

doi:10.15199/48.2024.11.27

## Zastosowanie OZE w kontekście dekarbonizacji portów morskich – uwarunkowania techniczne na przykładzie instalacji fotowoltaicznej

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono przykłady zastosowania różnego typu odnawialnych źródeł energii elektrycznej stosowanych w portach morskich na świecie. Skupiono się na elektrowniach, w których energia pozyskiwana jest ze słońca, wiatru i wody. Zwrócono uwagę, że mimo rosnącego zainteresowania morską energetyką wiatrową obecnie w portach morskich na świecie dominują instalacje fotowoltaiczne. Z tego powodu w pracy przeprowadzono analizę sposobów montażu takiej instalacji na jej wydajność oraz wymiary. Z przeprowadzonych badań wynika, że sposób montażu paneli fotowoltaicznych ma krytyczny wpływ na powierzchnię instalacji, a głównym zasobem każdego portu jest właśnie przestrzeń, która jest przedmiotem obrotu.

**Abstract.** The paper presents examples of various types of renewable electric energy sources used in worldwide maritime ports. It focuses primarily on power plants where energy is harnessed from the sun, wind, and water. It notes that despite growing interest in offshore wind energy, photovoltaic installations currently dominate in the world's maritime ports. For this reason, the paper conducts also an analysis of how the installation method influence of the efficiency of such a system. The investigation shows that the method of mounting photovoltaic panels has a significant impact on the efficiency and size of the planned installation. *(The use of renewable energy in the context of decarbonization of seaports - technical conditions on the example of a photovoltaic installation)*

**Słowa kluczowe:** Fit for 55, dekarbonizacja, OPS, OZE, PV

**Keywords:** Fit for 55, decarbonization, OPS, OZE, PV

### Wstęp

W ostatnim czasie coraz więcej uwagi poświęca się zmianom klimatycznym. Stanowią one istotne zagrożenie środowiskowe, społeczne i ekonomiczne.

Jedną z przyczyn tych zmian jest działalność człowieka związana z rosnącym popytem na energię elektryczną. Kosztem tego popytu jest emisja szkodliwych substancji do środowiska w wyniku spalania węgla, ropy naftowej i gazu.

Jak wynika z danych podawanych przez Komisję Europejską średnia temperatura na świecie w 2019 roku była o 1,1 °C wyższa od temperatury panującej na świecie około 150 lat temu [1]. Dodatkowo, obserwuje się, że globalne ocieplenie rośnie o 0,2 °C na 10 lat [1]. Jak wynika z badań i analiz przedstawionych przez Komisję Europejską wzrost temperatury o 2 °C w stosunku do temperatury panującej

w okresie przedindustrialnym niesie ze sobą negatywne skutki dla środowiska naturalnego oraz zdrowia ludzi i zwierząt [2].

Z tego powodu społeczność i organizacje międzynarodowe rozpoczęły działalność w kierunku dekarbonizacji, której celem jest ograniczenie wzrostu globalnego ocieplenia do 1,5 °C w stosunku do wspomnianego okresu przedindustrialnego [2]. W przypadku Państw Unii Europejskiej, Parlament Unii Europejskiej przyjął zestaw wniosków ustawodawczych nazwany pakietem „Fit for 55” [3]. Celem wspomnianego pakietu jest redukcja emisji gazów cieplarnianych do 55% w 2030 r. (z obecnie planowanych 40%) oraz osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 r [3].

Jak wynika z raportu opublikowanego w dniu 13 marca 2024 roku przez Komisję Europejską [4] transport morski odpowiada za 3-4 % całkowitej emisji CO<sub>2</sub> w Europie. Oznacza to, że transformacja energetyczna będzie obejmowała cały sektor żeglugowy wraz z portami co zapisano także w ramach pakietu „Fit for 55” gdzie podkreślono, konieczność zmniejszenia intensywności emisji gazów cieplarnianych z paliw stosowanych przez sektor żeglugi o 2 % do 2025 roku oraz aż o 80 % do 2050 roku [3]. Osiągnięcie wskazanego celu będzie możliwe dzięki wdrożeniu systemów OPS (ang. Onshore Power

Supply) w portach, które pozwolą na zasilanie statków z lądu podczas ich postoju w porcie. Wymagać to będzie jednak zagwarantowania odpowiedniego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz opracowania i wdrożenia nowych technologii, lub rozwinięcie na szerszą skalę już istniejących, które będą wspierały systemy energetyczne w portach. Kierunek ten wydaje się być obiecujący dla odnawialnych źródeł energii elektrycznej (OZE).

Celem pracy jest przegląd odnawialnych źródeł energii elektrycznej zainstalowanych w portach morskich na świecie oraz wskazanie uwarunkowań technicznych dla najpopularniejszego rozwiązania jakim jest technologia fotowoltaiczna. Stąd też praca ta została podzielona na dwie części. Pierwsza część opisana w rozdziale 2 poświęcona została wskazaniu przykładów zastosowania różnego typu OZE w portach a w drugiej części, której poświęcony jest rozdział w rozdziale 3 opisano analizę wyboru systemu PV do potrzeb portu.

### OZE w portach morskich

Jak wynika z literatury [5-7], zastosowanie odnawialnych źródeł energii elektrycznej w portach nabiera znaczenia zwłaszcza w kontekście zwiększającego się zapotrzebowania portów na energię elektryczną, które związane jest z prowadzoną przez nie działalnością i wdrażaniem systemów OPS.

Dobór odpowiedniego rozwiązania podyktowany jest wieloma czynnikami jak. m.in. położenie portu, otoczenie inwestycyjne i infrastrukturalne, polityka państwa, zasoby itp.

Rozważając wybór technologii OZE należy mieć też na uwadze to, że głównym zasobem każdego portu jest jego przestrzeń i infrastruktura, która jest przedmiotem obrotu z kontrahentami w ramach działalności statutowej portu [5]. Teren portu można podzielić na część nawodną, nadbrzeże i lądową. Część nawodna i nabrzeża są bezpośrednio wykorzystywane przez cumujące statki do przeladunku a część lądowa stanowi zazwyczaj biura, warsztaty, parkingi i magazyny. Spośród wymienionych, obecnie jedynie część lądowa portu stwarza możliwości instalacji systemów OZE [5, 6].

W zależności od wspomnianych czynników, w niektórych portach najlepszym rozwiązaniem będzie zastosowanie paneli fotowoltaicznych, a w innym turbin wiatrowych lub rozwiązań mieszanych. W dalszej części niniejszego rozdziału zostaną opisane przykładowe instalacje alternatywnych źródeł energii w wybranych portach morskich z podziałem na rodzaj źródła energii.

