

Energia wiatru

– przyszłość odnawialnych źródeł energii?

Foto – Dreamstime

Energia wiatru jest jednym z najbardziej obiecujących źródeł odnawialnej energii. Wykorzystuje naturalne ruchy powietrza w atmosferze do produkcji energii elektrycznej, co czyni ją ekologiczną alternatywą dla paliw kopalnych. Jakie są mechanizmy powstawania wiatru, jego rodzaje, zastosowanie w energetyce oraz wyzwania związane z jego wykorzystaniem?

Szymon Świątek

doktorant z zakresu nauk o Ziemi i środowisku UAM, Poznań

Wiatr to poziomy ruch mas powietrza w dolnej troposferze, wynikający z różnicy ciśnień atmosferycznych. Źródłem tej różnicy są nierównomierne nagrzewanie się powierzchni Ziemi oraz ukształtowanie terenu. Ciepłe powietrze unosi się, a chłodniejsze zajmuje jego miejsce, tworząc cyrkulację powietrza.

Prędkość i kierunek wiatru zależą od wielu czynników, w tym od globalnej cyrkulacji atmosferycznej, położenia geograficznego oraz rzeźby terenu. Do pomiaru tych parametrów wykorzystuje się anemometry i inne narzędzia meteorologiczne.

Rodzaje wiatru

Wiatry na Ziemi można podzielić na trzy główne kategorie: stałe, zmienne i sezonowe. Ich charakterystyka zależy od lokalizacji oraz czynników meteorologicznych.

- **Wiatry stałe** – należą do nich pasaty i antypasaty. Pasaty to ciepłe wiatry o prędkości 3-8 m/s, które powstają w strefie równikowej na skutek intensywnego nagrzewania się powietrza. Ogrzane masy powietrza unoszą się, tworząc niż baryczny, a następnie ochładzają się i przemieszczają ku biegunom jako antypasaty. W wyniku działania siły Coriolisa na półkuli północnej odchylają się w prawo, a na południowej w lewo, po czym powracają w stronę równika.
- **Wiatry zmienne** – zmieniają kierunek w zależności od pory roku lub dnia. Należą do nich monsuny, bryzy, fen (halny) oraz wiatr zboczowy. Monsuny występują głównie w Azji Południowej, Australii, a także w Ameryce i Europie.

Powstają w wyniku różnicy nagrzewania się lądu i wody – latem ląd nagrzewa się szybciej, co powoduje napływ wilgotnego powietrza znad oceanów, a zimą sytuacja jest odwrotna. Bryza to wiatr występujący na mniejszą skalę, którego kierunek zmienia się w cyklu dobowym. W dzień wieje od wody do lądu, a w nocy odwrotnie. Fen, znany w Polsce jako halny, powstaje, gdy powietrze napotyka przeszkodę górską. Po stronie dowieznej kondensuje się i ochładza, a po przejściu przez szczyt opada, ogrzewając się o 1°C na każde 100 m wysokości. Wiatr zboczowy (dolinno-górski) powstaje w wyniku różnic temperatur w górach – w dzień ciepłe powietrze unosi się po stokach, a w nocy ochładza się i spływa w dół doliny.

- **Wiatry sezonowe** – występują w określonym czasie w roku i należą do nich niektóre monsuny oraz wiatry pustynne. Wiatry pustynne, takie jak samum, harmattan i sirocco, są szczególnie intensywne. Samum to gorący i suchy wiatr wiejący w północnej Afryce i na Półwyspie Arabskim, powodujący burze piaskowe. Harmattan to silny północno-wschodni wiatr z Sahary, zawierający dużą ilość pyłu. Sirocco, charakterystyczny dla basenu Morza Śródziemnego, przynosi piasek i pył, a czasem powoduje zjawisko czerwonego śniegu.

Historia wykorzystania energii wiatru

Początki wykorzystania wiatraków sięgają VII wieku n.e. w Persji, choć niektóre źródła wskazują na wcześniejsze ich użycie w Chinach już w V wieku. W Europie historia wiatraków jest nieco niejasna – pierwszeństwo wynalazku przypisuje się jednak Anglii, Francji i Holandii. W Polsce pierwsze wiatraki pojawiły się na Pomorzu i służyły głównie do mielenia zbóż oraz osuszania terenów wcześniejszych objętych wodą.

