

*Reusing and recycling of composite wind turbine blades. A review of current practices and prospects. Part 6**. Wind energy worldwide. A sustainable wind energy value chain*

Ponowne wykorzystanie i recykling kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Przegląd aktualnych praktyk i perspektywy. Część VI**. Energetyka wiatrowa w świecie. Zrównoważony łańcuch wartości wiatru



DOI: 10.15199/62.2026.7.2

Przedstawiono aktualny stan energetyki wiatrowej na świecie i jej ekspansji na rynkach światowych, a także powstającego ekosystemu recyklingu wycofanych z eksploatacji komponentów, opierając się na wielu raportach branżowych i recenzowanych badaniach, w celu dokonania całościowej oceny stanu energetyki wiatrowej w latach 2025–2026 oraz jej przyszłych kierunków rozwoju.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, łopaty turbin wiatrowych, energetyka wiatrowa w świecie, recykling, gospodarka o obiegu zamkniętym

A review, with 12 refs., concerning current state of the global wind energy sector and its global market expansion, as well as it offers a view of the nascent recycling ecosystem for decommissioned wind turbine components. All of that is summarized, drawing on a range of industry reports and peer-reviewed at research to provide a holistic assessment of the state of wind energy in 2025–2026 and its trajectory.

Keywords: polymer composites, wind turbine blades, wind energy worldwide, recycling, circular economy



Prof. dr hab. inż. Andrzej K. BŁĘDZKI (ORCID: 0000-0003-3579-7534) studia rozpoczął na Politechnice Łódzkiej, a ukończył je w roku 1968 na Uniwersytecie Halle-Merseburg, gdzie w 1971 r. uzyskał stopień doktora. Po przeniesieniu się na Politechnikę Szczecińską (obecnie Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie), gdzie w 1987 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego, odbył liczne staże naukowe, m.in. w Fundacji Humboldta. W 1988 r. objął stanowisko profesora na Uniwersytecie w Kassel, a w 1993 r. Prezydent RP nadał mu tytuł profesora. Obecnie działa jako senior profesor w ZUT w Szczecinie. Od 2020 r. pełni funkcję przewodniczącego Sekcji Materiałów Niemetalowych w Komitecie Inżynierii Materiałowej i Metalurgii PAN. Specjalność – inżynieria materiałowa, szczególnie biokompozyty termoplastyczne i duroplastyczne, kompozyty samowzmocnione, recykling, przetwórstwo tworzyw termoplastycznych i duroplastycznych.

Prof. Andrzej K. BŁĘDZKI PhD Eng. (ORCID: 0000-0003-3579-7534) he started his studies at the Lodz University of Technology and graduated in 1968 from the University of Halle-Merseburg, where in 1971 he obtained a PhD. After moving to the Szczecin Technical University (currently the West Pomeranian University of Technology in Szczecin), where in 1987 he obtained a habilitated doctoral degree, he completed numerous research internships, including the Humboldt Foundation. In 1988, he took up the position of professor at the University of Kassel, and in 1993, the President of the Republic of Poland awarded him the title of professor. Currently, he works as a senior professor at ZUT in Szczecin. Since 2020, he has been the chairman of the Section for the Non-metallic Materials in the Committee of Materials Engineering and Metallurgy of the Polish Academy of Sciences. Specialty – materials science and engineering, especially thermoplastic and duroplastic biocomposites, self-reinforced composites, recycling, processing of thermoplastic and duroplastic materials.

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al Piastów 19, Szczecin 70-310, Polska, tel.: (91) 449-44-11, e-mail: andrzej.bledzki@zut.edu.pl



Dr hab. inż. Magdalena URBANIAK, prof. ZUT (ORCID: 0000-0002-0701-6908), w roku 1999 ukończyła studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Szczecińskiej (obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie). W 2005 r. uzyskała stopień doktora w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, a w 2020 r. stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie inżynieria mechaniczna na tym samym wydziale. Od 2022 r. jest profesorem uczelni ZUT. Obecnie jest członkiem Rad Dyscyplin Naukowych – Inżynieria Mechaniczna (od 2019 r.) i Inżynieria Materiałowa (od 2023 r.) ZUT w Szczecinie. Od 2020 r. jest także członkiem i sekretarzem Sekcji Materiałów Niemetalowych w Komitecie Inżynierii Materiałowej i Metalurgii PAN. Od 2020 r. pełni funkcję kierownika

Katedry Mechaniki na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT w Szczecinie. Specjalność – kompozyty i biokompozyty duroplastyczne, lekkie wielowarstwowe biokompozyty; badania właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych.

PhD DSc Eng. Magdalena URBANIAK, associate professor (ORCID: 0000-0002-0701-6908), in 1999, she graduated from the Faculty of Mechanical of the Szczecin Technical University (currently the Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics of the West Pomeranian University of Technology in Szczecin). In 2005, she obtained a doctoral degree in the building and maintenance of machines, and in 2020 was habilitated doctoral degree in the discipline of mechanical engineering at the same faculty. She obtained the title of associate professor in 2022. Currently, she is a member of the Science Discipline Councils – Mechanical Engineering (since 2019) and Materials Engineering (since 2023) of West Pomeranian University of Technology in Szczecin. Since 2020, she also became a member and secretary of the Section of Non-metallic Materials in the Committee of Materials Engineering and Metallurgy of the Polish Academy of Sciences. Since 2020, she is the head of the Department of Mechanics at the Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics of the West Pomeranian University of Technology in Szczecin. Specialty – duroplastic composites and biocomposites, lightweight sandwich composites; research on mechanical properties and behavior of composite materials.¹

** Part 5/Cz. V, Przem. Chem. 2025, **104**, nr 1, 142.

Globalna energetyka wiatrowa znajduje się w historycznie krytycznym momencie swojego rozwoju, w którym działania i środki podejmowane w kolejnych latach przez branżę, odpowiednich decydentów oraz innych partnerów z biznesu i społeczeństwa obywatelskiego będą miały znaczący wpływ na przyszły rozwój tej technologii. W dającej się przewidzieć przyszłości prognozuje się lata rekordowego wzrostu, w których już obecnie światowy rynek energetyki wiatrowej przechodzi fazę przyspieszonego wzrostu, napędzanego rekordowymi inwestycjami i dążeniem do niezależności energetycznej. Analiza najnowszych danych wykazuje, że energia wiatrowa od kilku lat znajduje się w centrum przyszłego rozwoju gospodarczego wielu krajów na świecie, będąc najważniejszym źródłem energii odnawialnej na naszym globie. Z opublikowanych przez Global Wind Energy Council (GWEC, z siedzibą w Brukseli, Belgia) danych dotyczących nowych instalacji wiatrowych wynika, że prognozowany wzrost instalacji wiatrowych w 2025 r. w stosunku do 2024 r. wynosi 8,8%, w tym głównie w Azji, osiągając docelowo moc 2 TW do 2030 r.¹⁾ Według szacunków World Wind Energy Association (WWEA, z siedzibą w Bonn, Niemcy; Światowe Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej zrzeszające blisko 600 członków z ponad 100 krajów) światowa moc zainstalowana przekroczyła już 1,2 TW, a stan globalnego rynku na lata 2024–2025 wykazał rekordowy przyrost do 117 GW nowych mocy energii wiatrowej. Szacowano, że do końca 2025 r. światowa moc energetyki wiatrowej przekroczy 150 GW¹⁾. Gwałtowny wzrost energetyki wiatrowej koncentruje się w kilku krajach, z Chinami, Indiami, Chile i Turcją na czele, przy umiarkowanym udziale tradycyjnych rynków, takich jak Niemcy i Stany Zjednoczone. Głównym liderem globalnego rynku tej energetyki wciąż pozostają Chiny, odpowiadając za wykonanie ok. 70% nowych instalacji w 2024 r. oraz ponad 72% w pierwszej połowie 2025 r. Podobnie Indie w 2025 r. osiągnęły rekord krajowy 6,3 GW mocy zainstalowanej. W tym samym roku w USA oczekiwano ponad 7 GW, a w Chinach przekroczenia 100 GW nowej mocy energetyki wiatrowej¹⁾.

