieczeństwo rozwiązań technicznych/technologicznych SI_{ST}

$\sum SI_{ES} \cdot a_j$ - Bezpieczeństwo ekologiczne

$\sum SI_{SS} \cdot a_j$ - Bezpieczeństwo społeczne wskaźnik cząstkowy

$\sum SI_{BS} \cdot a_j$ - Bezpieczeństwo procesu

$\sum SI_{SW} \cdot a_j$ - Ocena bezpieczeństwa obsługi

$\sum SI_{RR} \cdot a_j$ - Stopień redukcji ryzyka

Suma ww. wskaźników cząstkowych pozwala więc

otrzymać wartość wskaźnika kompleksowej SI.

Ostateczną ocenę SI_A można porównać z maksymalną możliwą wartością poziomu bezpieczeństwa SI_{MAX} , obliczając (RI_{SI}) czyli względną wartość

analizowanego danego wskaźnika jakości kompleksowej względem jego wartości maksymalnej wg. równania 4:

$$RI_{SI} = (SI_A - SI_{MAX}) / SI_A \cdot 100\% \quad (4)$$

W ten sposób jakościowa ocena RI_{SI} analizowanego procesu porównana z możliwą maksymalną wartością oceny SI_{MAX} przy użyciu jakościowej oceny eksperckiej może być uznana jako obiektywna. Wyniki obliczeń wskaźników jakości kompleksowej poziomu bezpieczeństwa SI przedstawia tab. 3.

Symbol grupy opcji	Symbol danej opcji	Poziom wartości pojedynczej opcji [pkt]					Wartość pojedynczej opcji S^*a_j z uwzględnieniem stopnia ważności	
		Bardzo duża 8-10	Duża 6-7	Średnia 4-5	Niska 2-3	Bardzo niska 0-1	Oceniana	Maksymalna
ST Stopień ważności $a_1 = 3$	ST1	9					27	30
	ST2	9					27	30
	ST3	9					27	30
	ST4	9					27	30
	ST5	8					24	30
	ST6	9					27	30
	ST7	8					24	30
	ST8	8					24	30
	ST9	8					24	30
	ST10	9					27	30
	ST11	8					24	30
	ST12	10					30	30
	ST13	8					24	30
	ST14	8					24	30
<i>Bezpieczeństwo rozwiązań technicznych/technologicznych wskaźnik cząstkowy $\sum SI_{ST} \cdot a_j$</i>							360	420
ES Stopień ważności $a_2 = 4$	ES1	9					36	40
	ES2	10					40	40
	ES3	9					36	40
	ES4	9					36	40
	ES5	9					36	40
	ES6	8					32	40
	ES7	9					36	40
	ES8	10					40	40
	ES9	10					40	40
<i>Bezpieczeństwo ekologiczne wskaźnik cząstkowy $\sum SI_{ES} \cdot a_j$</i>							332	360
SS Stopień ważności $a_3 = 2$	SS1	9					18	20
	SS2	10					20	20
	SS3	8					16	20
	SS4	10					20	20
	SS5	9					18	20
	SS6	10					20	20
	SS7	10					20	20
<i>Bezpieczeństwo socjalne wskaźnik cząstkowy $\sum SI_{SS} \cdot a_j$</i>							132	140
BS Stopień ważności $a_4 = 2$	BS1	9					18	20
	BS2	10					20	20
	BS3	10					20	20
	BS4	9					18	20
	BS5	10					20	20
	BS6	10					20	20
	BS7	10					20	20
	BS8	9					18	20
	BS9	10					20	20
	BS10	9					18	20
	BS11	10					20	20
<i>Bezpieczeństwo procesu wskaźnik cząstkowy $\sum SI_{BS} \cdot a_j$</i>							212	220
SW Stopień ważności	SW1	10					10	10
	SW2	10					10	10
	SW3	10					10	10