Przełomowym momentem w historii energii wiatrowej było wykorzystanie jej do produkcji elektryczności. Jednym z pionierów był szkocki profesor James Blyth, który w XIX wieku zbudował 10-metrową turbinę przy swoim domu w Marykirk. Ładowała ona akumulatory zasilające oświetlenie. Choć Blyth chciał sprzedać nadwyżkę energii do pobliskiego szpitala, jego oferta została odrzucona z powodu obaw, że turbina wiatrowa jest „dziełem diabła”.

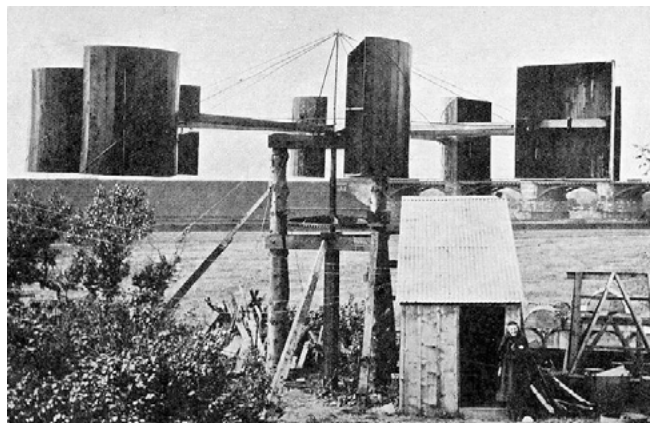
W tym samym czasie w USA Charles Brush, inżynier i wynalazca, zbudował turbinę o średnicy wirnika 17 metrów i wieży wysokości 18 metrów. Była ona w stanie zasilac 100 żarówek. W Danii chemik Poul la Cour skonstruował turbinę, która umożliwiała produkcję wodoru poprzez elektrolizę. Jego innowacyjny projekt doprowadził do wybudowania w ciągu dziesięciu lat około 2500 podobnych wiatraków.

Kolejne ważne wydarzenia w historii energetyki wiatrowej miały miejsce w XX wieku. W 1941 roku uruchomiono pierwszą turbinę o mocy 1 MW, a w 1978 roku – 2 MW. Wzrost zainteresowania energią wiatrową był w dużej mierze efektem globalnych kryzysów paliwowych, które skłoniły państwa do poszukiwania alternatywnych źródeł energii.

Elektrownia wiatrowa i zasady jej działania

Za elektrownię wiatrową uznaje się każdą instalację, która wykorzystując siłę wiatru, wytwarza energię elektryczną. Choć powszechnie kojarzymy elektrownię wiatrową głównie z turbiną, jest ona jedynie jednym z jej elementów. Elektrownia składa się z wielu kluczowych komponentów, do których należą m.in. wejście do sieci energetycznej, gondola, generator, hamulec postojowy, łopaty wirnika oraz akumulator.

Jedną z najważniejszych zalet tego rozwiązania jest jego ekologiczność. Elektrownie wiatrowe nie emitują gazów cieplarnianych podczas pracy, a jedyny ślad węglowy związany z ich funkcjonowaniem wynika z procesów budowy i późniejszej likwidacji. Nowoczesne technologie pozwalają na zdalne sterowanie turbinami, dostosowując ich działanie do warunków meteorologicznych oraz kierując wirnik wraz z łopatami w optymalnym kierunku.



Wiatrak Jamesa Blytha, źródło: Wikipedia

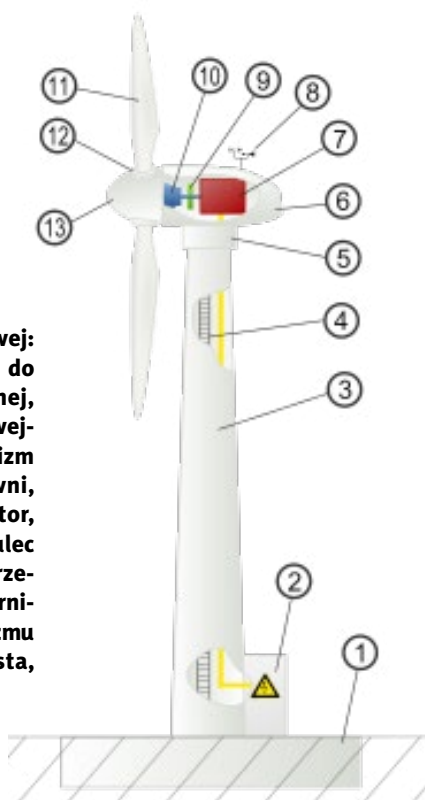
Podmuch wiatru wprawia w ruch łopaty wirnika, co powoduje przekształcenie energii kinetycznej wiatru w energię mechaniczną. Następnie ruch obrotowy wirnika przekazywany jest do generatora, który zamienia energię mechaniczną na elektryczną. Ilość energii uzyskiwanej z wiatru zależy od wielkości generatora oraz warunków atmosferycznych. Każda turbina jest podłączona do sieci energetycznej lub akumulatora, który pozwala na magazynowanie nadwyżek energii.

