

*Reusing and recycling of composite wind turbine blades. A review of current practices and prospects. Part 5\*\*. New industrial projects. Wind energy in China*

## Ponowne wykorzystanie i recykling kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Przegląd aktualnych praktyk i perspektywy. Część V\*\*. Nowe projekty przemysłowe. Energia wiatrowa w Chinach



DOI: 10.15199/62.2025.1.11

Dokonano przeglądu prac opublikowanych głównie w ciągu ostatnich 2 lat i obecnie komercjalizowanych przez duże konsorcja, często we współpracy z zespołami akademickimi. Przekazano wiele szczegółowych informacji na temat rozwoju energii wiatrowej i recyklingu łopat turbin wiatrowych w Chinach.

**Słowa kluczowe:** kompozyty polimerowe, łopaty turbin wiatrowych, obecnie realizowane projekty przez duże konsorcja, energia wiatrowa w Chinach, kompleksowe metody zarządzania

*A review, with 23 refs., of projects mainly from last 2 years currently commercialized by large consortia often in cooperation with academic teams. Many detail information about wind energy development and wind turbine blades recycling in China was delivered.*

**Keywords:** polymer composites, wind turbine blades, currently project by large consortia, wind energy in China, comprehensive management methods

Obecnie na całym świecie realizowanych jest wiele projektów przemysłowych i naukowo-przemysłowych w zakresie produkcji i recyklingu łopat turbin wiatrowych. W szczególności wykorzystanie energii wiatrowej stało się kluczowe dla chińskiej gospodarki narodowej.<sup>1</sup>

### Energia wiatrowa w Europie i Ameryce

André i współpracownicy<sup>1)</sup> przedstawili główne wyniki dotyczące realizacji projektu Circublade. W ramach tego projektu naukowcy zbadali możliwości ponownego wykorzystania łopat turbin wiatrowych po zakończeniu eksploatacji na terenie Szwecji. Rozważono 3 rozwiązania – wykorzystanie na: ekrany akustyczne, mosty dla pieszych o małej rozpiętości i elementy elewacji. Dla wszystkich proponowanych rozwiązań zbadano wpływ na środowisko. Autorzy skupili się również na innych aspektach związanych z ponownym

\*\* Part 4/Cz. IV Przem. Chem. 2025, 104, No. 1, s. 133.

\* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, al Piastów 19, Szczecin 70-310, Polska; tel.: +48-91-449-4411, e-mail: andrzej.bledzki@zut.edu.pl

*Many industrial and scientific-industrial projects in the area of wind turbine (WT) blades production and recycling are now carried out over the world. In particular, the use of wind energy became crucial in China's national economy.*

### Wind energy in Europe and America

*André et al.<sup>1)</sup> presented the main findings of the Circublade project where the possibilities of repurposing WT blades at the end-of-service in Sweden were explored. Three solutions for repurposing were considered: noise barriers, short-span pedestrian bridges and façade elements. For all proposed solutions, an environmental impact was studied. The authors also focused on WT transportation logistics and data collection on the condition of operating WT. Many companies and municipalities were interested in products made from end-of-service WT blades. However, there is a need to verify if structures manufactured from repurposed WT can meet the same standards as elements made from traditional materials. Moreover, it was discovered that the transportation of*

wykorzystaniem turbin wiatrowych, takich jak logistyka transportu i gromadzenie danych na temat stanu działających elektrowni wiatrowych. Wyniki pokazały, że wiele firm i gmin było zainteresowanych produktami wykonanymi z łopat turbin wiatrowych wycofanych z eksploatacji. Istnieje jednak potrzeba zweryfikowania, czy konstrukcje wytwarzane z turbin wiatrowych mogą spełniać te same standardy, co elementy wykonane z tradycyjnych materiałów. Ponadto stwierdzono, że transport wycofanych z eksploatacji turbin wiatrowych może pochłonąć do 30% całkowitych kosztów procesu recyklingu. Autorzy wskazali również na potrzebę opracowania cyfrowego systemu monitorowania stanu działających farm wiatrowych z łatwym dostępem dla firm zainteresowanych recyklingiem lub ich ponownym wykorzystaniem.

Acciona Energia (Alcobendas, Hiszpania) ogłosiła nawiązanie współpracy z El Ganso (Madryt, Hiszpania). Wynikiem tej współpracy jest limitowana linia butów wyprodukowanych z materiałów pochodzących z recyklingu łopat turbin wiatrowych. Zaawansowany proces obróbki mechanicznej został wykorzystany do zmniejszenia rozmiaru zdemontowanych łopat do rozmiaru mikrometrów. Następnie recyklat w postaci proszku został dodany do gumy w celu wyprodukowania podeszew do butów przy zachowaniu właściwości produktu bez dodatku recyklatu<sup>2)</sup>.

Budowa nowego zakładu recyklingu łopat wiatrowych Waste2Fibre w Lumbier (Navarra, Hiszpania) została ogłoszona przez Acciona (Alcobendas), Acciona Energia (Alcobendas) i RenerCycle (Navarra). Budowa obiektu rozpoczęła się w pierwszej połowie 2024 r. i zakończy się w 2025 r. Opatentowana technologia recyklingu termicznego zostanie wykorzystana do zachowania właściwości włókien pochodzących z recyklingu i umożliwienia ponownego wykorzystania frakcji organicznych. Materiały z recyklingu mogą być wykorzystywane do produkcji części w przemyśle motoryzacyjnym i budowlanym, a wg partnerów właściwości produktów uzyskanych z recyklingu powinny być porównywalne z właściwościami produktów wykonanych z materiałów pierwotnych. Przewidywana roczna zdolność przetwórcza zakładu wynosi 6000 t materiału na wszystkich etapach procesu produkcyjnego, od demontażu po kontrolę jakości produktów końcowych. Ponadto wykorzystanie włókien pochodzących z recyklingu zmniejszy ślad węglowy o 66% i o 95% w przypadku włókien odpowiednio szklanych i węglowych w porównaniu z włóknami pierwotnymi<sup>3)</sup>.

Niemiecki Instytut Badań Tekstyliów i Włókien w Denkendorf (DITF) dołącza do 14 partnerów z 7 krajów w europejskim projekcie REWIND (*Efficient decommissioning, repurposing and recycling to increase the circularity of end-of-life wind energy systems*). Projekt ma kilka celów związanych z recyklingiem turbin wiatrowych. W pierwszej fazie partnerzy konsorcjum opracują technologie skutecznego demontażu części kompozytowych oraz metody demontażu i oceny materiałów. Następnie firmy zbadają procesy recyklingu i możliwości ponownego wykorzystania materiałów kom-

*end-of-service WT can take up to 30% of the total cost of the recycling process. The authors also pointed out a need to develop a digital system for monitoring the condition of operating WT with easy access for companies interested in recycling or repurposing.*

*Acciona Energia (Alcobendas, Spain) announced a collaboration with El Ganso (Madrid, Spain). The result of this cooperation is a limited-edition line of shoes manufactured with materials from recycled WT blades. An advanced mechanical transformation process was used to reduce the size of dismantled WT blades to microns. Afterwards, the recycled material in the form of powder was added to rubber to manufacture soles with preserved properties<sup>2)</sup>.*

*New wind blade recycling plant Waste2Fibre construction in Lumbier (Navarra, Spain) was announced by Acciona (Alcobendas, Spain), Acciona Energia (Alcobendas, Spain) and RenerCycle (Navarra, Spain). The facility's construction started in the first half of 2024 and will be finished in 2025. A proprietary thermal technology will be used to preserve the properties of recycled fibres and allow organic fractions to be reused. Recycled materials can be used for manufacturing parts in the automotive and construction industries, and according to partners, the properties of recycled products should be comparable to products made from virgin materials. The predicted processing material capacity of the plant is 6000 t/year for all stages of the production process – from dismantling to quality control of final products. Moreover, the use of recycled fibers will reduce the carbon footprint by 66% and 95% for glass and carbon fibers, respectively, compared to virgin fibers<sup>3)</sup>.*

*German Institutes of Textile and Fiber Research Denkendorf (DITF) joins 14 partners from seven countries in the European project "Efficient Decommissioning, Repurposing and Recycling to Increase the Circularity of End-of-life Wind Energy Systems" (REWIND). The project has several objectives connected to the recycling of WTs. In the first phase, the consortium partners will develop technologies for efficiently dismantling composite parts and methods for disassembling and evaluating materials. Next, the companies will study the recycling processes and possibilities for reusing the composite materials. In summary, the project aims to decrease the amount of landfilled and incinerated WTs. The DITF will be responsible for developing yarns, fabrics or repair kits made from recycled carbon and glass fibres<sup>4)</sup>.*

*Ideko (Elgoibar, Spain) joins a consortium led by applied research company Profactor (Steyr, Austria) in the European project BioStruct. In this project, partners attempt to solve problems associated with bio-based composites in wind energy or marine industries. The main objectives include developing a laying process to control fiber orientation, creating material models and integrating bio-based sensors for load monitoring. The*

pozytywnych. Podsumowując, projekt ma na celu zmniejszenie ilości składowanych i spalanych turbin wiatrowych. DITF będzie odpowiedzialny za opracowanie przędzy, tkanin lub zestawów naprawczych wykonanych z włókien węglowych i szklanych pochodzących z recyklingu<sup>4</sup>).

