

Reusing and recycling of composite wind turbine blades. A review of current practices and prospects. Part 7^{**}. New structural solutions

Ponowne wykorzystanie i recykling kompozytowych łopat turbin wiatrowych.

Przegląd aktualnych praktyk i perspektywy. Część VII^{**}. Nowe rozwiązania konstrukcyjne



DOI: 10.15199/62.2026.8.1

Przedstawiono projekty obecnie realizowane oraz planowane przez przemysł oraz przemysł-uczenia dotyczące zwiększenia cyrkularności materiałów stosowanych w łopatach turbin wiatrowych oraz podsumowano najnowsze osiągnięcia w zakresie projektowania turbin i innowacji konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, łopaty turbin wiatrowych, aktualne projekty przemysłowe oraz przemysł-uczelnia

The review of projects currently implemented and planned by industry and industry-university being aimed at increasing the circularity of materials used in wind turbine blades as well as recent developments across turbine design and structural innovation were also summarized.

Keywords: polymer composites, wind turbine blades, current industrial and industry-university projects



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.

^{**} Part 6/Cz. VI, Przem. Chem. 2026, 105, nr 7, 682.

W ostatnich latach realizowanych jest szereg projektów badawczo-przemysłowych ukierunkowanych na zwiększenie cyrkularności materiałów stosowanych w łopatach turbin wiatrowych. Przedstawione przykłady obejmują trzy uzupełniające się obszary: projektowanie nowych łopat z myślą o łatwiejszej naprawie i recyklingu, wydłużanie trwałości konstrukcji podczas eksploatacji poprzez powłoki ochronne i systemy monitorowania oraz rozwój technologii pozwalających ponownie wykorzystać lub odzyskać wartościowe składniki z odpadów kompozytowych.

Jednym z takich przedsięwzięć jest projekt R3WIND (*Repairable, Recyclable and Reusable*), realizowany przez ÉireComposites Teo (Irlandia) we współpracy z University of Galway (Irlandia) oraz wspierany przez Sustainable Energy Authority of Ireland (SEAI). Projekt dotyczy opracowania konstrukcji łopat zoptymalizowanych pod kątem demontażu, naprawy oraz recyklingu, z wykorzystaniem termoplastycznych systemów żywic, takich jak Elixir® oraz wtryskiwarki. Zakłada się, że wdrożenie rozwiązań umożliwiających efektywną naprawę poprzez lokalne uplastycznienie materiału z wykorzystaniem temperatury oraz zwiększenie trwałości eksploatacyjnej łopat skutkować może wydłużeniem czasu życia produktu nawet o ok. 20%, przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów operacyjnych. Integralnym elementem projektu jest analiza cyklu życia (LCA), obejmująca wszystkie etapy od produkcji po zagospodarowanie odpadu¹⁾.

Podobne podejście prezentuje projekt EOLIAN, realizowany m.in. przez Proplast (Włochy) oraz Politecnico di Milano (Włochy), którego celem jest opracowanie biopochodnych kompozytów wtryskowych do zastosowań w łopatach turbin. W ramach projektu wytworzono laminaty z włókien bazaltowych impregnowanych żywicami wtryskowymi metodą infuzji, co stanowi istotny krok w kierunku skalowania przemysłowego. Opracowane materiały wykazują zdolność do ponownego przetwarzania, naprawy

In recent years, a number of research and industrial projects have been carried out to increase the circularity of materials used in wind turbine blades. The presented examples cover three complementary areas: designing new blades with easier repair and recycling in mind, extending structural durability during operation through protective coatings and monitoring systems, and developing technologies that enable valuable constituents to be reused or recovered from composite waste.

One such initiative is the R3WIND project (Repairable, Recyclable and Reusable), carried out by ÉireComposites Teo (Ireland) in cooperation with the University of Galway (Ireland) and supported by the Sustainable Energy Authority of Ireland (SEAI). The project concerns the development of blade structures optimized for disassembly, repair and recycling, using thermoplastic resin systems such as Elixir® and extruders. It is assumed that the implementation of solutions enabling effective repair through local thermal softening of the material, together with improved blade durability, may extend the product lifetime by up to approximately 20%, while reducing operating costs. An integral part of the project is a life cycle assessment (LCA), covering all stages from production to waste management¹⁾.

A similar approach is presented by the EOLIAN project, carried out, among others, by Proplast (Italy) and Politecnico di Milano (Italy), whose aim is to develop bio-based vitrimer composites for wind blade applications. As part of the project, basalt fiber laminates impregnated with vitrimer resins were produced using the infusion process, which represents an important step toward industrial scale-up. The developed materials show the ability to be reprocessed, repaired and recycled, while maintaining the required mechanical properties. In addition, structural health monitoring (SHM) systems are being developed to enable real-time damage detection, which reflects the



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.



Fig. 1. The world's highest wind turbine (365 m) is currently built in Schipkau (Germany), May 17, 2026

Rys. 1. Najwyższa na świecie turbina wiatrowa (365 m) powstaje obecnie w Schipkau (Niemcy), 17 maja 2026 r.

oraz recyklingu, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych właściwości mechanicznych. Dodatkowo rozwijane są systemy monitorowania stanu struktury (SHM), umożliwiające detekcję uszkodzeń w czasie rzeczywistym, co wpisuje się w trend integracji materiałów funkcjonalnych z systemami diagnostycznymi²⁾.