Obecnie stosowane są różne rodzaje turbin, w tym jedno-, dwu-, trój- i wielopłatowe. Najpopularniejsze są turbiny trójłopatowe, ponieważ zapewniają one optymalny kompromis między efektywnością a stabilnością pracy. Większa liczba łopat pozwala na skuteczniejszą pracę przy niewielkich podmuchach wiatru, ale jednocześnie wymaga większego momentu napędowego.

Turbiny wiatrowe można podzielić również pod względem osi obrotu – na pionowe i poziome. Turbiny z pionową osią nie są już powszechnie stosowane, a jeśli się pojawiają, pełnią głównie funkcję dekoracyjną lub historyczną. Inny podział dotyczy kierunku ustawienia wirnika względem wiatru. Jeśli wirnik ustawiony jest zgodnie z kierunkiem wiatru, mamy do czynienia z turbiną zawietrzną, natomiast w przypadku usta-



Typy wiatraków (od lewej): koźlak, holender i paltrak. Źródło: Wikipedia



Budowa elektrowni wiatrowej:

1. fundament, 2. wyjście do sieci elektroenergetycznej, 3. wieża, 4. drabinka wejściowa, 5. serwomechanizm kierunkowania elektrowni, 6. gondola, 7. generator, 8. wiatromierz, 9. hamulec postojowy, 10. skrzynia przekładniowa, 11. łopata wirnika, 12. siłownik mechanizmu przestawiania, 13. piasta, źródło: Wikipedia

wienia pod wiatr – z turbiną nawietrzną. Najczęściej wykorzystywane są turbiny nawietrzne.

W technologii elektrowni wiatrowych stosuje się wiele pojęć określających ich działanie i wydajność. Prędkość startowa to minimalna prędkość wiatru, przy której wirnik zaczyna się obracać. Prędkość załączająca to moment, w którym elektrownia zaczyna produkować energię elektryczną. Z kolei prędkość nominalna określa punkt, w którym elektrownia działa z pełną wydajnością.

Istnieją również parametry związane z bezpieczeństwem elektrowni – prędkość bezpieczna to wartość, przy której

elektrownia może pracować stabilnie, natomiast prędkość awaryjna oznacza moment, w którym włączany jest hamulec postojowy, aby zatrzymać wirnik i zapobiec uszkodzeniom. Prędkość odłączająca oznacza punkt, w którym turbina zostaje całkowicie wyłączona z zasilania.

Elektrownie wiatrowe można klasyfikować według kilku kryteriów. Pierwszym z nich jest ich zastosowanie – mogą być one przydomowe, przeznaczone do użytku indywidualnego, lub przemysłowe, wykorzystywane do masowej produkcji energii elektrycznej.

Drugim podziałem jest ich wielkość i moc – wyróżniamy elektrownie mikro, małe i duże.