### A. Systemy fotowoltaiczne

Panele fotowoltaiczne są jednym z najpopularniejszych źródeł bezemisyjnej energii elektrycznej. Instalowane są na dachach i ścianach domów i różnych obiektów, w tym także w portach [8]. Systemy fotowoltaiczne są szeroko stosowane w portach Europy południowej, ale w ostatnim czasie obserwuje się wzrost zainteresowania tym rozwiązaniem także w portach Europy północnej np. w takich jak Port w Amsterdamie, Port w Rotterdamie, Port w Göteborgu, Port Halsingborgu, Port w Kopenhadze czy port w Gdańsku [9].

Z kolei, w tabeli 1 zestawiono parametry przykładowych instalacji fotowoltaicznych znajdujących się w wybranych portach na świecie.

Jak można zauważyć z danych zestawionych w tabeli 1 instalacje fotowoltaiczne znajdują szerokie zastosowanie nie tylko w portach europejskich, ale są stosowane w największych portach na świecie, jak np. Port w Los Angeles, Port w Walencji. Można zauważyć, że największą moc generuje instalacja fotowoltaiczna znajdująca się w porcie w Walencji mimo zajmowania dużo mniejszej powierzchni w porównaniu do powierzchni instalacji w pozostałych portach [10-13].

Z kolei, jak wynika z [14] moc osiągnięta przez instalację PV znajdującą się w porcie w Singapurze pokrywa większość rocznego zapotrzebowania portu w zakresie typowego zapotrzebowania na moc. Ewentualne nadwyżki energii sprzedawane są do sieci operatora energetycznego.

Tabela 1. Zestawienie parametrów instalacji fotowoltaicznych w wybranych portach na świecie

Port	Moc	Łączna powierzchnia	Umieszczenie
Port w Los Angeles	3 MW	b.d.	Nabrzeże i dachy
Port w Amsterdamie	2 MW	260000	Dachy budynków portowych
Port w Rotterdamie	25 MW	b.d.	Dachy budynków portowych
Port w Walencji	12 MW	30000	Dachy budynków portowych
Port w Singapurze	9,6 MW	90750	Dachy budynków portowych

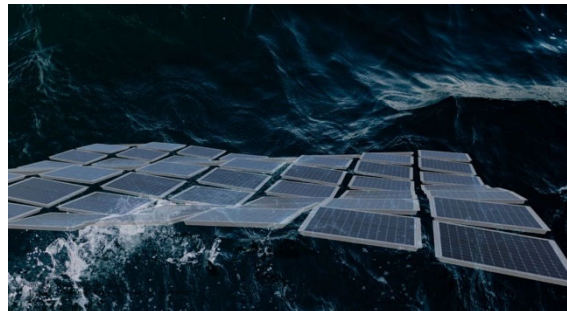
Z kolei, na rysunku 1 przedstawiono przykładową instalację fotowoltaiczną umieszczoną na jednym z nabrzeży Portu w Los Angeles. Instalacja ta znajduje się w na nabrzeżach 93A i B World Cruise Ship Terminal i zajmuje około 6600 m<sup>2</sup> [15].



Rys.1. Instalacja fotowoltaiczna na nabrzeżu w Porcie w Los Angeles [15]

W ostatnim czasie rośnie popularność pływających paneli fotowoltaicznych tworzących systemy instalowane m.in. na wodach przyportowych.

Pływające elektrownie słoneczne wytwarzają więcej energii elektrycznej niż systemy naziemne i dachowe ze względu na chłodzące działanie wody (rys. 2). Dodatkowo, ograniczają parowanie wody i rozwój glonów [16]. Ponadto do budowy pływających systemów fotowoltaicznych stosuje się polietylen o dużej gęstości, który jest odporny na promienie UV i korozję [17]. Jedną z takich instalacji znajduje się w porcie w Konstancy w Rumunii. Jest to instalacja o mocy elektrycznej 15 MW, która służy do zasilania części obiektów portowych i oświetlenia okolicznych terenów. Panele są wyposażone w pływaki i systemy kotwiczące oraz są odporne na działanie fal o wysokości do 1 m.



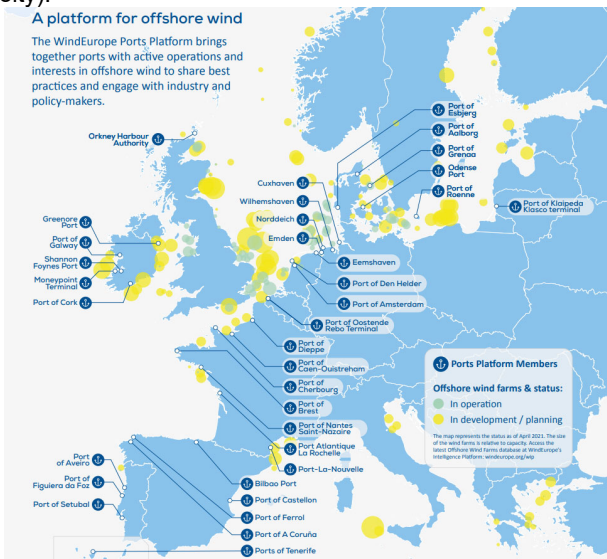
Rys.2. Instalacja fotowoltaiczna na wodzie [17]

Elektrownie słoneczne wydają się na obecnym etapie dekarbonizacji najlepszą formą systemów OZE, którą można wykorzystać na terenie portu. W szczególności, możliwość budowania instalacji PV zlokalizowanych na dużych przestrzeniach dachów hal magazynowych, warsztatów czy terenów zakwalifikowanych jako nieużytki wydaje się najlepszym rozwiązaniem, które pozwala efektywnie wykorzystać dostępną infrastrukturę portów i nie wymaga budowy nowych instalacji lub zajmowania przestrzeni, którą można wynająć komercyjnie na działalność portu.

### B. Morska energetyka wiatrowa

Morska energetyka wiatrowa cieszy się bardzo dużym zainteresowaniem ze względu na swój ogromny potencjał w zakresie szybkiego rozwoju wspomnianej technologii oraz możliwość uzyskania znacznie większej mocy od typowych rozwiązań. Dodatkowo, farmy wiatrowe tego typu charakteryzują się mniejszym wpływem na krajobraz, mniejszym ryzykiem konfliktów z użytkownikami gruntów oraz mniejszymi zakłóceniami w ekosystemach. Jak wynika z literatury [18] do 2020 r. łączna moc uzyskana za pomocą takich elektrowni wyniosła 35,3 GW [18]. Największa na świecie morska farma wiatrowa znajduje się w Wielkiej Brytanii. Jest to farma o mocy 1,2 GW. Dodatkowo w [18] wskazano, że 75% światowej mocy uzyskiwanej z morskich farm wiatrowych pochodzi z Wielkiej Brytanii (29%), Chin (28%) oraz Niemiec (22%). Z kolei, w raporcie [19] wskazano, że tylko Europa ma obecnie całkowitą zainstalowaną moc elektrowni wiatrowych na morzu wynoszącą 30,3 GW (marzec 2023 r.). Odpowiada to ponad 5954 turbinom wiatrowym podłączonym do sieci w 126 morskich farmach wiatrowych w 13 krajach. Zgodnie z prowadzoną polityką rządu europejskiego mającą na celu spełnienie założeń pakietu „Fit for 55” planuje się rozbudować farmy wiatrowe na morzu pozwalające uzyskać dodatkową moc na poziomie 150 GW [19].