The global wind energy sector is at a historically critical juncture in its development, at which the actions and measures taken in the coming years by the industry, relevant decision-makers and other partners from the business sector and civil society will have a significant impact on the future development of this technology. The foreseeable future is expected to bring years of record growth, with the global wind energy market already experiencing a phase of accelerated expansion, driven by record levels of investment and the pursuit of energy independence. An analysis of the latest data shows that wind energy has been at the heart of future economic development in many countries around the world for several years, being the most important source of renewable energy on our planet. Data on new wind power installations published by the Global Wind Energy Council (GWEC, based in Brussels, Belgium) shows that the projected growth in wind power installations in 2025 compared to 2024 is 8.8%, mainly in Asia, ultimately reaching a capacity of 2 TW by 2030¹⁾. According to estimates by the World Wind Energy Association (WWEA), based in Bonn, Germany, which brings together nearly 600 members from over 100 countries, global installed capacity has already exceeded 1.2 TW, and the state of the global market for 2024–2025 showed a record increase to 117 GW (gigawatts) of new wind power capacity. It has been estimated that by the end of 2025, global wind power capacity will exceed 150 GW¹⁾. It should be noted that the rapid growth in wind power is concentrated in a few countries, led by China, India, Chile and Turkey, with traditional markets such as Germany and the United States accounting for a moderate share. China remains the main leader in the global wind energy market, accounting for around 70% of new installations in 2024 and over 72% in the first half of 2025. Similarly, India achieved a national record of 6.3



Dr inż. Mieczysław SCHEIBE (ORCID: 0009-0002-9429-5155) w roku 1973 ukończył studia z zakresu mechaniki, maszyn i siłowni okrętowych na Wydziale Budowy Maszyn i Okrętów Politechniki Szczecińskiej (obecnie ZUT w Szczecinie). W 2022 r. uzyskał stopień doktora na Wydziale Mechanicznym Politechniki Morskiej w Szczecinie. W latach 2002–2003 był słuchaczem studiów podyplomowych z zakresu zarządzania przedsiębiorstwem na Uniwersytecie Szczecińskim i Pomorskiej Filii Polskiej Fundacji i Promocji Kadr, a w latach 2013–2015 odbył studia podyplomowe z projektowania jachtów i pływających jednostek sportowych w ZUT w Szczecinie. Zawodowo wykonuje pracę w przemyśle okrętowym w kraju i za granicą na rzecz spółek prywatnego sektora budowy i remontów statków. Specjalność – inżynieria mechaniczna

PhD Eng. Mieczysław SCHEIBE (ORCID: 0009-0002-9429-5155) in 1973 graduated with a degree in mechanics, machinery, and ship power plants from the Faculty of Mechanical and Ship Design of the Szczecin University of Technology (currently West Pomeranian University of Technology in Szczecin). In 2022, he obtained his PhD from the Faculty of Mechanical Engineering of the Maritime University of Technology in Szczecin. In 2002–2003, he attended postgraduate studies in business management at the University of Szczecin and the Pomeranian Branch of the Polish Foundation and Personnel Promotion, and in 2013–2015, he completed postgraduate studies in yacht and floating sports vessel design at West Pomeranian University of Technology in Szczecin. He professionally works in the shipbuilding industry in Poland and abroad for companies in the private shipbuilding and repair sector. Specialty – mechanical engineering.



Mgr inż. Piotr MĄDRY ukończył studia inżynierskie na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn oraz studia magisterskie na kierunku Inżynieria Materiałowa na Politechnice Warszawskiej. Obecnie jest doktorantem Szkoły Doktorskiej Politechniki Warszawskiej. Specjalność – materiały kompozytowe i recykling materiałów polimerowych.

MSc Eng. Piotr MĄDRY graduated in Mechanical Engineering and completed a master's degree in Materials Engineering at the Warsaw University of Technology. He is currently a PhD student at the Doctoral School of the Warsaw University of Technology. Specialty – composite materials and recycling of polymer materials.

Obecnie duży postęp w rozwoju energetyki wiatrowej odnotowują kolejne kraje Azji Południowo-Wschodniej (Filipiny i Wietnam) oraz Australia, postrzegając energię odnawialną jako główny element ich rozwoju gospodarczego. Szacowano, że Chiny osiągną wzrost PKB na poziomie 5% w 2025 r., natomiast MFW (Międzynarodowy Fundusz Walutowy) prognozował wzrost dla Indii na poziomie 6%, dla Wietnamu 7% i dla Filipin 6%¹⁾. Kraje te budują nowe gospodarki dla blisko 4,9 mld mieszkańców regionu Azji i Oceanii, którzy odpowiadają za ok. połowę globalnego zużycia energii. Przewiduje się, że do 2040 r. ich zużycie energii wzrośnie o blisko 60%¹⁾. Istotną sprawą pozostaje struktura rynku, w której dominuje lądowa energetyka wiatrowa (*onshore*), stanowiąc ponad 75% przychodów całego sektora, a pozostałe 25% stanowi morska energetyka wiatrowa (*offshore*).

Energetyka wiatrowa w Europie

Rozwój energetyki wiatrowej w Europie obecnie koncentruje się na zwiększaniu skali projektów *offshore* oraz na modernizacji już istniejących farm (*repowering*). W 2024 r. w Europie zainstalowano 17,5 GW energii, z czego 14 GW przypadło na kraje Unii Europejskiej (UE-27), a w 2025 r. zainstalowano 22,5 GW. Liderem rynku energetyki wiatrowej w Europie są nadal Niemcy z rekordowymi inwestycjami instalacji na poziomie 4–5 GW rocznie i Wielka Brytania, realizująca projekty głównie w sektorze *offshore* o łącznej mocy zainstalowanej ok. 16 GW (stan na styczeń 2026 r.) i wyznaczonymi celami: na 2030 r. 50 GW, a na 2050 r. ponad 100 GW. Znaczny przyrost inwestycji instalacji energetyki wiatrowej w ostatnich latach odnotowuje również Francja, Hiszpania i Szwecja. Europa posiada ok. 45% światowej mocy morskich farm wiatrowych, która na koniec 2024 r. wyniosła 37 GW²⁾. Rozwój morskiej energetyki wiatrowej w Europie jest istotny ze względu na możliwość wykorzystania zasobów energetycznych wiatrów występujących na Morzu Bałtyckim, Morzu Północnym i Morzu Norweskim. Od niedawna szczególnym zainteresowaniem objęto akwen południowy i wschodni Morza Północnego, które przez Niemcy i Norwegię postrzegane są jako wzrastający rynek morskiej energetyki wiatrowej. W celu wsparcia skoordynowanych działań dotyczących wzrostu tych dwóch kluczowych rynków

GW of installed capacity in 2025. In the same year, the US was expected to add over 7 GW, whilst China was set to exceed 100 GW of new wind power capacity¹⁾. Currently, significant progress in the development of wind power is being made by other countries in South-East Asia (the Philippines and Vietnam) and Australia, which view renewable energy as a key component of their economic development. It is estimated that China is set to achieve GDP growth of around 5% in 2025, whilst the IMF (International Monetary Fund) forecasts growth of around 6% for India, 7% for Vietnam and 6% for the Philippines¹⁾. These countries are building new economies for the nearly 4.9 billion people living in the Asia-Pacific region, who account for around half of global energy consumption. Their energy consumption is projected to rise by nearly 60% by 2040¹⁾. The market structure remains significant, with onshore wind power dominating and accounting for over 75% of the sector's total revenue, whilst the remaining 25% is accounted for by offshore wind power.