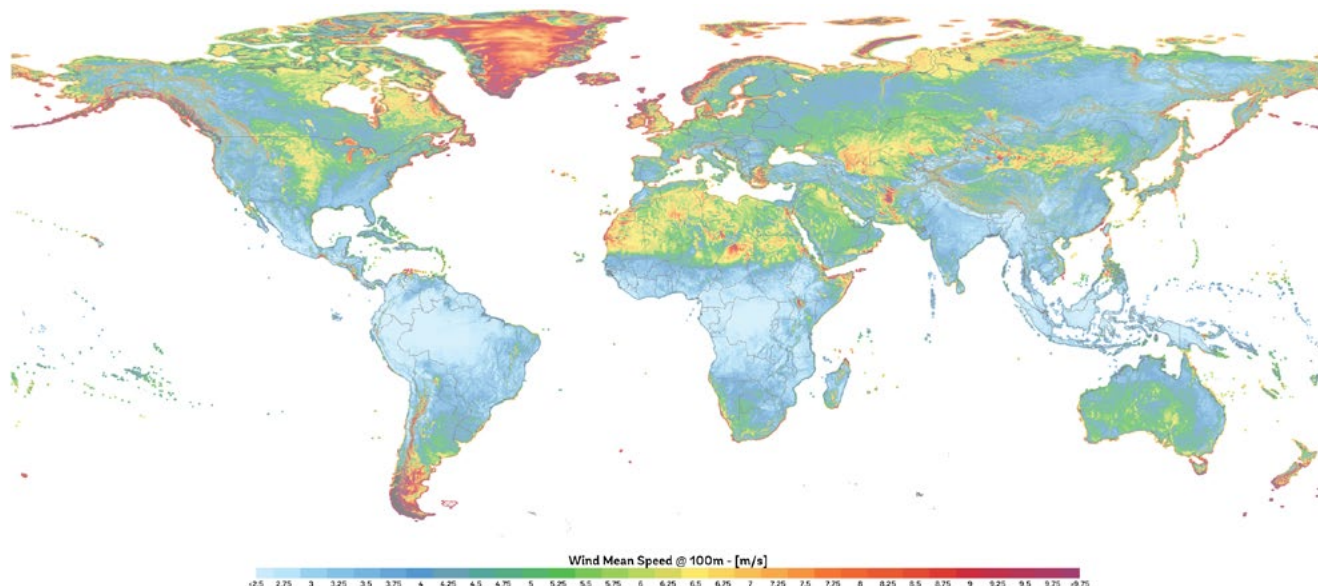
Trzecim, i jednym z najważniejszych podziałów, jest lokalizacja elektrowni. Wyróżniamy elektrownie lądowe oraz morskie.

Czynniki lokalizacyjne

Budowa elektrowni wiatrowej wymaga analizy wielu czynników lokalizacyjnych, które decydują o jej efektywności i opłacalności. Do kluczowych aspektów należą warunki przyrodnicze, kwestie zdrowotne, regulacje prawne, aspekty społeczne oraz ekonomiczne. Wszystkie te elementy są ze sobą powiązane i wpływają na końcowy sukces inwestycji.

Strefa klimatyczna odgrywa istotną rolę w ocenie potencjalnej lokalizacji farm wiatrowych. Warunki meteorologiczne różnią się w zależności od szerokości i długości geograficznej, a przewidywanie wiatru jest wciąż wyzwaniem dla meteorologów. Nawet w dobrze dobranych lokalizacjach mogą występować zmienne warunki atmosferyczne, które wpływają na efektywność pracy turbin. Mapa wietrzności dla Ziemi wskazuje, że najbardziej korzystne obszary dla energetyki wiatrowej znajdują się na Grenlandii, w południowej części Ameryki Południowej oraz w północnej Europie.

Szorstkość terenu to kolejny istotny czynnik. Opisuje ona ukształtowanie i pokrycie terenu, co ma wpływ na przepływ powietrza. Tereny o niskiej szorstkości, takie jak powierzchnie wodne, sprzyjają efektywności turbin, ponieważ minimalizują opory wiatru. W Polsce elektrownie wiatrowe buduje się głównie na obszarach o klasach szorstkości 1,5-2, gdzie



Średnia roczna prędkość wiatru na świecie, źródło: https://pl.m.wikipedia.org/wiki/Plik:Global_Map_of_Wind_Speed.png, autor: Technical University of Denmark (DTU)



Farma wiatrowa Muppandal w Indiach. Foto – Dreamstime

współczynnik wydajności wynosi około 40%. Studenci Politechniki Śląskiej opracowali zalecenia dotyczące optymalnej lokalizacji turbin – sugerują oni, aby odległość turbin wynosiła 20-krotność wysokości najwyższego obiektu w pobliżu, a wysokość gondoli z łopatami była co najmniej dwukrotnie większa od wysokości sąsiednich budynków.