Na rysunku 3 przedstawiono działające w Europie farmy wiatrowe (kolor zielony) i planowane do uruchomienia (kolor żółty).



Rys.3. Uruchomione i planowane do instalacji farmy wiatrowe w Europie [19]

Jak można zauważyć z mapy przedstawionej na rysunku 3 mimo największej generowanej mocy z farm wiatrowych znajdujących się w u wybrzeży Wielkiej Brytanii, to właśnie tam oraz w rejonie morza Bałtyckiego planuje się największe instalacje farm wiatrowych w Europie. Dodatkowo w [20] wskazano, że około 23 km od brzegu, na wysokości Choczewa oraz Łeby, powstanie farma wiatrowa Baltic Power. Morską farmę wiatrową Baltic Power będzie tworzyło 76 turbin o jednostkowej mocy 15 MW i wysokości ponad 200 metrów, pracujących na obszarze około 130 km<sup>2</sup>. Po zakończeniu budowy wspomniana farma ma produkować energię pozwalającą na zaspokojenie zapotrzebowania dla 1,5 mln gospodarstw domowych w energię elektryczną.

Farmy wiatrowe (rys. 4) wydają się drugą, najbardziej realną formą instalacji OZE, którą można wdrożyć w portach. Farmy wiatrowe wymagają budowy dedykowanych instalacji naziemnych, które zajmują dodatkowy teren i przestrzeń. Wymagają też specjalistycznego zabezpieczenia przed ruchem powietrznym, generując drgania i hałas. Ograniczenia te mogą być istotne w większości portów. Można rozważyć budowę turbin wiatrowych na falochronach, których przestrzeń jest znaczna i nie jest wykorzystywana do innych celów jak zabezpieczenie nabrzeża. W niektórych krajach falochrony podlegają dodatkowym regulacjom prawnym, które wykluczają inne ich wykorzystanie.



Rys.4. Elektrownia wiatrowa zlokalizowana na terenie portu i w morzu

### C. Energia wodna

Energia wodna uznawana także za odnawialne źródło energii elektrycznej, pozyskiwana jest z różnych form

ruchów wody, w tym z pływów, fal, prądów oceanicznych i gradientów termicznych. Potencjał energii wody jako czystego i zrównoważonego źródła energii jest ogromny, ponieważ ocean i morza pokrywają ponad 70% powierzchni Ziemi. Jak wynika z [21] jednym z celów UE w zakresie mocy zainstalowanej z energii wody na lata 2030 i 2050 jest uzyskanie odpowiednio co najmniej 1 i 40 GW. Choć technologia ta jest wciąż na wczesnym etapie rozwoju, stwarza ogromne nadzieje w zakresie zaspokojenia rosnących potrzeb energetycznych świata. Mimo dużego potencjału technologia nie jest jeszcze powszechnie stosowana w portach morskich, ale są miejsca, gdzie takie rozwiązania zostały wdrożone. Przykładowo, największa turbina pływowa na świecie, została zainstalowana u wybrzeży Szkocji, w pobliżu wysp Orkadów. Turbina ta waży 680 ton i jest zakotwiczona w miejscu, w którym kabel podmorski łączy jednostkę o mocy 2 MW z lądową siecią energetyczną [22]. Z kolei jak wynika z [23] elektrownia wykorzystująca energię fal morskich została uruchomiona także w 2016 roku w pobliżu portu na Gibraltarcie (rys.5). Aktualnie moc zainstalowana elektrowni wynosi 100 kW.

Planuje się rozbudowę stacji i osiągnięcie 5 MW co pozwoli na pokrycie do 15% zapotrzebowania na energię elektryczną Gibraltaru. Wspomniana elektrownia składa się z 8 pływaków przymocowanych do istniejącego nabrzeża za pomocą mechanicznych ramion. Dodatkowo zawiera jednostkę konwersji energii zlokalizowaną w tunelu, prowadzącym do nabrzeża. Dodatkowo, podobne elektrownie mają powstać w Hiszpanii przy Porcie Adriano. W przypadku tego rozwiązania należy mieć na uwadze to, że w istotnym stopniu ogranicza dostęp do nabrzeży, więc jego zastosowanie wymaga wcześniejszej analizy ruchu statków i obciążenia portu.



Rys.5. Elektrownia pływowa – Gibraltar [23]

### D. Wodór i ogniwa paliwowe

Ogniwa paliwowe w portach morskich stanowią innowacyjne rozwiązanie, które może znacząco przyczynić się do redukcji emisji szkodliwych substancji i zwiększenia ich efektywności energetycznej. Ogniwa paliwowe w portach wykorzystywane są przede wszystkim do zasilania urządzeń portowych (dźwigi, wózki, ciągniki), pojazdów logistycznych czy niewielkich statków wykonujących krótkie rejsy. Tematyka ogniw paliwowych w kontekście transformacji energetycznej portów morskich to temat bieżący i priorytetowy, któremu poświęconych jest dużo prac badawczych [24, 25].

Rozważa się zastosowanie ogniw paliwowych jako źródła energii wspomagającego systemy zasilania statków z lądu [25]. Jednym z wiodących portów na świecie, który bada możliwości ogniw paliwowych oraz częściowo wdraża tę technologię jest wspomniany już wcześniej port w Los Angeles [11]. W 2023 roku port ten posiadał 10 pojazdów elektrycznych napędzanych wodorowymi ogniwami

paliwowymi (FCEV) i dwie stacje do tankowania wodoru (rys.6). Badania i analiza możliwości wdrożenia ogniw paliwowych do infrastruktury portowej jest jednak szeroko rozpatrywana na świecie i w Europie. Przykładowo, Zarząd Portu w Rotterdamie we współpracy z firmą Nobian S.B w ramach projektu H2-Fifty planują opracowanie elektrolizera o mocy 250 MW do 2025 r. Celem jest docelowa dostawa od 100 do 180 tys. ton zielonego wodoru rocznie dla przemysłu i/lub sektora transportu [26].



Rys.6. Pojazdy napędzane wodorem oraz stacje wodorowe stanowiące wyposażenie portu w Los Angeles

Z kolei, w ramach projektu H2Ports planuje się wdrożenie technologii wodorowych w Porcie w Walencji. Celem projektu jest przetestowanie i zweryfikowanie technologii wodorowych na sprzęcie portowym, w tym na tzw., ReachStacker (stosowanym do układania kontenerów) i jednostce traktora z napędem wodorowym 4x4. Planuje się także budowę mobilnej stacji wodorowej [27].

