

Technologie zeroemisyjne dla zastosowań w marynistyce

Streszczenie. Celem niniejszej pracy jest analiza obecnie rozwijanych technologii zero emisyjnych dostępnych dla sektora marynistycznego mających wpływ na obniżenie śladu węglowego. Szczegółowo opisane zostały alternatywne rozwiązania napędzające dekarbonizację tego sektora oraz zaproponowana została możliwość zastosowania odnawialnych źródeł energii jako elementu wspomagającego zieloną transformację.

Abstract. This paper aims to analyze the currently developed zero-emission technologies available for the maritime sector that have an impact on reducing the carbon footprint. Alternative solutions driving the decarbonization of this sector have been described in detail and the possibility of using renewable energy sources as an element supporting the green transition has been proposed. (**Zero-emission technologies for marine applications**).

Słowa kluczowe: dekarbonizacja; technologie zeroemisyjne; odnawialne źródła energii; ogniwa paliwowe.

Keywords: decarbonization; zero-emission technologies; renewable energy sources; fuel cells.

Wstęp

Przemysł marynistyczny, uzależniony jest w głównej mierze od tradycyjnych paliw kopalnych, jednak w związku z potrzebą łagodzenia klimatu przechodzi znaczącą transformację. W miarę jak świat poszukuje czystszych i bardziej zrównoważonych źródeł energii, zielone technologie coraz częściej znajdują zastosowanie w przemyśle morskim. Wśród nich rozwiązania w zakresie zielonej energii rewolucjonizują sposób działania statków, portów i konstrukcji w rejonie przybrzeżnym. Od energii wiatrowej i słonecznej po energię pływów i fal, potencjał zielonej energii w zastosowaniach morskich jest ogromny i obiecujący.

Jednym z najbardziej widocznych przejawów wykorzystania zielonej energii w sektorze morskim jest energetyka wiatrowa. Systemy napędzane siłą wiatru, takie jak żagle i nowoczesne technologie wspomaganie wiatru, takie jak wirniki Flettnera i żagle latawcowe, są integrowane ze statkami w celu zmniejszenia zużycia paliwa i emisji. Systemy te wykorzystują energię wiatru jako uzupełnienie tradycyjnych metod napędu, oferując znaczne oszczędności paliwa i redukcję emisji. Ponadto morskie farmy wiatrowe stają się coraz bardziej powszechne, dostarczając energię odnawialną do zasilania społeczności przybrzeżnych i instalacji morskich.

Energia słoneczna to kolejne obiecujące ekologiczne rozwiązanie do zastosowań morskich. Panele słoneczne zainstalowane na pokładach statków, dachach, a nawet żaglach mogą generować energię elektryczną do zasilania systemów pokładowych, zmniejszając zależność od paliw kopalnych. Ponadto zasilane energią słoneczną boje i pomoce nawigacyjne przyczyniają się do bezpieczniejszych i bardziej zrównoważonych operacji morskich, szczególnie w odległych lub wrażliwych pod względem środowiskowym obszarach, gdzie tradycyjne źródła energii są niepraktyczne.

Przypływy i odpływy oraz ciągły ruch fal mają ogromny potencjał do generowania czystej energii. Konwertery energii pływów i urządzenia wykorzystujące energię fal wychwytyują energię kinetyczną prądów i fal oceanicznych, przekształcając ją w energię elektryczną. Technologie te mogą być wdrażane w pobliżu wybrzeży lub na morzu, zapewniając niezawodne i przewidywalne źródło energii odnawialnej. Ponadto zintegrowane rozwiązania, takie jak turbiny pływowe, mogą wykorzystywać energię ze strumieni pływowych, oferując ciągłe i przyjazne dla środowiska dostawy energii dla społeczności przybrzeżnych i infrastruktury morskiej [1].

Wykorzystanie zielonej energii w zastosowaniach morskich przynosi znaczne korzyści, ale wiąże się również z wyzwaniami. Wysokie koszty początkowe, ograniczenia technologiczne i przeszkody regulacyjne często zniechęcają do powszechnego wdrażania. Jednak nieustanne wysiłki w zakresie badań i rozwoju, w połączeniu ze wspierającymi politykami i zachętami, napędzają innowacje i ułatwiają wdrażanie technologii ekologicznych. Inicjatywy współpracy między rządami, zainteresowanymi stronami z branży i instytucjami badawczymi mają zasadnicze znaczenie dla przezwyciężenia barier i przyspieszenia przejścia na bardziej ekologiczny sektor morski.