a ₅ = 1	SW4	9				9	10	
	SW5	9				9	10	
	SW6	9				9	10	
	SW7	10				10	10	
	SW8	10				10	10	
	SW9	8				8	10	
	SW10	8				8	10	
	SW11	9				9	10	
	SW12	9				9	10	
	SW13	10				10	10	
	SW14	10				10	10	
	SW15	10				10	10	
	SW16	9				9	10	
	SW17	10				10	10	
	SW18	10				10	10	
	SW19	10				10	10	
	SW20		7			7	10	
	SW21	10				10	10	
	SW22	8				8	10	
	SW23	8				8	10	
	SW24	10				10	10	
	SW25	10				10	10	
	SW26	10				10	10	
	SW27	10				10	10	
	SW28			5		5	10	
	<i>Ocena bezpieczeństwa obsługi wskaźnik cząstkowy $\sum SI_{SW} a_j$</i>						258	280
	RR Stopień ważności a ₆ = 3	RR1	10				30	30
		RR2	10				30	30
RR3		10				30	30	
RR4		10				30	30	
RR5		10				30	30	
RR6		10				30	30	
RR7		9				27	30	
RR8		9				27	30	
RR9		9				27	30	
RR10		9				27	30	
RR11		10				30	30	
RR12		10				30	30	
RR13		9				27	30	
RR14		8				24	30	
RR15		10				30	30	
RR16		10				30	30	
RR17		10				30	30	
RR18		10				30	30	
RR19		10				30	30	
RR20		10				30	30	
RR21		10				30	30	
RR22		9				30	30	
<i>Stopień redukcji ryzyka wskaźnik cząstkowy $\sum SI_{RR} a_j$</i>						639	660	
<i>Suma oceny grup opcji – wskaźnik jakości kompleksowej SI</i>						1933	2080	
<i>Względny udział w maksymalnym poziomie SI</i>						92,9%		

Zródło: opracowanie własne

W tab. 4 zestawiono wskaźniki cząstkowe jakości kompleksowej SI.

Tabela 4. Wskaźniki cząstkowe i sumaryczny wskaźnik jakości kompleksowej wg danych z tab. 3

Wskaźniki cząstkowe	Analizowany proces Katamaran [pkt]	Wartości wskaźników cząstkowych			Katamaran/ Maximum SI [%]
		% całego SI	Maximum SI	%Maximum SI	
Bezpieczeństwo techniczne SI _{ST}	360	18,6	420	20,2	85,7
Bezpieczeństwo ekologiczne SI _{ES}	332	17,2	360	17,3	92,2
Bezpieczeństwo socjalne SI _{SS}	132	6,8	140	6,7	94,3
Bezpieczeństwo procesu SI _{BS}	212	11,0	220	10,6	96,4
Bezpieczeństwo obsługi SI _{SW}	258	13,3	280	13,5	92,1
Stopień redukcji ryzyka SI _{RR}	639	33,1	660	31,7	96,9
Sumaryczny SI	1933	100,0	2080	100,0	92,9

Źródło: opracowanie własne

Oceniana metoda dała bardzo zbliżone, wysokie wyniki, co przedstawiono w tab. 4. Całkowity wyliczony wskaźnik bezpieczeństwa SI wynosi 92,9% maksymalnej możliwej wartości poziomu bezpieczeństwa, co dało bardzo wysoką wartość sumarycznego poziomu bezpieczeństwa SI obliczoną w tabeli 3.

Z wyliczonych cząstkowych wskaźników bezpieczeństwa najwyższą wartość uzyskał wskaźnik cząstkowy *Stopień redukcji ryzyka* SI_{RR} (639 pkt). Stanowił on 33,1% całkowitego wskaźnika analizowanego procesu SI i 31,7% maksymalnego wskaźnika SI procesu katamaran. Punktacja przedstawiona w tabeli 4 wskazała, że suma opcji bezpieczeństwa charakteryzujących etapy technologiczne obejmujące bezpieczeństwo procesu SI_{BS}, oraz bezpieczeństwo obsługi SI_{SW} wynosi 270 pkt (24,3% całkowitej wartości SI i 24,1% wartości maksymalnej).