#### **Uwarunkowania techniczne wynikające ze stosowania OZE w portach na przykładzie instalacji fotowoltaicznej**

Dążenie do uzyskania neutralności klimatycznej wymaga zastosowania odnawialnych źródeł energii elektrycznej. Jak wskazano w rozdziale 2 w portach morskich na świecie instalowane są już różne rozwiązania reprezentujące OZE, jednak dobór odpowiedniego rozwiązania zależy od wielu czynników. Należą do nich uwarunkowania geograficzne, polityczne, infrastruktura portowa, wpływ na środowisko itp. Jak już wspomniano w portach stosuje się zarówno systemy fotowoltaiczne, systemy mieszane (fotowoltaika i wiatraki), systemy turbin wiatrowych, ogniwa paliwowe itp. W celu wyboru najbardziej efektywnego rozwiązania prowadzi się analizy uwarunkowań technicznych i ekonomicznych wykorzystując między innymi dostępne narzędzia w postaci np. kalkulatorów instalacji fotowoltaicznych (PV). Z faktu, że takie instalacje są najczęściej stosowane w portach morskich dalsza część pracy została poświęcona uwarunkowaniom technicznym.

#### **A. Uwarunkowania techniczne instalacji PV**

Systemy fotowoltaiczne wymagają uwzględnienia wielu uwarunkowań technicznych, które mają istotny wpływ na ich efektywność, trwałość i wydajność. Należą do nich: lokalizacja i orientacja, zaciemnienie, temperatura, konstrukcja montażowa, system elektryczny, dostęp do sieci, konserwacja i serwis.

Istotną zaletą instalacji PV jest fakt, że można umieszczać je na niewykorzystanych powierzchniach dachów hal magazynowych, warsztatów lub na innych budynkach portowych. Dodatkowo, nowoczesne instalacje PV mogą być też połączone z elewacją budynków, nie emitują hałasu i drgań. Są też stosunkowo proste i mało awaryjne, ponieważ nie wymagają skomplikowanej aparatury, czy zwożonej konstrukcji mechanicznej. Systemy PV można stosunkowo łatwo integrować z zasobnikami energii, aby efektywniej wykorzystywać powstałą w ten sposób energię.

Jednak energia elektryczna wytwarzana przez PV poza czynnikami klimatycznymi zależy także od technologii w jakiej wykonano panele, powierzchni paneli oraz całej instalacji. W przypadku portów, to właśnie powierzchnia może być czynnikiem limitującym wydajność takiej instalacji.

Mając na uwadze wyżej wymienione ograniczenia, w dalszej części artykułu przeprowadzono analizę porównawczą możliwych do zastosowania na terenie portu systemów PV.

Głównym wyróżnikiem systemów PV jest sposób instalacji paneli fotowoltaicznych. Obecnie stosowane są cztery główne warianty montażu systemów PV, można je w pierwszym przybliżeniu sklasyfikować jako stałe i ruchome. W systemach montażu stałego decydujące jest właściwe ustawienie paneli, w szczególności istotny jest kąt i kierunek. Instalacje tego typu są zazwyczaj proste i nie wymagają dużych nakładów finansowych. Można je umieszczać na dachu lub ziemi. Są też łatwe w serwisowaniu i eksploatacji. Konstrukcje zapewniające ruchomość umieszczonych na nich paneli są z reguły złożonymi systemami, ale zapewniają wyraźnie efektywniejsze wykorzystanie energii słonecznej przy mniejszej liczbie paneli. Nazywane są systemami pozycjonowania i w odróżnieniu od montażu stałego, pozwalają na śledzenie pozycji słońca na niebie i ustawianie paneli fotowoltaicznych w taki sposób, aby generowały jak najwięcej energii elektrycznej. Zazwyczaj tego typu rozwiązania są oparte na jednej lub dwóch osiach obrotu.

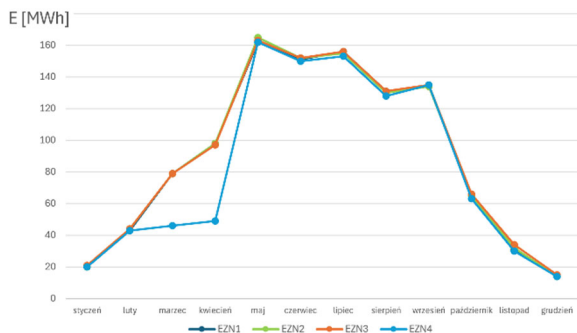
W Polsce optymalne kierunki instalacji elektrowni PV to południe, południowy wschód lub południowy zachód, a optymalny kąt nachylenia w północnej Polsce wynosi 25° – 35°. Jak wspomniano wcześniej, sposób montażu istotnie wpływa na wydajność instalacji PV. W dalszej części pracy opisano różne sposoby montażu instalacji fotowoltaicznych oraz zaprezentowano badania symulacyjne ilustrujące wpływ wybranych sposobów montażu na wydajność elektrowni PV. W pracy wykorzystano wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych uzyskane w [29].

#### **B. Wyniki z pomiaru rzeczywistych instalacji PV**

W celu uwiarygodnienia wyników symulacji przy zastosowaniu wspomnianego wcześniej programu porównano je z wynikami pomiarów pracy miesięcznej (z roku kalendarzowego 2023) czterech elektrowni fotowoltaicznych zbudowanych w Polsce. Rozważane elektrownie wybudowane zostały w 2021 roku i nazywają się kolejno EZN1, EZN2, EZN3, EZN4 (EZN – Energia z Natury). Każda z nich składa się z takiej samej liczby identycznych paneli fotowoltaicznych oraz falowników, czyli z 2222 sztuk paneli fotowoltaicznych o mocy 450 W oraz 5 sztuk falowników o mocy 185 kW, co daje łącznie 1 MW mocy zainstalowanej oraz 925 kW łącznej mocy falowników. Badane elektrownie fotowoltaiczne posiadają stały system montażu paneli fotowoltaicznych, z panelami zorientowanymi w kierunku południowym. Jediną różnicą między porównywanymi elektrowniami fotowoltaicznymi jest układ rozłożenia paneli wynikający z kształtu działek na których zostały zbudowane oraz ukształtowania terenu. Badane elektrownie fotowoltaiczne nie są wyposażone w magazyny energii elektrycznej. Na rysunku 7 przedstawiono wartości wyprodukowanej energii przez w/w elektrownie na przestrzeni 2023 roku.

Różnice w ilości wygenerowanej energii elektrycznej wynikają z ukształtowania terenu, elektrownie fotowoltaiczne EZN 1, 2 i 3 zbudowane są na terenie pochyłym w kierunku południowym, dzięki czemu wzajemne zaciemnienie się modułów fotowoltaicznych występuje tam

rzadziej w porównaniu do elektrowni fotowoltaicznej EZN 4, zbudowanej na płaskim terenie.