Budowa farm wiatrowych ma również wpływ na środowisko, zwłaszcza na ptaki i nietoperze. Szacuje się, że pojedyncza turbina wiatrowa może powodować śmierć około 10 ptaków i 3 nietoperzy rocznie. Wyróżnia się także inne negatywne skutki: odstraszenie zwierząt, efekt bariery wpływający na zmiany tras przelotów oraz utratę siedlisk spowodowaną przekształceniem terenu. W celu ochrony przyrody wiele obszarów, takich jak parki narodowe, rezerваты przyrody oraz tereny Natura 2000, jest wyłączonych z możliwości budowy elektrowni wiatrowych. Badania przeprowadzone na farmie wiatrowej Smøla (Norwegia) wykazały, że pomalowanie jednego z trzech skrzydeł turbiny na czarno zmniejszyło liczbę śmiertelnych kolizji ptaków aż o 70%. Podobne badania sugerują, że odpowiednie oświetlenie farm wiatrowych w nocy może obniżyć śmiertelność zwierząt o 10%.

Elektrownie wiatrowe generują również hałas, którego poziom zależy od odległości turbiny, prędkości wiatru, mocy generatora oraz sprawności technicznej całej instalacji. Na przykład turbina oddalona o 150 metrów od domu generuje hałas o natężeniu około 45 dB, co jest porównywalne do dźwięków występujących w biurze lub domu. Długotrwała ekspozycja na hałas może jednak wpływać negatywnie na zdrowie mieszkańców. Nowoczesne rozwiązania, takie jak ekrany akustyczne oraz zielone bariery w postaci drzew i krzewów, mogą skutecznie zredukować poziom hałasu.

Niektóre osoby mieszkające w pobliżu farm wiatrowych skarżą się na tzw. syndrom turbiny wiatrowej, obejmujący objawy takie jak zaburzenia snu, bóle głowy oraz tachykardię. Badania wykazują, że odległość wynosząca co najmniej 500 metrów od turbin znacząco zmniejsza występowanie tych dolegliwości. Innym problemem jest efekt migotania cienia (obracające się łopaty wirnika turbiny rzucają na otaczające je tereny cień), który powoduje irytację i zmęczenie. Jest on szczególnie uciążliwy dla osób mieszkających w odległości mniejszej niż dziesięciokrotność średnicy wirnika turbiny.

Zimą na łopatach turbin wiatrowych może osadzać się lód, co stanowi zagrożenie zarówno dla ich sprawności, jak i bezpieczeństwa otoczenia. Aby ograniczyć ryzyko, stosuje się

różne metody przeciwdziałania oblodzeniu. Systemy mechaniczne, choć skuteczne, są kosztowne i wymagają ręcznego usuwania lodu za pomocą dźwigów. Metody pasywne obejmują malowanie łopat na czarno, aby absorbowały więcej ciepła, oraz stosowanie specjalnych powłok ochronnych. Do systemów aktywnych należą czujniki oblodzenia, systemy alarmowe oraz ogrzewanie łopat. W wielu krajach wprowadzono również przepisy regulujące budowę farm wiatrowych, aby ograniczyć ich wpływ na środowisko i społeczności lokalne.

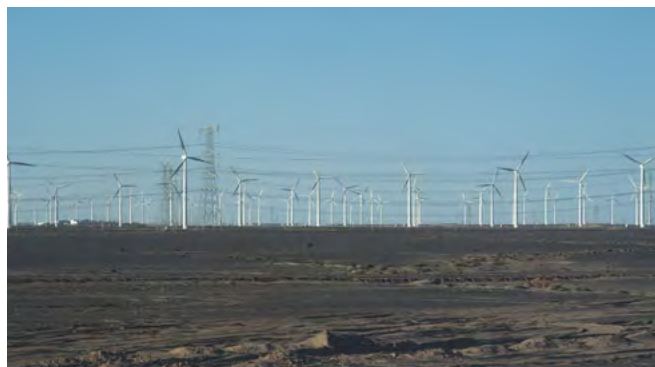
Każda inwestycja w elektrownie wiatrowe wymaga także konsultacji społecznych. Badania przeprowadzone w Polsce wskazują, że farmy wiatrowe są jednymi z najczęściej oprotostowywanych inwestycji. Paradoksalnie, głównym powodem sprzeciwów nie są kwestie zdrowotne, lecz obawy dotyczące zmian w krajobrazie.

