

Reusing and recycling of composite wind turbine blades. A review of current practices and prospects. Part 4.** Novel academic research

Ponowne wykorzystanie i recykling kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Przegląd aktualnych praktyk i perspektywy. Część IV**. Nowe badania akademickie



Dokonano przeglądu opublikowanych w ciągu ostatnich 2 lat prac dotyczących nowych żywic do produkcji łopat turbin wiatrowych, metod naprawy łopat i standardów możliwości recyklingu po wycofaniu ich z eksploatacji.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, łopaty turbin wiatrowych, wysokowydajne turbiny wiatrowe, metody naprawy i recyklingu, zarządzanie wycofaniem z eksploatacji, największe turbiny wiatrowe na świecie

A review, with 21 refs., of new resins for manufacturing, repair methods and recycling possibility stds. for established end-of-life management published in last 2 years.

Keywords: polymer composites, wind turbine blades, high-performance wind turbines, repair and recycling methods, end-of-life management, world's largest wind turbines

Rynek elektrowni wiatrowych jest jednym z najszybciej rozwijających się w sektorze energii odnawialnej. Kraje europejskie generują ponad 70% światowej energii z wiatru. Jednak rozwój rynku turbin wiatrowych i budowa nowych farm

The wind turbine (WT) market is one of the fastest growing in the renewable energy sector. The European countries generate more than 70% of the world's energy from wind. However, the growing wind turbine market



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

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

** Part 3/Cz. III Przem. Chem. 2024, 103, No. 2, 241.

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

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



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

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

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

wiatrowych prowadzi do większej ilości odpadów z wycofanych z eksploatacji turbin wiatrowych¹⁾. Szacuje się, że tylko w Hiszpanii ok. 20 tys. łopat zostanie wyłączonych z użytku w najbliższej przyszłości²⁾. Co więcej, firmy opracowują coraz to bardziej zaawansowane turbiny wiatrowe, o większych średnicach łopat i wydajności energetycznej, aby sprostać wymaganiom rynku. MingYang Group (Guangdong, Chiny), we współpracy z Hengshen Co., Ltd. (Zhenjiang, Chiny), wyprodukowała nową morską turbinę wiatrową MySE292 o średnicy wirnika wynoszącej 292 m. Firma twierdzi, że produkt ten ma największą średnicę wirnika, jaką wyprodukowano do tej pory na całym świecie. Projekt ten przekroczył już rozmiar modelu turbiny wiatrowej ogłoszonego przez MingYang Group na początku 2023 r.³⁾

Siemens Gamesa (Hamburg, Niemcy) również prowadzi badania nad wysokowydajnymi turbinami wiatrowymi. Fundusze na badania zapewnia Unia Europejska. Według niektórych doniesień, firma stawia morskie turbiny wiatrowe o najwyższej znanej mocy wytwórczej, wynoszącej 21 MW, i średnicy wirnika wynoszącej 276 m na obszarze testowym na wybrzeżu Danii. Obecnie informacje te nie są oficjalnie potwierdzone⁴⁾.

Jeszcze bardziej interesujący projekt budowy ma miejsce w niemieckiej gminie Shipkau, gdzie budowane są największe na świecie turbiny wiatrowe. Środek wirnika (piasty) będzie na wysokości 300 m (ponad 2 razy więcej niż przeciętna turbina wiatrowa). Zebrane dane wykazały, że na wysokości 300 m podmuchy wiatru są bardziej stabilne, co powoduje podwojenie wytwarzanej energii w porównaniu z tradycyjnymi turbinami wiatrowymi o tej samej średnicy wirnika. Kolejną zaletą tego projektu jest to, że te największe elektrownie wiatrowe nie wymagają dodatkowej przestrzeni. Mogą być budowane pomiędzy istniejącymi wiatrakami, ponieważ ich wirniki nie będą na siebie nachodzić. Firma Gicon (Drezno, Niemcy) planuje zbudować 1000 turbin wiatrowych do 2030 r., głównie na terenie Bawarii. Co więcej, w przyszłości firma planuje budowę trzypoziomowej farmy energii odnawialnej z panelami fotowoltaicznymi na dole i dwoma poziomami turbin wiatrowych⁵⁾.

W ostatnich latach rozpoczęto wiele projektów badawczych i utworzono wiele konsorcjów przemysłowych koncentrują-

and the constructing new wind farms results in production of more waste from end-of-life WT¹⁾. It was estimated that c.a. 20,000 blades will be out of service in the near future only in Spain²⁾. Moreover, the companies are developing more advanced wind turbines with higher blade diameters and energy output to meet the market requirements. MingYang Group (Guangdong, China), in cooperation with Hengshen Co. Ltd. (Zhenjiang, China), manufactured new off-shore wind turbine blades MySE292 with an impeller diameter of 292 m. The company claims this product has the largest impeller diameter that rolled off production worldwide. This project has already surpassed the size of wind turbine model announced by MingYang Group at the beginning of last year³⁾.

