

Reusing and recycling of composite wind turbine blades.

A review of current practices and prospects. Part 2^{**}. Industrial activities

Ponowne wykorzystanie i recykling kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Przegląd obecnych praktyk i perspektywy. Część II^{**}. Działalność przemysłowa

DOI: 10.15199/62.2024.2.3

Przegląd 33 źródeł odnoszących się do projektów obecnie realizowanych oraz planowanych przez duże konsorcja, dotyczących odzysku materiałów kompozytowych do ich ponownego wykorzystania.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, łopaty turbin wiatrowych, globalne projekty dotyczące recyklingu, potencjalne trendy rozwojowe, praktyczny odzysk i ponowne wykorzystanie, włókna węglowe z recyklingu

A review, with 33 refs., of projects currently implemented and planned by large consortia in the area of recovering variety of composite materials for their reuse.

Keywords: polymer composites, wind turbine blades, global recycling projects, potential development trends, practical recovery and reuse, recycled carbon fibers

Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na energię elektryczną, w ostatnich latach wzrósł udział energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych. W porównaniu z tradycyjnymi źródłami energii, takimi jak paliwa kopalniane, energia odnawialna jest korzystniejszym wyborem na przyszłość ze względu na mniejszą emisję CO₂ oraz mniejszy wpływ na środowisko. Ponadto ograniczenia nałożone przez Unię Europejską (UE) i Komisję Europejską (KE), w tym długoterminowa strategia dekarbonizacji¹⁾ dodatkowo zachęcają do inwestowania w energię odnawialną. Według Europejskiego Stowarzyszenia Przemysłu Kompozytowego (EuCIA) w UE w 2018 r. energia wiatrowa dostarczyła 14% energii elektrycznej, a w 2019 r. 15%. Celem UE jest zwiększenie tej wartości do 32% do 2030 r. i 50% do 2050 r.¹⁾ Ponadto od 2010 r. ceny turbin wiatrowych zmniejszyły się nawet o 60%, a Międzynarodowa Agencja Energii Odnawialnej (IRENA) przewiduje dalsze potencjalne oszczędności w kosztach wytwarzania energii elektrycznej w wysokości 25% w przypadku elektrowni lądowych i 50% w przypadku elektrowni morskich²⁾. Co więcej, wg brytyjskiego Narodowego Centrum Kompozytów NCC (U.K.'s National Composites Centre) energia wiatrowa jest jednym z najszybciej rozwijających się źródeł energii odnawialnej³⁾. Na przykład, tylko

As the global demand for electric energy is increasing, the percentage of energy generated from renewable sources has grown in recent years. Compared to traditional energy sources like fossil fuels, renewable energy is a better choice for the future due to lower CO₂ emissions and environmental impact. Moreover, the restrictions imposed by European Union (EU) and European Commission (EC) including long-term decarbonisation strategy¹⁾ additionally stimulate investments in renewable energy. According to European Composites Industry Association (EuCIA) in the EU in 2018, wind energy supplied 14% of the electricity, which increased to 15% in 2019. The EU's target is to increase this value to 32% by 2030 and 50% by 2050¹⁾. Additionally, the wind turbine prices have fallen by up to 60% since 2010 and the International Renewable Energy Agency (IRENA) predicts further potential savings in electricity generation costs of 25% from onshore plants and 50% from offshore plants²⁾. Furthermore, according to the U.K.'s National Composites Centre (NCC), wind energy is one of the fastest-growing sources of renewable energy³⁾. For example, only in Germany 30 000 wind turbines with a capacity of 60 GW were installed²⁾ and global wind farm capacity reached 652 GW at the end of 2019⁴⁾. Furthermore, the UK plans to increase offshore wind capacity from 14 GW to 40 GW by 2030⁵⁾. With the increasing need for electricity and the development of the wind turbine industry, wind turbines' size and energy

^{**} Part 1/Cz. 1 Przem. Chem. 2024, 103, No. 2, s 225

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, al. Piastów 19, Szczecin 70-310, Polska; tel.: +48-091-449-4411, e-mail: andrzej.bledzki@zut.edu.pl

w Niemczech jest zainstalowanych 30 tys. turbin wiatrowych o mocy 60 GW²), a globalna moc farm wiatrowych osiągnęła 652 GW na koniec 2019 r.⁴). Ponadto Wielka Brytania planuje zwiększenie mocy morskich elektrowni wiatrowych z 14 GW do 40 GW do 2030 r.⁵). Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na energię elektryczną oraz rozwojem branży turbin wiatrowych zwiększyły się rozmiary oraz generowana moc turbin. Obecnie Siemens Gamesa (Hamburg, Niemcy) oferuje turbiny wiatrowe o średnicy wirnika 129–170 m dla turbin lądowych oraz 167–236 m dla turbin morskich⁶). Na początku 2023 r. firma Ming Yang Smart Energy (Guangdong, Chiny) przedstawiła nowy model turbiny wiatrowej o średnicy wirnika 280 m, który może generować 80 GWh energii elektrycznej rocznie⁷). Według prognoz ekspertów z Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnej USA (NREL) do 2035 r. średnia średnica wirnika osiągnie 174 i 250 m dla odpowiednio lądowych i morskich turbin wiatrowych⁸).