Projekt HAIZEEKO, realizowany w latach 2025–2027 z udziałem Cidetec Surface Engineering (Gipuzkoa, Hiszpania) oraz Tecnalia (Derio, Hiszpania) jako jednostek badawczo-rozwojowych, koncentruje się głównie na opracowaniu nowych technologii dla morskich turbin wiatrowych. Głównym obszarem prac są zaawansowane powłoki ochronne, w tym ceramiczne powłoki antykorozyjne CX dla konstrukcji wsporczych, powłoki ceramiczne o właściwościach przeciwbłędzeniowych oraz hybrydowa technologia wtryskiwania laserowo-indukcyjnej do zastosowań na powierzchniach zewnętrznych łopatek. Rozwój tych rozwiązań wynika z ograniczeń konwencjonalnych powłok metalicznych, których trwałość bez kosztownych prac serwisowych nie przekracza 25 lat. Dodatkowo konserwacja powłok metalicznych generuje znaczne ilości zanieczyszczeń wpływających negatywnie na atmosferę i środowisko morskie. Oprócz ochrony powierzchni projekt obejmuje również dwa powiązane kierunki: *eco-design* i poprawę aerodynamiki

trend of integrating functional materials with diagnostic systems²⁾.

*The HAIZEEKO project, carried out in 2025–2027 with the participation of Cidetec Surface Engineering (Gipuzkoa, Spain) and Tecnalia (Derio, Spain) as research and development entities, focuses mainly on the development of new technologies for offshore wind turbines. The main area of work involves advanced protective coatings, including CX ceramic anti-corrosion coatings for support structures, ceramic coatings with anti-icing properties, and hybrid laser-induction vitrification technology for application on the external surfaces of blades. The development of these solutions results from the limitations of conventional metallic coatings, whose service life without costly maintenance does not exceed 25 years. In addition, the maintenance of metallic coatings generates significant amounts of pollutants that negatively affect the atmosphere and the marine environment. Apart from surface protection, the project also includes two related directions: *eco-design* and aerodynamic improvement of blades to increase energy efficiency, as well as the use of more sustainable materials, such as 3R epoxy resins and removable adhesives facilitating repair and recycling. The third pillar is structural health monitoring, including ultrasonic inspection of ceramic coatings*



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.



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.

łopat w celu zwiększenia efektywności energetycznej oraz zastosowanie bardziej zrównoważonych materiałów, takich jak żywice epoksydowe 3R i usuwalne kleje ułatwiające naprawę oraz recykling. Trzecim filarem jest monitoring stanu konstrukcji, obejmujący m.in. ultradźwiękową kontrolę powłok ceramicznych i systemy filtracji sygnału do detekcji w warunkach rzeczywistej eksploatacji *offshore*. Konsorcjum projektu tworzą Navacel jako koordynator oraz Argolabe Ingeniería, Mecanizados Ekimen, Global Factor, Innomat Coatings, Innovation Tree, Manutención y Manipulación Eraman, KeraCoat i Mandiola Composites, przy współpracy z Basquenergy Cluster³⁾.

Na poziomie wdrożeń przemysłowych istotnym krokiem jest projekt realizowany przez Swancor (Taiwan) we współpracy z Siemens Gamesa (Hiszpania) oraz RWE (Niemcy), dotyczący implementacji technologii Recyclable Blade w morskiej farmie wiatrowej Sofia zlokalizowanej na obszarze Dogger Bank w środkowej części Morza Północnego. W ramach inwestycji 50 ze 100 łopat o długości 108 m, zainstalowanych na turbinach SG 14-222 (o mocy do 14 MW każda), wykonano z wykorzystaniem recyklingowej żywicy epoksydowej. Pozwoliło to osiągnąć poziom recyklingowości przekraczający 90%, co stanowi jedno z pierwszych wdrożeń tego typu technologii w skali komercyjnej (łączna moc farmy ok. 1,4 GW). Projekt ten potwierdza możliwość implementacji rozwiązań cyrkularnych bezpośrednio w dużych instalacjach *offshore*⁴⁾.

Inną rozwijaną obecnie technologią wykorzystania materiałów wtórnych w produkcji nowych łopat jest projekt realizowany przez Verretex (EPFL spin-off, Szwajcaria) oraz Ryse Energy (Hiszpania), w którym opracowano tkaniny z włókien szklanych pochodzących w 100% z recyklingu