Wind energy in Europe

The development of wind energy in Europe is currently focused on scaling up offshore projects and modernising existing wind farms (repowering). In 2024, 17.5 GW was installed in Europe, of which 14 GW was in the European Union (EU-27), and in 2025 the growth rate stood at 22.5 GW. Germany remains the leader in the European wind energy market, with record-breaking annual installations of around 4–5 GW, alongside the United Kingdom, which is implementing projects mainly in the offshore sector, with a total installed capacity of approximately 16 GW (as of January 2026) and targets set at 50 GW for 2030 and over 100 GW for 2050. France, Spain and Sweden have also seen a significant increase in wind power investment in recent years. Europe accounts for approximately 45% of the world's offshore wind farm capacity, which stood at 37 GW at the end of 2024²⁾. The development of offshore wind energy in Europe is significant due to the potential to



Prof. dr hab. inż. Anna BOCZKOWSKA (ORCID: 0000-0002-3694-1342) w roku 1989 ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. W 2000 r. uzyskała stopień doktora, a w 2011 r. stopień doktora habilitowanego na tym samym wydziale. W 2018 r. otrzymała tytuł profesora. Jest dziekanem Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Specjalność – kompozyty, polimery, nanomateriały, materiały inteligentne; badania materiałów kompozytowych w zakresie opisu zależności pomiędzy parametrami wytwarzania a mikrostrukturą i właściwościami.

Prof. Anna BOCZKOWSKA PhD Eng. (ORCID: 0000-0002-3694-1342) graduated from the Faculty of Materials Science and Engineering at the Warsaw University of Technology in 1989. In 2000, she obtained a doctoral degree, and in 2011, she obtained a habilitated doctoral degree at the same faculty. In 2018, she received the title of professor. She is the dean of the Faculty of Materials Science and Engineering at the Warsaw University of Technology. Specialty – composites, polymers, nanomaterials, intelligent materials; research on composite materials in terms of describing the relationship between manufacturing parameters and microstructure and properties.

in 2018, she received the title of professor. She is the dean of the Faculty of Materials Science and Engineering at the Warsaw University of Technology. Specialty – composites, polymers, nanomaterials, intelligent materials; research on composite materials in terms of describing the relationship between manufacturing parameters and microstructure and properties.



Dr Mathias KÖHLER w roku 2015 uzyskał stopień doktora chemii metaloorganicznej na Wydziale Chemii i Nauk o Ziemi Uniwersytetu Friedricha Schillera w Jenie. Od 2016 r. pracuje w Instytucie Fraunhofera Badań Stosowanych Polimerów IAP, gdzie obecnie jest kierownikiem grupy „testy strukturalne i analityka” w Dziale Materiałów Polimerowych i Kompozytów PYCO. Specjalność – opracowywanie żywic do konstrukcji lekkich.

Dr. Mathias KÖHLER, Group Manager; in 2015 obtained a PhD in metalorganic chemistry from the Faculty of Chemistry and Earth Sciences of the Friedrich Schiller University Jena. Since 2016 he is working at the Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP. Currently, he is group manager of the group 'structural testing and analytics' at the Research division Polymeric Materials and Composites PYCO of the Fraunhofer IAP. Specialty – resin development for lightweight structures.

and analytics' at the Research division Polymeric Materials and Composites PYCO of the Fraunhofer IAP. Specialty – resin development for lightweight structures.

energii w Europie, Niemiecko-Norweska Izba Handlowa (AHK Norwegen z siedzibą w Oslo, Norwegia; organizacja bilateralna o charakterze stowarzyszenia) oraz Norwegian Offshore Wind (z siedzibą w Haugesund, Norwegia; największa w Norwegii organizacja branżowa i jednocześnie klastrowa przemysłowy skupiający ponad 350 firm z sektora morskiej energetyki wiatrowej, promujący innowacje i eksport rozwiązań wiatrowych, ze szczególnym uwzględnieniem technologii pływających), podczas Trzeciego Szczytu Morza Północnego, który odbył się 26 stycznia 2026 r. w Hamburgu, Niemcy, zadeklarowały swoje działania dotyczące utworzenia specjalnej niemiecko-norweskiej grupy roboczej do spraw morskiej energetyki wiatrowej oraz masowej rozbudowy już istniejących i budowy nowych morskich farm wiatrowych³⁾. Przywódcy państw regionu Morza Północnego: Belgii, Danii, Francji, Niemiec i innych krajów ościennych formalnie zacieśnili współpracę w celu przyspieszenia transformacji energetycznej i potwierdzili swoje zobowiązania do budowy wspólnej infrastruktury energetycznej w latach 2026–2050. Podtrzymano wspólne zobowiązanie, aby Morze Północne stało się największym na świecie centrum zielonej energii, a moc z farm wiatrowych wyniosła co najmniej 120 GW do 2030 r. i ok. 300 GW do 2050 r., z czego ok. 33% mocy winna być zrealizowana w ramach projektów transgranicznych, co będzie wymagało skoordynowanych regulacji prawnych, skoordynowanego planowania infrastruktury w zakresie inżynierii morskiej oraz ścisłej współpracy biznesowo-przemysłowej⁴⁾. Na tle krajów starego kontynentu Polska staje się jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się rynków wiatrowych w Europie i na koniec 2025 r. zajmowała 7. miejsce pod względem przyrostu nowych mocy farm wiatrowych, a odnotowana zainstalowana łączna moc energii wiatrowej obecnie wynosi 10,5 GW. Według prognoz i szacunków GWEC i WWEA rozwój energetyki wiatrowej na całym świecie zdefiniuje kolejną erę rozwoju gospodarczego.

Zrównoważony łańcuch wartości wiatru: energetyka wiatrowa-recykling-GOZ

Energetyka wiatrowa przechodzi obecnie z modelu liniowego na gospodarkę obiegu zamkniętego (GOZ), co jest kluczowe w obliczu kończącej się żywotności pierwszych generacji turbin (ok. 20–25 lat). Potwierdzone dane rynkowe wskazują,



Prof. dr inż. Holger SEIDLITZ (ORCID: 0000-0003-0024-1624) w roku 2013 uzyskał stopień doktora na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki w Chemnitz. W 2015 r. otrzymał stanowisko młodszego profesora na Brandenburgskiej Politechnice Cottbus-Senftenberg. W 2019 r. został profesorem zwyczajnym na Brandenburgskim Uniwersytecie Technologicznym w Cottbus-Senftenberg oraz dyrektorem Działu Materiałów Polimerowych i Kompozytów PYCO w Instytucie Fraunhofera Badań Stosowanych Polimerów IAP w Wildau pod Berlinem. Specjalność – lekkie konstrukcje na bazie kompozytów polimerowych.