Ideko (Elgoibar, Hiszpania) dołącza do konsorcjum prowadzonego przez firmę Profactor (Steyr, Austria) w ramach europejskiego projektu BioStruct. W ramach tego projektu partnerzy zajmują się problemami związanymi z biokompozytami w energetyce wiatrowej lub przemyśle morskim. Główne cele obejmują opracowanie procesu układania tkanin w celu kontrolowania orientacji włókien, tworzenie modeli materiałowych i wprowadzenie bioczułników do monitorowania obciążenia w strukturę kompozytu. Ideko Research Center ma doświadczenie w pomiarach 3D oraz technologiach wizyjnych i będzie odpowiedzialne za poprawę precyzji procesu układania tkanin. Produktem końcowym projektu będzie produkcja dwóch demonstratorów: kadłuba dla 6-metrowej łodzi i łopaty wirnika dla turbin wiatrowych. Ponadto partnerzy projektu BioStruct dążą do zwiększenia wykorzystania biokompozytów i zmniejszenia zależności od włókien węglowych i szklanych, które są produkowane głównie poza Europą<sup>5</sup>).

Nowy projekt finansowany przez Unię Europejską, Blade2Circle, został ogłoszony przez Aitiip Technology Center (Saragossa, Hiszpania) wraz z 11 partnerami z Francji, Szwecji, Belgii, Irlandii i Hiszpanii. Głównym celem tego projektu jest opracowanie wysokowydajnych łopat turbin wiatrowych produkowanych z biokompozytów. Dodatkowo partnerzy dążą do uproszczenia demontażu łopat i opracowania nowych chemicznych i enzymatycznych procesów degradacji żywic. Co więcej, projekt obejmie również badania nad poprawą wydajności łopat oraz zwiększeniem czasu ich eksploatacji, a także efektywności wycofania turbin z eksploatacji<sup>6</sup>).

Współpraca pomiędzy firmami Swancor (Nantou, Tajwan) i Siemens Gamesa (Zamudio, Hiszpania) została zacieśniona poprzez podpisanie listu intencyjnego. Partnerstwo to doprowadzi do opracowania w pełni nadających się do recyklingu turbin wiatrowych do 2040 r. Obecnie partnerzy wytwarzają turbiny o nazwie handlowej RecyclableBlade z możliwością odzyskania 95% surowców. Tak wysoki stopień odzysku materiałów jest możliwy dzięki nadającej się do recyklingu żywicy epoksydowej EzCiclo firmy Swancor. Zgodnie z listem intencyjnym, od 2026 r. wszystkie żywice dostarczane przez Swancor będą nadawały się do recyklingu. Co więcej, na chwilę obecną wyprodukowano 20 szt. łopat nadających się do recyklingu, a końcowe testy jakości i certyfikacja produktu są w toku<sup>7</sup>).

Nowy europejski projekt, EOLIAN, rozpoczął się w czerwcu 2024 r. Proplast (Alessandria, Włochy), wraz z 8 partnerami z Włoch, Turcji, Belgii, Wielkiej Brytanii i Europejskiego Stowarzyszenia Przemysłu Kompozytowego (EuCIA), skupi się na opracowaniu nowej generacji inteligentnych i zrównoważonych łopat turbin wiatrowych o dłuższej żywotności, zwiększonej niezawodności oraz zrównoważonym rozwoju. Partnerzy planują wykorzystać biopochodne, nadające się do

*Ideko Research Center have experience in 3D measurement and vision technologies and will be responsible for improving the precision of the laying process. The project's final product will be manufacturing two demonstrators: a hull for a 6-meter boat and rotor blades for WTs. Moreover, the partners of the BioStruct project aim to enhance the use of biocomposites and reduce the dependence on carbon and glass fibers, which are mainly produced outside Europe<sup>5</sup>.*

*A new EU-funded project, Blade2Circle, was announced by Aitiip Technology Center (Zaragoza, Spain) with 11 partners from France, Sweden, Belgium, Ireland and Spain. The main aim of this project is to develop high-performance wind turbine blades manufactured with bio-based composites. Additionally, the partners aim to simplify the dismantling of blades and develop new chemical and enzymatic degradation processes for resins. Moreover, the project will also include an investigation of improving blade performance and operation time or efficiency of decommissioning<sup>6</sup>.*

*The cooperation between Swancor (Nantou, Taiwan) and Siemens Gamesa (Zamudio, Spain) has been solidified by signing a letter of intent. This partnership will lead to the development of fully recyclable WTs by 2040. Currently, the partners can manufacture the RecyclableBlade product with the possibility of recovering 95% of raw materials. Such a high degree of material recovery is possible thanks to Swancor's recyclable epoxy resin EzCiclo. According to the letter of intent from 2026, all resin supplied by Swancor to Siemens will be recyclable. Moreover, for the moment, 20 pieces of recyclable blades have been manufactured, and final quality tests and certification are in progress<sup>7</sup>.*

*A new European project, EOLIAN, started in June 2024. Proplast (Alessandria, Italy), together with 8 partners from Italy, Turkey, Belgium, the U.K. and the European Composites Industry Association (EuCIA), will focus on developing a new generation of smart and sustainable WT blades with longer lifetime, improved reliability and higher sustainability. The partners plan to use bio-based recyclable vitrimer composites with basalt fiber and implement sensors that enable structural health monitoring. Thanks to using vitrimers as a composite matrix, developed blades will be repairable and recyclable. In high-quality parts, the fibers and vitrimer matrix can be separated and reused, while parts of low quality can be mechanically shredded and moulded into other products. Moreover, LCA-based environmental analysis will be conducted, and various end-of-use solutions for WTs will be studied<sup>8</sup>.*

*Regen Fiber (Fairfax, Iowa, U.S.) opened a new facility for recycling WTs. The recycling process includes shredding the blades, extracting usable components, and transforming other parts (without using heat or chemicals) into products used in construction materials. In this way, Regen Fiber supports a circular economy*

recyklingu kompozyty witymerowe wzmocnione włóknami bazaltowymi oraz wdrożyć czujniki umożliwiające monitorowanie stanu konstrukcji. Dzięki zastosowaniu witymerów jako matrycy kompozytowej, opracowane łopaty będą nadawały się do naprawy i recyklingu. W przypadku wysokiej jakości części, włókna i matryca z witymeru mogą być odseparowane i ponownie wykorzystane, podczas gdy części o niskiej jakości mogą być mechanicznie rozdrabniane i wykorzystane do innych zastosowań. Ponadto zostanie przeprowadzona analiza środowiskowa oparta na LCA oraz zbadane zostaną różne rozwiązania dotyczące wykorzystania turbin wiatrowych wycofanych z eksploatacji<sup>8</sup>.