Rys.7. Porównanie energii wyprodukowanej przez elektrownie: EZN1...4 w ciągu 2023 rok

### C. Założenia do symulacji instalacji PV

W celu analizy wpływu sposobu montażu paneli fotowoltaicznych na wydajność elektrowni, która może być dedykowana dla infrastruktury portowej zastosowano program PVsys, w którym zaprojektowano 4 elektrownie o parametrach odpowiadających rzeczywistej elektrowni opisanej w poprzednim rozdziale [28].

Rozważane elektrownie składają się z takich samych komponentów, jednak różnią się umiejscowieniem paneli fotowoltaicznych lub zastosowanym systemem pozycjonowania.

Na potrzeby analizy wybrano moduły fotowoltaiczne o parametrach odpowiadających modułom firmy Longi Solar będącej jednym z czołowych producentów na świecie, o mocy 500 Wp, cechujących się wysoką sprawnością oraz odpornością na oddziaływanie warunków atmosferycznych. W celu osiągnięcia pożądanej mocy elektrowni fotowoltaicznej (1MW) zastosowano 2 000 modułów o mocy 500 Wp. Poniższa tabela przedstawia najważniejsze parametry zastosowanych w programie modułów fotowoltaicznych.

Tabela 2 Parametry wybranych modułów fotowoltaicznych

Producent	Longi Solar
Model	LR5-66HPH 500M
Wymiary [mm]	2094 X 1134 X 35
Moc Maksymalna $P_{max}$ [W]	500
Napięcie obwodu otartego $U_{oc}$ [V]	45,55
Prąd Zwarciaowy $I_{sc}$ [A]	13,90
Napięcie przy maksymalnej mocy $U_{mp}$ [V]	38,38
Prąd przy maksymalnej mocy $I_{mp}$ [A]	13,03
Wydajność modułu [%]	21,10
Maksymalne napięcie systemu [V]	1500
Współczynnik temperaturowy $\alpha I_{sc}$ [%/°C]	0,050
Współczynnik temperaturowy $\alpha U_{oc}$ [%/°C]	-0,265
Współczynnik temperaturowy $\alpha P_{max}$ [%/°C]	-0,340

Poza panelami fotowoltaicznymi do analizy właściwości elektrowni PV w programie PVsys zastosowano także falowniki o parametrach odpowiadających parametrom falowników firmy Huawei. Cechują się one długim okresem żywotności, niskim napięciem startu pracy oraz dużą ilością modułów śledzących MPPT (10 szt.) co daje projektantowi dużą swobodę w projektowaniu obwodów DC. Do zaprojektowania rozważanych elektrowni fotowoltaicznych zastosowano 8 falowników o mocy 100 kW, osiągając moc maksymalną 800 kW i pożądane przewymiarowanie

instalacji na poziomie 125%. W tabeli 3 przedstawiono najważniejsze parametry dobranych falowników.

Tabela 3 Parametry wybranych falowników do rozważanej elektrowni PV

Moc zainstalowana elektrowni [W]	1 000 000
Moc pojedynczego modułu fotowoltaicznego [W]	500
Ilość modułów fotowoltaicznych w elektrowni [szt.]	2 000
Moc pojedynczego falownika [W]	100 000
Ilość falowników w elektrowni [szt.]	8
Maksymalna ilość szeregów podłączonych do jednego falownika [szt.]	20
Maksymalna ilość paneli fotowoltaicznych w szeregu [szt.]	19
Minimalna ilość paneli fotowoltaicznych w szeregu [szt.]	5

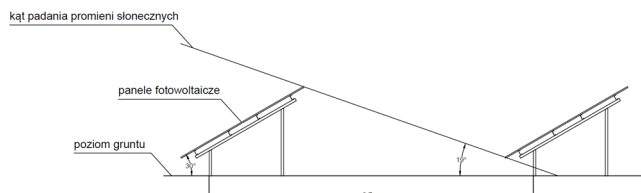
Na podstawie określonych parametrów modułów fotowoltaicznych, falowników oraz rzeczywistej elektrowni opisanej wcześniej przeprowadzono badania symulacyjne uwzględniające następujące założenia projektowe:

- 1) Każda zaprojektowana elektrownia fotowoltaiczna składa się z 2000 sztuk paneli fotowoltaicznych o mocy 500 W każdy, sumaryczna moc elektrowni wyniesie 1 MW.
- 2) Każda zaprojektowana elektrownia fotowoltaiczna składa się z 8 falowników o mocy 100 kW każdy, sumaryczna moc jest więc równa 800 kW.
- 3) Każda elektrownia podzielona jest na 125 szeregów po 16 paneli fotowoltaicznych.
- 4) Każda elektrownia fotowoltaiczna obejmuje 5 falowników obsługujących razem 80 szeregów (5 x 16 szeregów) oraz 3 falowniki obsługujące razem 45 szeregów (3 x 15 szeregów).

### D. Sposoby montażu paneli w elektrowniach PV

Jak wspomniano wcześniej wydajność elektrowni fotowoltaicznej w istotny sposób zależy od sposobu montażu paneli fotowoltaicznych.

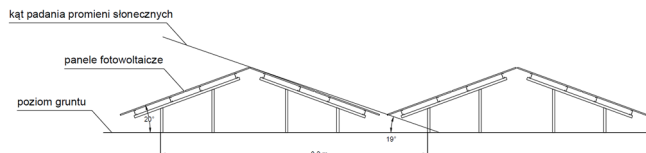
W przypadku elektrowni fotowoltaicznej zamontowanej na stałe, zorientowanej na południe, stosuje się system montażu pionowego paneli fotowoltaicznych. Na rysunku 8 zilustrowano sposób tego montażu. W rozważanym przypadku, w celu zapewnienia jak największej ekspozycji paneli fotowoltaicznych na słońce, pochylono panele fotowoltaiczne o 30° względem poziomu gruntu, co jest wartością optymalną na szerokości geograficznej północnej Polski. Dodatkowo, rozsunięto kolejne rzędy paneli o 0,7 m. Pozwoliło to na wyeliminowanie wzajemnego zaciemnienia pomiędzy panelami. Zbudowana w ten sposób elektrownia fotowoltaiczna o mocy 1 MW zajmuje obszar o wielkości około 1,06 ha.



Rys. 8. Sposób montażu paneli fotowoltaicznych w elektrowni z panelami zamontowanymi na stałe i zorientowanymi na południe.