Wskazuje to, że wraz ze wzrostem rozmiaru turbin wiatrowych w przyszłości wzrosnie również ilość generowanych odpadów. Po okresie eksploatacji wynoszącym 20–25 lat pierwsza generacja turbin wiatrowych zaczęła zbliżać się do końca okresu eksploatacji⁹), co zgodnie z dostępnymi informacjami wygeneruje 2,5 mln t odpadów z infrastruktury przemysłu wiatrowego, głównie odpadów betonowych, metalowych i kompozytowych. Prognozy wskazują, że ilość ta wzrosnie do prawie 5 mln t w 2030 r.¹⁰). Wind Europe (Bruksela, Belgia) szacuje ponadto, że do 2023 r. w Europie zostanie wycofanych z eksploatacji 14 tys. łopatek turbin wiatrowych, co odpowiada 40–60 tys. t materiałów kompozytowych. Dodatkowo, Globalna Rada Energetyki Wiatrowej (GWEC) szacuje, że po 2035 r. trzeba będzie poddać recyklingowi na całym świecie ok. 225 tys. t^{9,11}).

EuCIA szacuje, że w 2025 r. przemysł turbin wiatrowych przyczyni się do powstania 66 tys. t odpadów z kompozytów termoutwardzalnych¹), a wyniki badań przeprowadzonych na Uniwersytecie Strathclyde w Glasgow wskazują na globalny wzrost ilości odpadów z łopatek turbin wiatrowych z ok. 400 tys. t w 2030 r. do ok. 2 mln t w 2050 r.¹²). Tak ogromna ilość wytwarzanych odpadów kompozytowych powinna zostać poddana recyklingowi, zwłaszcza po wprowadzeniu ograniczeń nałożonych przez dyrektywy UE dotyczących składowania¹³) oraz spalania¹⁴) odpadów. Obecnie najbardziej powszechną technologią recyklingu odpadów kompozytowych wytwarzanych przez przemysł wiatrowy jest współprzetwarzanie przy produkcji cementu (*cement co-processing*). Inne technologie recyklingu, takie jak piroliza, solwoliza lub recykling mechaniczny, nie są dostępne na skalę przemysłową lub nie są konkurencyjne ekonomicznie^{2,9}). Ostatnio duże firmy utworzyły wiele konsorcjów mających na celu opracowanie rozwiązań dla turbin wiatrowych po okresie eksploatacji EOL (*end-of-life*).

Przegląd projektów obecnie realizowanych i planowanych przez duże konsorcja

GE Renewable Energy (Paryż, Francja) podpisało wieloletnią umowę z Veolia North America (VNA, Boston, Mass., USA) na recykling łopatek turbin pochodzących z modernizacji lądowych

output have increased. Currently, Siemens Gamesa (Hamburg, Germany) offers wind turbines with a rotor diameter range from 129 m to 170 m and 167 m to 236 m for onshore and offshore wind turbines, respectively⁶. At the beginning of 2023, Ming Yang Smart Energy (Guangdong, China) announced a new wind turbine model featuring a rotor diameter of 280 m, which can generate 80 GWh of electricity per year⁷. According to the forecast of experts from U.S.'s National Renewable Energy Laboratory (NREL) the average rotor diameter will reach 174 m and 250 m by 2035 for onshore and offshore wind turbines, respectively⁸.

This indicates that as the size of wind turbines will increase in future, the amount of generated wastes will increase as well. With a service time of 20–25 years, the first generation of wind turbines started to come to the end of operational life⁹), which according to available information, generated 2.5 Mt of waste from the wind industry infrastructure, mainly concrete, metal and composite waste. The predictions show that this amount will increase to almost 5 Mt in 2030¹⁰. Moreover, Wind Europe (Brussels, Belgium) estimate that 14 000 wind turbine blades will be decommissioned in Europe by 2023, equivalent to 40–60 kt of composite materials. In addition, the Global Wind Energy Council (GWEC) estimates that after 2035, approximately 225 kt will need to be recycled globally^{9, 11}.

The EuCIA estimates that the wind turbine industry will contribute 66 kt of thermoset composite waste in 2025¹), and a finding from the University of Strathclyde indicates a global increase of wind turbine blade waste from around 400 kt per annum in 2030 to around 2 Mt by 2050¹²). Such a vast amount of generated composite waste needs to be recycled, especially after the restrictions imposed by EU directives on landfill waste¹³) and waste incineration¹⁴). Currently, the most common technology for recycling composite waste generated by the wind industry is through cement co-processing. Other recycling technologies, such as pyrolysis, solvolysis or mechanical recycling, are not available on an industrial scale or are not economically competitive^{2, 9}). Huge companies recently created many consortia to develop new end-of-life (EOL) solutions for wind turbines.

A review of projects currently implemented and planned by large consortia

GE Renewable Energy (Paris, France) signed a multi-year agreement with Veolia North America (VNA, Boston, Mass., U.S.) for recycling wind turbine blades removed from U.S.-based onshore wind turbines during repowering efforts. Shredded blades will be used in cement kiln co-processing to replace coal, sand and clay at cement manufacturing facilities. On average, up to

wych turbin wiatrowych w USA. Rozdrobnione łopaty zostaną wykorzystane do współprzetwarzania w piecu cementowym w celu zastąpienia węgla, piasku i gliny w zakładach produkcji cementu. Średnio do 90% mas. materiału łopat zostanie ponownie wykorzystane. W stosunku do tradycyjnej produkcji cementu, recykling łopat umożliwia zmniejszenie emisji CO₂ o 27% netto i zmniejszenie zużycia wody o 13% netto¹⁵.