Firma Regen Fiber (Fairfax, Iowa, USA) otworzyła nowy zakład recyklingu turbin wiatrowych. Proces recyklingu obejmuje rozdrabnianie łopat, odzyskiwanie użytecznych komponentów oraz recykling pozostałych części łopat (bez wykorzystania procesów cieplnych czy chemikaliów) na produkty stosowane w materiałach budowlanych. W ten sposób Regen Fiber wspiera gospodarkę o obiegu zamkniętym w innych sektorach, np. w budownictwie, ponieważ produkty z recyklingu łopat turbin wiatrowych mogą być wykorzystywane w procesie produkcji betonu lub asfaltu. Firma spodziewa się poddawać recyklingowi ponad 30 tys. t łopat turbin wiatrowych rocznie, z możliwością zwiększenia tej liczby w przyszłości. Ponadto Regen Fiber rozpoczęła współpracę z dwoma innymi zakładami. Jeden z nich zajmuje się recyklingiem odpadów poprodukcyjnych z produkcji nowych łopat turbin wiatrowych (Des Moines, Iowa, USA), a drugi specjalizuje się w końcowej obróbce łopat (Lubbock, Teksas, USA)<sup>9</sup>.

Avangrid Inc. (Orange, Conn., USA) planuje do 2030 r. poddać recyklingowi 100% wycofanych z eksploatacji łopat turbin wiatrowych. Aby osiągnąć ten cel, firma nawiązała współpracę ze startupem WindLoop wywodzącym się z Uniwersytetu Yale (New Haven, Conn., USA). Firma przekazała startupowi 300 funtów wycofanych z eksploatacji turbin wiatrowych na potrzeby zaawansowanego projektu badawczego. Głównym celem WindLoop jest stworzenie gospodarki o obiegu zamkniętym dla branży turbin wiatrowych. Główną ideą recyklingu turbin wiatrowych jest wykorzystanie maszyn do cięcia/rozdrabniania kompozytów na miejscu demontażu turbiny wiatrowej w celu zmniejszenia kosztów transportu i wykorzystanie innowacyjnego procesu zgodnego z zasadami zielonej chemii do oddzielania włókien i żywicy w łopatach. Członkowie WindLoop twierdzą, że opracowane rozwiązania umożliwiają odzyskanie ponad 90% materiałów z łopat turbin<sup>10</sup>.

We wrześniu 2024 r. ogłoszono ostateczne wyniki konkursu Wind Turbine Materials Recycling Prize. Dwuetapowy konkurs został zorganizowany przez Departament Energii Stanów Zjednoczonych (DOE, Waszyngton, D.C., USA) ufundowany przez Bipartisan Infrastructure Law, którego celem było opracowanie zrównoważonych i wydajnych metod recyklingu materiałów turbin wiatrowych, które nie są poddawane recyklingowi komercyjnemu, takich jak części kompozytowe i pierwiastki ziem rzadkich. Celem konkursu jest przyczynienie się do osiągnięcia bezemisyjnego sektora energetycznego do 2035 r.

*in other sectors, e.g. construction, because the products from recycling WTs can be used in the manufacturing process of concrete or asphalt. The company expects to recycle more than 30,000 tons of WT blades per year, with the possibility of increasing the volume in the future. Moreover, Regen Fiber started cooperation with two other facilities. One of them recycles scrap materials from new WT blades (Des Moines, Iowa, U.S.), and the second one specialises in blade processing (Lubbock, Texas, U.S.)<sup>9</sup>.*

*Avangrid Inc. (Orange, Conn., U.S.) plans to recycle 100% of the company's decommissioned WT blades by 2030. To achieve this goal, they started cooperation with a WindLoop startup that originates from Yale University (New Haven, Conn., U.S.). The company donated 300 pounds of decommissioned WTs to a startup for an advanced research project. The main goal of WindLoop is to create a circular economy for the wind turbine industry. The main idea for recycling WTs is to incorporate on-site shredders to reduce transportation costs and use their innovative process, which uses green chemistry principles, to separate the fibres and resin in blades. WindLoop members state that the developed solutions enable the recovery of more than 90% of turbine blade materials<sup>10</sup>.*

*In September 2024, the final results of the Wind Turbine Materials Recycling Prize were announced. A two-phase competition was organised by the U.S. Department of Energy (DOE, Washington, D.C., U.S.) founded by the Bipartisan Infrastructure Law aimed to develop sustainable and cost-effective recycling methods for WT materials that are not recycled commercially, such as composite parts and rare earth elements. The competition aims to contribute to achieving a carbon-free energy sector by 2035 and net zero emissions by 2050. After the first phase, where teams had to present a concept of WT recycling methods, 20 teams were selected. In the second phase, 6 winners were announced. With a budget of 500,000 USD and technical support vouchers, the teams have to upscale the demonstrators and validate proposed solutions. The results will be presented at a Pitch Day event in 2025<sup>11</sup>.*

## Wind energy in China

*As the world increasingly turns to renewable energy sources to address environmental concerns, wind energy has emerged as an important option. Wind turbine blades play a vital role in harnessing this energy, and the materials used in their construction have a significant impact on their performance and durability<sup>12</sup>. Carbon fiber-reinforced composites have gained recognition for their superior mechanical properties, such as high strength-to-weight ratios, making them ideal for large wind turbine blades in China. The geographical distribu-*

i zerowej emisji netto do 2050 r. Po pierwszym etapie, w którym zespoły musiały przedstawić koncepcję metod recyklingu turbin, wybrano 20 zespołów. W drugim etapie ogłoszono 6 zwycięzców. Dysponując budżetem w wysokości 500 tys. USD i dokumentami uprawniającymi do skorzystania ze wsparcia technicznego, zespoły muszą zwiększyć skalę demonstratorów i zweryfikować proponowane rozwiązania. Wyniki zostaną zaprezentowane podczas wydarzenia Pitch Day w 2025 r.<sup>11)</sup>

## Energia wiatrowa w Chinach

W miarę jak świat coraz częściej zwraca się ku odnawialnym źródłom energii, aby rozwiązać problemy środowiskowe, energia wiatrowa stała się ważną opcją. Łopaty turbin wiatrowych odgrywają kluczową rolę w wykorzystywaniu tej energii, a materiały użyte do ich budowy mają znaczący wpływ na ich wydajność i trwałość<sup>12)</sup>. Kompozyty wzmocnione włóknem węglowym zyskały uznanie dzięki swoim doskonałym właściwościom mechanicznym, takim jak duża wartość stosunku wytrzymałości do masy, dzięki czemu idealnie nadają się do wytwarzania dużych łopat turbin wiatrowych w Chinach. Geograficzne rozmieszczenie zasobów energii wiatrowej w Chinach pokazuje wiele regionów o szczególnie wysokim potencjale energii wiatrowej. Regiony te obejmują południowo-wschodnie wybrzeże, Mongolię Wewnętrzną i część płaskowyżu Qinghai-Tybet. Teng i współpr.<sup>12)</sup> porównują korzyści ekonomiczne wynikające ze zwiększenia długości łopat turbin w tych obszarach, podkreślając, że dłuższe łopaty mogą znacznie zwiększyć produkcję energii. Wykorzystują oni model matematyczny do analizy efektywności energetycznej kompozytów z włókna węglowego, biorąc pod uwagę takie czynniki, jak koszt, energochłonność i ślad węglowy, potwierdzając wysoki potencjał energii wiatrowej. Pomimo tych korzyści, powszechne zastosowanie kompozytów z włókna węglowego w Chinach stoi przed wieloma wyzwaniami. Teng i współpr.<sup>12)</sup> wskazują kluczowe kwestie, takie jak wysokie koszty, luki technologiczne w produkcji oraz brak równowagi między podażą a popytem w branży włókien węglowych.

Niemniej jednak, chiński przemysł energii wiatrowej znacznie się rozwinął od początku XXI w. Podkreślanie przez rząd znaczenia energii odnawialnej, w szczególności poprzez ustawę o energii odnawialnej z 2005 r., stworzyło korzystne warunki dla rozwoju energetyki wiatrowej. Od 2011 r. Chiny stały się światowym liderem pod względem mocy zainstalowanej w elektrowniach wiatrowych (tabela), wyprzedzając Stany Zjednoczone.