Siemens Gamesa (Hamburg, Germany) also develops high-performance wind turbines. The funds for the research are provided by the European Union. According to some reports, the company is setting offshore wind turbines with the highest known output of 21 MW and a rotor diameter of 276 m on a test field on the Danish coast. Currently, this information is not officially confirmed⁴⁾.

An even more interesting construction project occurs in the German municipality of Shipkau, where the world's largest wind turbines are built. The central part of the rotor (hub) will be 300 m high (more than 2 times more than the average WT). Collected data showed that at a height of 300 m, the wind blows more evenly, which results in doubling the energy yield produced by traditional WT with the same rotor diameter. Another advantage of this project is that the enormous WTs do not need additional space and can be built between existing WTs because the rotors will not overlap. The operating company Gicon (Dresden, Germany) plans to build 1,000 WTs by 2030, focusing on Bavaria state. Moreover, in the future, the company plans to build a 3-level renewable energy farm with photovoltaic panels at the bottom and 2 levels of WTs⁵⁾.

In recent years, many research projects and industrial consortiums focusing on the design, construction and recycling of WT blades have been started and were



Mgr inż. Szymon DEMSKI (ORCID: 0000-0001-7355-407X) w roku 2020 ukończył studia I stopnia, a w 2021 r. studia II stopnia na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Jest doktorantem Szkoły Doktorskiej tej samej uczelni. Specjalność – polimerowe kompozyty włókniste, nanokompozyty.

MSc Eng. Szymon DEMSKI (ORCID: 0000-0001-7355-407X) graduated with a degree in engineering in 2020 and a master's degree in 2021 at the Faculty of Materials Science and Engineering of Warsaw University of Technology. He is a PhD student at the Doctoral School of the same university. Specialty – fiber reinforced polymers, nanocomposites.



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

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

Table 1. Milestones of the development of the installed wind capacity in China⁷⁾

Tabela 1. Najważniejsze etapy rozwoju zainstalowanej mocy wiatrowej w Chinach⁷⁾

Year/ Rok	Levelized cost of electricity/ Uśredniony koszt energii elektrycznej, USD/kWh		Total installation cost/ Całkowity koszt instalacji, USD/kWh	
	on-shore/ turbiny lądowe	off-shore/ turbiny morskie	on-shore/ turbiny lądowe	off-shore/ turbiny morskie
2010	0.08	0.16	1913	4572
2018	0.06	0.13	1497	4353
2030	0.03–0.05	0.05–0.09	800–1350	1700–2000
2050	0.02–0.03	0.03–0.07	650–1000	1400–2800

cyh się na projektowaniu, budowie i recyklingu łopatek turbin wiatrowych, które zostały opisane we wcześniejszej pracy autorów⁶⁾. Jednakże obecnie dostępne na rynku metody recyklingu są niewystarczające, aby sprostać ilości generowanych odpadów z turbin wiatrowych bez ich składowania lub spalania. W ostatnim roku wiele nowych projektów badawczych i konsorcjów przemysłowych zaczęło koncentrować się na opracowywaniu elektrowni wiatrowych w pełni nadających się do recyklingu, nowych i wydajnych metod recyklingu oraz sposobów ponownego wykorzystania turbin wycofanych z eksploatacji.

Ze względu na rosnące ceny energii i potrzebę zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, wiele krajów intensywnie inwestuje w energię wiatrową. Chociaż uważa się, że technologia energii wiatrowej jest już technologią dojrzałą, nadal istnieje znaczny potencjał do jej ulepszenia. W szczególności, dla jej dalszego rozwoju niezbędne jest obniżenie ceny energii wiatrowej (tabela 1).

Główny nacisk kładzie się na rozbudowę turbin wiatrowych, zwiększając ich rozmiar i moc wyjściową. Obejmuje to udoskonalenia w zakresie aerodynamiki łopatek wirnika oraz wdrożenie aktywnych systemów sterowania i hamulców aerodynamicznych w celu poprawy wydajności i mocy wyjściowej (rysunek).

Kluczowe znaczenie mają również udoskonalone praktyki konserwacyjne i wczesne diagnozowanie potencjalnych usterek. Te udoskonalenia skracają czas przestoju oraz zwiększają niezawodność i dostępność turbin wiatrowych. Ponadto,

described in the authors' previous work⁶⁾. However, the recycling methods currently available on the market are insufficient to cope with the amount of generated WT waste without landfilling or incineration. In the last year, many new research projects and industrial consortiums have started focusing on developing fully recyclable WT, as well as new and efficient recycling methods or ways to repurpose end-of-life WT.