Prof. Dr.-Ing. Holger SEIDLITZ (ORCID: 0000-0003-0024-1624) in 2013, he obtained a PhD from the Faculty of Mechanical Engineering of University of Technology Chemnitz. In 2015, he has been granted

a junior professorship at Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg. In 2019 he became full professor for Polymer-based Lightweight Design at Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg as well as division director Polymeric Materials and Composites PYCO at the Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP in Wildau near Berlin. Specialty – lightweight structures based on polymer composites.

harness the wind energy resources found in the Baltic Sea, the North Sea and the Norwegian Sea. Recently, particular attention has been focused on the southern and eastern parts of the North Sea, which are viewed by Germany and Norway as a growing market for offshore wind energy. In order to support coordinated efforts to promote the growth of these two key energy markets in Europe, the German-Norwegian Chamber of Commerce (AHK Norway, based in Oslo, Norway – a bilateral association) and Norwegian Offshore Wind (based in Haugesund, Norway – Norway's largest industry organization and an industrial cluster bringing together over 350 companies from the offshore wind energy sector, promoting innovation and the export of wind energy solutions, with a particular focus on floating technologies), during the Third North Sea Summit, which took place on 26 January 2026 in Hamburg, Germany, announced their plans to establish a special German-Norwegian working group on offshore wind energy and the large-scale expansion of existing offshore wind farms and the construction of new ones³⁾. Leaders from the North Sea region – Belgium, Denmark, France, Germany and other neighbouring countries – have formally strengthened their cooperation to accelerate the energy transition and reaffirmed their commitment to building shared energy infrastructure between 2026 and 2050. They reaffirmed their shared commitment to making the North Sea the world's largest green energy hub, with wind farm capacity reaching at least 120 GW by 2030 and approximately 300 GW by 2050, of which around 33% of the capacity should be delivered through cross-border projects, which will require coordinated legal frameworks, coordinated infrastructure planning in the field of marine engineering, and close business and industrial cooperation⁴⁾. It should be noted that, compared to other European countries, Poland is emerging as one of the most dynamically developing wind energy markets in Europe; by the end of 2025, it will rank seventh in terms of the increase in new wind farm capacity, with the total installed wind power capacity currently standing at 10.5 GW. According to forecasts and estimates by GWEC and WWEA, the development of wind energy worldwide will define the next era of economic growth.

A sustainable wind energy value chain: wind energy-recycling-circular economy

The wind energy sector is currently transitioning from a linear model to a Circular Economy (CE), which is crucial as the first generation of turbines reaches the end of their service life (approx. 20–25 years). Confirmed market data indicates that emerging and developing economies account for almost 80% of global growth in electricity demand. The wind energy sector currently

że gospodarki wschodzące i rozwijające się odpowiadają za niemal 80% światowego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną. Energetyka wiatrowa stoi obecnie przed wyzwaniem określanym jako „domknięcie obiegu” GOZ, ponieważ o ile generuje czystą energię umożliwiającą zaspokojenie tego popytu w sposób zrównoważony, budując czysty i bezpieczny system energetyczny, o tyle sama infrastruktura musi stać się w pełni możliwa do odzyskania. Dlatego obecne powiązanie energetyki wiatrowej z recyklingiem i GOZ jest kluczowe dla zapewnienia, żeby wytwarzanie czystej energii było rzeczywiście zrównoważone w całym cyklu życia oraz po jego zakończeniu (*end of life*). O ile 85–90% masy turbiny wiatrowej (elementy maszynowni i wieże zawierające stal, miedź i aluminium oraz fundamenty zawierające stal i beton) jest łatwe do recyklingu, to kluczowym i największym problemem tej branży są łopaty wirnika, które wykonane z kompozytów (żywice, włókno szklane/węglowe) są trudne do przetworzenia. Obecnie GOZ w tym obszarze to głównie wymiana na nowsze modele (*repowering*) oraz próby odzysku włókien metodami chemicznymi (piroliza, solwoliza) i mechanicznymi (*upcycling*) lub powtórne wykorzystanie zużytych łopat znajdujących drugie życie (*repurposing*) jako elementy w małej w architekturze (np. ławki, wiaty na szlakach komunikacyjnych, elementy placów zabaw) oraz konstrukcjach mostowych (np. kładki dla pieszych), a nawet zbrojenie betonu. Wyzwaniem nadal pozostaje odzysk metali ziem rzadkich (np. neodymu) z magnesów w generatorach. Należy zaznaczyć, że w ramach GOZ opracowano również „projektowanie dla obiegu” (*design for circularity*), polegające na takim projektowaniu turbin, by były one łatwe do demontażu. Firmy takie jak Vestas czy Siemens Gamesa (hiszpańsko-niemiecka firma inżynierii wiatrowej z siedzibą w Zamudio, Hiszpania) pracują nad żywicami termoplastycznymi, które pozwalają na chemiczne oddzielenie składników łopaty wirnika i ich ponowne wykorzystanie. Obecnie firmy te wprowadzają nowe, łatwiejsze do demontażu i recyklingu materiały kompozytowe, które umożliwiają separację włókien od żywicy na koniec życia turbiny. W GOZ istotna jest nie tylko utylizacja czy recykling, ale też produkcja wykazująca się redukcją śladu węglowego. Rozważa się wytwarzanie wież z „zielonej stali” (produkowanej z użyciem wodoru) lub nawet z drewna laminowanego, co może drastycznie obniżyć całkowitą energię zaangażowaną w realizację inwestycji energetyki wiatrowej. Nowoczesne turbiny wiatrowe potrzebują 3–14 miesięcy, aby wyprodukować tyle energii, ile zużyto na ich budowę, instalację i utylizację, co czyni je wysoce zrównoważonymi, a recykling materiałów dodatkowo obniża ich negatywny wpływ na środowisko. Zauważalne przechodzenie większości krajów Europy na GOZ spowodowane jest niezbędną koniecznością zrównoważonego zarządzania odpadami kompozytowymi.