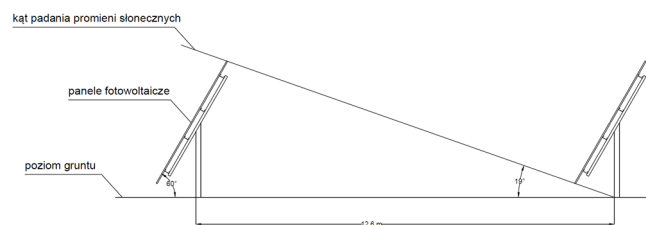
Z kolei na rysunku 9 zaprezentowano sposób montażu paneli fotowoltaicznych w elektrowni z panelami zamontowanymi na stałe oraz zorientowanymi na wschód i zachód. W tak zaprojektowanej elektrowni PV podobnie jak we wcześniej rozważanym przypadku zastosowano system

montażu pionowego paneli. Z uwagi na rozkład paneli fotowoltaicznych w systemach zorientowanych na wschód i zachód, oraz na mniejszy kąt posadowienia paneli fotowoltaicznych ( $20^\circ$ ), nie ma potrzeby stosowania przerw między sąsiednimi rzędami, gdyż nie występuje możliwość ich wzajemnego zacięcia się, gdy promienie słoneczne padają pod kątem większym lub równym  $19^\circ$ . Zbudowana w ten sposób elektrownia fotowoltaiczna o mocy 1 MW zajmie obszar o wielkości około 0,44 ha.



Rys.9. Sposób montażu paneli fotowoltaicznych w elektrowni fotowoltaicznej z panelami zamontowanymi na stałe i zorientowanymi na wschód i zachód.

Na rysunku 10 zaprezentowano system pozycjonowania jedno – osiowego, który stosowany jest w celu optymalnej ekspozycji słonecznej paneli fotowoltaicznych. Systemy takie montuje się w orientacji wschód- zachód, co pozwala na znaczną poprawę generacji energii elektrycznej w godzinach porannych i popołudniowych.



Rys.10. Sposób montażu paneli fotowoltaicznych w elektrowni z jedno – osiowym systemem pozycjonowania.

Zaprezentowany na rysunku 10 system pozycjonowania, zakłada pionowy montaż paneli fotowoltaicznych w dwóch rzędach. Pozwala on na śledzenie położenia słońca za pomocą wbudowanych czujników światła oraz na wychylenie zamontowanych paneli fotowoltaicznych o  $60^\circ$ . Zbudowana w ten sposób elektrownia fotowoltaiczna o mocy 1 MW zajmie obszar o wielkości około 1,38 ha.

Z kolei, systemy dwu - osiowe zaprezentowane na rysunkach 11 i 12, pozwalają na maksymalizację uzysków z paneli fotowoltaicznych poprzez utrzymywanie ich w pozycji prostopadłej do kierunku padania promieni słonecznych. Systemy te pozwalają na obracanie paneli fotowoltaicznych we wszystkich kierunkach co umożliwia zwiększenie generacji energii elektrycznej przez cały dzień. Zbudowana w ten sposób elektrownia fotowoltaiczna o mocy 1 MW zajmie obszar o wielkości około 4,98 ha.

### C. Wyniki badań

Jak wspomniano wcześniej do badań symulacyjnych przygotowano 4 modele elektrowni różniących się między sobą sposobem montażu paneli. Badania symulacyjne przeprowadzono dla 4 wariantów montażu paneli fotowoltaicznych odpowiadających odpowiednio:

Wariant 1: Elektrownia z panelami zamontowanymi na stałe, zorientowanymi na południe. Energia elektryczna wygenerowana rocznie jest równa około: 1036 MWh,

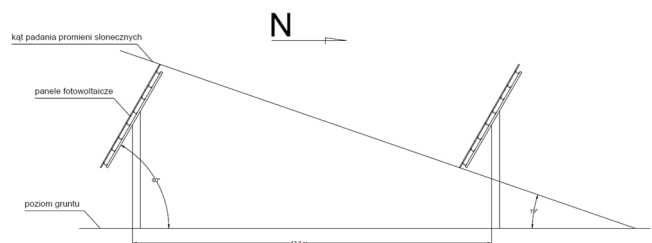
Wariant 2: Elektrownia z panelami zamontowanymi na stałe, zorientowanymi na wschód i zachód. Energia elektryczna wygenerowana rocznie jest równa około: 858 MWh,

Wariant 3: Elektrownia z jedno – osiowym systemem pozycjonowania. Energia elektryczna wygenerowana rocznie: jest równa około: 1184 MWh,

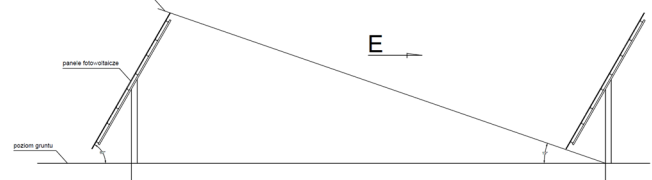
Wariant 4: Elektrownia z dwu – osiowym systemem pozycjonowania. Energia elektryczna wygenerowana rocznie jest równa około: 1344 MWh.

Dodatkowo, przeprowadzono badania wpływu sposobu montażu paneli PV na rozmiar projektowanej elektrowni.

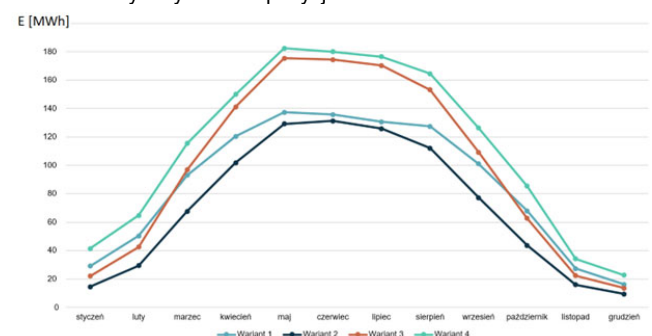
Na rysunku 13 zaprezentowano uzyskane wyniki badań ilustrujące ilość energii elektrycznej produkowanej w każdym miesiącu przez każdą z rozważanych elektrowni.



Rys.11. Sposób montażu paneli fotowoltaicznych w elektrowni z dwu – osiowym systemem pozycjonowania w kierunku północnym



Rys.12. Sposób montażu paneli fotowoltaicznych w elektrowni z dwu – osiowym systemem pozycjonowania w kierunku wschodnim



Rys.13. Porównanie uzysków miesięcznych projektowanych elektrowni fotowoltaicznych

Jak można zauważyć z danych przedstawionych na rysunku 13, wyniki symulacji dla pierwszego wariantu są zbliżone do wyników uzyskanych przez elektrownie EZN 1 – 4, będące punktem odniesienia do przeprowadzonych symulacji. Różnica w ilości wygenerowanej energii wynika z tego, że program PVsyst bierze pod uwagę czynnik starzenia się instalacji a uzyskane wyniki są uśrednioną ilością na przestrzeni 10 lat pracy instalacji, a elektrownie EZN 1- 4 są stosunkowo nowymi instalacjami, w których procesy starzenia się modułów nie wpłynęły znacząco na wydajność.