Rozwój produkcji turbin wiatrowych w Chinach można podzielić na kilka etapów. Faza początkowa rozpoczęła się w 1996 r. wraz z programem Riding the Wind, który zachęcał do importu technologii i produkcji krajowej. W fazie szybkiej industrializacji polityka promowała uprzemysłowienie na dużą skalę (2006–2010), z naciskiem na produkcję krajową w celu obniżenia kosztów inwestycji w farmy wiatrowe. W miarę dojrzewania branży (od 2011 r.) rozpoczęła się faza intensywnego

*tion of wind resources in China shows many regions with particularly high wind energy potential. These regions include the southeast coast, Inner Mongolia and parts of the Qinghai-Tibet Plateau. Teng et al.<sup>12)</sup> compare the economic benefits of increasing the length of turbine blades in these areas, highlighting that longer blades can significantly increase energy production, and use a mathematical model to analyze the energy efficiency of carbon fiber composites, taking into account factors such as cost, embodied energy and carbon footprint, confirming the high potential of wind energy. Despite these benefits, the widespread adoption of carbon fiber composites in China faces many challenges. Teng et al.<sup>12)</sup> identify key issues such as high costs, technology gaps in manufacturing and an imbalance between supply and demand in the carbon fiber industry.*

*Nevertheless, China's wind energy industry has grown significantly since the early 2000s. The government's emphasis on renewable energy, particularly through the Renewable Energy Law of 2005, created a favorable environment for the development of wind power. By 2011, China had become the world leader in installed wind capacity, overtaking the U.S., as summarized in Table.*

*Therefore, the development of wind turbine manufacturing in China can be categorized into several phases. The beginning phase launched in 1996 with the Riding the Wind program, which encouraged technology imports and domestic production. In the rapid industrialization phase, policies promoted large-scale industrialization (2006–2010), with a focus on domestic manufacturing to reduce wind farm investment costs. As the industry matured (since 2011), an intensive development phase began with such issues as overcapacity and quality concerns emerged, prompting a shift from scale to efficiency.*

*Currently, the wind turbines in China are mainly categorized into three configurations: Doubly Fed Induction Generators (DFIG) with gearboxes, Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG), and PMSG with single/double stage gearboxes. Most turbines in operation are in the 1.5 to 3 MW range<sup>14)</sup>.*

*By 2011, domestic manufacturers had already achieved a rapid increase in production scale and competitiveness, securing significant global market shares. This expansion was characterized by an increase in turbine sizes, which led to improved economics as the industry moved towards larger turbines capable of generating more energy. These advances were accompanied by a significant reduction in unit prices, making wind power more competitive with conventional energy sources. In addition, the establishment of integrated service systems allowed manufacturers to participate not only in the production of turbines but also in the operation of wind farms, creating a more cohesive and efficient supply chain in China<sup>13)</sup>.*

*The current landscape of the carbon fiber industry in China is therefore one of growing demand, driven*

rozwoju, w której pojawiły się takie kwestie, jak nadwyżka mocy produkcyjnych i obawy dotyczące jakości, co skłoniło do przejścia od skali produkcji do efektywności.

Obecnie turbiny wiatrowe w Chinach dzielą się głównie na 3 konfiguracje: generatory indukcyjne z podwójnym zasilaniem (DFIG) z przekładnikami, generatory synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSG) z napędem bezpośrednim oraz PMSG z przekładnikami jedno- i dwustopniowymi. Większość działających turbin ma moc 1,5–3 MW<sup>14)</sup>.

Do 2011 r. krajowi producenci osiągnęli szybki wzrost skali produkcji i konkurencyjności, zapewniając sobie znaczący udział w globalnym rynku. Ta ekspansja charakteryzowała się wzrostem rozmiarów turbin, co doprowadziło do poprawy opłacalności, ponieważ przemysł przestawił się na większe turbiny, zdolne do generowania większej ilości energii. Tym postępom towarzyszyło znaczne obniżenie cen jednostkowych, dzięki czemu energia wiatrowa stała się bardziej konkurencyjna w stosunku do konwencjonalnych źródeł energii. Ponadto wprowadzenie systemów zintegrowanych usług pozwoliło producentom uczestniczyć nie tylko w produkcji turbin, ale także w obsłudze farm wiatrowych, tworząc bardziej spójny i sprawny łańcuch dostaw w Chinach<sup>13)</sup>.

Obecny rynek włókien węglowych w Chinach charakteryzuje się zatem rosnącym popytem, generowanym głównie przez sektor turbin wiatrowych. Większość włókien węglowych wykorzystywanych w tym sektorze jest nadal importowana, co wskazuje na potrzebę zwiększenia krajowych mocy produkcyjnych w celu zaspokojenia rosnącego popytu. Zbadane zostaną technologie produkcji łopatek kompozytowych z włókna węglowego, z naciskiem na poprawę efektywności i jakości, aby ułatwić ich szersze zastosowanie<sup>12)</sup>.

Gwałtowny rozwój chińskiego przemysłu energii wiatrowej stworzył kilka krytycznych wyzwań<sup>13)</sup>, takich jak nadwyżka mocy produkcyjnych (ostra konkurencja ponad 100 producentów doprowadziła do nadmiernej podaży, z mocami produkcyjnymi znacznie przekraczającymi popyt rynkowy), kwestie jakości (krajowe turbiny często mają wysoki wskaźnik defektów i małą dostępność, co budzi obawy o niezawodność), zaciekle konkurencja (wojny cenowe spowodowały erozję marż zysku, prowadząc do skupienia się na kosztach, a nie na jakości i innowacjach), brak niezależnych innowacji (wielu producentów polega na zagranicznych technologiach, czego skutkiem jest brak podstawowych kompetencji), i wreszcie zablokowany eksport (silne uzależnienie od rynku krajowego utrudnia wysiłki na rzecz ekspansji międzynarodowej, przy potencjalnych środkach antidumpingowych ze strony innych krajów).

W szczególności kwestie jakościowe prowadzą do wysokiego wskaźnika awarii turbin wiatrowych. Lin i współpr.<sup>14)</sup> podzielili je na awarie kilku komponentów, w tym przetwornice częstotliwości, generatory, przekładnie, układy pochylenia, układy odchylenia, łopaty i układy hamulcowe oraz kwestie związane z rezonansem podsynchronicznym. Przetwornice częstotliwości mają najwyższe wskaźniki awaryjności, co ma poważne konsekwencje dla jakości energii. Awaryje gene-

Table. Milestones of the development of the installed wind capacity in China<sup>13)</sup>

Tabela. Najważniejsze etapy rozwoju wykorzystania mocy wiatrowej w Chinach<sup>13)</sup>

Year/Rok	Installed capacity/ Moc zainstalowana, GW	Keyevents/ Kluczowe wydarzenia
2007	6.04	China surpassed Denmark, becoming a top wind developer/ Chiny prześcignęły Danię, stając się czołowym producentem energii wiatrowej
2008	10+	exceeded 10 GW, ahead of the 11th Five-Year Plan target/przekroczono 10 GW, wyprzedzając cel 11. planu pięcioletniego
2009	23.9	added 13.8 GW, surpassing the U.S. in new installations/ dodano 13,8 GW, wyprzedzając Stany Zjednoczone pod względem nowych instalacji
2010	44.7	newly installed capacity of 18.9 GW. China leads in total capacity/nowo zainstalowana moc 18,9 GW; Chiny są liderem pod względem całkowitej mocy produkcyjnej
2011	62.4	total installations reached 62.4 GW, maintaining global leadership/łączna moc instalacji osiągnęła 62,4 GW, utrzymując Chiny w pozycji światowego lidera

primarily by the wind turbine sector. The majority of carbon fiber used in this application is still imported, indicating the need for domestic production capacity to meet the growing demand. Manufacturing technologies for carbon fiber composite blades will be explored, with a focus on improving efficiency and quality to facilitate wider adoption<sup>12)</sup>.

The dramatic growth of China's wind energy industry has created several critical challenges<sup>13)</sup>: like overcapacity (more than 100 manufacturers have led to fierce competition and oversupply, with production capacities far exceeding market demand), quality issues (domestic turbines often have high defect rates and low availability, raising concerns about reliability), vicious competition (price wars have eroded profit margins, leading to a focus on cost over quality and innovation), lack of independent innovation (many manufacturers rely on foreign technologies, resulting in a lack of core competencies), and finally blocked exports (heavy reliance on the domestic market hampers international expansion efforts, with potential anti-dumping measures from other countries).