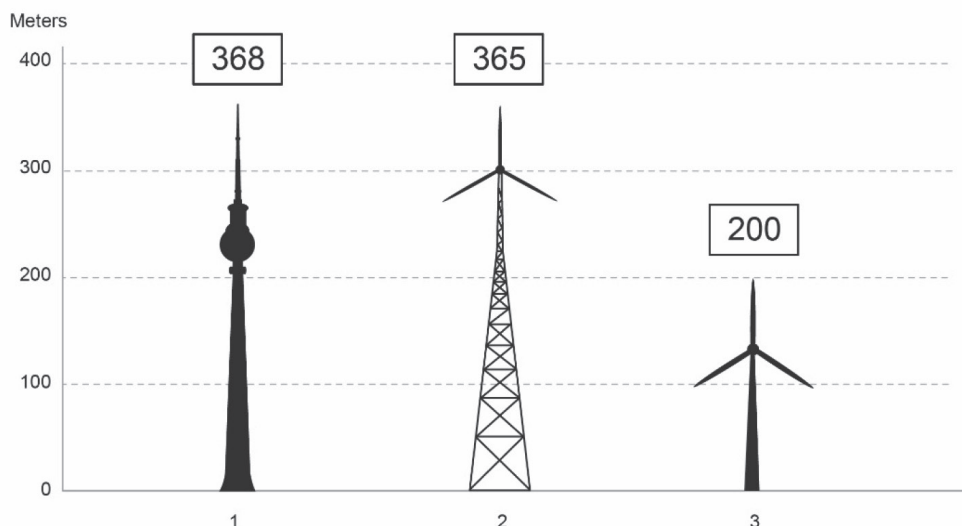


Fig. 2. Comparison of the size of objects: 1 – Berlin Television Tower, 2 – high wind tower, 3 – ordinary wind turbine

Rys. 2. Porównanie wielkości obiektów: 1 – wieża telewizyjna w Berlinie, 2 – wysoka wieża turbiny wiatrowej, 3 – klasyczna turbina wiatrowa

and signal filtering systems for detection under real *offshore* service conditions. The project consortium consists of Navacel as coordinator, together with Argolabe Ingeniería, Mecanizados Ekimen, Global Factor, Innomat Coatings, Innovation Tree, Manutención y Manipulación Eraman, KeraCoat and Mandiola Composites, in cooperation with the Basquenergy Cluster³⁾.

At the industrial implementation level, an important step is the project carried out by Swancor (Taiwan) in cooperation with Siemens Gamesa (Spain) and RWE (Germany), concerning the implementation of RecyclableBlade technology at the Sofia *offshore* wind farm, located on Dogger Bank in the central North Sea. As part of the investment, 50 out of 100 blades, each 108 m long and installed on SG 14-222 turbines with a power output of up to 14 MW each, were manufactured using recyclable epoxy resin. This enabled a recyclability level exceeding 90%, making it one of the first commercial-scale implementations of this type of technology. The total capacity of the wind farm is approximately 1.4 GW. This project confirms the possibility of implementing circular solutions directly in large *offshore* installations⁴⁾.

Another technology currently being developed for the use of secondary materials in the production of new blades is the project carried out by Verretex (an EPFL spin-off, Switzerland) and Ryse Energy (Spain), in which fabrics made from 100% recycled glass fibers (rGF) were developed. Pilot tests demonstrated that these fabrics can be used as a direct replacement for conventional glass fabrics without the need to modify the manufacturing process. The obtained structures met the requirements of the IEC 61400-2 standard, while an LCA analysis carried out by Tech-Fab Europe indicated that the melting stage during glass fiber production accounts for approximately 89% of the carbon footprint of the final fabric. The use of rGF



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.

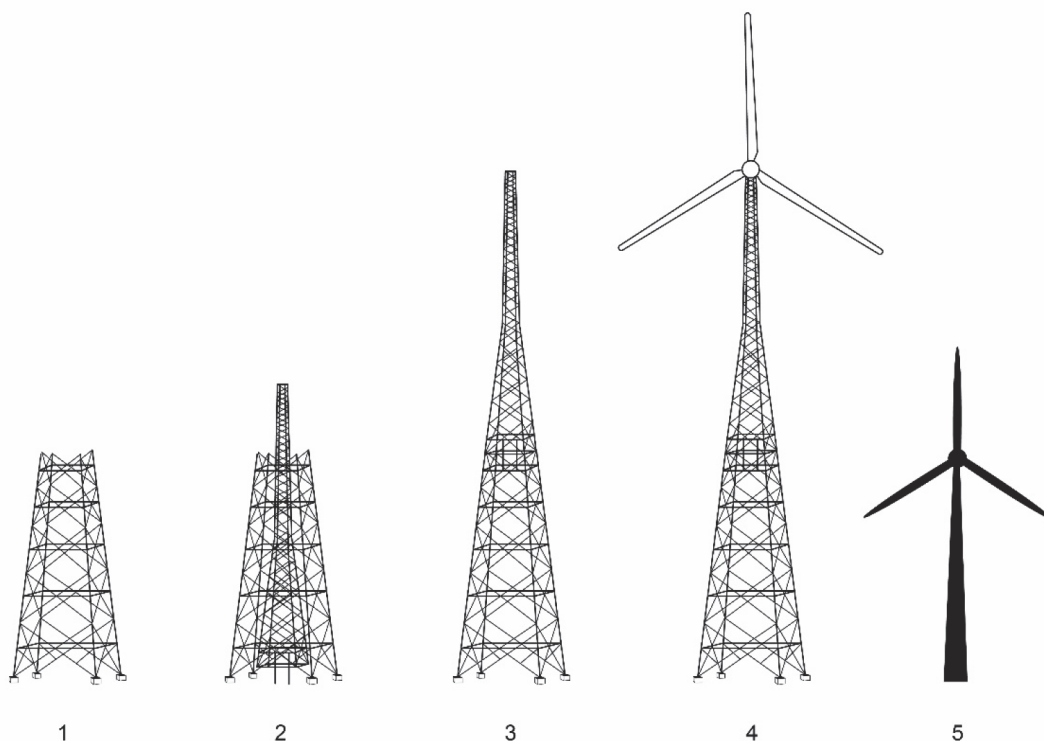


Fig. 3. Conception of building for a high wind turbine tower consisting of two parts: 1 – outer tower, 2 – inner tower, 3 – the two parts of the tower both assembled, 4 – the final structure. For comparison: 5 – an ordinary wind turbine