Aby elektrownia wiatrowa była opłacalna, jej produkcja energii musi przewyższać zużycie oraz koszty eksploatacyjne. Koszt budowy oraz utrzymania elektrowni wiatrowej jest uzależniony od wielu czynników, takich jak lokalizacja, warunki wietrzne oraz dostępne technologie. Inwestycje w odnawialne źródła energii są jednak coraz bardziej konkurencyjne, a rozwój technologii pozwala na optymalizację kosztów i poprawę efektywności turbin.

Największe farmy wiatrowe na świecie

Wśród największych lądowych farm wiatrowych wyróżnia się Gansu Wind Farm w Chinach, której budowa uwzględniła różne scenariusze polityki energetycznej, od umiarkowanego spadku kosztów energii odnawialnej po drastyczne ograniczenia emisji CO₂. W Indiach funkcjonuje Muppandal Wind Farm, której lokalizacja jest ściśle związana z sezonowymi monsunami.

W Stanach Zjednoczonych jednym z najciekawszych projektów jest Alta Wind Energy Center, zlokalizowane w pobliżu miasta Tehachapi. Obszar ten leży w sąsiedztwie uskoku San Andreas, co wiąże się z ryzykiem trzęsienia ziemi. W 1897 roku miało tam miejsce trzęsienie ziemi o magnitudzie 8, a mimo to farma kontynuuje działalność od lat 80. XX wieku. Znajduje się również w regionie alei tornad, co oznacza korzystne warunki wiatrowe. W USA udział energii odnawialnej w zestawie energetycznym różni się w zależności od stanu – w niektórych regionach energia wiatrowa odgrywa kluczową rolę, a w innych żadną.



Gansu Wind Farm w Chinach. Źródło: Wikimedia.org

W Europie największe farmy wiatrowe znajdują się w Rumunii i Wielkiej Brytanii. Kontynent ten przoduje również w liczbie morskich farm wiatrowych, które stanowią coraz większy udział w produkcji energii.

Farmy wiatrowe w Polsce

W Polsce największe farmy wiatrowe znajdują się w Margoninie (województwo wielkopolskie), Baniach (województwo zachodniopomorskie), Marszewie, Kopaniewie i Karścinie (województwo zachodniopomorskie i pomorskie). Największa moc zainstalowana występuje w województwie zachodniopomorskim (ponad 1620 MW), a kolejne miejsca zajmują kujawsko-pomorskie (1000 MW) i wielkopolskie (niecałe 900 MW). Pomimo dynamicznego rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce, nadal zajmuje ona czwarte miejsce w strukturze źródeł energii elektrycznej – po węglu kamiennym, brunatnym i gazie ziemnym.

Produkcja energii elektrycznej z wiatru w Polsce w ostatnich latach wynosiła około 15 GWh rocznie. W 2018 roku odnotowano spadek tej wartości, co było wynikiem niekorzystnych warunków pogodowych, wprowadzenia tzw. ustawy antywiatrakowej oraz awarii turbin w wyniku silnych orkanów, takich jak Ksawery w 2017 roku. W 2022 roku energia wynosiła około 10,4 TWh, co dało około 11% zapotrzebowania na energię elektryczną.

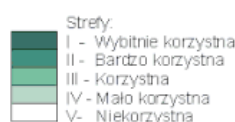
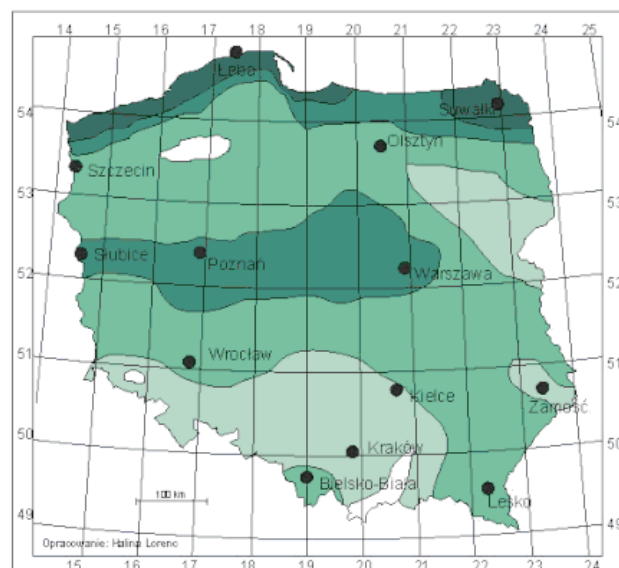
Największa polska farma wiatrowa w Margoninie jest pięć razy mniejsza od największej farmy w Europie. Z kolei największa farma wiatrowa w Europie jest trzysta razy mniejsza od największej na świecie, czyli chińskiej Gansu Wind Farm.