Quality issues in particular lead to high failure rates in wind turbines. Lin et al.<sup>14)</sup> categorize failures into several components, including frequency converters, generators, gearboxes, pitch systems, yaw systems, blades, braking systems and issues related to sub-synchronous resonance. In particular, frequency converters have the highest failure rates, with serious consequences for power quality.

ratorów są często spowodowane usterkami mechanicznymi i elektrycznymi, podczas gdy problemy z przekładniami są powszechne w turbinach o wysokich przełożeniach. Badania awarii łopát turbin wiatrowych pokazują, że są one związane głównie z pęknięciami i rysami powierzchniowymi. Ze względu na brak skutecznych metod testowania, pęknięcia powierzchniowe często przekształcają się w szczeliny, zanim zostaną wykryte. Statystyki z lat 2010–2012 pokazują, że pęknięcia łopát były najczęstszymi awariami w Chinach, spowodowanymi głównie wadami produkcyjnymi i odkształceniami związanymi z długotrwałą pracą i wibracjami. Uderzenia piorunów mogą również powodować poważne uszkodzenia, takie jak eksplozje łopát<sup>14</sup>. Ponadto, kumulacja chropowatości powierzchni, spowodowana takimi czynnikami jak kurz, oblodzenie i łuszcząca się farba, znacznie zmniejsza wydajność przechwytywania energii, nawet przy braku widocznych uszkodzeń. Procesy transportu i instalacji w Chinach również przyczyniają się do uszkodzeń łopát, ponieważ ich końcówki mogą ocierać się o drzewa lub gałęzie, powodując ukryte uszkodzenia<sup>14</sup>. Ponadto standardy projektowe stosowane dla turbin wiatrowych w Chinach opierają się na międzynarodowych wytycznych, które mogą nie być w pełni zgodne ze specyficznymi warunkami środowiskowymi tego kraju. Czynniki takie jak wysokość, ekstremalne temperatury i silne podmuchy wiatru mogą mieć znaczący wpływ na niezawodność turbiny<sup>14</sup>.

Aby poprawić niezawodność turbin, Lin i współpracownicy<sup>14</sup> zaproponowali kompleksową metodę zarządzania skupiającą się na fazach projektowania, produkcji i konserwacji. Na etapie projektowania ustalono cele niezawodności i przeprowadzono dokładną ocenę, aby odpowiednio szybko zidentyfikować potencjalne awarie. Na etapie produkcji wdrożono rygorystyczne procesy kontroli jakości i przeprowadzono testy ciągłej sprawności. Na etapie konserwacji opracowano protokoły systematycznej konserwacji i usprawniono gromadzenie danych w celu uzyskania informacji na temat przyszłych ulepszeń projektowych i produkcyjnych.

W rezultacie w Chinach testowane są różne techniki SHM, w tym analiza wibracji, analiza oleju, pomiar odkształceń i kontrola wizualna. Metody te były stosowane głównie w laboratorium, a ich praktyczne zastosowanie w terenie pozostawało ograniczone. Ta luka nadal przyczynia się do wysokich wskaźników awaryjności i zmniejszonej wydajności w wytwarzaniu energii wiatrowej. Kluczowe komponenty do monitorowania to łopaty wirnika, kolumny, łożyska i układy elektryczne. W bardziej efektywnych technikach SHM sugerowane jest wykorzystanie termografii w podczerwieni, monitorowania akustycznego i badań ultradźwiękowych<sup>15</sup>.

Aby sprostać opisanym wyzwaniom, Yuan i współpracownicy<sup>13</sup> sugerują różne strategie, takie jak przeniesienie nacisków politycznych ze zdolności produkcyjnych na zdolności innowacyjne w celu promowania konkurencyjnego przemysłu lub ustanowienie surowych standardów technologicznych i systemu certyfikacji w celu poprawy jakości produktów<sup>13,16</sup>.

*Generator failures are often due to mechanical and electrical malfunctions, while gearbox problems are prevalent in turbines with high speed gear ratios. Studies of wind turbine blade failures show that these failures are primarily fractures and surface cracks. Due to the lack of effective testing methods, surface cracks often develop into fractures before they are detected. Statistics from 2010 to 2012 show that blade fractures were the most common failures in China, mainly caused by manufacturing defects, deformation from prolonged operation and vibration. Lightning strikes can also cause serious damage, such as blade explosions<sup>14</sup>. In addition, the accumulation of surface roughness from factors such as dust, icing and peeling paint significantly reduces energy capture efficiency, even in the absence of visible damage. The transportation and installation processes in China also contribute to blade damage, as blade tips can scrape against trees or branches, creating hidden problems<sup>14</sup>. In addition, the design standards used for wind turbines in China are based on international guidelines that may not be fully compatible with the country's unique environmental conditions. Factors such as altitude, extreme temperatures and high wind gusts can have a significant impact on turbine reliability<sup>14</sup>.*

*To improve turbine reliability, Lin et al.<sup>14</sup> propose a comprehensive management method focusing on design, manufacturing, and maintenance phases. In the design stage reliability goals were established and thorough evaluations were conducted to identify potential failures early. In the manufacturing stage, rigorous quality inspection processes were implemented and continuous performance testing was conducted. In the maintenance stage, The systematic maintenance protocols were developed and data collection was improved to inform about future design and manufacturing improvements.*

*As a result, various SHM techniques, including vibration analysis, oil analysis, strain measurement and visual inspection, are being studied in China. While the methods have mainly been studied in the laboratory, their practical application in the field remained limited. This gap still contributes to the high failure rates and reduced productivity in wind power generation. Key components for monitoring include rotor blades, towers, bearings and electrical systems. Techniques such as infrared thermography, acoustic monitoring and ultrasonic testing are suggested as potential advances for more effective SHM<sup>15</sup>.*

*To overcome the challenges described, Yuan et al.<sup>13</sup> suggest various strategies, such as shifting the policy focus from production capacity to innovation capacity to promote a competitive industry, or establishing strict technology standards and a certification system to improve product quality<sup>13,16</sup>.*

*As the demand for wind energy continues to grow, the associated waste from composite turbine blades has also*

Wraz z rosnącym popytem w Chinach na energię wiatrową również odpady związane z kompozytowymi łopatomy turbin stały się tam poważnym problemem. Liu i współpr.<sup>17)</sup> oszacowali obecną i przyszłą inwentaryzację odpadów z łopat turbin wiatrowych i przewidzieli, że do 2050 r. na całym świecie powstanie łącznie 43 mln t odpadów. Uważa się, że Chiny będą odpowiedzialne za 40% tych odpadów (Europa za 25%, Stany Zjednoczone za 16%, a reszta świata za 19%), co wskazuje, że do 2050 r. Chiny mogą wygenerować od 7,7 do 23,1 mln t odpadów z łopat<sup>17, 18)</sup>. Jak przedstawiono w *Raporcie na temat rozwoju branży recyklingu sprzętu wiatrowego i fotowoltaicznego w Chinach w 2022 r.*, nadchodząca fala wycofywanych z eksploatacji turbin wiatrowych, zwłaszcza tych starszych niż 20 lat, stwarza pilną potrzebę skutecznych rozwiązań w zakresie recyklingu. Do 2030 r. konieczna będzie wymiana ponad 30 tys. turbin, a do 2035 r. liczba ta ma wzrosnąć do ponad 90 tys. Konsekwencje tego wzrostu są znaczące, ponieważ generowane odpady stałe będą obejmować ogromną ilość materiałów kompozytowych, którymi należy zarządzać w sposób odpowiedzialny<sup>19)</sup>. Czynniki przyczyniającymi się do powstawania odpadów w postaci łopat są odpady powstające w trakcie procesu produkcyjnego, wady, rutynowa konserwacja i uszkodzenia podczas eksploatacji. Analiza przeprowadzona przez Liu i współpr.<sup>17)</sup> pokazuje, że do 2029 r. największe źródło odpadów zmieni się z odpadów produkcyjnych na odpady w postaci łopat wycofanych z eksploatacji, co podkreśla potrzebę ulepszenia technologii i metod recyklingu.