W branży fotowoltaicznej bardzo ważnym parametrem, jest ilość energii elektrycznej możliwej do wygenerowania

z ograniczonego obszaru, ponieważ grunty przeznaczone na budowę instalacji elektrowni fotowoltaicznych bardzo często są dzierżawione lub ograniczone przez wszelakiego rodzaju objekty zacięające. Ilość energii elektrycznej możliwej do wygenerowania z 1 ha, uzyskana poprzez podzielenie wyników symulacji przez wyliczony obszar zajęty przez dane elektrownie, przedstawia tabela 4.

Tabela 4. Ilość energii elektrycznej możliwej do wygenerowania z 1 ha

Elektrownia fotowoltaiczna	Ilość energii elektrycznej możliwej do uzyskania z 1 ha rocznie [MWh]
Elektrownia fotowoltaiczna z panelami zamontowanymi na stałe, zorientowanymi na południe	977,36
Elektrownia fotowoltaiczna z panelami zamontowanymi na stałe, zorientowanymi na wschód i zachód	1950
Elektrownia fotowoltaiczna z jedno – osiowym systemem pozycjonowania	857,97
Elektrownia fotowoltaiczna z dwu – osiowym systemem pozycjonowania	341,98

Wyniki zaprezentowane w tabeli 4 dowodzą, że sposób montażu paneli fotowoltaicznych na stałe i zorientowanie ich w kierunkach wschód i zachód, jest najbardziej wydajnym sposobem w przypadku ograniczonego obszaru dostępnego pod budowę elektrowni. Ponadto, elektrownia oparta o dwu – osiowy system pozycjonowania, która przyniosła najwyższy wynik w przeprowadzonej symulacji, sprawdza się zdecydowanie najgorzej w sytuacji, gdy teren przeznaczony do budowy elektrowni fotowoltaicznej jest ograniczony.

#### Podsumowanie

W pracy zaprezentowane różne źródła energii elektrycznej stosowane w portach morskich na świecie. Praca została podzielona na dwie części. W pierwszej scharakteryzowano technologie OZE stosowane w portach morskich. Zwrócono jednak uwagę na fakt, że choć dużym zainteresowaniem cieszą się morskie elektrownie wiatrowe oraz inne źródła czystej energii to najlepszym rozwiązaniem – uwzględniając wiele czynników, będą przez długi czas elektrownie fotowoltaiczne. W związku z powyższym drugą część pracy poświęcono elektrowniom fotowoltaicznym, dla których przeanalizowano wpływ sposobu montażu paneli PV na wydajność takiej elektrowni przy zastosowaniu programu PVsys. Jak wynika z przeprowadzonych badań zastosowanie systemów do pozycjonowania paneli fotowoltaicznych, pozwala na znaczne zwiększenie uzysków przy zachowaniu takiej samej mocy przyłączeniowej. Zastosowanie systemu jedno – osiowego pozwala na zwiększenie produkcji rocznej o około 15%, a dwu – osiowego o niemal 30% względem standardowej instalacji zamontowanej na stałe i zorientowanej na południe. Montaż paneli fotowoltaicznych na stałe, zorientowanych na wschód i zachód przynosi zdecydowanie najmniejsze uzyski, przy zachowaniu takiej samej mocy zainstalowanej.

Z przeprowadzonych badań widać także, że sposób montażu paneli fotowoltaicznych ma ogromny wpływ na rozmiar projektowanej instalacji. Przykładowo dla elektrowni o mocy zainstalowanej 1000 kWp, obszar zajęty przez instalacje oparte o jedno - osiowe systemy pozycjonowania zajmą około 1,4 ha, a przez dwu – osiowe systemy pozycjonowania około 3,9 ha. Obszar zajęty przez instalacje tej samej mocy, lecz oparte o stałe konstrukcje bez możliwości pozycjonowania to około 1 ha w przypadku orientacji południowej lub około 0,5 ha dla instalacji wschód – zachód. Jest to więc czynnik istotnie wpływający na koszt i wydajność instalacji PV. Mając też na uwadze fakt, że instalacje

w portach są najczęściej instalowane na dużych powierzchniach dachów budynków gospodarczych typu magazyny, warsztaty, parkingi itp. to powierzchnia

zajmowana przez instalację oraz jej waga mają fundamentalne znaczenie i stanowią istotny argument za wyborem tej technologii OZE. Instalacje stałe są lżejsze i mniej obciążające dla konstrukcji budynku, natomiast instalacje wykorzystujące systemy pozycjonowania są najczęściej budowane na gruncie, ponieważ mają większą wagę, zajmują większą przestrzeń i są bardziej złożone. Kolejnym argumentem za stosowaniem stałego montażu instalacji fotowoltaicznych w portach jest to, że są praktycznie bezobsługowe i bezawaryjne – co w przypadku lokowania ich na dachach jest istotne [30]. Uwzględniając powyższe czynniki, tj. powierzchnię i wagę, to w przypadku instalacji fotowoltaicznych, które mają być zastosowane w portach istotny będzie współczynnik pokazujący możliwość pozyskania energii z jednostki powierzchni. Po analizie wyników tabeli 4 okazuje się, że sposób montażu paneli fotowoltaicznych na stałe i zorientowanie ich w kierunkach wschód i zachód, jest najbardziej wydajny w przypadku ograniczonego obszaru dostępnego pod budowę elektrowni fotowoltaicznej. Ponadto, elektrownia oparta o dwu – osiowy system pozycjonowania, która przyniosła najwyższy wynik

w przeprowadzonej symulacji, sprawdza się zdecydowanie najgorzej w sytuacji, gdy teren przeznaczony do budowy elektrowni fotowoltaicznej jest ograniczony.

Elektrownie fotowoltaiczne, jako technologia OZE wydają się też być korzystniejsza na tle pozostałych ze względu na rozwój żeglugi wykorzystującej jednostki z napędem elektrycznym lub hybrydowym [31,32]. Technologie związane z przesyłem energii prądem stałym są też rozwijane i coraz tańsze. Bardzo ciekawą alternatywą jest łączenie instalacji fotowoltaicznych z magazynami energii [33,34]. Famy fotowoltaiczne portów można również wykorzystać w połączeniu z instalacjami OPS, które pojawiają się coraz częściej w portach jako ewolucja usług świadczonych przez nie [31-35].