W pierwszej połowie 2025 r. Europejskie Stowarzyszenie Przemysłu Kompozytów EuCIA (European Composites Industry Association z siedzibą w Brukseli) przeprowadziło pełną analizę odpadów kompozytów termoutwardzalnych w Europie. Wynikało z niej, że szacowana na koniec 2025 r.

faces a challenge known as ‘closing the loop’ in the circular economy, because whilst it generates clean energy that enables this demand to be met in a sustainable manner, thereby building a clean and secure energy system, the infrastructure itself must become fully recoverable. Hence, the current link between wind energy, recycling and the circular economy is crucial to ensuring that clean energy is truly sustainable throughout its entire life cycle and at the end of its life (EOL). Whilst around 85–90% of a wind turbine’s mass (the nacelle components and towers, which contain steel, copper and aluminum, and the foundations, which contain steel and concrete) is easy to recycle, the key and biggest challenge facing the industry is the composite rotor blades, which are made from composites (resins, glass/carbon fiber) are difficult to process. Currently, circular economy initiatives in this area mainly involve replacing turbines with newer models (repowering) and attempts to recover fibers using chemical methods (pyrolysis and solvolysis) and mechanical methods (upcycling), or the reuse of worn-out blades finding a second life as elements in small-scale architecture (e.g. benches, shelters along transport routes, playground equipment) and bridge structures (e.g. pedestrian bridges) and even as concrete reinforcement. The recovery of rare-earth metals (e.g. neodymium) from the magnets in generators remains a challenge. It should be noted that, within the framework of the circular economy, the concept of ‘design for circularity’ has also emerged, which involves creating turbines that are designed from the outset to be easily dismantled. Companies such as Vestas and Siemens Gamesa (a Spanish-German wind engineering firm based in Zamudio, Vizcaya, Spain) are working on thermoplastic resins that allow the components of the rotor blades to be chemically separated and reused. These companies are currently introducing new composite materials that are easier to dismantle and recycle, enabling the separation of fibers from the resin at the end of the turbine’s life. A key aspect of the circular economy is not only waste disposal or recycling, but also production that demonstrates a reduction in the carbon footprint. The aim is to construct towers from ‘green steel’ (produced using hydrogen) or even laminated timber, which can drastically reduce the total energy involved in a wind energy project. In the context of the carbon footprint, it should be noted that modern wind turbines take 3–14 months to generate as much energy as was consumed in their construction, installation and decommissioning, making them highly sustainable, whilst the recycling of materials further reduces their negative environmental impact. The noticeable shift towards a circular economy in most European countries is driven by the urgent need for sustainable management of composite waste. In the first half of 2025, a comprehensive analysis of ther-

ilość odpadów kompozytów termoutwardzalnych w Europie wyniesie ok. 914 Gg, z czego tylko ok. 25% tego wolumenu (ok. 228 Gg) będzie w pełni dostępna do recyklingu, co wynikało z trudności w zbiórce i wyekstrahowaniu materiałów osadzonych w infrastrukturze⁵). Obecnie ilość tych kompozytów podlegających recyklingowi wynosi maksymalnie 5–10 Gg, co stanowi niespełna 5% z dostępnej ilości 228 Gg⁵). Na początku marca 2025 r. podczas targów JEC World 2025 w Paryżu EuCIA we współpracy z JEC Group (organizacja *non-profit* z siedzibą w Paryżu, Francja) powołało koalicję przemysłową pn. Europejski Sojusz na rzecz Kompozytów o Obiegu Zamkniętym ECCA (European Circular Composites Alliance), będący inicjatywą mającą na celu transformację europejskiego przemysłu kompozytowego w kierunku GOZ⁵). Największym europejskim stowarzyszeniem branży wiatrowej obecnie jest organizacja WindEurope, która aktywnie promuje energetykę wiatrową na całym kontynencie, zrzeszając ponad 450 firm członkowskich i instytucji z całego łańcucha wartości, w tym inwestorów, producentów turbin, a także instytuty badawcze. Współpracując ściśle z instytucjami UE i dostarczając informacje branżowe do Systemu Informacji o Strategicznym Planie Technologii Energetycznych Energetyki Wiatrowej SETIS (Strategic Energy Technology Information System Unii Europejskiej), również na swojej platformie wspiera realizację Planu SET (Strategic Energy Technology Plan) w celu przyspieszenia transformacji niskoemisyjnej w Europie oraz rozwija politykę, badania i infrastrukturę niezbędną do transformacji energetycznej starego kontynentu. Według przedstawionej przez SETIS WindEurope analizy wycofanych z eksploatacji odpadów z kompozytów termoutwardzalnych szacowano, że do końca 2025 r. w Europie powstanie ok. 60 Gg odpadów kompozytowych pochodzących z wycofanych z eksploatacji łopat wirników rocznie, a do 2040 r. liczba ta wzrośnie do ok. 400 Gg. Z tego powodu rozwój efektywnych technologicznie i ekonomicznie metod recyklingu (np. piroliza, solwoliza, rozdrabnianie pod wpływem impulsów elektrycznych wysokiego napięcia) jest priorytetem dla pełnego wdrożenia zasad GOZ w sektorze energetyki wiatrowej⁶). SETIS, zarządzany przez Wspólne Centrum Badawcze (JRC) Komisji Europejskiej, monitoruje postępy w realizacji Strategicznego Planu Technologii Energetycznych (Plan SET będący systemem gromadzącym dane i analizy niezbędne do osiągnięcia celów klimatyczno-energetycznych UE, w tym pozycji lidera w dziedzinie czystej energii). WindEurope ściśle współpracuje z SETIS i Europejską Platformą Technologii i Innowacji w Dziedzinie Energii Wiatrowej (ETIP Wind), aby dostosować badania, innowacje i rozwój technologiczny do unijnych celów zerowej emisji netto. W Unii Europejskiej, w tym w Polsce, regulacje wymuszające GOZ w energetyce wiatrowej ewoluują od ogólnych zasad gospodarki odpadami w stronę precyzyjnych wymogów dotyczących recyklingu komponentów, takich jak łopaty turbin. Unijne ramy prawne kładą nacisk na odpowiedzialność producenta i hierarchię postępowania z odpadami, w której składowanie jest ostatecznością. Również Dyrektywa Ramowa o Odpadach (Waste Framework Directive) nakłada

moset composite waste in Europe was carried out by the European Composites Industry Association (EuCIA, based in Brussels, Belgium). This analysis indicates that the estimated volume of thermoset composite waste in Europe by the end of 2025 will be approximately 914 Gg, of which around 25% (approximately 228 Gg) is fully available for recycling, due to the difficulties in collecting and extracting materials embedded in infrastructure⁵). Currently, the amount of these composites being recycled is between 5 and 10 Gg, which represents less than 5% of the total available volume of 228 Gg⁵). In early March 2025, during the JEC World 2025 trade fair in Paris, the European Composites Industry Association (EuCIA) in collaboration with the JEC Group (a non-profit organization based in Paris, France), established an industrial coalition known as the European Circular Composites Alliance (ECCA), an initiative aimed at transforming the European composites industry towards a circular economy⁵). The largest European wind energy association is currently WindEurope, which actively promotes wind energy across the continent, bringing together over 450 member companies and institutions from across the value chain, including investors, turbine manufacturers and research institutes. Working closely with EU institutions and providing industry information to the Strategic Energy Technology Information System for Wind Energy (SETIS – Strategic Energy Technology Information System of the European Union), it also supports the implementation of the SET Plan (Strategic Energy Technology Plan) via its platform to accelerate the low-carbon transition in Europe and develops the policy, research and infrastructure necessary for the Old Continent's energy transition. According to an analysis of end-of-life thermoset composite waste presented by SETIS WindEurope, it is estimated that by the end of 2025 Europe will generate approximately 60 Gg of composite waste from end-of-life rotor blades annually, and by 2040 this figure will rise to approximately 400 Gg. For this reason, the development of technologically and economically efficient recycling methods (e.g. pyrolysis, solvolysis, high-voltage shredding) is a priority for the full implementation of the principles of the Circular Economy in the wind energy sector⁶). It should be noted that SETIS, managed by the European Commission's Joint Research Centre (JRC), monitors progress in the implementation of the Strategic Energy Technology Plan (SET Plan, a system that collects the data and analyses necessary to achieve the EU's climate and energy objectives, including leadership in the field of clean energy). WindEurope works closely with SETIS and the European Technology and Innovation Platform for Wind Energy (ETIP Wind) to align research, innovation and technological development with the EU's net-zero emissions targets (source: setis.ec.europa.eu). In the European Union and in Poland, regulations promoting the circular