Rys. 3. Koncepcja konstrukcji wysokiej wieży turbiny wiatrowej składającej się z dwóch części: 1 – wieża zewnętrzna, 2 – wieża wewnętrzna, 3 – dwie części wieży po złożeniu, 4 – gotowa konstrukcja; dla porównania 5 – klasyczna turbina wiatrowa

(rGF). Badania pilotażowe wykazały możliwość ich zastosowania jako bezpośredniego zamiennika konwencjonalnych tkanin szklanych bez konieczności modyfikacji procesu produkcyjnego. Otrzymane struktury spełniły wymagania normy IEC 61400-2, a analiza LCA przeprowadzona przez Tech-Fab Europe wskazała, że sam przetop podczas produkcji włókna szklanego odpowiada za ok. 89% śladu węglowego gotowej tkaniny. Zastosowanie rGF pozwala zatem pominąć najbardziej energochłonny etap procesu i znacząco ograniczyć emisje związane z wytwarzaniem materiałów tekstylnych dla kompozytów⁵⁾.

Istotnym elementem rozwoju cyrkularności jest również zwiększenie zdolności odzysku włókien węglowych. W tym kontekście współpraca Westlake Epoxy (USA) z Alpha Recyclage Composites (Francja) dotyczy skalowania opatentowanego procesu pirolizy parowej, umożliwiającego odzysk włókien węglowych przy zachowaniu ich właściwości mechanicznych. Planowana rozbudowa instalacji do trybu półciągłego pozwoli osiągnąć zdolność przetwarzania na poziomie ok. 1 Gg odpadów rocznie do 2027 r. Projekt obejmuje również rozwój zastosowań dla odzyskanych włókien (rCF) oraz integrację z systemami żywic o obniżonym śladzie środowiskowym, np. *portfolio* EpoVive⁶⁾.

Innym przykładem rozwiązania wykorzystującego naprawy i *remanufacturing* jest technologia „Re-FIT” opracowana przez firmę We4Ce (Almelo, Holandia), specjalizującą się w łopatach turbin wiatrowych, oraz CNC Onsite (Vejle, Dania), zajmującą się precyzyjną obróbką mobilną. W maju

therefore makes it possible to omit the most energy-intensive stage of the process and significantly reduce emissions associated with the production of textile materials for composites⁵⁾.

An important element in the development of circularity is also the increase in carbon fiber recovery capacity. In this context, the cooperation between Westlake Epoxy (USA) and Alpha Recyclage Composites (France) concerns the scale-up of a patented steam pyrolysis process, enabling the recovery of carbon fibers while preserving their mechanical properties. The planned expansion of the installation to a semi-continuous mode is expected to achieve a processing capacity of approximately 1 Gg of waste per year by 2027. The project also includes the development of applications for recovered carbon fibers (rCF) and their integration with resin systems with a reduced environmental footprint, such as the EpoVive portfolio⁶⁾.

Another example of a solution involving repair and remanufacturing is the “Re-FIT” technology developed by We4Ce (Almelo, the Netherlands), a company specializing in wind turbine blades, and CNC Onsite (Vejle, Denmark), which specializes in mobile precision machining. In May 2025, the companies transferred the technology to a wind farm in South Asia, training local technicians to repair loose bushings/inserts in the blade root section, which are responsible for connecting the blade to the turbine hub. The project involved 26 turbines with a total capacity of 50 MW and represented the first field application of this

2025 r. firmy przeprowadziły transfer technologii do farmy wiatrowej w Azji Południowej, szkoląc lokalnych techników w zakresie naprawy poluzowanych tulei/insertów w części nasadowej łopaty, odpowiedzialnych za połączenie łopaty z piastą turbiny. Projekt objął 26 turbin o łącznej mocy 50 MW i stanowił pierwsze terenowe zastosowanie tej metody. Opracowane rozwiązanie polega na precyzyjnym usunięciu uszkodzonych tulei z laminatu kompozytowego za pomocą specjalnie zaprojektowanej maszyny CNC oraz narzędzi przeznaczonych do obróbki włókna szklanego. Następnie We4Ce wykorzystuje opatentowaną technologię infuzji, w której nowa tuleja jest centrowana i mocowana poprzez wprowadzenie żywicy epoksydowej do przestrzeni wokół elementu, przy wspomaganiu procesu próżnią. Po szkoleniu lokalny zespół serwisowy zorganizował na terenie farmy warsztat polowy złożony z 3 namiotów technologicznych o powierzchni 100 m² każdy, przeznaczonych kolejno do wiercenia, wymiany tulei oraz końcowego wyrównania powierzchni. Docelowo technologia ma umożliwić odtworzenie ponad 1000 tulei, zapewniając żywotność naprawionych elementów do 20 lat. W porównaniu z konwencjonalną wymianą lub transportem łopat do zakładów naprawczych metoda pozwala ograniczyć koszty nawet o 60%, zmniejszyć przestoje oraz uniknąć emisji i kosztów logistycznych związanych z transportem dużych komponentów⁷⁾.