Firma LM Wind Power (Kolding, Dania), należąca do GE Renewable Energy, zadeklarowała, że do 2030 r. będzie produkować łopaty o zerowej ilości odpadów w celu zmniejszenia śladu węglowego. Firma planuje wspierać swoich klientów w opracowywaniu turbin wiatrowych w obiegu zamkniętym, co spowoduje zmniejszenie odpadów generowanych podczas procesu produkcji. LM Wind Power planuje osiągnąć bezodpadową produkcję turbin wiatrowych poprzez odzyskanie energii z odpadów poprodukcyjnych oraz opakowań przed odesłaniem ich na wysypisko śmieci lub do spalarni. Według firmy kluczem do ograniczenia śladu węglowego w branży turbin wiatrowych jest optymalizacja łańcucha dostaw, który obecnie odpowiada za 75% emisji CO₂ dla całego procesu¹⁶.

Aker Offshore Wind (Lysaker, Norwegia), Aker Horizons (Norwegia) oraz Uniwersytet Strathclyde (Szkocja) podpisały protokół uzgodnień w celu opracowania procesu recyklingu produktów z włókna szklanego. Członkowie porozumienia skupią się na zwiększeniu skali i komercjalizacji opracowanego przez Uniwersytet Strathclyde procesu odzyskiwania włókien z polimerów termoutwardzalnych wzmocnionych włóknem szklanym. Szacuje się, że ten innowacyjny proces może zaspokoić 50% globalnego zapotrzebowania na włókna szklane, jeśli zostanie wdrożony na skalę światową¹².

Fairmat (Paryż), firma branży *deeptech* założona w 2020 r. w celu zrewolucjonizowania recyklingu włókna węglowego, podpisała nową długoterminową umowę z Dassault Aviation (Paryż) na zbiórkę i recykling odpadów produkcyjnych z kompozytów węglowych. Fairmat rok po rozpoczęciu działalności zamierza poddać recyklingowi 30% przemysłowych odpadów z włókna węglowego w Europie. Według doniesień, proces mechanicznego recyklingu opracowany przez firmę umożliwia recykling odpadów produkcyjnych i przemysłowych przy jednoczesnym zachowaniu wysokich właściwości mechanicznych¹⁷.

Iberdrola (Bilbao, Hiszpania) i FCC Ámbito (Madryt, Hiszpania) uruchomiły projekt EnergyLOOP w ramach programu PERSEO Venture Builder. Inicjatywa ta ma na celu odzyskanie komponentów łopat turbin wiatrowych i ich ponowne wykorzystanie w sektorach: energetycznym, lotniczym, motoryzacyjnym, tekstylnym, chemicznym i budowlanym, co ma doprowadzić do transformacji energetycznej i pobudzenia gospodarki o obiegu zamkniętym w Hiszpanii. Szacuje się, że do 2030 r. w Europie demontowanych będzie ok. 5700 turbin wiatrowych rocznie. Partnerzy planują utworzenie zakładu recyklingu łopat w pobliżu farm wiatrowych w południowej Nawarze oraz w innych regionach kraju. Ponadto inicjatywa jest wspierana przez Siemens Gamesa (Zamudio, Hiszpania)¹⁸.

EuCIA (Bruksela, Belgia) organizuje Europejskie badania rynku odpadów i recyklingu kompozytów (European

90 wt.% of the blade material will be reused. Unlike traditional cement manufacturing, blade recycling enables a 27% net reduction in CO₂ emissions from cement production and a 13% net reduced water consumption¹⁵.

LM Wind Power (Kolding, Denmark), a GE Renewable Energy business, announced its pledge to produce zero waste blades by 2030 in order to reduce the carbon footprint of the company's products. The company plans to support customers in developing fully circular wind turbines, resulting in generating less waste during the production process. LM Wind Power wants to achieve zero waste blades by not sending manufacturing materials and packaging to landfill and incineration without energy recovery. The company states that the key to reducing its carbon footprint lies in the supply chain of the wind turbine industry since around 75% of CO₂ emissions occur in the supply chain¹⁶.

Aker Offshore Wind (Lysaker, Norway), Aker Horizons (Norway) and the University of Strathclyde (Scotland) signed a memorandum of understanding to develop a recovery process for glass fiber products. Members will focus on scaling up and commercializing the laboratory scale process developed by the University of Strathclyde of recovery fibers from glass fiber-reinforced polymers with thermoset matrixes. It is said that this innovative process could serve 50% of global glass fiber demand when implemented worldwide¹².

Fairmat company (Paris, France), the deeptech company founded in 2020 to revolutionize the recycling of carbon fiber, has signed a new long-term contract with Dassault Aviation (Paris) for the collection and recycling of carbon fiber composite production offcuts. Fairmat intends to recycle 30% of industry's carbon fiber waste in Europe one year after inception. Fairmat's mechanical recycling process is reported to enable the production offcuts and industrial waste to be recycled while retaining high mechanical properties¹⁷.

Iberdrola (Bilbao, Spain) and FCC Ámbito (Madrid, Spain) launched the EnergyLOOP project through its PERSEO Venture Builder program. This initiative aims to recover wind turbine blade components and reuse in energy, aerospace, automotive, textiles, chemicals and construction sectors, resulting in an energy transition and boost in the circular economy in Spain. It is estimated that by 2030, around 5700 wind turbines will be dismantled per year in Europe. Partners plan to set up a blade recycling plant in southern Navarre, within proximity to wind farms in the country and other regions. Moreover, the initiative is supported by Siemens Gamesa (Zamudio, Spain)¹⁸.