Alternatywne rozwiązania napędzające dekarbonizację sektora marynistycznego

Dwutlenek węgla w 53% stanowi główny składnik gazów cieplarnianych emitowanych do atmosfery. Technologie wychwytywania tego składnika odgrywają zatem kluczową rolę w ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych i łagodzeniu zmiany klimatu. Z technologicznego punktu proces wychwytu dwutlenku węgla można przeprowadzić poprzez np.:

- wychwyt po spalaniu;
- wychwyt przed spalaniem;
- spalanie tlenowo-paliwowe;
- spalanie w pętli chemicznej;
- separacja membranowa.

Aby zapewnić zamknięty obieg zapewniając kontrolę nad emisją dwutlenku węgla, prowadzono kilka działań badawczo-rozwojowych w celu łagodzenia emisji gazów cieplarnianych. Zwraca się uwagę, że jego zastosowanie można podzielić na cztery kategorie:

- a) surowiec do produkcji polimerów i węglanów;
- b) surowiec do produkcji benzyny i oleju napędowego).
- c) eksploatacja biologiczna (np. źródło węgla dla wzrostu biomasy np. mikroalg);
- d) zastosowanie konwencjonalne (np. rozpuszczalnik).

Dodatkowym aspektem wymienianym jako procesy łagodzenia emisji dwutlenku węgla jest wykorzystanie paliw o większej czystości, niwelując wprowadzanie dodatkowych zanieczyszczeń takich jak tlenki siarki i azotu, utrudniając proces wychwytu samego dwutlenku węgla (CO₂).

Istotnym aspektem mającym bezpośrednie przełożenie na możliwość stosowania przedstawionych wyżej wymienionych technologii jest ich poziom zaawansowania oraz możliwość do użycia na skale przemysłowej.

Najbardziej rozwiniętymi technologiami są procesy wychwytu CO₂ po spalaniu gazu naturalnego, procesie produkcji etanolu na drodze fermentacji oraz możliwość skalowania oraz wciąż powszechne stosowanie spalania paliw kopalnych.

Technologią, która w większości jest dostępna w fazie demonstracji z niewieloma rozwiązaniami w zaawansowanej fazie rozwoju czy zastosowanej jako ostateczne rozwiązanie są procesy membranowe. Natomiast jako najmniej rozwiniętą technologią są procesy chemicznego wiązania CO₂ poprzez reakcje chemiczne prezentowane są na etapie laboratoryjnych stanowisk pilotażowych [2]. Orientacyjny koszt wychwytu dwutlenku węgla z powietrza w alkalicznym absorberze wynosi ok. 94-232 USD, a w przypadku stałego absorbera wynosi ok. 600 USD [3].

Alternatywą dla tradycyjnych paliw kopalnych stosowanych obecnie w marynistyce jest amoniak. W procesie konwersji energii chemicznej na energię elektryczną w ogniwie paliwowym w reakcji uczestniczą amoniak i tlen z powietrza, a produktami reakcji jest azot i woda. Proces ten nie generuje bezpośrednio żadnych szkodliwych gazów cieplarnianych. Ponadto amoniak charakteryzuje się wysoką gęstością energetyczną oraz powstaje w stosunkowo prostym procesie syntezy. Olbrzymią niedogodnością w stosowaniu amoniaku jest kwestia jego korozyjności oraz toksyczności. Personel obsługujący stacje na pokładzie statków oraz załoga portowa musi być specjalnie przeszkolona oraz wyposażona w urządzenia ochronne minimalizujące ryzyko rozszczelnienia i wycieku amoniaku do środowiska. Niestety ze względu na fakt potrzeby stosowania wodoru do produkcji amoniaku, który dla spełnienia warunku przyjazności dla środowiska sprawia, że amoniak jako paliwo jest droższe niż tradycyjne paliwa.