Łącznie przedstawione inicjatywy wskazują na zmianę podejścia w sektorze energetyki wiatrowej, polegającą na uwzględnianiu możliwości naprawy, monitorowania i recyklingu już na etapie projektowania łopat. Kluczowe kierunki obejmują wydłużanie czasu eksploatacji poprzez powłoki ochronne, systemy SHM i łatwiejsze metody naprawy, a także stosowanie materiałów o obniżonym śladzie węglowym, takich jak żywice biopochodne, włókna z recyklingu czy włókna bazaltowe. Istotne znaczenie mają również materiały termoplastyczne i wtryskowe, które mogą ułatwiać późniejsze przetwarzanie oraz odzysk składników kompozytu.

Wyścig w kierunku mocy rzędu gigawatów: rekordowe osiągnięcia w dziedzinie turbin

Uruchomienie turbiny wiatrowej, często uznawanej za największą na świecie, było kluczowym wydarzeniem 2025 r. w sektorze morskiej energetyki wiatrowej. Ustanawiając jednocześnie dwa rekordy świata w kategorii zainstalowanej mocy pojedynczego urządzenia oraz średnicy wirnika⁸⁾, firma Dongfang Electric Corporation (DEC) z powodzeniem zbudowała 29 sierpnia 2025 r. swój prototyp morskiej turbiny o mocy 26 MW w chińskim ośrodku Dongying Wind Power Equipment Testing and Certification Innovation Base. Dzięki łopatom o długości 153 m wirnik turbiny zajmuje powierzchnię 77 000 m², czyli mniej więcej 10,5 standardowych boisk piłkarskich⁸⁾. Budowla ma wysokość zbliżoną do 63-piętrowego wieżowca, a jej wysokość w punkcie centralnym wynosi 185 m⁹⁾. Przy znamionowej

method. The developed solution consists of the precise removal of damaged bushings from the composite laminate using a specially designed CNC machine and dedicated tools for machining glass fiber composites. We4Ce then applies its patented infusion technology, in which the new bushing is centered and fixed by introducing epoxy resin into the space around the component, assisted by vacuum processing. After the training, the local service team organized a field workshop at the wind farm consisting of three 100 m² process tents, used respectively for drilling, bushing replacement and final surface flattening. Ultimately, the technology is intended to restore more than 1000 bushings, ensuring a service life of repaired elements of up to 20 years. Compared with conventional replacement or transporting blades to repair facilities, the method can reduce costs by up to 60%, decrease downtime and avoid emissions and logistical costs associated with transporting large components⁷⁾.

Overall, the initiatives presented above indicate a change in approach within the wind energy sector, involving the consideration of repair, monitoring and recycling already at the blade design stage. Key directions include extending service life through protective coatings, SHM systems and easier repair methods, as well as the use of materials with a reduced carbon footprint, such as bio-based resins, recycled fibers and basalt fibers. Thermoplastic and vitrimer materials are also of particular importance, as they may facilitate subsequent processing and recovery of composite constituents.

The race toward gigawatt-scale: record-breaking turbine development

Commissioning what is often regarded as the biggest wind turbine in the world defines 2025 in offshore wind. Setting concurrent world records for installed single-unit capacity and rotor diameter⁸⁾, the Dongfang Electric Corporation (DEC) successfully built its 26-MW offshore prototype on 29 August 2025 at the Dongying Wind Power Equipment Testing and Certification Innovation Base in China. With individual blades measuring 153 m long, the turbine's rotor sweeps an area of 77,000 m² – roughly ten and a half standard football pitches⁸⁾. The building is around as tall as a 63-storey skyscraper at a hub elevation of 185 m⁹⁾. At rated wind velocities of 10 m/s, a single unit may generate 100 GWh yearly, satisfying the electrical requirements of roughly 55,000 homes while preventing over 80 Gg of CO₂ emissions⁸⁾.

At its Østerild testing location in Denmark, the Siemens Gamesa SG 21-276 DD, which had certification at 21.5 MW with a rotor diameter of 276 meters¹⁰⁾, supplants the former record-holder. The Danish Energy Agency formally certified the model's capabilities with a prototype certificate, therefore €30 million in EU funding had been provided for the installation¹⁰⁾. Just recently, the Siemens

prędkości wiatru wynoszącej 10 m/s pojedynczy blok może wygenerować rocznie 100 GWh, zaspokajając zapotrzebowanie na energię elektryczną ok. 55 tys. gospodarstw domowych i zapobiegając emisji ponad 80 Gg CO₂⁸⁾.