Największe morskie elektrownie wiatrowe

Największe morskie farmy wiatrowe znajdują się w Europie, głównie na Morzu Północnym. Jest to obszar idealny do tego typu inwestycji, ponieważ leży na europejskim szelfie kontynentalnym, a jego średnia głębokość wynosi 90 metrów. Dzięki temu możliwe jest stosowanie różnych technologii posadowienia turbin, a stałe i silne wiatry zapewniają wysoką efektywność energetyczną.

Wśród największych morskich elektrowni wiatrowych w Europie wyróżnia się Hornsea 2 (Wielka Brytania), która jest jedną z najbardziej zaawansowanych technologicznie i wydajnych farm o mocy około 1,32 GW. Kolejnym znaczącym projektem jest Borssele 1&2 – holenderska elektrownia, która znacząco wpływa na bilans energetyczny kraju. Z kolei East

Strefy energetyczne wiatru w Polsce Mezoskala

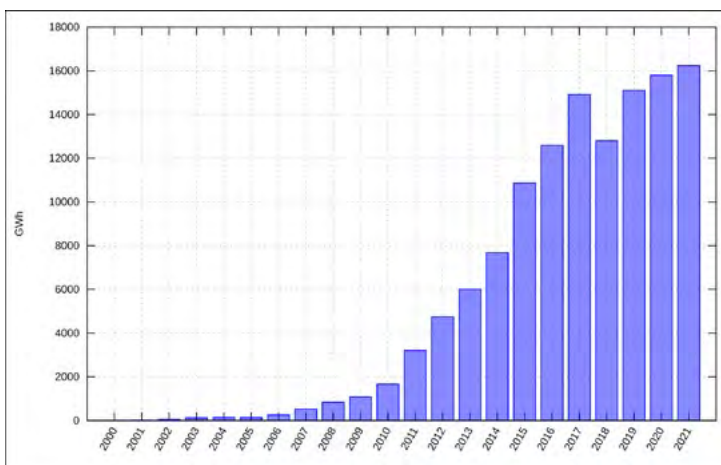


Ośrodek
Meteorologii



Aktualizacja mapy na podstawie okresu obserwacyjnego 1971-2000

Źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Strefy_energiiwiatru.gif, autor: IMGW



Produkcja prądu z energetyki wiatrowej w Polsce, źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Energetyka_wiatrowa_w_Polsce#/media:Plik:Poland-wind-generation.svg, autor: Tbp

Anglia One to jeden z największych projektów morskiej energetyki wiatrowej w Wielkiej Brytanii, który przyczynia się do zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii w tym kraju.

Najwięcej morskich farm wiatrowych znajduje się w Europie, a wiodącymi krajami w tej dziedzinie są Wielka Brytania, Holandia, Niemcy, Dania oraz Hiszpania. Poza Europą znaczący rozwój tego sektora obserwuje się w Chinach, jednak całkowita moc zainstalowana w tym kraju jest trzykrotnie mniejsza niż w Europie.

W Wielkiej Brytanii energia wiatrowa, zarówno lądowa, jak i morska, zajmuje drugie miejsce w całym bilansie energetycznym, zaraz po gazie ziemnym. Jak wynika z dostępnych danych, udział farm wiatrowych lądowych i morskich jest niemal równy, co pokazuje, że rozwój tych technologii jest tam na podobnym poziomie. W Holandii energia wiatrowa zajmuje trzecie miejsce w zestawie energetycznym kraju. Pierwsze miejsce przypada gazowi ziemnemu, a drugie węglowi. Morskie farmy wiatrowe stanowią aż jedną trzecią całkowitej produkcji energii wiatrowej, co czyni je kluczowym elementem strategii energetycznej Holandii.