Metodę jakości kompleksowej można zaproponować do oceny wskaźnika jakości SI poziomu bezpieczeństwa do oceny urządzeń i systemów produkcyjnych na poziomie mikro. Jednym z innowacyjnych aspektów jest kategoryzacja proponowanych opcji na sześć kategorii [10,11]. Przy obliczaniu wartości całkowitej jakości wskaźnika bezpieczeństwa jako cząstkowych wskaźników bezpieczeństwa uwzględniono sześć analizowanych kategorii opcji. Ważenie poszczególnych opcji zostało dokonane w oparciu o czynniki ustalone przez panel ekspertów. Wyniki pokazują również, w jaki sposób proponowana metoda może dawać realistyczne wyniki przy jedynie ograniczonej szczegółowości danych wejściowych [12,13]. Zaproponowana metoda oceny wskaźnika jakości poziomu bezpieczeństwa procesów projektowania złożonych wyrobów technicznych na poziomie mikro, biorąc pod uwagę główne wskaźniki jakości, zapewnia rozsądny wybór najbardziej akceptowalnej opcji spośród pozostałych metod badawczych [14,15].

Wnioski

Opisane ograniczenia związane z charakterem eksploatacji jednostek pływających spowodowały, że opracowano innowacyjny układ napędowy wykorzystujący cztery źródła napędu w tym ogniwo wodorowe i panele fotowoltaiczne, źródła zero emisyjne. Takie rozwiązania nie są stosowane obecnie w klasie jednostek pływających, która jest przedmiotem projektu. Główną zaletą ogniwa jest ich bez emisyjność. Przebywanie na obecnie budowanym w ramach realizowanego projektu katamaranie motorowym w każdym momencie będzie całkowicie bezpieczne dla człowieka. Katamaran wykorzystujący jako główne źródło energii ogniwa paliwowe jest całkowicie ekologiczny; nie emituje żadnych szkodliwych dla zdrowia i samopoczucia człowieka substancji.

- Zestawiając charakterystykę pracy ogniwa paliwowych, generatorów oraz ogniwa fotowoltaicznych odpowiednio z parametrami

silników elektrycznych, przez odpowiednie opracowanie sterowania można znacząco obniżyć maksymalną konieczną moc ogniwa paliwowych, ich masę i rozmiary zapewniając zbliżony moment obrotowy do klasycznego silnika spalinowego. Jednym z kryteriów opracowanego sterowania napędem jest minimalizacja emisji związków szkodliwych oraz zapewnienie maksymalnego zasięgu jednostki pływającej. Cel ten planowany jest do osiągnięcia głównie przez odpowiednie kierowanie wytwarzania energii w układzie, w zależności od zaistniałych warunków, np. wykorzystanie tylko ogniwa paliwowych w obszarach wymagających ograniczonej emisji, wykorzystanie dwóch lub trzech źródeł (ogniwa i generatory LPG i ON) w warunkach konieczności zwiększenia zasięgu. Napęd konstruowany jest do pracy w trybie automatycznym tj. uruchomienie ogniwa paliwowego nie będzie wymagało zewnętrznego zasilania, ale taka możliwość będzie dostępna. Energia do uzyskania temperatury pracy ogniwa będzie pochodzić z akumulatora wykorzystywanego do rozruchu generatorów spalinowych oraz zasilania w energię innych układów katamaranu.

Metoda jakości kompleksowej zaproponowana do oceny poziomu bezpieczeństwa obsługi wykorzystania katamaranu pozwala na kategoryzację proponowanych opcji oceny na sześć kategorii. Przy obliczaniu wartości całkowitej jakości wskaźnika bezpieczeństwa uwzględniono sześć analizowanych kategorii opcji. Oceniana metoda pozwoliła oszacować wskaźnik całkowitego bezpieczeństwa SI procesu wykorzystania katamaranu na 92,9% maksymalnej możliwej maksymalnej wartości poziomu bezpieczeństwa, co jest oceną bardzo wysoką. Oznacza to że, nowe technologie wykorzystywane na budowanym katamaranie są w pełni bezpieczne i przyjazne dla środowiska i człowieka.

Finansowanie

Badania zostały sfinansowane przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju - projekt badawczy w ramach programu Inteligentny Rozwój (umowa nr POIR.01.04.01.00-0067/20).