Łopaty turbin wiatrowych wykonane głównie z materiałów kompozytowych stanowią wyjątkowe wyzwanie dla recyklingu ze względu na ich rozmiar, złożoność i trudności w oddzieleniu różnych materiałów. Chociaż istnieją technologie recyklingu włókna szklanego, nie są one jeszcze opłacalne komercyjnie ani zrównoważone środowiskowo na dużą skalę. Konwencjonalne metody gospodarowania odpadami, takie jak składowanie i spalanie, są technicznie wykonalne, ale mają istotne wady, w tym utratę wartości materiałów i emisje gazów cieplarnianych. Dlatego obecne przepisy i zachęty finansowe w Chinach, takie jak ustawa o odpadach stałych, mają na celu promowanie recyklingu i gospodarki odpadami<sup>18)</sup>. Skuteczność istniejących technologii jest jednak bardzo zróżnicowana, a wiele z nich nie jest jeszcze wystarczająco dojrzałych, aby można je było stosować na szeroką skalę. Badania podkreślają, że kompleksowe zrozumienie wzorców wytwarzania odpadów w różnych prowincjach Chin może pomóc w podejmowaniu lepszych decyzji dotyczących zakładów recyklingu i strategii gospodarowania odpadami. Rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym w odniesieniu do odpadów z łopat ma zasadnicze znaczenie dla osiągnięcia neutralności pod względem emisji dwutlenku węgla i maksymalizacji korzyści płynących z energii wiatrowej jako zasobu odnawialnego<sup>18)</sup>.

Niemniej jednak proces recyklingu łopat turbin wiatrowych w Chinach przyspiesza. Firma Sinoma Technology, główny producent łopat do turbin wiatrowych, opublikowała raport ESG za 2023 r., w którym wykazała zmniejszenie ilości odpadów stałych na łopatę o 17,26% rok do roku

*become a major concern in China. Liu et al.<sup>17)</sup> estimated the current and future inventory of wind turbine blade waste and predicted a total of 43 million metric tons of waste worldwide by 2050. China is expected to account for 40% of this waste, followed by Europe (25%), the United States (16%) and the rest of the world (19%), indicating that China could generate between 7.7 and 23.1 million metric tons of blade waste by 2050, driven by the historical deployment of wind turbines<sup>17, 18)</sup>. As outlined in the 2022 China Wind Power and Photovoltaic Equipment Recycling Industry Development Report, the coming wave of decommissioned wind turbines, particularly those over 20 years old, presents an urgent need for effective recycling solutions. By 2030, more than 30,000 turbines will need to be replaced, and this number is expected to rise to over 90,000 by 2035. The implications of this surge are profound, as the solid waste generated will include a staggering amount of composite materials that need to be managed responsibly<sup>19)</sup>. Contributing factors to blade waste are in-process manufacturing waste, defects, routine maintenance and damage during operation. The analysis by Liu et al.<sup>17)</sup> shows that the largest source of waste will shift from manufacturing to end-of-life waste by 2029, highlighting the need for improved recycling technologies and practices.*

*For example, wind turbine blades, which were primarily made of composite materials, present unique recycling challenges due to their size, complexity and the difficulty of separating different materials. While recycling technologies exist for glass fiber, they are not yet commercially viable or environmentally sustainable on a large scale. Conventional waste management methods such as landfill and incineration are technically feasible but have significant drawbacks, including loss of material value and greenhouse gas emissions. Therefore, current regulations and financial incentives in China, such as the Solid Waste Law, aim to promote recycling and waste management<sup>18)</sup>. However, the effectiveness of existing technologies varies widely and many are not yet mature enough for widespread application. The research highlights that a comprehensive understanding of waste generation patterns across different provinces in China can help inform better decision-making on recycling facilities and waste management strategies. Developing a circular economy for blade waste is essential to achieving carbon neutrality and maximizing the benefits of wind energy as a renewable resource<sup>18)</sup>.*

*Nevertheless, the process of recycling wind turbine blades in China is accelerating. Sinoma Technology, a major manufacturer of wind turbine blades, released its 2023 ESG report, which showed a 17.26% year-on-year reduction in solid waste per blade output due to solid waste reduction initiatives. In addition, Sinoma Technology has developed nearly 100 meter long thermoplastic composite blades using advanced recyclable*



dzięki inicjatywom na rzecz redukcji odpadów stałych. Sinoma Technology opracowała prawie 100-metrowe termoplastyczne łopaty kompozytowe wykorzystujące zaawansowane materiały nadające się do recyklingu, ustanawiając światowy rekord długości. Podobnie firma Times New Materials odnotowała znaczną redukcję emisji ditlenku węgla podczas produkcji łopat dzięki usprawnieniom procesów produkcyjnych i czystym technologiom. Firma wprowadziła na rynek pierwsze na świecie łopaty termoutwardzalne nadające się do recyklingu, co stanowi przełom w zastosowaniu materiałów<sup>20</sup>. W 2023 r. firma Mingyang Smart Energy ogłosiła, że osiągnęła wskaźnik recyklingu materiału łopat na poziomie ponad 95%. Firma Goldwind Technology wdrożyła kompleksowe podejście do recyklingu zużytych łopat turbin, w tym recykling na miejscu, kruszenie i drukowanie 3D z odpadów stałych, w nowe produkty, tworząc zamknięty system zarządzania odpadami<sup>20</sup>.

Chińska Narodowa Komisja Rozwoju i Reform wydała również nowe wytyczne w celu dalszego promowania recyklingu wycofanego z eksploatacji sprzętu wiatrowego i fotowoltaicznego. Te wytyczne zachęcają do zaawansowanego demontażu i recyklingu komponentów turbin, w tym łopat, przy jednoczesnym wspieraniu rozwoju zdolności przemysłowych w zakresie złożonych materiałów<sup>20</sup>. W rezultacie Komisja Rozwoju i Reform prowincji Shanxi podkreśliła wyjątkową pozycję prowincji Shanxi jako strefy pilotażowej dla krajowej transformacji gospodarczej opartej na zasobach. Region ma ambitne cele w zakresie mocy odnawialnych źródeł energii, dążąc do osiągnięcia 50% zainstalowanej mocy i 30% produkcji energii z nowych źródeł energii do końca 14. planu pięcioletniego. Ponieważ stare turbiny wiatrowe stoją w obliczu szybkiego wycofania z eksploatacji, skuteczny recykling odpadów stałych, w szczególności łopat turbin wiatrowych, ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia zrównoważonego rozwoju energii odnawialnej<sup>16</sup>.

Ponadto naukowcy z Instytutu Chemii Węgla w prowincji Shanxi, kierowani przez Hou Xianglina i Deng Tianshenga, opracowali innowacyjną technikę degradacji materiałów kompozytowych w odpadach z łopat. To innowacyjne podejście pozwala na degradację żywic w przyjaznych warunkach. W przeciwieństwie do tradycyjnych metod recyklingu, które koncentrują się na rozdrabnianiu materiałów na mniejsze cząstki, ta nowa metoda wykorzystuje słabo skoordynowane jony metali do selektywnego rozrywania wiązań chemicznych w żywicy. Umożliwia to efektywną degradację i pełny recykling komponentów kompozytów na bazie żywic termoutwardzalnych, przy jednoczesnym zachowaniu jak największej integralności strukturalnej materiałów. Osiągnięto wysokie współczynniki odzysku przy wskaźnikach degradacji żywicy przekraczających 99% i wskaźnikach odzysku włókien węglowych przekraczających 96%. Jakość materiałów pochodzących z recyklingu jest zbliżona do jakości oryginalnych włókien, co stanowi wyraźną przewagę nad konwencjonalnymi technikami

*materials, setting a world record for length. Similarly, Times New Materials has reported a significant reduction in carbon dioxide emissions from blade production through improvements in manufacturing processes and clean technologies. They have introduced the world's first recyclable thermoset blade, marking a breakthrough in materials application<sup>20</sup>. Mingyang Smart Energy announced in 2023 that it had achieved a blade material recycling rate of more than 95%. Goldwind Technology has implemented a comprehensive approach to recycling retired turbine blades, including on-site recycling, crushing and 3D printing of solid waste into new products, creating a closed-loop system for waste management<sup>20</sup>.*