The European Composites Industry Association (EuCIA, Brussels, Belgium) is organizing the European Composites Waste & Recycling Market Survey in order to promote the building of a composites recycling infrastructure in Europe. This survey will help us to control

Composites Waste & Recycling Market Survey) w celu promowania budowy infrastruktury zajmującej się recyklingiem kompozytów w Europie. Badania mają pomóc rozpoznać obecny brak wiarygodnych danych na temat wykorzystania kompozytów po okresie eksploatacji oraz praktyk zarządzania odpadami w całej Europie. Potrzebne są nowe rozwiązania w zakresie recyklingu, ponieważ rosnąca liczba wyrobów kompozytowych zbliża się do końca okresu użytkowania, a EuCIA szacuje, że całkowita ilość odpadów z kompozytów termoutwardzalnych w Europie sięga obecnie ok. 400 tys. t rocznie¹⁹.

EuCIA ogłosiła swój udział w projekcie REFRESH (*Smart dismantling, sorting and recycling of glass fiber reinforced composite from the wind power sector through holistic approach*). Głównym celem tego 48-miesięcznego projektu finansowanego przez UE jest opracowanie nowatorskiego, cyrkularnego, inteligentnego systemu usprawniającego recykling kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknem szklanym. Po wycofaniu łopaty turbiny wiatrowej z eksploatacji system ten będzie wysyłać informacje o jej stanie. Następnie, zgodnie z zapotrzebowaniem rynku, zostanie wybrany optymalny proces recyklingu. EuCIA będzie współpracować z Rina Consulting SpA (Włochy), Acciona Construcción SA (Hiszpania), CETMA (Włochy), CIRCE (Research Center for Energy Resources and Consumption, Hiszpania), GEES Recycling (Włochy), Tecnalia (Hiszpania), Enocolab Srl (Włochy), MTB Manufacturing (Francja), Gjenkraft AS (Norwegia) i STD (Francja)²⁰.

Projekt EoLO-HUB to konsorcjum 18 partnerów: ECHT Regie in Transitie B.V. (Niderlandy), Nordex Energy GmbH (Niemcy), Moses Productos SL (Hiszpania), Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH (Niemcy), Teruel Airport (Hiszpania), Advantis APS (Dania), Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung E.V. (Niemcy), Jansen Recycling Group B.V. (Niderlandy), Mondragon Goi Eskola Politeknikoa Jose Maria Arizmendiarieta S Coop (MGEP, Hiszpania), Saint-Gobain Placo Iberica SA (Hiszpania), Global Equity & Corporate Consulting SL (Hiszpania), TNO Netherlands Organisation for Applied Scientific Research i jej centrum innowacji Brightlands Materials Center (Niderlandy), Centro Ricerche Fiat SCPA (Włochy), Polymeris (Francja), National Composites Centre (NCC, Wielka Brytania), University of Leeds (Wielka Brytania) oraz The Manufacturing Technology Centre Ltd. (MTC, Wielka Brytania). Projekt będzie realizowany przez ponad 48 miesięcy. Jego celem jest opracowanie nowatorskiego rozwiązania do odzyskiwania wysokiej jakości materiałów kompozytowych z łopat turbin wiatrowych. Wyróżnić można trzy fazy projektu: (i) opracowanie innowacyjnego procesu demontażu łopat turbin wiatrowych, (ii) opracowanie niskoemisyjnej pirolizy i ekologicznej solwolizy chemicznej i (iii) poprawa właściwości odzyskanych włókien w celu ich wykorzystania w sektorze motoryzacyjnym, budowlanym oraz odnawialnych źródeł energii²¹.

Nowe konsorcjum składające się z TPI Composites Inc. (Scottsdale, Ariz., USA), Tex-Tech (Kernersville, N.C., USA) oraz Carbon Rivers (Knoxville, Tenn., USA) planuje recykling łopat turbin wiatrowych. Łopaty po okresie eksploatacji

the current lack of reliable data on end-of-use composites and waste management practices across Europe. New recycling solutions are needed as a growing number of composite components near the end of their service life and EuCIA estimates the total volume of thermoset composites waste in Europe that is currently around 400 kt/year as yet¹⁹.

EuCIA announces its participation in REFRESH (Smart dismantling, sorting and Recycling of glass Fiber Reinforced composite from the wind power Sector through Holistic approach). The main objective of this 48-month EU-funded project is to develop a novel circular, intelligent system to improve the recycling of GFRP. After decommissioning, the dedicated track tool will send information about the wind turbine blade condition. Afterwards, the most optimal recycling process will be selected according to the market demand. EuCIA will collaborate with Rina Consulting SpA (Italy), Acciona Construcción SA (Spain), CETMA (Italy), CIRCE (Research Center for Energy Resources and Consumption, Spain), GEES Recycling (Italy), Tecnalia (Spain), Enocolab Srl (Italy); MTB Manufacturing (France), Gjenkraft AS (Norway), and STD (France)²⁰.