hierarchię, w której recykling i odzysk mają pierwszeństwo przed składowaniem. Choć obecnie nie zakazuje ona wprost składowania łopat turbin wiatrowych w całej UE, wyznacza ramy dla krajowych zakazów. Z punktu widzenia ochrony środowiska naturalnego istotna jest Samoregulacja Branżowa (Wind Europe Landfill Ban), która określa, że od 1 stycznia 2026 r. europejski przemysł wiatrowy dobrowolnie zobowiązał się do zakazu składowania wycofanych z eksploatacji łopat wirników, dążąc do ich 100-proc. recyklingu lub odzysku energii. Branża wzywa UE do wpisania tego zakazu do prawa ogólnokrajowego w celu wyrównania szans rynkowych. Przyszłym kluczowym instrumentem, który ma ustanowić standardy dla produktów w całym cyklu życia, promując projektowanie ułatwiające recykling i zwiększając popyt na surowce wtórne będzie akt prawny UE pn. *Circular Economy Act* (planowany na III kw. 2026 r.).

Dylemat wycofywania z eksploatacji: wyzwania na dużą skalę związane z końcem cyklu życia

Recykling przestarzałych komponentów stał się poważną przeszkodą strukturalną dla branży, ponieważ pierwsza generacja komercyjnych turbin wiatrowych, głównie instalacji lądowych o mocy 1–1,5 MW, zainstalowanych w latach 2000–2005, zbliża się do końca swojego dwudziestoletniego okresu eksploatacji. W raporcie badawczym dotyczącym budowy systemu gospodarki o obiegu zamkniętym w chińskim sektorze energii odnawialnej przewidywano, że tylko w 2025 r. z eksploatacji będzie wycofanych ok. 1,26 GW zainstalowanej mocy, pochodzącej z 1864 turbin. Liczba ta prawdopodobnie drastycznie wzrośnie, osiągając 13,8 GW do 2029 r. i 18,93 GW do 2030 r.⁷⁾

Ten strumień odpadów ma istotne konsekwencje gospodarcze. W 2024 r. wartość chińskiego sektora recyklingu wycofanych z eksploatacji turbin wiatrowych wzrosła o ok. 3 mld juanów, co stanowi wzrost o 25% w ujęciu rok do roku, a prognozowano, że w 2025 r. tempo wzrostu przyspieszy do ponad 66%. Szacuje się, że do 2030 r., przy obecnych cenach, sama wartość złomu nadającego się do odzysku stali i miedzi wyniesie łącznie 24 mld juanów, przy czym odzysk metali z jednej wycofanej z eksploatacji turbiny o mocy 1,5 MW, zawierającej ok. 120 kg stali, 3 kg miedzi i 1,7 kg aluminium na każdy kilowat mocy zainstalowanej, może zmniejszyć emisję CO₂ o ok. 600 Mg na każdą jednostkę⁷⁾.

Głównym wąskim gardłem są jednak łopaty wirników. Zazwyczaj żywica epoksydowa wzmocniona włóknem szklanym lub węglowym nie nadaje się do ponownego stopienia i przetworzenia, tak jak ma to miejsce w przypadku tworzyw termoplastycznych. Istnieją trzy główne techniki recyklingu: (i) procesy fizyczne, obejmujące rozdrabnianie mechaniczne w celu wykorzystania jako kruszywo do betonu lub wypełniacz w piecach cementowych, (ii) piroliza, czyli rozkład termiczny w celu odzyskania włókien, oraz (iii) metody chemiczne z wykorzystaniem rozpuszczalników lub płynów w stanie nad-

economy in the wind energy sector are evolving from general waste management principles towards specific requirements for the recycling of components, such as turbine blades. The EU legal framework emphasises producer responsibility and a waste management hierarchy in which landfill is a last resort. The Waste Framework Directive also establishes a hierarchy in which recycling and recovery take precedence over landfill. Although it does not currently explicitly ban the landfilling of wind turbine blades across the EU, it sets out a framework for national bans. From an environmental perspective, the Industry Self-Regulation (WindEurope Landfill Ban), which stipulates that from 1 January 2026, the European wind industry has voluntarily committed to banning the landfilling of decommissioned rotor blades, aiming for 100% recycling or energy recovery. The industry is calling on the EU to enshrine this ban in national law to level the playing field. A key future instrument set to establish standards for products throughout their life cycle, promoting design for recycling and increasing demand for secondary raw materials, will be the EU's Circular Economy Act (scheduled for 2026).

The decommissioning dilemma: end-of-life challenges at scale

Recycling of obsolete components has become a major structural barrier for the industry as the first generation of commercial wind turbines – mostly onshore units of 1 to 1.5 MW capacity installed between 2000 and 2005 – approaches their twenty-year design life. The Research Report on Constructing a Circular Economy System in China's Renewable Energy Sector projects that roughly 1.26 GW of deployed capacity over around 1,864 turbines were due for retirement in 2025 alone; this figure is likely to increase drastically, reaching 13.8 GW by 2029 and 18.93 GW by 2030⁷⁾.

This waste stream has significant economic aspects. The recycling industry for discarded wind turbines in China grew by around 3 billion yuan in 2024, or 25% year-on-year, with predicted acceleration more than 66% growth in 2025. By 2030, at present prices, recoverable steel and copper scrap value alone is projected to total 24 billion yuan. Further explaining that metallic recovery from a single decommissioned 1.5 MW turbine – comprising around 120 kg of steel, 3 kg of copper, and 1.7 kg of aluminum per kilowatt of installed capacity – can lower CO₂ emissions by about 600 Mg per unit⁷⁾.

Rotor blades, however, provide the main bottleneck. Usually, epoxy resin strengthened with glass or carbon fiber cannot be remelted and refashioned as thermoplastic materials can. There are three main recycling techniques: physical processes – mechanical grinding for usage as concrete aggregate or cement kiln filler; pyrolysis – thermal degradation to retrieve fibers; and

krytycznym. Żadna z nich nie osiągnęła jeszcze komercyjnie opłacalnego odzysku materiałów o wysokiej wartości na dużą skalę. W niektórych regionach ceny za fizyczny recykling o niższej wartości spadły z 3–5 tys. juanów za 1 Mg do zaledwie kilkuset juanów, co spowodowało, że marże dla firm zajmujących się recyklingiem są obecnie bardzo niskie. Techniki pirolityczne i chemiczne, stosowane wciąż głównie na skalę laboratoryjną lub pilotażową, pozwalają lepiej zachować integralność włókien i otwierają możliwości ich wykorzystania w przemyśle motoryzacyjnym oraz budownictwie⁷⁾.