*China's National Development and Reform Commission has also issued new guidelines to further promote the recycling of decommissioned wind and photovoltaic equipment. These guidelines encourage the sophisticated dismantling and recycling of turbine components, including blades, while supporting the development of industrial capacity for complex materials<sup>20</sup>. As a result, the Shanxi Provincial Development and Reform Commission has highlighted Shanxi's unique position as a pilot zone for the national resource-based economic transformation. The region has ambitious targets for renewable energy capacity, aiming to achieve 50% of installed capacity and 30% of power generation from new energy sources by the end of the 14th Five-Year Plan. As old wind turbines face early decommissioning, effective recycling of solid waste, particularly from wind turbine blades, is essential to ensure sustainable renewable energy development<sup>16</sup>.*

*In addition, researchers from the Shanxi Institute of Coal Chemistry, led by Hou Xianglin and Deng Tiansheng, have developed an innovative technique for degrading composite materials in blade waste. The innovative approach allows for the degradation of resins under mild conditions. Unlike traditional recycling methods that focus on breaking materials into smaller molecules, this new method selectively breaks chemical bonds in the resin using unsaturated or weakly coordinated metal ions. This enables efficient degradation and full component recycling of thermoset resin-based composites, while preserving as much of the structural integrity of the materials as possible. High recovery rates have been achieved with resin degradation rates in excess of 99% and carbon fiber recovery rates in excess of 96%. The quality of the recycled materials is close to that of the original fibers, a clear advantage over conventional mechanical shredding and pyrolysis techniques. The predicted economic benefits are significant, especially as recovered resin products can be converted into high value chemicals such as bisphenol A<sup>19</sup>.*

*Other approaches to recycling include pyrolysis techniques, as investigated by Cheng et al.<sup>21</sup>. The research*

rozdrabniania mechanicznego i pirolizy. Przewidywane korzyści ekonomiczne są znaczące, zwłaszcza że odzyskane produkty żywiczne mogą być przekształcane w chemikalia o wysokiej wartości, takie jak bisfenol A<sup>19)</sup>.

Inne podejścia do recyklingu obejmują techniki pirolizy, badane przez Chenga i współpracowników<sup>21)</sup>. Badania koncentrują się na wpływie różnych czynników na proces pirolizy, w tym temperatury, czasu, składu spalin i trybu ogrzewania. Wyniki wskazują, że piroliza w temp. 420–450°C przez 5–6 h daje włókna szklane o wysokiej czystości (powyżej 99%) przy minimalnym zmniejszeniu wytrzymałości na rozciąganie (mniej niż 10% w porównaniu z włóknami oryginalnymi). Badanie wykazało, że stężenie ditlenku siarki w spalinach ma znikomy wpływ na jakość włókien, podkreślając wykonalność procesu w elektrowniach węglowych. Mechanizm pirolizy obejmuje dwa główne etapy: karbonizację żywicy i utlenianie powstałego węgla. Ta wyjątkowa dwuetapowa reakcja jest ułatwiona dzięki specyficznym warunkom (niskie stężenie tlenu i ciągły przepływ powietrza) zapewnianym przez spaliny<sup>21)</sup>. Zaproponowano plan wdrożenia przemysłowego, który obejmuje wykorzystanie części gazów spalinowych do pirolizy łopat, umożliwiając spalanie wszelkich gazów resztkowych w kotle. Instalacja wymaga minimalnego dodatkowego wyposażenia, w tym mieszalnika spalin, odpylacza, pieca odzyskowego i wentylatora. Ta metoda nie tylko skutecznie wykorzystuje ciepło odpadowe, ale także integruje się z istniejącymi układami oczyszczania spalin, aby zminimalizować wpływ na środowisko<sup>21)</sup>.

Podobnie jak w Europie, większość przetworzonych łopat turbin wiatrowych jest wykorzystywana do produkcji cementu. Kompleksowy przegląd został opublikowany przez Wanga i współpracowników<sup>22)</sup>. Porównanie betonu zwykłego, betonu zawierającego włókna z łopat turbin wiatrowych, betonu z włóknami szklanymi i betonu z kruszywem drugiej generacji wykazało, że wytrzymałość na zginanie betonu z włóknami z łopat turbin wiatrowych była o 5–18% większa niż betonu zwykłego, w zależności od zawartości włókien. Ogólnie rzecz biorąc, efekt wzmocnienia betonu włóknami z łopat turbin wiatrowych jest znacznie słabszy niż w przypadku włókien szklanych, ale pokryta żywicą powierzchnia włókien z recyklingu poprawia odporność na poślizg i właściwości blokujące na styku włókno-cement. Połączenie kruszyw z recyklingu z włóknami z recyklingu jest rzadkie, a interpretacja wyników testów pozostaje trudna, ponieważ dodanie włókien z recyklingu do betonu z kruszywem drugiej generacji znacznie zmniejszyło wytrzymałość betonu. Konieczne jest zatem dalsze opracowywanie projektów mieszanek betonowych i badanie wpływu odpadów z łopat turbin wiatrowych pochodzących z recyklingu<sup>22)</sup>.

Łopaty turbin wiatrowych z recyklingu mogą być również stosowane w mieszankach asfaltowych. Łopaty te są najpierw kruszone i mielone na drobny proszek, który jest następnie mieszany z kauczukiem butadienowo-styrenowym poddanym obróbce silanem w celu uzyskania modyfikatora asfaltu. Ten modyfikator został połączony z kopolimerem styren-butadien-styren w celu wytworzenia kompozytowych modyfiko-

*focuses on the effects of various factors on the pyrolysis process, including temperature, time, flue gas composition and heating mode. The results indicate that pyrolysis at temperatures between 420°C and 450°C for 5–6 h yields high purity recycled glass fibers (above 99% purity) with minimal reduction in tensile strength (less than 10% compared to the original fibers). The study shows that the sulfur dioxide concentration in the flue gas has a negligible effect on the fiber quality, highlighting the feasibility of the process in coal-fired power plants. The pyrolysis mechanism involves two main steps: carbonization of the resin and oxidation of the resulting carbon. This unique two-step reaction is facilitated by the specific conditions of low oxygen concentration and continuous air flow provided by the flue gas<sup>21)</sup>. An industrial implementation plan is proposed, which involves using part of the flue gas to pyrolyze the blades, allowing the combustion of any residual gases in the boiler. The installation requires minimal additional equipment, including a flue gas mixer, dust collector, recovery furnace and fan. This method not only effectively utilizes waste heat, but also integrates with existing flue gas cleaning systems to minimize environmental impact<sup>21)</sup>.*

*As in Europe, most recycled wind turbine blades are used for cement production. A comprehensive review has been published by Wang et al.<sup>22)</sup>. The comparison of normal concrete, windmill fiber concrete, glass fiber concrete and second generation aggregate concrete showed that the flexural strength of windmill fiber concrete was 5–18% higher than that of normal concrete, depending on the fiber content. Overall, the reinforcing effect of wind turbine blade fibers on concrete is significantly weaker than that of glass fibers, but the resin-coated surface of recycled fibers improves slip resistance and interlocking properties at the fiber-cement interface. The combination of recycled aggregates with recycled fibers is uncommon and the interpretation of the test results remains difficult, as the addition of recycled fibers to second generation aggregate concrete extremely reduced the strength of the concrete. Further development of concrete mix designs and investigation of the influence of recycled wind turbine blade waste is therefore required<sup>22)</sup>.*

*Recycled wind turbine blades can also be used in asphalt mixes. Wind turbine blades are first crushed and ground into fine powders, which are then mixed with silane-treated styrene-butadiene rubber to create an asphalt modifier. This modifier was combined with styrene-butadiene-styrene to produce composite modified asphalt mixes. The key findings of the Li et al.<sup>23)</sup> studies were that the modifier significantly improved the resistance of the asphalt mixes to moisture-induced damage, achieving a residual Marshall stability of 95.6% after immersion, compared to 83.67% for virgin mixes. Therefore, the asphalt modifiers offer a sustainable solu-*

wanych mieszanek asfaltowych. Kluczowe wnioski z badań Li i współpr.<sup>23)</sup> były takie, że modyfikator znacznie poprawił odporność mieszanek asfaltowych na uszkodzenia spowodowane wilgocią, osiągając resztkową stabilność Marshalla na poziomie 95,6% po zanurzeniu, w porównaniu z 83,67% dla mieszanek pierwotnych. W związku z tym modyfikatory asfaltu zapewniają zrównoważone rozwiązanie poprawiające właściwości użytkowe nawierzchni przy jednoczesnym sprośnaniu wyzwaniom związanym z gospodarką odpadami.