The EoLO-HUB project with a consortium of 18 partners: ECHT Regie in Transitie B.V. (Netherlands), Nordex Energy GmbH (Germany), Moses Productos SL (Spain), Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH (Germany), Teruel Airport (Spain), Advantis APS (Denmark), Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung E.V. (Fraunhofer Society, Germany), Jansen Recycling Group B.V. (Netherlands), Mondragon Goi Eskola Politeknikoa Jose Maria Arizmendiarieta S Coop (MGEP, Spain), Saint-Gobain Placo Iberica SA (Spain), Global Equity & Corporate Consulting SL (Spain), TNO Netherlands Organisation for Applied Scientific Research and its joint innovation centre Brightlands Materials Center (Netherlands), Centro Ricerche Fiat SCPA (Italy), Polymeris (France), National Composites Centre (NCC, U.K.), University of Leeds (U.K.) and The Manufacturing Technology Centre Ltd. (MTC, U.K.). The project will be carried out for over 48 months. The project aims to develop a novel solution to recover high-value composite materials from wind turbine blades. Three phases can be differentiated: first – the development of the innovative process of dismantling wind turbine blades; second – the development of low-carbon pyrolysis and green chemical solvolysis; third – the improvement of recovered fiber properties to utilize them in automotive, construction and wind sector²¹.

A new consortium consisting of TPI Composites Inc. (Scottsdale, Ariz., U.S.), Tex-Tech (Kernersville, N.C., U.S.) and Carbon Rivers (Knoxville, Tenn., U.S.) was formed. Consortium partners want to process EOL wind blades, pyrolyze them and process the recovered glass fiber into liners for cured-in-place pipe (CIPP). CIPP is

będą wstępnie przetwarzane, następnie poddawane procesowi pirolizy, a odzyskane w procesie włókno szklane będzie wykorzystane do produkcji rękawów renowacyjnych stosowanych w technologii CIPP (*cured-in-place pipe*). Technika ta pozwala na regenerację uszkodzonych rurociągów poprzez istniejące sieci wodociągowe i kanalizacyjne, bez konieczności rozkopywania ulic. Dzięki temu partnerzy konsorcjum przyczynią się do rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym. Co więcej, konstrukcja rękawów renowacyjnych znacznie zwiększa właściwości użytkowe instalacji wodociągowej, co obniża koszty i wydłuża czas eksploatacji instalacji²²).

Firmy RWE (Essen, Niemcy) oraz Siemens Gamesa połączyły działania w projekcie farmy wiatrowej Kaskasi u wybrzeży Niemiec. Firmy umieściły 38 nadających się do recyklingu turbin wiatrowych generujących 342 MW energii, które zostały dostarczone w ciągu 10 miesięcy. Jak twierdzi Siemens Gamesa, nowatorska technologia Recyclable Blade umożliwia całkowity odzysk komponentów łopaty pod koniec okresu eksploatacji produktu. Oddzielenie m.in. żywicy, włókna szklanego i drewna odbywa się przy wykorzystaniu łagodnego roztworu kwasu²³). Współpraca obu firm była kontynuowana w ramach priorytetowego projektu przybrzeżnego w Wielkiej Brytanii, obejmującego morską farmę wiatrową Sofia na ławicy Dogger Bank w środkowej części Morza Północnego, 195 km od północno-wschodniego wybrzeża Wielkiej Brytanii. W ramach tego projektu Siemens Gamesa wdroży 132 łopaty nadające się do recyklingu w morskim projekcie wiatrowym o mocy 1,4 GW. Nowe rodzaje żywicy zastosowane w łopatach można skutecznie oddzielić od pozostałych elementów. Ponadto Siemens Gamesa twierdzi, że odzyskane materiały mogą być ponownie wykorzystane w przemyśle motoryzacyjnym lub towarów konsumpcyjnych, takich jak walizki. Zgodnie z umową, 50% turbin wiatrowych będzie produkowanych w Wielkiej Brytanii. Instalacja rozpoczęła się w 2023 r. i ma się zakończyć do końca 2026 r.²⁴).

Firma Vestas-American Wind Technology (Portland, Ore., USA) ogłosiła ostatnio realizację zamówienia na turbiny wiatrowe o łącznej mocy 158 MW na zasilenie trzech nieujawnionych projektów w USA. Zamówienie obejmuje 72 turbiny V120-2,2 MW, w tym dostawę i uruchomienie turbin, a także 10-letnie aktywne zarządzanie mocą. Celem firmy Vestas jest produkcja łopat w pełni nadających się do recyklingu do 2030 r. i produkcja turbin bezodpadowych do 2040 r. Obecnie turbiny wiatrowe produkowane przez firmę są zdadne do recyklingu średnio w 85%²⁵).

Swancor (Nantou, Tajwan) i Siemens Gamesa ogłosiły strategiczną współpracę w zakresie opracowania łopat turbin wiatrowych z możliwością recyklingu. Partnerzy chcą wykorzystać termoutwardzalną, podlegającą recyklingowi żywicę epoksydową EzCiclo firmy Swancor. Głównym celem współpracy jest dostarczanie klientom przyjaznych dla środowiska produktów i rozwiązań w celu osiągnięcia ekologicznej gospodarki o obiegu zamkniętym i neutralności węglowej. Opracowany proces recyklingu turbin wiatrowych nie generuje odpadów w postaci rozpuszczalników i gazów oraz ma niski ślad węglowy²⁶).

a technique that enables the recovery of damaged pipelines through existing water mains and waste and without excavation of streets. Thanks to that, partners contribute to a circular economy. Moreover, liner design significantly increases the installation properties, resulting in lower costs and improved long-term performance²²).