Amoniak jako paliwo w dużej mierze stanowi źródło wodoru, które następnie konwertowane jest w energię elektryczną przy wykorzystaniu ogniw paliwowych. Dostępne są technologie ogniw paliwowych, które zapewniają produkcję na poziomach od kW do kilku MW dla zastosowań związanych z transportem jak i wariantów stacjonarnych. Z dostępnych różnego rodzaju technologii ogniw paliwowych na szczególną uwagę zasługują ogniwa paliwowe z polimerowym elektrolitem w postaci membrany (ang. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEMFC), na bazie kwasu fosforowego (ang. Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC), ze stopionym węglanem (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) oraz na bazie stałych tlenków (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC). Z przedstawionych technologii tylko PEMFC wykorzystuje procesy w temperaturze od pokojowej do 80 °C ze sprawnością na poziomie ok. 40% i może być wykorzystywane w transporcie. PAFC jest technologią, która operuje w wyższym zakresie temperatur w okolicy 200 °C na podobnym poziomie sprawności konwersji. Niestety ze względu na stosunkowo niską temperaturę pracy nie jest możliwe zastosowanie bezpośrednio amoniaku jako paliwa, a dostarczany wodór do ogniwa musi wykazywać się wysoką czystością. Dodatkowo ze względu na kwasowy charakter procesów zachodzących w PEMFC i PAFC, zanieczyszczenie wodoru amoniakiem może spowodować znaczne obniżenie sprawności działania ogniwa paliwowego. MCFC i SOFC operują w znacznie wyższym reżimie temperatur, odpowiednio 650 °C, lub w zakresie 600-1000 °C, co powoduje, że można użyć amoniak bezpośrednio bez potrzeby przeprowadzania osobno procesu rozkładu amoniaku. PAFC, MCFC i SOFC ze względu na złożoność systemu stosowane są wyłącznie jako instalacje stacjonarne.

Bilans energetyczny produkcji jednej tony amoniaku wynosi 8-12 MWh przy zastosowaniu tradycyjnych paliw kopalnych lub 10-12 MWh stosując wodór wytworzony w procesach opartych na odnawialnych źródłach energii (energii słonecznej i wiatrowej). Biorąc pod uwagę najkorzystniejszy scenariusz z 1 MWh energii odnawialnego użytej do syntezy amoniaku odzyskuje się 326 kWh w postaci energii elektrycznej już po ponownej konwersji amoniaku w energię elektryczną [4].

Kolejną alternatywą jest bezpośrednie stosowanie paliwa wodorowego, które coraz częściej postrzegane jako ważne rozwiązanie dla dekarbonizacji żeglugi. Paliwo wodorowe produkowane przy użyciu odnawialnych źródeł energii spala się przy zerowej emisji dwutlenku węgla, a jedynym produktem ubocznym jest woda. Wodór jako paliwo ma również około 3 razy większą gęstość energii niż ciężki olej opałowy i jest nietoksyczny, bezbarwny i bezwonny. Wodór jest jednak gazem łatwopalnym i łatwo dyfuzyjnym; Aby wykorzystać go jako paliwo, załogi muszą być specjalnie przeszkolone, a statki musiałyby wdrożyć kosztowną infrastrukturę do przechowywania wodoru w temperaturach kriogenicznych (-253 stopni C (-423 stopni F) poprzez zwiększanie ciśnienia. Te obawy dotyczące bezpieczeństwa, a także wysokie koszty modernizacji i eksploatacji, stanowią bariery we wdrażaniu, które są wspólne z amoniakiem.

Istnieje kilka kwestii, które należy wziąć pod uwagę przy promowaniu morskiego zastosowania ogniw paliwowych i wodoru. Problemy zostały podzielone przez Fu i współautorów na cztery aspekty:

1. kluczem jest dobór odpowiedniej technologii do zastosowań morskich w kontekście ogniw paliwowych do specyficznych zastosowań, np. transport pasażerski, towarowy. Zwykle ogniwa paliwowe stanowią element większego systemu hybrydowego i zwykle współpracują z innymi źródłami zasilania do napędzania statków. Optymalna konfiguracja systemu może zapewnić wykonalność systemu, a zaawansowane metody modelowania i sterowania mogą wydobyć potencjał systemu.