Ścieżki rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym: innowacje w zakresie odzyskiwania surowców

Pojawiło się wiele nowatorskich pomysłów wskazujących realne kierunki recyklingu łopat o wysokiej wartości. Wykorzystując stopniowe rozdrabnianie oraz regenerację kompozytów do produkcji profili z materiałów z recyklingu, płyt drewnopodobnych z tworzyw sztucznych oraz palet przemysłowych, firma Guoneng Longyuan Ecological Technology (Zhangjiakou) Co., Ltd. zainwestowała 157 mln juanów w instalację demonstracyjną o rocznej zdolności przetwarzania przekraczającej 10 Gg. Po pomyślnym opracowaniu ponad 10 kategorii produktów w swoim ośrodku badawczo-produkcyjnym w Faku w prowincji Liaoning (w tym podłóg zewnętrznych, donic do roślin oraz szalunków budowlanych) korporacja wykorzystała już 6 tys. m² płyt z kompozytu drewniano-plastikowego w projektach inżynieryjnych. Biorąc pod uwagę prognozowaną wewnętrzną stopę zwrotu z kapitału własnego na poziomie 7,8% dla zakładu w Zhangjiakou, przedstawiono realistyczne uzasadnienie ekonomiczne⁷⁾.

Model opracowany przez firmę Fengnuo (Jiangsu) Environmental Protection Technology Co., Ltd. polega na wstępnym pocięciu łopat w farmie wiatrowej zgodnie z wymaganiami dotyczącymi produktu końcowego, przekształceniu elementów konstrukcyjnych o najwyższej wytrzymałości (głównych dźwigarów) bezpośrednio w palety do transportu ciężkich ładunków oraz formowaniu pozostałego materiału w alternatywne wyroby formowane. Produkując obecnie taki materiał w ilości ok. 5 Gg/r, z czego powstaje ponad 100 tys. palet wielokrotnego użytku, firma nawiązała współpracę z kilkoma przedsiębiorstwami energetycznymi. Jedną z głównych przewag konkurencyjnych tej metody jest model obiegu zamkniętego, obejmujący proces od surowców odpadowych, przez produkt, aż po ponowne wykorzystanie w ramach systemu leasingu o obiegu zamkniętym⁷⁾.

W dziedzinie zaawansowanego odzyskiwania surowców pojawiają się techniki uzupełniające. Prezentacja linii Eco-Stone na targach JEC World 2026 we współpracy z firmą Ban Mao Green Coating, firma Swancor Regener wykorzystuje własną procedurę recyklingu chemicznego CleaVER. Jest to weryfikowalna technika niskoemisyjna, w której nie powstają odpady płynne i która rozkłada płyty z włókna węglowego termoutwardzalnego na oligomery o wysokiej czystości,

chemical methods utilizing solvents or supercritical fluids. None have yet achieved commercially viable high-value recovery at scale. In certain areas, physical down-cycling prices have fallen from 3,000–5,000 yuan/Mg to as little as a few hundred yuan, therefore generating a poor margin context for recyclers. Pyrolysis and chemical techniques, still mostly at lab or pilot scale, better preserve fibre integrity and provide access into automotive and building uses⁷⁾.

Circular economy pathways: innovation in materials recovery

Still, a group of innovative ideas show feasible directions for high-value blade recycling despite these problems. Utilizing graduated comminution and composite regeneration to make recycled profiles, wood-plastic boards, and industrial pallets, Guoneng Longyuan Ecological Technology (Zhangjiakou) Co., Ltd. has invested 157 million yuan in a demonstration plant with an annual processing capability exceeding 10 Gg. Having successfully created over ten product categories at its research and manufacturing facility in Faku, Liaoning, including outdoor flooring, planting containers, and construction formwork, the corporation has already used 6,000 square meters of wood-plastic composite boards in engineering projects. With an estimated 7.8% projected internal rate of return on equity for the Zhangjiakou plant, a realistic commercial argument is made⁷⁾.

The model developed by Fengnuo (Jiangsu) Environmental Protection Technology Co., Ltd. pre-segments blades at the wind farm according to final product requirements, transforms the highest-strength structural components (main spars) directly into heavy-load pallets, and molds the remaining material into molded alternatives. With around 5 Gg currently produced annually generating more than 100,000 reusable pallets, the company has formed alliances with several power generation companies. One of the main competitive advantages of this method is the closed-loop model from waste material via product to reuse using a circular leasing system⁷⁾.

Emerging in sophisticated material recovery are complementary techniques. Revealing the “Eco-Stone” line at JEC World 2026 together with Ban Mao Green Coating, Swancor Regener Utilizing Swancor’s own CleaVER chemical recycling procedure – a zero-liquid-waste, verifiable low-carbon technique that degrades thermoset carbon fiber plates into high-purity oligomers fit for inclusion into stone-like building materials – this construction material includes 11% recycled oligomers recovered from wind turbine carbon fiber prepreg waste⁸⁾. The Eco-Stone possesses fire- and earthquake-resistance characteristics, which are major

nadające się do wykorzystania w materiałach budowlanych przypominających kamień – ten materiał budowlany zawiera 11% oligomerów pochodzących z recyklingu, odzyskanych z odpadów preimpregnatów z włókna węglowego z turbin wiatrowych⁸⁾. Eco-Stone charakteryzuje się odpornością na ogień i trzęsienia ziemi, co stanowi istotną potrzebę na Tajwanie. Technologia firmy Swancor znajduje zastosowanie w produkcji artykułów sportowych, karoserii pojazdów elektrycznych, wnętrz kamperów oraz w robotyce⁸⁾.

Przyspieszające załamanie europejskiego recyklingu tworzyw sztucznych stanowi jeden z istotnych kontekstowo przykładów analogii. W otwartym liście skierowanym w kwietniu 2026 r. do niemieckiego rządu federalnego, podpisanym przez Niemiecki Instytut Opakowań (DVI) wraz z czołowymi podmiotami branżowymi, takimi jak Constantia Flexibles, Dirk Rossmann, Werner & Mertz, Remondis Recycling oraz Der Grüne Punkt, ostrzegano, że w całej Europie utracono prawie 1 Tg mocy przerobowych w zakresie recyklingu w wyniku bankructw i zamykania zakładów. Wymienione czynniki, takie jak spadające ceny polimerów pierwotnych, mały import materiałów pochodzących z recyklingu, wysokie koszty energii oraz niewystarczające zachęty prawne i ekonomiczne do stosowania materiałów pochodzących z recyklingu, odzwierciedlają strukturalne słabości, z jakimi boryka się branża recyklingu łopat turbin wiatrowych na całym świecie. Same mechanizmy rynkowe nie są w stanie utrzymać infrastruktury gospodarki o obiegu zamkniętym dla zaawansowanych materiałów bez celowych działań politycznych, obejmujących ulgi podatkowe, bardziej rygorystyczne przepisy importowe oraz przyspieszenie procedur wydawania pozwoleń⁹⁾.

Ekspansja na rynki światowe i gotowość przemysłowa

Na początku 2026 r. Światowa Rada Energetyki Wiatrowej (GWEC) odnotowała ożywioną aktywność rynkową w regionie Azji i Pacyfiku. Elektrownia wiatrowa Hibikinada stanowi kamień milowy w rozwoju japońskiego sektora morskiej energetyki wiatrowej i jest największym tego typu obiektem w kraju. Rozpoczęła działalność 2 marca 2026 r. W ramach 20-letnich umów o stałej cenie Korea ogłosiła przetarg na 1,8 GW mocy elektrowni wiatrowych, obejmujący sekcje lądowe, morskie na stałych fundamentach oraz morskie pływające. Dzięki wsparciu GWEC w zakresie działań na rzecz kształtowania polityki oraz organizowaniu spotkań przy okrągłym stole z udziałem zainteresowanych stron Wietnam i Filipiny rozwijają systemy regulacyjne oraz prowadzą badania dotyczące infrastruktury portowej, które mają kluczowe znaczenie dla pobudzenia inwestycji w morską energetykę wiatrową¹⁰⁾.