Renewable energy company RWE (Essen, Germany), which partners with Siemens Gamesa (Zamudio, Spain), joined forces in Kaskasi offshore wind power project in Germany. Companies placed 38 recyclable wind turbines generating 342 MW of energy, which were delivered in 10 months. The novel Recyclable Blade technology enables total reclaim of the blade's components at the end of the product's lifespan, Siemens Gamesa says. Separating the resin, fiber glass and wood, among others, is achieved using a mild acid solution²³). The two companies' partnership continued in U.K. flagship offshore project – Sofia. The Sofia offshore wind farm is located on Dogger Bank in the central North Sea, 195 km off the North East coast of the U.K. In this project, Siemens Gamesa will deploy 132 recyclable blades at the 1.4 GW offshore wind project. Blades with new resin types can be efficiently separated from other elements. Moreover, Siemens Gamesa claims that recovered materials can be reused in casting applications for the automotive industry or consumer goods like suitcases. According to the agreement, 50% of wind turbines will be produced in the U.K. The installation is expected to begin in 2023 and finish by the end of 2026²⁴).

Vestas-American Wind Technology (Portland, Ore., U.S.) has announced lately a 158-megawatt (MW) order to repower three undisclosed projects in the US. The order consists of 72 V120-2.2 MW turbines for the three projects. This particular order includes supply, delivery and commissioning of the turbines, as well as a 10-year active output management. Vestas has a goal of producing fully recyclable blades by 2030 and producing zero-waste turbines by 2040. Today, Vestas wind turbines are, on average, 85% recyclable²⁵).

Swancor (Nantou, Taiwan) and Siemens Gamesa (Zamudio, Spain) have announced a strategic collaboration on recyclable wind turbine blades. Partners want to use Swancor's recyclable thermosetting epoxy resin EzCiclo. The main aim of the cooperation is to supply customers with environmentally friendly products and solutions to achieve a green circular economy and hit carbon neutrality. The developed wind turbine recycling process does not produce waste solvents and gas and has a low-carbon footprint²⁶).

Researchers at the U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory (NREL, Golden, Colo., U.S.), in partnership with Arkema Inc. (King of Prussia, Pa., U.S.) are trying to develop recyclable wind turbine blade with thermoplastic acrylic resin Elium. Compared to conventional blades manufactured

Naukowcy z Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnej Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych (NREL, Golden, Colo., USA) we współpracy z Arkema Inc. (King of Prussia, Pa., USA) podjęli próbę opracowania łopat turbin wiatrowych podlegających recyklingowi z termoplastycznej żywicy akrylowej Elium. W porównaniu z konwencjonalnymi łopatami produkowanymi z żywicy epoksydowej, żywica termoplastyczna umożliwia produkcję dłuższych oraz lżejszych łopat przy niższych kosztach. Ponadto NREL opracowuje model techniczno-ekonomiczny w celu zbadania korzyści płynących z zastosowania żywicy termoplastycznej do produkcji łopat. Firma Arkema i Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation (IACMI, Knoxville, Tenn., USA) wykazały również zalety stosowania osnowy termoplastycznej, takie jak możliwość wytwarzania łopat na miejscu montażu turbiny²⁷⁾.

Odzyskiwanie materiałów w celu ich ponownego wykorzystania

Obecnie do produkcji turbin wiatrowych powszechnie wykorzystuje się żywice termoutwardzalne. Istnieje wiele metod odzyskiwania włókien węglowych i szklanych z odpadów łopat turbin wiatrowych. Obejmują one recykling mechaniczny, termiczny i chemiczny. Metody mechaniczne to np. mielenie lub rozdrabnianie kompozytów. W wyniku tego procesu uzyskuje się recyklat składający się z włókien i żywicy. Recyklat w takiej formie może być stosowany jako wypełniacz. Główną wadą recyklingu mechanicznego jest pogorszenie właściwości mechanicznych recyklatu z powodu zmniejszonej długości włókien. Ponadto wykorzystywane urządzenia muszą być wyposażone w odpowiednie filtry, aby uniknąć zanieczyszczenia pyłem^{28, 29)}. Solwoliza to metoda recyklingu chemicznego, w której odpady kompozytowe są poddawane działaniu rozpuszczalników, takich jak woda, alkohol lub kwasy, w celu zerwania wiązań osnowy w określonej temperaturze i ciśnieniu. Proces ten wymaga niższych temperatur niż recykling termiczny, co skutkuje mniejszą degradacją włókien poddanych recyklingowi. Mimo wielu zalet, proces solwolizy wymaga wysokich nakładów inwestycyjnych i bieżących kosztów. Z tego powodu nie jest to metoda konkurencyjna ekonomicznie¹⁾.