2. produkcja zielonego wodoru ze źródeł odnawialnych, magazynowanie wodoru i morski transport wodorowy. Produkcja, magazynowanie i transport wodoru to tematy z którymi przemysł boryka się od początku stosowania technologii ogniw paliwowych zasilanych wodorem, które również dotyczą transportu morskiego.

3. Koszt samych ogniw paliwowych i zastosowań morskich w energetyce wodorowej, w tym koszt paliwa, koszt budowy systemu, koszt przestrzeni ładunkowej i tak dalej.

4. Regulacje prawne oraz wymogi bezpieczeństwa ogniw paliwowych zasilanych wodorem w żegludzie morskiej [5].

W celu zapewnienia jak najwyższej sprawności ogniw paliwowych zasilanych wodorem zaleca się stosowanie wodoru w najczystszej postaci przy jak najmniejszej ilości etapów przejściowych. Każdy dodatkowy etap oczyszczania wodoru obniża sprawność całego systemu, co musi być brane pod uwagę w szczególności jeśli chodzi o pozyskiwanie wodoru w procesie elektrolizy bezpośrednio na pokładzie statku [6].

Zero-emisyjność jako „Święty Grań” zielonej transformacji

Osiągnięcie całkowitej zero-emisyjności stosowanych technologii jest na obecnym stanie wiedzy niemożliwe ze względu na wiele ograniczeń dotyczących zidentyfikowanych pięciu płaszczyzn: (i) zarządzania ryzykiem dotyczącym bezpieczeństwa i ryzykiem

operacyjnym, (ii) regulacje prawne, (iii) rozwój rynku, model biznesowy i innowacje finansowe, (iv) rozwój i adaptacja technologii, (v) analiza rynku.

Zarządzanie ryzykiem bezpieczeństwa i ryzykiem operacyjnym jest dominującym obszarem płaszczyzny związanych z infrastrukturą paliwową, w której występują luki. Nadal brakuje wiedzy na temat bezpiecznego obchodzenia się z paliwem pochodzącym z odnawialnych źródeł energii, odpowiednich norm i mechanizmów bezpieczeństwa, a także szkoleń i certyfikacji pracowników w zakresie obchodzenia się z nowymi paliwami podczas składowania i magazynowania w obszarze portów. Zidentyfikowano na podstawie analizy obecnego stanu potrzebę nowatorskiego podejścia, aby zapewnić portom wystarczającą elastyczność funkcjonowania, w celu planowania inwestycji w ich infrastrukturę, przy jednoczesnym zapewnieniu kompatybilności systemów między statkami dokującymi a portowymi urządzeniami do tankowania i zasilaczami.

Luki w zakresie wymaganych regulacjach i polityce regionalnej, krajowej i światowej dotyczą braku wspólnych przepisów portowych i procedur dotyczących składowania paliw alternatywnych, a także w okresie krótkoterminowym rozwiązań zachęcających wprowadzanie inwestycji w infrastrukturę paliwową.

Natomiast, sektor prywatny musi wprowadzać innowacje w zakresie rozwoju rynku, modeli biznesowych i innowacji finansowych, aby rozwiązać problem braku odpowiednich strategii handlowych dla nowych paliw.

Rozwój i adaptacja dostępnych technologii mają kluczowe znaczenie dla połączenia infrastruktury portowej z lądową infrastrukturą energetyczną. Projekty, materiały, komponenty, procedury magazynowania nowych paliw muszą być w miarę możliwości stopniowo dostosowywane, a w przypadku ich braków opracowywane. Zarówno sektor publiczny, jak i prywatny muszą ustanowić nowe sposoby pracy.

Analiza rynku pod kątem luk w innowacjach ujawnia potrzebę przeglądu istniejącej i planowanej infrastruktury składowania, a także mechanizmu śledzenia rozwoju w kluczowych portach. Istnieje szczególna potrzeba zapewnienia widoczności dostaw lub zdolności produkcyjnych dla przyszłych paliw w wybranych kluczowych portach.