W ośrodku testowym Østerild w Danii turbina Siemens Gamesa SG 21-276 DD, certyfikowana na moc 21,5 MW przy średnicy wirnika wynoszącej 276 m¹⁰⁾, pobiła dotychczasowy rekord. Duńska Agencja Energetyczna oficjalnie potwierdziła parametry modelu, wydając certyfikat prototypowy, w związku z czym na realizację projektu przeznaczono 30 mln euro z funduszy unijnych¹⁰⁾. Turbina firmy Siemens Gamesa wyprzedziła model MySE18.X-20 o mocy 20 MW firmy Ming Yang Smart Energy, zaprezentowany w październiku 2024 r., co pokazuje jak szybko zmienia się otoczenie konkurencyjne¹⁰⁾. Wykorzystująca całkowicie zintegrowaną architekturę napędu półbezpośredniego 3. generacji, platforma DEC 26 MW charakteryzuje się podwójną konstrukcją odporną na tajfuny, zdolną wytrzymać supertajfuny 17. kategorii, oraz w pełni krajowym systemem sterowania elektronicznego, co stanowi strategiczne osiągnięcie w zakresie niezależności łańcucha dostaw⁸⁾. Firma Dongfang Electric coraz bardziej koncentruje się na produkcji dużych turbin wiatrowych, a ponadto opracowuje projekt pływającej morskiej turbiny wiatrowej o mocy 17 MW i średnicy wirnika wynoszącej 262 m¹¹⁾.

Podobne istotne zmiany konstrukcyjne zachodzą również w turbinach na lądzie. Firma inżynieryjna Gicon rozpoczęła budowę lądowej turbiny wiatrowej o wysokości 365 m w Schipkau w Brandenburgii w Niemczech (rys. 1). Wysokość ta jest zbliżona do wysokości berlińskiej wieży telewizyjnej (rys. 2). Turbina, zaprojektowana z myślą o wykorzystaniu zasobów wiatrowych o gęstości energetycznej wyższej o 60–70% w porównaniu z zasobami występującymi na typowych wysokościach piasty wynoszących 140–200 m^{12, 13)}, ma wysokość piasty wynoszącą 300 m oraz stalową wieżę kratową wzorowaną na geometrii Wieży Eiffla, której rozpiętość u podstawy wynosi 48 m (rys. 3). Zakończenie inwestycji planowane jest do końca 2026 r.¹²⁾. Firma Gicon twierdzi, że takie instalacje mogą zapewnić wydajność energetyczną porównywalną z wydajnością elektrowni morskich, zmieniając tym samym kierunek rozwoju energetyki odnawialnej w Niemczech. Planuje ona wybudować do 2030 r. nawet 1000 takich obiektów, a koszty związane z prototypem i pracami rozwojowymi szacuje się na 20–30 mln euro^{12, 13)}.

Chociaż turbina Vestas V236-15,0 MW jest mniejsza, stanowi produkt opracowany na potrzeby rynku, wokół którego skupiają się znaczne nakłady produkcyjne. W marcu 2026 r. firma Vestas ogłosiła plany budowy zakładu produkującego gondole i piasty turbin wiatrowych w Szkocji, co wiąże się z inwestycją kapitałową przekraczającą 250 mln euro, pod warunkiem uzyskania wystarczającej liczby zamówień w ramach brytyjskich aukcji kontraktów różnicowych (Contract for Difference) AR7 i AR8. Planowana elektrownia, która ma zacząć działać w latach 2029–2030,

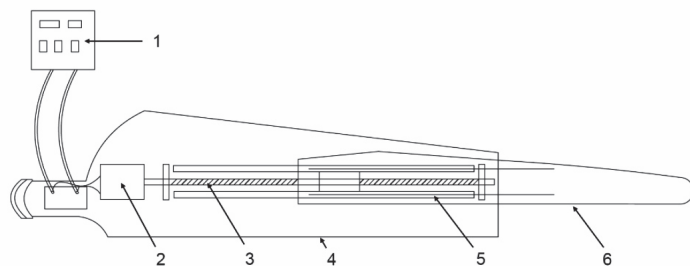


Fig. 4. Components of variable length blade wind turbine: 1 – control unit, 2 – DC motor, 3 – drive screw, 4 – root blade, 5 – rails, 6 – tip blade

Rys. 4. Elementy turbiny wiatrowej o zmiennej długości łopat: 1 – jednostka sterująca, 2 – silnik prądu stałego, 3 – śruba napędowa, 4 – łopata nasadowa, 5 – szyny, 6 – łopata końcowa

Gamesa turbine itself overtook Ming Yang Smart Energy's 20 MW MySE18.X-20 platform, declared in October 2024, demonstrating how fast the competitive environment is changing¹⁰⁾. Using a third-generation totally integrated semi-direct drive architecture, the DEC 26 MW platform includes dual typhoon-resistant design able to endure Category 17 super-typhoons and a completely domestically made electronic control system – a strategic accomplishment in supply chain sovereignty⁸⁾. Dongfang Electric has grown more and more focused on the building of large wind turbines and is also designing a floating offshore wind turbine with a capacity of 17 MW and a rotor diameter of 262 m¹¹⁾.

Comparable significant structural developments are going on land. The engineering company Gicon has started building a 365-m onshore wind turbine in Schipkau, Brandenburg, Germany (Fig. 1); this height near that of the Berlin Television Tower (Fig. 2). Designed to access wind resources 60–70% more energetically dense than those at typical hub heights of 140–200 m^{12, 13)}, the turbine has a hub height of 300 m and a lattice-steel tower inspired by the geometry of the Eiffel Tower; covering 48 m from corner to corner at the base (Fig. 3). Starting construction in July 2025, the installation is slated to be finished by the end of 2026¹²⁾. Gicon contends that such installations can provide energy yields comparable to those from offshore sites, thereby changing the course of renewable energy development in Germany, aiming to build up to 1,000 such buildings by 2030, with prototype and development costs estimated to be €20–30 million^{12, 13)}.