Literatura

15. Międzynarodowa Konwencja o zapobieganiu zanieczyszczeniu morza przez statki, 1973/1978 MARPOL, 2015
16. Międzynarodowa Konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu 1974, SOLAS, 2015
17. Międzynarodowa Konwencja o wymaganiach w zakresie wykształcenia marynarzy, wydawania im świadectw oraz pełnienia wacht, 1978, sporządzona w Londynie dnia 7 lipca 1978 r.
18. Haarlemmer, G., Boissonnet, G., Imbach, J., Setier, P. A., Peduzzi, E. 2012. Second generation BtL type biofuels – a production cost analysis. *Energy & Environmental Science*, 5(9), 8445. doi:10.1039/c2ee21750c
19. Makara, A., Generowicz, A., Kowalski, Z. 2019. Assessment and comparison of technological variants of the sodium tripolyphosphate production with the use of multi-criteria analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16:4, 2069–2082
20. Niemiec, A. 2014. Zagrożenia bezpieczeństwa pracy pracowników zatrudnionych na komunalnych składowiskach odpadów. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej*, 62
21. Kowalski, Z. 2001. Evaluation of Options of Production Process Modernisation on the Example of the Sodium Chromate Production Process. *P. J. Chem. Technol.* 3 (4), 20-28.
22. Kowalski Z, Kulczycka J, Verhé R, Desender L, De Clercq G, Makara A, Generowicz N and Harazin P (2022), Second-generation biofuel production from the organic fraction of municipal solid waste. *Front. Energy Res.* 10:919415. doi: 10.3389/fenrg.2022.919415
23. Kowalski, Z., Makara, A., Henclik, A., Kulczycka, J., Cholewa. 2020. M. Comparative evaluation of sodium tripolyphosphate production technologies with the use of a complex quality method. *P. J. Chem. Technol.* 22, 4, 48–54, doi:10.2478/pjct-2020-0038.
24. Azevedo, S., Godina, R., Matias, J. 2017. Proposal of a sustainable circular index for manufacturing companies. *Resources* 6, 63. doi:10.3390/resources6040063
25. Bhuiya, M. M. K., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., Azad, A. K. 2016. Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel—Part: 1 selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1109–1128. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.163.
26. Guide to managing risks in wineries September 2016. Health & Safety Risk Assessment Guidelines for Wineries Catalogue No. SW08232 SafeWork NSW, 92–100 Donnison Street, Gosford, NSW 2250 Locked Bag 2906, Lisarow, NSW 2252 | Customer Service Centre 13 10 50 Website www.safework.nsw.gov.au © Copyright SafeWork NSW 0416.
27. Seruga, P. 2014. Zagrożenia w proponowanych zmianach prawnych dla biologicznego przetwarzania odpadów. *Nauki inżynierskie i technologie* 2(13), ISSN 2080-5985.
28. Sheetal, S., Meghendra, S., Ashwani, K. 2018. Global warming and climate change: next generation biofuels and role of biotechnology. *International Journal of Life science & Pharma Research*, 8:2, ISSN 2250-0480.
29. Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Inda, C. S., Sharma, S., Sharma, P. K., & Jhalani, A. 2021. A comprehensive review of physicochemical properties, production process, performance and emissions characteristics of 2nd generation

Streszczenie

Transport morski stanowi podstawę światowej gospodarki. Nowe wymagania prawne i środowiskowe powodują poszukiwanie nowoczesnych i innowacyjnych napędów, które mogą być wykorzystywane w jednostkach pływających. Wraz z rozwojem nowych technologii istotne znaczenie ma kwestia bezpieczeństwa i ryzyka wynikającego z zastosowania nowoczesnych instalacji. Jednym z kryteriów właściwego sterowania napędem jest minimalizacja emisji związków szkodliwych oraz zapewnienie maksymalnego zasięgu jednostki pływającej. Cel ten realizowany może być przez odpowiednie wytwarzanie energii w układzie, w zależności od zaistniałych warunków, np. wykorzystanie tylko ogniw paliwowych w obszarach wymagających ograniczonej emisji, wykorzystanie dwóch lub trzech źródeł (ogniwa i generatory LPG i ON) w warunkach konieczności zwiększenia zasięgu. W artykule nowe rozwiązania dla jednostki pływającej typu katamaran poddano ocenie ryzyka i bezpieczeństwa wykorzystując metodę jakości kompleksowej.