Aby uzyskać całkowicie poziom zerowej emisyjności w grupie zarządzania ryzykiem dotyczącym wszystkich pięciu płaszczyzn, w kontekście statków, paliwa i infrastruktury portowej określono konkretne luki, a dotyczą szczegółowo m. in.:

- braku wiedzy na temat kwestii bezpieczeństwa związanych z amoniakiem między sektorem morskim a odpowiednimi gałęziami przemysłu;
- braku dojrzałych rozwiązań w zakresie składowania amoniaku i doświadczenia w procesie bunkrowania;
- potrzeby norm bezpieczeństwa, wszystkich przepisów dotyczących statków, a także nakazowych przepisów dotyczących wodoru;
- potrzeby wprowadzenia przepisów normatywnych dotyczących amoniaku jako paliwa
- konieczności zmiany obecnych norm NOx pod względem dopuszczalnego zakresu emisji NOx;
- potrzeby ustanowienia norm emisji metanu;
- braku zaktualizowanych metod bezpieczeństwa na pokładzie, instrukcji operacyjnych i przeglądu programów edukacyjnych
- potrzeby dalszych badań i oceny w celu rozwiązania i złagodzenia istotnych problemów związanych z bezpieczeństwem związanych z wodorem, w tym palności, niskiej aktywacji i energii zapłonu;

- niskiego zaufanie społeczności portowych i zainteresowanych stron spoza tradycyjnych operatorów do produkcji i magazynowania amoniaku i wodoru;
- braku jasnych i dobrze zdefiniowanych globalnych przepisów dotyczących ograniczania ryzyka toksyczności (metanolu i amoniaku) w odniesieniu do składowania;
- bezpiecznego magazynowanie i tankowanie wodoru i amoniaku w dużych ilościach;
- ram/wytycznych mających na celu zapobieganie zanieczyszczeniu metanolem (np. chlorkiem)
- identyfikacji luk technologicznych i bezpieczeństwa w zakresie transferu amoniaku i wodoru do systemów magazynowania paliwa
- braku norm dotyczących stref bezpieczeństwa/alarmowych w portach i wokół nich, rodzajów budynków, które można/należy budować, potrzebnych mechanizmów bezpieczeństwa;
- braku zrozumienia barier społecznych dla obaw dotyczących bezpieczeństwa amoniaku i wodoru;
- braku zrozumienia wymogów bezpieczeństwa dotyczących składowania nowych paliw;
- braku szkoleń i certyfikacji pracowników w zakresie obsługi nowych paliw w bunkrowaniu i portach
- potrzeby testowania rozwiązań technologii wytwarzania alternatywnych paliw w kontekście sprawności konwersji na energię elektryczną, czasu funkcjonowania i kosztów eksploatacji;
- potrzeby rozwoju technologii w zakresie dostarczania paliwa i magazynowania w kontekście stosowanych materiałów zapewniający szczelność instalacji oraz bezpieczeństwo w ich użytkowaniu;
- dostępności wiedzy w odniesieniu do łańcucha produkcji i dostaw oraz parametrów biopaliw lub alternatywnych paliw dla statków czy instalacji portowych.

Zielona transformacji sektora morskiego jest zagadnieniem bardzo szerokim i wymaga globalnego podejścia do wszystkich kwestii poruszonych powyżej. Rozwój technologii i wiedzy w zakresie technologii, prawa i aspektów społecznych będzie nakładał obowiązek aktualizacji okresowej stanu wiedzy a wielopłaszczyznowe do zagadnień będzie niewątpliwie kluczem do sukcesu [7-9].

Podsumowanie i wizja przyszłości

Istnieją współzależności i powiązania między lukami na poszczególnych płaszczyznach oraz pomiędzy nimi. Misja zero-emisyjności technologii powinna podkreślać i wykorzystywać takie powiązania w planie działania w celu opracowania spójnej mapy drogowej określające poszczególne etapy i ich kamienie milowe. Przykładami wymagających globalnej kooperacji są projekty oceaniczne i dotyczące rozwoju zielonych korytarzy żeglugowych, które w istotny sposób powinny być powiązane z regionalnymi planami rozwoju.

Jak już wcześniej wspomniano, plan działania, czyli swoista mapa drogowa ma na celu objęcie innowacji we wszystkich płaszczyznach mając na względzie, że nie wszystkie potrzeby w zakresie innowacji są dobrze dostosowane do zakresu i zasobów misji. Na przykład dekarbonizacja żeglugi w dużym stopniu opiera się na wsparciu politycznym i mechanizmach regulacyjnych, ale rolą misji nie jest tworzenie takich polityk. Plan działania będzie koncentrował się na wyeliminowaniu tych luk w innowacjach, które najlepiej odpowiadają misji i znajdują się na kluczowej drodze do osiągnięcia jej celów.