Though smaller in size, the Vestas V236-15.0 MW turbine is a commercially developed item around which major manufacturing expenditure is forming. Vestas revealed intentions for a nacelle and hub assembly facility in Scotland in March 2026, implying a capital investment exceeding €250 million, subject on obtaining enough orders in the UK's Contract for Difference auction rounds AR7 and AR8. Expected to be running from 2029 to 2030, the proposed plant will generate up to 500 direct jobs and turn out Vestas' fifth committed offshore wind turbine factory in Europe¹⁴⁾.

stworzy do 500 bezpośrednich miejsc pracy i będzie piątą fabryką turbin wiatrowych firmy Vestas w Europie¹⁴⁾.

Technologia teleskopowo wysuwanych łopat: analityczne ramy optymalizacji specyficznej dla danej lokalizacji

Równolegle do tego gwałtownego wzrostu skali prowadzone są projekty badawcze, których celem jest rozwiązanie jednej z podstawowych wad tradycyjnej konstrukcji turbin: niezdolności łopat o stałej długości do dynamicznego dostosowywania się do zmieniających się warunków wiatrowych (rys. 4). Zgodnie z wynikami badań terenowych przeprowadzonych przez firmę Energy Unlimited Inc., łopaty teleskopowe lub o zmiennej długości, których koncepcja powstała już w 1997 r., a których działanie po raz pierwszy zweryfikowano w 2002 r. na turbinie Bonus o mocy 120 kW, wykazały możliwość zwiększenia rocznej produkcji energii nawet o 30%, gdy wydłużenie łopat osiąga 44%¹⁵⁾.

Konieczność wytwarzania podstawowych prototypowych łopat o stałej długości w celu ustalenia parametrów roboczych niezbędnych do zastosowań związanych z kontrolą promienia utrudniała powszechne przyjęcie technologii łopat teleskopowych. Obecny wzór na korektę promienia stosowany przez firmę Energy Unlimited Inc. wymaga zestawu parametrów mocy wyjściowej i współczynnika mocy, ustalonych dla każdego punktu prędkości. Kimiti i wsp.¹⁵⁾ bezpośrednio zajmują się tym ograniczeniem i proponują dwa dodatkowe modele analityczne, które pozwalają prognozować krytyczne prędkości robocze (prędkość uruchomienia, prędkość znamionową i prędkość wyłączenia) bez konieczności tworzenia wczesnych prototypów o stałym kształcie łopat. Traktując turbinę jako maszynę dźwigniową, pierwszy model z obrotową dźwignią porównuje efektywną siłę wiatru z obciążeniem oporowym. W drugiej części analizowany jest efektywny transfer pędu poprzecznego między cząstkami powietrza a wirnikiem w modelu koła i osi¹⁵⁾.

Jednym z głównych wniosków płynących z tego modelu jest to, że masa oporowa i długość łopat turbiny w znacznym stopniu determinują prędkość uruchomienia, która wynosi w przybliżeniu połowę prędkości znamionowej. Co istotne, stwierdzono, że promień znamionowy utrzymywał się na stałym poziomie ok. 0,7-krotności maksymalnej długości łopat we wszystkich symulowanych konfiguracjach w przypadku turbin o maksymalnej długości 8, 10 i 15 m. Rozwiązania te zapewniają projektantom niedrogi i wszechstronny sposób na dostosowanie parametrów turbin do lokalnych warunków wiatrowych. Jest to kolejny dowód na to, że najlepszą wydajność generatora osiąga się, gdy znamionowa prędkość kątowna turbiny jest zsynchronizowana ze średnią prędkością wiatru w danym miejscu. Jest to założenie projektowe mające istotny wpływ na sposób doboru przyszłych turbin dostosowanych do różnych warunków wiatrowych. To analityczne podejście zmniejsza koszty związane z wielokrotnym wytwarzaniem prototypów

Telescopic blade technology: an analytical framework for site-specific optimization

Along these scale jumps, contemporaneous research projects are tackling one of the fundamental flaws in traditional turbine design: the incapacity of fixed-length blades to adjust dynamically to changing wind conditions (Fig. 4). According to field tests done by Energy Unlimited Inc., telescopic or variable-length blades – conceptualized as early as 1997 and first operatively verified in 2002 on a Bonus 120 kW turbine – have shown the possibility to boost yearly energy production by up to 30% when blade extension reaches 44%¹⁵⁾.

The need to produce basic fixed-length prototype blades in order to establish the operational settings necessary for radius control applications has hampered the widespread acceptance of telescopic blade technology. Energy Unlimited Inc.'s present radius correction formula calls for a matching set of power output and power coefficient parameters determined for every velocity point. Kimiti et al.¹⁵⁾ directly address this restriction by suggesting two supplementary analytical models that can forecast critical operating speeds – cut-in, rated, and cut-out – without the need for early fixed-blade prototypes. Conceiving the turbine as a lever machine, the first model – a rotating lever model – compares effective wind force against resistive load. Effective cross-sectional momentum transfer between wind particles and the rotor is studied in the second, a wheel-and-axle model¹⁵⁾.