**Autorzy:** dr inż. Adam Muc, Katedra Automatyki Okrętowej, E-mail: a.muc@we.umg.edu.pl; dr hab. inż. Kalina Detka, prof. UMG, Katedra Elektroniki Morskiej, Uniwersytet Morski w Gdyni, E-mail: k.detka@we.umg.edu.pl

#### LITERATURA

- [1] 2019 second hottest year on record, UN confirms <https://news.un.org/en/story/2020/01/1055392>, dostęp online 21.04.2024
- [2] Climate Change: what will happen if we do nothing? [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/peseta-projects/jrc-peseta-iv\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/peseta-projects/jrc-peseta-iv_en), data dostępu 21.04.2024
- [3] G. Erbach, L. Jensen, Sa.Chahri, E. Claros, Fit for 55 package, European Parliament, PE 733.513, March 2024
- [4] Europejski semestr na rzecz koordynacji polityki gospodarczej – 2024 r. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0156\\_PL.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0156_PL.html), dostęp online 21.04.2024
- [5] I. Zadeh, S. Behbood, et al. "Optimizing Smart Energy Infrastructure in Smart Ports: A Systematic Scoping Review of Carbon Footprint Reduction." *Journal of Marine Science and Engineering* 11.10 (2023): 1921
- [6] A. Fadiga, L. Miguel D. Ferreira, J. F. Bigotte. "Decarbonising maritime ports: A systematic review of the literature and insights for new research opportunities." *Journal of Cleaner Production* (2024): 142209
- [7] I. Sadek, M. Elgohary. "Assessment of renewable energy supply for green ports with a case study." *Environmental Science and Pollution Research* 27.5 (2020): 5547-5558
- [8] J. Kambale. "The viability of solar power supply: a feasibility study of Monkey Bay maritime base port in Malawi." (2021)
- [9] A. C. Lazaroiu, O. Gmal, C-V.Strejoiu, G. A. Lazaroiu, Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality. *Sustainability* 2023, 15, 16297. <https://doi.org/10.3390/su152316297>

- [10] Valenciaport calls for tenders for the photovoltaic installation on the Principe Felipe dock at the Port of Valencia <https://www.valenciaport.com/en/valenciaport-calls-for-tenders-for-the-photovoltaic-installation-on-the-principe-felipe-dock-at-the-port-of-valencia/>, dostęp online 21.04.2024
- [11] Solar Power, <https://www.portoflosangeles.org/environment/sustainability/solar-power>, dostęp online 21.04.2024
- [12] Sun in port <https://www.portofamsterdam.com/en/discover/sustainable-port/sun-port>, dostęp online 21.04.2024
- [13] Port of Rotterdam increases use of solar power <https://www.porttechnology.org/news/port-of-rotterdam-increases-use-of-solar-power/>, dostęp online 21.04.2024.
- [14] Singapore as state to achieve net zero emissions mid-century <https://www.sustainable-ships.org/rules-regulations/port-singapore>, dostęp online 21.04.2024
- [15] <https://www.intres.com/project/port-of-la-berth-93-solar-array>
- [16] ahu, Y., Shahabuddin, M., Agrawal, P.: Floating solar photovoltaic system: an emerging technology. In: National Seminar on the Prospects and Challenges of the Electrical Power Industry in India, vol. 2, pp. 219–227, (2015)
- [17] Ingole, N., Kelzarkar, A., Rathod, P., Bandewar, A.: Floating solar power plants: a review. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 3(7), 3154–3160 (2021)
- [18] Parhamfar, Mohammad, Iman Sadeghkhani, and Amir Mohammad Adeli. "Towards the application of renewable energy technologies in green ports: Technical and economic perspectives." *IET Renewable Power Generation* 17.12 (2023): 3120-3132
- [19] Offshore Wind Ports Platform, <https://windeurope.org/policy/topics/offshore-wind-ports/>, dostęp online 21.04.2024
- [20] Ruszyła budowa bazy serwisowej morskiej farmy <https://www.orlen.pl/o-firmie/media/komunikaty-prasowe/2024/styczen-2024/Ruszyła-budowa-bazy-serwisowej-morskiej-farmy-wiatrowej-w-Lebie->, dostęp online 21.04.2024
- [21] Directorate-General for Energy, Offshore renewable energy. [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshorerenewable-energy\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshorerenewable-energy_en)
- [22] <https://wyborcza.pl/7,177851,27543145,u-wybrzezy-szkocji-podwodna-megaturbina-wytwarza-prad-z-plywow.html>
- [23] Eco Wave Power Wave Energy Power Station Gibraltar <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/eco-wave-power-wave-energy-power-station-gibraltar#location>, dostęp online 21.04.2024
- [24] Steele, Lindsay M., and Charlie A. Myers. *Hydrogen Fuel Cell Applications in Ports: Feasibility study at multiple US ports*. No. PNNL-SA-147032. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (United States), 2019
- [25] Mac Kinnon, Michael, Ghazal Razeghi, and Scott Samuelson. "The role of fuel cells in port microgrids to support sustainable goods movement." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 147 (2021): 111226
- [26] A new energy system <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/energy-transition/a-new-energy-system>, dostęp online 21.04.2024
- [27] The H2PORTS hydrogen project carries out a public demonstration of its pilots in the Port of Valencia, <https://h2ports.eu/>, dostęp online 21.04.2024
- [28] Stona program PVsyst <https://www.pvsyst.com/>, dostęp online 5.03.2024
- [29] M. Czech, Analiza porównawcza systemów do pozycjonowania paneli fotowoltaicznych, Wydział Elektryczny, Uniwersytet Morski w Gdyni, 2023 r.
- [30] Miłek, D.; Nowak, P.; Latosińska, J. The Development of Renewable Energy Sources in the European Union in the Light of the European Green Deal. *Energies* 2022, 15, 5576. <https://doi.org/10.3390/en15155576>
- [31] Annamaria Buonomano, Gianluca Del Papa, Giovanni Francesco Giuzio, Adolfo Palombo, Giuseppe Russo, Future pathways for decarbonization and energy efficiency of ports: Modelling and optimization as sustainable energy hubs, *Journal of Cleaner Production*, 420 (2023) 138389, [doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138389](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138389)
- [32] Agostinelli, S.; Neshat, M.; Majidi Nezhad, M.; Piras, G.; Astiaso Garcia, D. Integrating Renewable Energy Sources in Italian Port Areas towards Renewable Energy Communities. *Sustainability* 2022, 14, 13720. <https://doi.org/10.3390/su142113720>
- [33] Sifakis, N.; Tsoutsos, T. Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept. *J. Clean. Prod.* 2020, 286, 125448
- [34] Agostinelli, S.; Cumo, F.; Nezhad, M.M.; Orsini, G.; Piras, G. Renewable Energy System Controlled by Open-Source Tools and Digital Twin Model: Zero Energy Port Area in Italy. *Energies* 2022, 15, 1817
- [35] Parhamfar, M., Sadeghkhani, I., Adeli, A.M.: Towards the application of renewable energy technologies in green ports: Technical and economic perspectives. *IET Renew. Power Gener.* 17, 3120–3132 (2023), <https://doi.org/10.1049/rpg2.12811>