Jedną z metod recyklingu termicznego o dużym potencjale jest piroliza. Proces ten pozwala na odzysk włókien i osnowy polimerowej w postaci produktów węglowodorowych poprzez rozkład żywicy. Jednakże proces ten jest uciążliwy dla środowiska ze względu na emisję gazów. Kolejną wadą pirolizy są wysokie temperatury, które uszkadzają powierzchnię włókien, powodując obniżenie właściwości mechanicznych. Efekt ten można zminimalizować poprzez optymalizację parametrów procesu dla każdej osnowy^{1, 28)}. Alternatywą dla tradycyjnej pirolizy może być piroliza mikrofalowa. W tej metodzie proces ogrzewania jest przeprowadzany za pomocą promieniowania mikrofalowego. Jako stosunkowo nowa metoda, nie została ona jeszcze szczegółowo zbadana pod kątem materiałów kompozytowych. Główną zaletą pirolizy mikrofalowej jest to, że proces jest przeprowadzany w niższej temperaturze niż piroliza

with epoxy resin, the thermoplastic resin enable longer, lighter-weight and lower-cost blade manufacturing. Additionally NREL is developing a techno-economic model to explore benefits of using thermoplastic resin in blades. Moreover Arkema and Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation (IACMI, Knoxville, Tenn., U.S.) demonstrated advantages of using thermoplastic matrix, such as possibility to build blades on site²⁷⁾.

Recovery of different materials for their reuse

Today for wind turbine production, thermoset resins are frequently used. Multiple methods can be applied to recover carbon and glass fibers from wind turbine blade waste. This includes mechanical, thermal and chemical recycling. Mechanical methods include, e.g. grinding or shredding of composites. Through this process, a recyclate consisting of fibers and resin is obtained. Recyclate in such a form can be used as a filler in virgin materials. The main disadvantage of mechanical recycling is the decreased mechanical properties of recyclate due to reduced fiber length. Moreover, facilities must be equipped with appropriate filters to avoid dust pollution^{28, 29)}. Solvolysis is a method of chemical recycling, where composite waste is treated with solvents, such as water, alcohol or acids, to break the matrix bonds at specific temperature and pressure. This process requires lower temperatures than thermal recycling, resulting in lower degradation of recycled fibers. Although it has many advantages, the solvolysis process requires high investment and running costs. Thus it is not an economically competitive method¹⁾.

One of the methods of thermal recycling with high potential is pyrolysis. The process allows the recovery of fibers and polymer matrix in the form of hydrocarbon products through resin decomposition. Thus, the process is not environmentally friendly due to gas emissions. Another disadvantage of pyrolysis is high temperatures, which damage the surface of recycled fibers, resulting in decreased mechanical properties. This effect can be minimized by optimizing parameters for each matrix^{1, 28)}. An alternative to traditional pyrolysis can be microwave pyrolysis. In this method the heating process is implemented through microwave radiation. As a relatively new method, it has yet to be studied in detail for composite materials. The main advantage of microwave pyrolysis is that the process is carried out at a lower temperature than the traditional method and promising results were obtained for carbon and glass fiber-reinforced composites²⁸⁾. Moreover, The Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO, The Hague, Netherlands), in collaboration with Brightlands Materials Center (Geleen, Netherlands), are developing

tradycyjna, a obiecujące wyniki uzyskano dla kompozytów wzmocnionych włóknem węglowym i szklanym²⁸). Ponadto, Holenderska Organizacja Zastosowań Nauki (TNO, Haga, Niderlandy), we współpracy z Brightlands Materials Center (Geleen, Niderlandy), opracowuje proces termomechaniczny obejmujący pirolizę niskotemperaturową. Po recyklingu włókna są wykorzystywane do produkcji kompozytów z osnową termoplastyczną. W ten sposób dalszy recykling takich produktów ma być prostszy i bardziej przyjazny dla środowiska³⁰).

Ponieważ tradycyjne metody recyklingu są ograniczone, wiele firm i naukowców koncentruje się na opracowywaniu nowych rozwiązań i strategii wykorzystania odpadów z turbin wiatrowych, takich jak zastąpienie żywicy termoutwardzalnej tworzywami termoplastycznymi lub biopochodnymi wariantami materiałów czy opracowanie nowych metod recyklingu³¹). Na przykład, na Uniwersytecie Tennessee (Knoxville, TN, USA) opracowuje się recykling łopat turbin wiatrowych na dużą skalę w celu odzyskania włókna szklanego, przy jednoczesnym ograniczeniu mechanicznej degradacji włókien. Dzięki temu włókna z recyklingu mogą być ponownie wykorzystane w nowych zastosowaniach kompozytowych, np. w pojazdach w celu obniżenia ich masy³²). Firma REGEN Fibers (Cedar Rapids, IA, USA) opracowała przyjazny dla środowiska proces recyklingu łopat turbin wiatrowych. Produkty uzyskiwane tą metodą to włókna wzmacniające do zastosowań w betonie i zaprawach lub mikrowłókna jako dodatki do różnych zastosowań w materiałach kompozytowych, betonowych czy do stabilizacji gleby. Firma przewiduje recykling ponad 30 tys. t turbin wiatrowych rocznie³³).

a thermomechanical process involving low-temperature pyrolysis. After recycling, fibers are used to manufacture composites with thermoplastic matrixes. Thus, further recycling of such products will be more straightforward and environmentally friendly³⁰).

As the traditional recycling methods are limited, many companies and researchers focused on developing new solutions and strategies to utilize wind turbine waste, such as replacing thermoset resin with thermoplastics or bio-based versions of materials or developing new recycling methods³¹). For example, University of Tennessee (Knoxville, TN, U.S.) is developing large-scale recycling of wind turbine blades for glass fiber recovery, while limiting mechanical degradation of fibers. Thanks to that, recycled fibers can be reused in new composite applications such as vehicle lightweighting³²). REGEN Fibers (Cedar Rapids, IA, United States) developed an eco-friendly recycling process of wind turbine blades. The products obtained through this method are reinforcement fibers for concrete and mortar applications or microfibers and additives for use in various composite, concrete and soil stabilization applications. The company forecasts the recycling of more than 30 kt of wind turbines annually³³).