W połączeniu z planowaną inwestycją firmy Vestas w sektorze produkcyjnym w Szkocji¹¹⁾ oraz trwającym rozbudowywaniem mocy produkcyjnych w Chinach¹²⁾, te regionalne zmiany wskazują, że światowa branża przechodzi od pilotażowych projektów demonstracyjnych do standaryzowanego wdrażania w skali wielogigawatowej.

needs in Taiwan. Sporting goods, electric vehicle bodies, motorhome interiors, and robotics use Swancor's technology⁸⁾.

The quickening collapse in European plastic recycling is one contextually significant parallel. Addressed to the German federal government in April 2026, an open letter signed by the German Packaging Institute (dvi) along with significant industry players including Constantia Flexibles, Dirk Rossmann, Werner & Mertz, Remondis Recycling, and Der Grüne Punkt warned that nearly 1 Tg of recycling capacity had been lost throughout Europe due to bankruptcies and plant shutdowns. The indicated drivers – falling virgin polymer prices, low import of recyclates, high energy costs, and insufficient regulatory and economic incentives for the use of recycled materials – echo the structural weaknesses confronting wind blade recycling globally. Market forces alone cannot sustain circular economy infrastructure for sophisticated materials without intentional policy action by requesting tax incentives, stricter import rules, and expedited permitting⁹⁾.

Global market expansion and industrial readiness

Early in 2026, the Global Wind Energy Council (GWEC) noted strong market activity across the Asia-Pacific area. Marking a major milestone for Japan's developing offshore industry, the Hibikinada Wind Farm is its biggest one. It started operations on 2 March 2026. Under 20-year fixed-price agreements, Korea started a competitive bidding round for 1.8 GW of wind capacity spread throughout onshore, fixed-bottom offshore, and floating offshore sections. With GWEC supporting policy advocacy initiatives and arranging stakeholder roundtables, Vietnam and the Philippines are advancing regulatory systems and port infrastructure studies vital to unleash offshore wind investment¹⁰⁾.

Together with Vestas's scheduled Scottish manufacturing investment¹¹⁾ and ongoing Chinese capacity expansion¹²⁾, these regional developments point to a worldwide industry moving from pilot demonstration toward standardized industrial deployment at multi-gigawatt scale.

Conclusion

The wind energy sector in 2025–2026 is characterized by remarkable technological ambition and growing systemic complexity. Yet the industry's long-term sustainability depends equally on resolving the circular economy deficit at the end of the asset lifecycle. Policy frameworks must evolve alongside technological ones: without binding standards, credible economic incentives, and investment in advanced material recovery – lessons

Wnioski

Sektor energetyki wiatrowej w latach 2025–2026 charakteryzuje się niezwykle ambicją technologiczną i rosnącą złożonością systemową. Jednak długoterminowa stabilność tej branży zależy w równym stopniu od rozwiązania problemu niedostatecznego funkcjonowania gospodarki o obiegu zamkniętym na końcu cyklu życia aktywów. Ramy polityczne muszą zmieniać się wraz z postępem technologicznym: bez wiążących norm, wiarygodnych zachęt ekonomicznych i inwestycji w zaawansowane technologie odzyskiwania surowców ekologiczne zalety energii wiatrowej mogą zostać podważone przez materiałowe dziedzictwo jej własnej infrastruktury. Wnioski te dotyczą zarówno sektora energetyki wiatrowej, jak i szeroko pojętego recyklingu tworzyw sztucznych w Europie.

that apply equally to the wind sector and to European plastics recycling more broadly – the environmental credentials of wind energy risk being undermined by the material legacy of its own infrastructure.

Received/Otrzymano:

19-05-2026

Accepted/Zaaakceptowano:

25-05-2026

Reviewed/Zrecenzowano:

21-05-2026

Published/Opublikowano:

17-07-2026

REFERENCES/LITERATURA

- [1] G. Stubbins, *Composites World*, 2026; <https://www.compositesworld.com/news/gwec-insights-place-wind-energy-at-the-center-of-future-economic-development>; Feb 4, 2026.
- [2] Anonym, <https://windeurope.org/data/products/wind-energy-in-europe-2024-statistics-and-the-outlook-for-2025-2030>; accessed Mar 2, 2026.
- [3] G. Stubbins, *Composites World*, 2026; https://www.compositesworld.com/news/german-norwegian-partnership-launches-dedicated-offshore-wind-working-group?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+03%2F04%2F2026; Mar 2, 2026.
- [4] Anonym, <https://www.gov.uk/government/publications/building-the-north-seas-power-hub-for-a-resilient-and-competitive-europe-north-sea-summit-declarations-2026>; accessed Mar 2, 2026.
- [5] G. Stubbins, *Composites World*, 2025; <https://www.compositesworld.com/news/eucia-conducts-analysis-on-thermoset-composites-waste-sees-untapped-recycling-market-potential>; Jul 21, 2025.
- [6] Anonym, https://setis.ec.europa.eu/document/download/68ead1b5-1e50-4142-bf47-f35a0c702cb2_en?filename=Strategic%20Energy%20Technology%20%28SET%29%20Plan%20Governance%20%281%29.pdf; accessed Mar 2, 2026.
- [7] J. Qiao, Der milliardenschwere Recyclingkampf um ausrangierte Windkraftanlagen, China Environment App/China Environmental News; <https://app.cenews.com.cn>; Jan 5, 2026.
- [8] G. Stubbins, *Composites World*, 2026; <https://www.compositesworld.com/news/swancor-ban-mao-green-coating-turn-composites-waste-into-lightweight-construction-materials>; Mar 30, 2026.
- [9] Anonym, *Kunststoffe* 2026; <https://www.kunststoffe.de/a/news/ist-das-kunststoffrecycling-in-europa-no-7673606>; Apr 1, 2026.
- [10] G. Stubbins, *Composites World*, 2026; <https://www.compositesworld.com/news/wind-energy-builds-clean-energy-potential-across-asias-economic-landscape>; Apr 3, 2026.
- [11] G. Stubbins, *Composites World*, 2026; <https://www.compositesworld.com/news/vestas-sets-out-plans-to-build-nacelle-factory-in-scotland>; Mar 30, 2026.
- [12] Anonym, *The world's largest 26 MW offshore wind turbine successfully installed*, Dongfang Electric Corporation; <http://www.dongfang.com>; Aug 29, 2025.



**Międzynarodowy Instytut Chemii Analitycznej
Polskiej Akademii Nauk**

we współpracy z

**Kujawsko-Pomorskim Centrum
Naukowo-Technologicznym
im. prof. J. Czochralskiego sp. z o.o.**

**ogłasza nabór na studia podyplomowe w roku 2026/2027
z zakresu:**

**PODSTAWOWE I ZAAWANSOWANE
TECHNIKI SEPARACYJNE
W EKO- I BIOANALITYCE**

Szczegółowe informacje są dostępne na stronie: centrumczochralskiego.pl