Słowa kluczowe: transport morski, ocena ryzyka, katamaran

Abstract

Maritime transport is the basis of the world economy. New legal and environmental requirements result in the search for modern and innovative drives that can be used in vessels. With the development of new technologies, the issue of safety and risk resulting from the use of modern installations is important. One of the criteria for proper drive control is to minimize the emission of harmful compounds and ensure the maximum range of the vessel. This goal can be achieved by appropriate energy generation in the system, depending on the existing conditions, e.g. using only fuel cells in areas requiring limited emissions, using two or three sources (LPG and diesel cells and generators) when it is necessary to increase the range. In the article, new solutions for a catamaran-type vessel were subjected to a risk and safety assessment using the comprehensive quality method.

Keywords: maritime transport, risk assessment, catamaran

Spis Treści

dr hab. Joanna Kulczycka, dr hab. inż. Anna Lewandowska, Jędrzej Kasprzak, mgr inż. Natalia Generowicz - Caba EFEKTYWNOŚĆ ŚRODOWISKOWA W CYKLU ŻYCIA JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH, W TYM WODOROWYCH – PRZEGLĄD BADAŃ LCA	3
dr hab. inż. Andrzej Ziółkowski, prof. dr hab. inż. Paweł Fuć, dr hab. inż. Łukasz Rymaniak, prof. PP, dr inż. Michał Dobrzyński, dr inż. Maciej Siedlecki, mgr inż. Aleks Jagielski WODOROWE UKŁADY NAPĘDOWE STOSOWANE W JEDNOSTKACH PŁYWAJĄCYCH.....	11
prof. dr hab. Zygmunt Kowalski, dr hab. Joanna Kulczycka, mgr Agnieszka Nowaczek ANALIZA RYZYKA I BEZPIECZEŃSTWA DLA WIELONAPĘDOWYCH JEDNOSTEK PŁYWAJĄCYCH Z WYKORZYSTANIEM OCENY JAKOŚCI KOMPLEKSOWEJ.....	17

WYDAWCA: KRAKOWSKIE TOWARZYSTWO

TECHNICZNE 30-563 Kraków, ul. Malborska 10/6

Redaguje: Komitet

Redaktor Naczelny: dr **OLGA JANIKOWSKA**, IGSMiE PAN, Kraków, e-mail: olgajan@min-pan.krakow.pl

Z-ca Redaktora Naczelnego: dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**, prof. AGH

Sekretarz: mgr inż. **NATALIA GENEROWICZ- CABA**, IGSMiE PAN, Kraków

Redaktor zeszytu nr 197:

dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**, prof. AGH

Kolegium Redakcyjne:

dr inż. **JERZY BANAS**

mgr inż. **MIECZYSLAW MAJCHER**

dr inż. **WIESLAWA STYKA**

Redakcja Naukowa:

dr hab. inż. **AGNIESZKA GENEROWICZ**, prof. PK,

dr hab. inż. **NATALIA IWASZCZUK**, prof. AGH,

dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**, prof. AGH,

prof. **GENNADIY PIVNYAK**,

prof. **ROMAN EMILIAN DYCHKOVSKYI**,

prof. **NATALIIA IVANIVNA SHTEMENKO**,

prof. dr hab. inż. **RYSZARD TADEUSIEWICZ**

Redaktor techniczny - skład i łamanie tekstu: mgr **MAGDALENA BYRTEK**

Redakcja nie zwraca nadesłanych materiałów.

W publikowanych artykułach redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania skrótów.

Redakcja nie odpowiada za treść ogłoszeń.

© Copyright by Krakowskie Towarzystwo Techniczne 2024

ISSN 1425-8390

NR INDEKSU 334006