Dla przykładu, Korea Południowa planuje do 2030 roku zbudować morskie farmy wiatrowe o łącznej mocy 8,2-12 GW, co uczyniłoby je największą tego typu inwestycją na świecie. Rozwój energetyki wiatrowej w tym kraju jest możliwy dzięki sprzyjającym warunkom meteorologicznym, zwłaszcza silnym wiatrom monsunowym, których prędkość przekracza 8 m/s. Obecnie łączna moc zainstalowana morskich farm wiatrowych w Korei wynosi ~124 MW, co jest stosunkowo niewielką wartością w porównaniu do planowanych inwestycji.

Morska energetyka wiatrowa w Polsce – perspektywy

Obecnie w Polsce nie funkcjonują żadne morskie elektrownie wiatrowe, choć prowadzone są intensywne prace nad ich uruchomieniem.

Pierwotne plany zakładały zainstalowanie farm o łącznej mocy 1 GW do 2020 roku, jednak pandemia oraz inne czynniki wpłynęły na opóźnienie realizacji tych projektów. Ograniczenia te mają charakter ekologiczny, prawny oraz administracyjno-przestrzenny. Jednym z kluczowych problemów są obawy związane z ochroną środowiska. Morskie farmy wiatrowe mogą negatywnie wpływać na populacje ptaków oraz inne gatunki zwierząt zamieszkujących ekosystemy morskie. Dodatkowo skomplikowane regulacje prawne związane z obszarami przesyłowo-transportowymi wymagają licznych uzgodnień, zarówno na poziomie krajowym, jak i unijnym. Administracyjnie budowa farm morskich wymaga uzyskania wielu zezwoleń, co dodatkowo wydłuża proces inwestycyjny.

Jak wskazuje polska strona rządowa pierwsza produkcja energii z morskiej farmy wiatrowej ma rozpocząć się już

w 2026 r. W Polityce Energetycznej Polski do 2040 r. wskazano, że moc zainstalowana w morskiej energetyce wiatrowej osiągnie w 2030 r. wartość 5,9 GW, natomiast w 2040 r. – do 11 GW.

W porównaniu do innych krajów Polska wciąż pozostaje w tyle pod względem rozwoju morskiej energetyki wiatrowej. Podczas gdy Wielka Brytania i Holandia posiadają już rozbudowane farmy wiatrowe na morzu, Polska dopiero planuje pierwsze tego typu inwestycje. Jeśli uda się je zrealizować, mogą one znacząco wpłynąć na krajowy bilans energetyczny i przyczynić się do większego uniezależnienia się od paliw kopalnych.

Energia wiatru – czy na pewno ekologiczna?

Turbiny wiatrowe, podobnie jak każde inne urządzenia mechaniczne, podlegają awariom i wymagają konserwacji. Do najczęstszych problemów należą pożary spowodowane przeciążeniem instalacji elektrycznej, problemy ze stabilnością konstrukcji, a także uszkodzenia wynikające z ekstremalnie wysokich prędkości wiatru.

Pomimo tego, że same turbiny nie emitują gazów cieplarnianych podczas eksploatacji, ich wpływ na środowisko nie kończy się wraz z zakończeniem okresu użytkowania. Głównym problemem jest utylizacja zużytych turbin, zwłaszcza łopat wirnika, które często trafiają na tzw. cmentarzyska turbin wiatrowych. W niektórych przypadkach są one nawet zakopywane, co może prowadzić do emisji szkodliwych substancji do gleby i wód gruntowych.

W szczególności problematyczna jest obecność pierwiastków ziem rzadkich, takich jak neodym, cer, terb i tul, które są wykorzystywane w produkcji magnesów stosowanych w generatorach turbin. Z czasem mogą one przedostawać się do środowiska, powodując zanieczyszczenie ekosystemów.

Obecnie rozwijane są technologie, które pozwalają na recykling i ponowne wykorzystanie nawet 80% materiałów składowych turbin, co znacząco redukuje negatywne skutki dla środowiska. Badania koncentrują się na opracowaniu bardziej ekologicznych łopat, które mogłyby być łatwiej przetwarzane lub wykorzystywane w innych gałęziach przemysłu. W przyszłości możliwe jest wprowadzenie w pełni zrównoważonych rozwiązań, które pozwolą na minimalizację odpadów związanych z wycofywaniem turbin wiatrowych z eksploatacji.



Morska farma wiatrowa Hornsea 2 na Morzu Północnym. Foto – Dreamstime