One major result of this framework is that the resistive mass and blade length of the turbine define most of the cut-in velocity, which approximates half the rated velocity. Critically, the rated radius was found to be consistently around 0.7 times the maximum blade length across all simulated configurations – for turbines with maximum lengths of 8, 10 and 15 m, respectively. These connections give designers a cheap, broad way to correlate turbine requirements to local wind patterns. Further proving that best generator performance is attained when the rated angular velocity of the turbine is synchronized with the site's mean wind speed, a design premise with major consequences for how prospective custom turbines are specified for diverse wind conditions. This analytical approach reduces the iterative cost burden of prototype fabrication and offers a pathway to more economically deployable site-specific turbine systems¹⁵⁾.

Conclusion

The wind energy sector in 2025–2026 is characterized by remarkable technological ambition and growing systemic complexity. Record-setting turbines from Dongfang Electric and Siemens Gamesa are redefining the engineering frontier of offshore wind, while Gicon's onshore innovation in Schipkau challenges fundamental assumptions about where

i otwiera drogę do bardziej ekonomicznego wdrażania systemów turbin dostosowanych do konkretnych lokalizacji^[15].

Wnioski

Sektor energetyki wiatrowej w latach 2025–2026 charakteryzuje się niezwykle ambicją technologiczną i rosnącą złożonością systemową. Rekordowe turbiny firm Dongfang Electric i Siemens Gamesa przesuwały granice inżynierii w dziedzinie morskiej energetyki wiatrowej, podczas gdy innowacyjne rozwiązanie firmy Gicon w Schipkau podważa podstawowe założenia dotyczące tego, gdzie lądowa energetyka wiatrowa jest wykonalna i opłacalna. Modele analityczne służące do projektowania łopat teleskopowych umożliwiają obniżenie kosztów przy opracowywaniu turbin dostosowanych do konkretnych lokalizacji, eliminując konieczność tworzenia wstępnych prototypów z łopatami stałymi.

land-based wind is feasible and economically competitive. Analytical frameworks for telescopic blade design offer cost-reducing pathways for site-specific turbine development by eliminating the need for preliminary fixed-blade prototypes.

Received/Otrzymano: 19-05-2026

Reviewed/Zrecenzowano: 21-05-2026

Accepted/Zaakceptowano: 25-05-2026

Published/Opublikowano: 18-08-2026

REFERENCES/LITERATURA

- [1] G. Stubbins, *Composites World*, 2025; <https://www.compositesworld.com/news/eirecomposites-university-of-galway-launch-r3wind-project>; Apr 11, 2025.
- [2] G. Stubbins, *Composites World*, 2026; <https://www.compositesworld.com/news/eolian-project-reports-successful-infusion-trials-of-vitrimer-composite-wind-blade>; Feb 16, 2026;
- [3] G. Stubbins, *Composites World*, 2025; https://www.compositesworld.com/news/haizeeko-project-studies-coatings-smart-monitoring-and-eco-design-for-offshore-wind-structures?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+12%2F17%2F2025; Dec 15, 2025.
- [4] G. Stubbins, *Composites World*, 2025; https://www.compositesworld.com/news/swancor-partners-with-siemens-gamesa-rwe-for-large-scale-recyclableblade-implementation?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+9%2F5%2F2025; Sep 3, 2025.
- [5] G. Stubbins, *Composites World*, 2025; https://www.compositesworld.com/news/verretex-ryse-energy-confirm-use-of-rgf-textiles-as-drop-in-wind-blade-materials?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+9%2F3%2F2025; Sep 2, 2025.
- [6] G. Stubbins, *Composites World*, 2025; https://www.compositesworld.com/news/westlake-epoxy-collaborates-with-alpha-recyclage-composites?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+6%2F27%2F2025; Jun 25, 2025.
- [7] Anonym, <https://windpower.nl.com/2025/07/07/we4ce-and-cnc-onsites-new-technology-for-blade-root-remanufacturing-debuts-in-south-asia>; accessed on Apr 23, 2026.
- [8] Anonym, *The world's largest 26 MW offshore wind turbine successfully installed*, Dongfang Electric Corporation; <http://www.dongfang.com>; Aug 29, 2025.
- [9] Anonym, *Offshore Mag.* 2025; <https://www.offshore-mag.com/renewable-energy/news/55294623>; Jun 4, 2025.
- [10] G. Stubbins, *Composites World*, 2025; <https://www.compositesworld.com/news/siemens-energy-installs-21-mw-offshore-turbine-prototype-reports-say>; Apr 16, 2025.
- [11] O. Bünte, *Heise Online*, 2025; <https://www.heise.de/en/news/World-s-largest-offshore-wind-power-plant-with-26-MW-to-be-built-in-China-10512905.html>; Aug 7, 2025.
- [12] J. Piwon, *Tagesschau*, 2025; <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/energie/hoechstes-windrad-der-welt-deutschland-100.html>; Sep 21, 2025.
- [13] P. Müller, *Schindler Mag.* 2024; <https://magazin.schindler.de/technologie/das-groesste-windrad-der-welt>; Aug 6, 2024.
- [14] G. Stubbins, *Composites World*, 2026; <https://www.compositesworld.com/news/vestas-sets-out-plans-to-build-nacelle-factory-in-scotland>; Mar 30, 2026.
- [15] R.M. Kimiti, F.N. Kariuki, J.N. Kamau, T.N. Soitah, *Acad. Eng.* 2025, **2**, 1; doi: 10.20935/AcadEng8067.