Podsumowując, poprzez ponowne wykorzystanie i renowację, interesariusze mogą złagodzić wpływ na środowisko, jednocześnie osiągając korzyści ekonomiczne. Alternatywne technologie recyklingu muszą być dalej rozwijane, aby osiągnąć zamknięty obieg materiałów w przypadku łopat turbin wiatrowych.

*tion to improve pavement performance while addressing waste management challenges.*

*In conclusion, by embracing reuse and refurbishment, stakeholders can mitigate environmental impacts while achieving economic benefits. Alternative recycling technologies need to be further developed to achieve closed-loop materials cycles for wind turbine blades.*

Received/Otrzymano: 24-11-2024

Reviewed/Zrecenzowano: 26-11-2024

Accepted/Zaakceptowano: 30-12-2024

Published/Opublikowano: 24-01-2025

#### REFERENCES/LITERATURA

- [1] A. André, T. Bru, A.G. Abbasi, S. Sinha, S. Nunes, M. Juntikka, K. Kazmierczak, N.Ó. Egilsson, G. Frid, M. Sobczyk, R. Haghani, *Sustainability* 2024, **16**, 7858, doi:10.3390/su16177858, doi: 10.3390/su16177858.
- [2] G. Nehls, *CompositesWorld*, Jan 4, 2024; <https://www.compositesworld.com/news/acciona-energia-el-ganso-develop-shoes-made-with-recycled-wind-blade-materials>.
- [3] G. Nehls, *CompositesWorld*, Apr 8, 2024; [https://www.compositesworld.com/news/acciona-to-build-wind-blade-recycling-plant-in-spain-by-2025?utm\\_source=Omeda&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CW+Today+4%2f10%2f2024&oly\\_enc\\_id=4680G2264356G6Y](https://www.compositesworld.com/news/acciona-to-build-wind-blade-recycling-plant-in-spain-by-2025?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+4%2f10%2f2024&oly_enc_id=4680G2264356G6Y).
- [4] G. Nehls, *CompositesWorld*, May 23, 2024; [https://www.compositesworld.com/news/ditf-joins-horizon-europe-rewind-project?utm\\_source=Omeda&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CW+Today+5%2f31%2f2024&oly\\_enc\\_id=0351H2919923F5U](https://www.compositesworld.com/news/ditf-joins-horizon-europe-rewind-project?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+5%2f31%2f2024&oly_enc_id=0351H2919923F5U).
- [5] G. Nehls, *CompositesWorld*, May 14, 2024; [https://www.compositesworld.com/news/biostruct-project-to-validate-biocomposite-focused-manufacturing-processes?utm\\_source=Omeda&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CW+Today+5%2f13%2f2024](https://www.compositesworld.com/news/biostruct-project-to-validate-biocomposite-focused-manufacturing-processes?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+5%2f13%2f2024).
- [6] G. Nehls, *CompositesWorld*, Oct 5, 2024; [https://www.compositesworld.com/news/blade2circ-project-to-facilitate-sustainable-next-gen-wind-blade-designs?utm\\_source=Omeda&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CW+Today+5%2f13%2f2024](https://www.compositesworld.com/news/blade2circ-project-to-facilitate-sustainable-next-gen-wind-blade-designs?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+5%2f13%2f2024).
- [7] G. Nehls, *CompositesWorld*, Mar 29, 2024; [https://www.compositesworld.com/news/swancor-siemens-gamesa-solidify-recyclable-wind-blade-partnership?utm\\_source=Omeda&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CW+Today+4%2f1%2f2024](https://www.compositesworld.com/news/swancor-siemens-gamesa-solidify-recyclable-wind-blade-partnership?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+4%2f1%2f2024).
- [8] G. Nehls, *CompositesWorld*, Jul 16, 2024; [https://www.compositesworld.com/news/eolian-kicks-off-bio-based-wind-blade-development?utm\\_source=Omeda&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CW+Today+7%2f17%2f2024](https://www.compositesworld.com/news/eolian-kicks-off-bio-based-wind-blade-development?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+7%2f17%2f2024).
- [9] G. Nehls, *CompositesWorld*, Jun 7, 2024; [https://www.compositesworld.com/news/regen-fiber-opens-wind-turbine-blade-recycling-facility?utm\\_source=Omeda&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CW+Today+6%2f10%2f2024&oly\\_enc\\_id=0351H2919923F5U](https://www.compositesworld.com/news/regen-fiber-opens-wind-turbine-blade-recycling-facility?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+6%2f10%2f2024&oly_enc_id=0351H2919923F5U).
- [10] G. Nehls, *CompositesWorld*, Jun 21, 2024; [https://www.compositesworld.com/news/avangrid-partners-with-windloop-to-test-wind-blade-recycling?utm\\_source=Omeda&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CW+Today+6%2f24%2f2024&oly\\_enc\\_id=4680G2264356G6Y](https://www.compositesworld.com/news/avangrid-partners-with-windloop-to-test-wind-blade-recycling?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+6%2f24%2f2024&oly_enc_id=4680G2264356G6Y).
- [11] G. Nehls, *CompositesWorld*, Sep 23, 2024; <https://www.compositesworld.com/news/doe-announces-wind-turbine-materials-recycling-prize-winners>, [https://www.compositesworld.com/news/us-doe-awards-36-million-in-final-phase-of-wind-turbine-recycling-project?utm\\_source=Omeda&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=CW+Today+9%2F25%2F2024](https://www.compositesworld.com/news/us-doe-awards-36-million-in-final-phase-of-wind-turbine-recycling-project?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+9%2F25%2F2024).
- [12] H. Teng, S. Li, Z. Cao, S. Li, C. Li, T.J. Ko, *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, **11**, 624, doi: 10.3390/jmse11030624.
- [13] J. Yuan, C. Na, Y. Xu, C. Zhao, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, **51**, 1235, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.048.
- [14] Y. Lin, I. Tu, H. Liu, W. Li, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, **55**, 482, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.149.
- [15] W. Liu, B. Tang, Y. Jiang, *Renew. Energy* 2010, **35**, 1414, doi: 10.1016/j.renene.2010.01.006.
- [16] Anonim, 2023 Innovation and Development Forum of New Energy Composite Materials and Green Circular Economy Industry Chain, 25–26.04.2023, Taiyuan, China.
- [17] P. Liu, C.Y. Barlow, *Waste Manage.* 2017, **62**, 229, doi: /10.1016/j.wasman.2017.02.007.
- [18] J. Yang, F. Meng, L. Zhang, J. McKechnie, Y. Chang, B. Ma, Y. Hao, X. Li, K. Pender, L. Yang, G. A. Leeke, J. M. Cullen, *Comm. Earth Environ.* 2023, **4**, 466, doi:10.1038/s43247-023-01104-w.
- [19] Anonim, *Government Affairs: China Composite Materials Society*, 2.11.2023, No. 8, 2.
- [20] L. Limin, *China Energy News*, 15.04.2024, 13.
- [21] G. Cheng, S. Yang, X. Wang, Z. Guo, M. Cai, *J. Eng. Res.* 2023, **11**, 13, doi: 10.1016/j.jer.2023.100070.
- [22] J. Wang, C. Wang, Y. Ji, R. Qie, D. Wang, G. Liu, *Materials* 2024, **17**, 3565, doi: 10.3390/ma17143565.
- [23] P. Li, X. Wang, W. Chen, T. Yang, X. Bian, X. Xu, *Sustainability* 2024, **16**, 2343, doi: 10.3390/su16062343.