Osiągnięcie celów wyznaczonych dla żeglugi międzynarodowej zależy od szerokiej koalicji i wysiłków globalnej współpracy publiczno-prywatnej. Współpraca z członkami misji i przemysłem ma kluczowe znaczenie dla opracowania planu działania. Misja będzie nadal współdziałać z kluczowymi podmiotami branżowymi – zarówno z sektora morskiego, jak i energetycznego – w celu opracowania i utrzymania odpowiedniego i priorytetowego planu działania. Członkowie misji będą inicjować działania i koordynować swoje działania zgodnie z planem działania i planem działania. Istotne jest również, aby te dwie publikacje stanowiły wytyczne dla dodatkowych prac tych podmiotów, które obecnie nie są jeszcze częścią misji, ale są częścią szerszego ekosystemu.

Należy nie zapominać o wspólnym przenikaniu się technologii odnawialnych źródeł energii, które jako stacjonarne rozwiązania powinny być wykorzystywane do wspierania technologii mobilnych stosowanych w żegludze, z uwzględnieniem uwarunkowań geograficzno-środowiskowych, które pozwolą na wykorzystanie naturalnych zasobów np. siły wiatru, energii słonecznej lub siły pływów do generowania energii elektrycznej.

Autorzy: dr Krzysztof A. BOGDANOWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: bogdanowicz@witi.wroc.pl; prof. dr hab. Agnieszka IWAN, Akademia Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki, Wydział Nauk o Bezpieczeństwie, ul. Czajkowskiego 109, 51-147 Wrocław, e-mail: agnieszka.iwan@awl.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Melnyk, O., Onishchenko, O., & Onyshchenko, S. (2023). Renewable Energy Concept Development and Application in Shipping Industry. *Lex Portus*, 9(6), 15–24. <https://doi.org/10.26886/2524-101X.9.6.2023.2>
- [2] Vaz, S., Rodrigues de Souza, A.P., Lobo Baeta, B.E. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. *Cleaner Engineering and Technology* 2022, 8, 100456, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>.
- [3] Li, M., Irtem, E., Iglesias van Montfort, HP. et al. Energy comparison of sequential and integrated CO₂ capture and electrochemical conversion. *Nat Commun* 13, 5398 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33145-8>.
- [4] Giddey, S., Badwal, S. P. S., Munnings, C., Dolan, M.. Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5, 11, 10231–10239. doi:10.1021/acssuschemeng.7b02219
- [5] Fu, Z., Lu, L., Zhang, C., Xu, Q., Zhang, X., Gao, Z., Li, J. Fuel cell and hydrogen in maritime application: A review on aspects of technology, cost and regulations. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2023, 57, 103181, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103181>.
- [6] Bacquart, T., Moore, N., Wilmot, R., Bartlett, S., Morris, A.S.O., Olden, J., Becker, H., Aarhaug, T.A., Germe, S., Riot, P., et al. Hydrogen for Maritime Application—Quality of Hydrogen Generated Onboard Ship by Electrolysis of Purified Seawater. *Processes* 2021, 9, 1252. <https://doi.org/10.3390/pr9071252>.
- [7] Shi, J., Zhu, Y.; Feng, Y.; Yang, J.; Xia, C. A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping: Green Hydrogen, Ammonia, and Methanol Production and Utilization in Marine Engines. *Atmosphere* 2023, 14, 584. <https://doi.org/10.3390/atmos14030584>.
- [8] Harahap, F., Nurdawati, A., Conti, D., Leduc, S., Urban, F. Renewable marine fuel production for decarbonised maritime shipping: Pathways, policy measures and transition dynamics. *Journal of Cleaner Production* 2023, 415, 137906, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137906>.
- [9] Kim, J., Sovacool, B.K., Bazilian, M., Griffiths, S., Yang, M. Energy, material, and resource efficiency for industrial decarbonization: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science* 2024, 112, 103521, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103521>.