Received/Otrzymano: 18-12-2023

REFERENCES/LITERATURA

- [1] <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/accelerating-wind-turbine-blade-circularity>, access 20.03.2023.
- [2] M. Henningsen, H. Ruckdäschel, *Chem. unserer Zeit* 2021, **55**, No. 6, 406; doi: 10.1002/ciuz.202100012.
- [3] <https://www.compositesworld.com/news/uk-launches-initiative-for-recyclable-wind-turbine-blade-technologies>, access 20.03.2023.
- [4] <https://www.compositesworld.com/articles/defining-the-landscape-for-wind-blades-at-the-end-of-service-life>, access 20.03.2023.
- [5] <https://www.compositesworld.com/news/orsted-to-recover-reuse-or-recycle-wind-turbine-blades>, access 20.03.2023.
- [6] <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services>, access 20.03.2023.
- [7] <https://www.compositesworld.com/news/mingyang-reveals-18-mw-off-shore-wind-turbine-model-with-140-meter-long-blades>, access 20.03.2023.
- [8] https://www.compositesworld.com/news/experts-forecast-taller-more-economical-wind-plant-designs-in-the-future?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+5%2F27%2F2022, access 20.03.2023.
- [9] <https://www.compositesworld.com/news/wind-energy-leaders-present-recommendations-for-recycling-wind-turbine-blades>, access 20.03.2023.
- [10] Emerging waste streams: Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective, Briefing no. 07/2021; doi: 10.2800/927429.
- [11] T. Siwowski, M. Rajchel, M. Kulpa, A. Adamcio, *Materiały Budowlane* 2021, **9**, 48.
- [12] <https://www.compositesworld.com/news/european-partnership-drive-forward-novel-process-development-for-grp-recyclin>, access 20.03.2023.
- [13] Directive 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 Amending Directive 1999/31/EC on the Landfill of Waste; European Parliament and Council: Brussels, Belgium, 2018.
- [14] Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the Incineration of Waste; European Parliament and Council: Brussels, Belgium, 2000.
- [15] <https://www.compositesworld.com/news/csp-advanced-materials-center-unveils-composite-battery-enclosure-and-material-innovations>, access 20.03.2023.
- [16] <https://www.compositesworld.com/news/lm-wind-power-reports-it-will-produce-zero-waste-blades-by-2030>, access 20.03.2023.
- [17] <https://www.compositesworld.com/news/fairmat-signs-long-term-contract-with-dassault-aviation-for-composite-offcuts>, access 26.07.2023.
- [18] <https://www.compositesworld.com/news/iberdrola-fcc-ambito-launches-energyloop-for-wind-turbine-blade-recycling>, access 20.03.2023.
- [19] <https://www.compositesworld.com/news/eucia-welcomes-industry-to-complete-composites-waste-and-recycling-survey>, access 13.09.2023.
- [20] <https://www.compositesworld.com/news/eucia-participates-in-eu-funded-refresh-wind-blade-recycling-project>, access 20.03.2023.
- [21] <https://www.compositesworld.com/news/european-project-eolo-hubs-targets-wind-turbine-blade-recycling>, access 20.03.2023.
- [22] <https://www.compositesworld.com/news/pilot-program-turns-eol-wind-blades-to-liners-for-pipe-infrastructure>, access 20.03.2023.
- [23] <https://www.compositesworld.com/news/siemens-gamesa-recyclable-blades-installed-at-rwe-offshore-wind-farm>, access 20.03.2023.
- [24] <https://www.compositesworld.com/news/rwe-sofia-offshore-wind-farm-to-use-siemens-recyclableblades>, access 20.03.2023.
- [25] <https://www.compositesworld.com/news/vestas-secures-another-us-repowering-order-looks-ahead-to-wind-blade-recyclability>, access 4.09.2023.
- [26] <https://www.compositesworld.com/news/swancor-siemens-gamesa-collaborate-on-advancing-recyclable-wind-blade-technologies>, access 20.03.2023.
- [27] <https://www.compositesworld.com/news/nrel-arkema-research-recyclable-thermoplastic-composite-wind-turbine-blades>, access 20.03.2023.
- [28] D. Åkesson, Z. Foltynowicz, J. Christ en, M. Skrifvars, *J. Reinf. Plast. Compos.* 2012, **31**, No. 17, 1136; doi: 10.1177/0731684412453512.
- [29] <https://www.compositesworld.com/news/decomblades-consortium-awarded-funding-for-a-cross-sector-wind-turbine-blade-recycling-project>, access 20.03.2023.
- [30] <https://www.compositesworld.com/news/tno-research-offers-circularity-solution-for-discarded-wind-turbine-blades>, access 20.03.2023.
- [31] <https://www.compositesworld.com/news/takeaways-from-international-conference-on-sustainable-wind-turbine-blades-2022>, access 20.03.2023.
- [32] <https://www.compositesworld.com/news/ut-receives-funding-for-wind-turbine-blades-recycling-technology>, access 20.03.2023.
- [33] <https://www.compositesworld.com/news/regen-fiber-launches-eco-friendly-wind-blade-recycling-process>, access 20.03.2023.