Driven by rising energy prices and the need for energy security, many countries are investing heavily in wind power. Although wind energy technology is considered mature, there is still significant potential for improvement. In particular, reducing the price of wind energy is essential for its further expansion (Table 1).

A major focus is on the upscaling of wind turbines, increasing their size and power output. This includes advances in rotor blade aerodynamics and the implementation of active control systems and aerodynamic brakes to improve efficiency and power output (Figure).

Improved maintenance practices and early diagnosis of potential faults are also crucial. The advances will reduce downtime and increase the reliability and

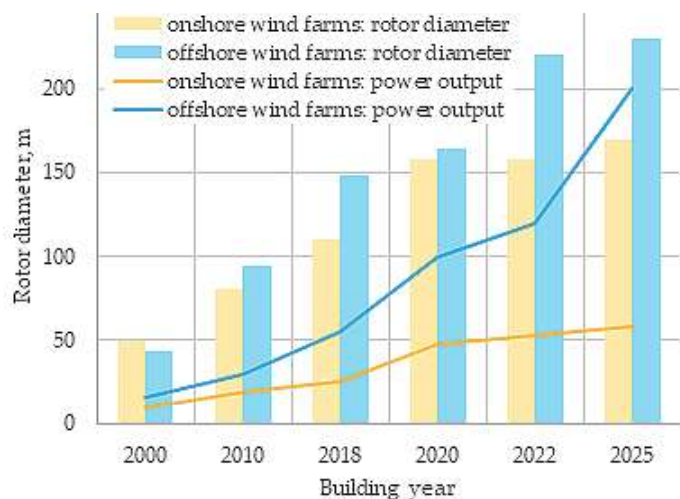


Figure. Trends in wind turbine sizes and power outputs over the years⁷⁾

Rysunek. Trendy w rozmiarach turbin wiatrowych i mocy wyjściowej na przestrzeni lat⁷⁾



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

Prof. Dr.-Ing. Holger SEIDLITZ (ORCID: 0000-0003-0024-1624) in 2013, he obtained a PhD from the Faculty of Mechanical

Engineering of University of Technology Chemnitz. In 2015, he has been granted a junior professorship at Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg. In 2019 he became full professor for Polymer-based Lightweight Design at Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg as well as division director Polymeric Materials and Composites PYCO at the Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP in Wildau near Berlin. Specialty – lightweight structures based on polymer composites.



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

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

wyzwania związane z transportem i montażem dotyczące większych turbin są rozwiązywane poprzez produkcję łopatek w segmentach. W przypadku morskich farm wiatrowych obserwuje się trend w kierunku budowy większych turbin zlokalizowanych dalej od brzegu i na głębokich wodach. Ta zmiana wymaga opracowania nowych technologii fundamentów pływających i zoptymalizowanych technik budowy posadowień morskich. Ponadto wykorzystanie kabli 66 kV zastąpi obecnie wykorzystywane kable 33 kV do przesyłu energii, co dodatkowo zwiększy wydajność⁷⁾.

Ponadto, aby zwiększyć produkcję energii, konieczna jest modernizacja turbin wiatrowych. Wiąże się to z wymianą starszych turbin wiatrowych na nowsze, bardziej wydajne modele. Ponieważ wiele lądowych farm wiatrowych w Europie zbliża się do końca swojego 25-letniego okresu eksploatacji, modernizacja oferuje istotną możliwość podwojenia mocy i potrojenia produkcji energii. Jest to szczególnie skuteczne, ponieważ stare turbiny są często zlokalizowane na obszarach o optymalnych warunkach wiatrowych. Godne uwagi projekty, takie jak Windplan Groen w Niderlandach, ilustrują ten trend. Jednak mniej niż 10% wycofanych z eksploatacji turbin jest obecnie ponownie modernizowanych ze względu na skomplikowane przepisy i długotrwałe procesy wydawania pozwoleń. Uproszczenie tych procedur jest konieczne, aby ułatwić zwiększenie wysiłków w zakresie modernizacji⁷⁾.

Wraz z rosnącym wykorzystaniem materiałów nadających się do recyklingu, takich jak recyklingowa termoplastyczna w łopatach turbin wiatrowych, niezbędne są również skuteczne metody naprawy w celu przedłużenia ich żywotności. Naprawy łopatek turbin wiatrowych zazwyczaj dzielą się na dwie kategorie: poprodukcyjne, które zapewniają jakość przed instalacją, oraz naprawy w terenie, które usuwają uszkodzenia powstałe podczas pracy. Typowe problemy obejmują erozję łopatek, rozwarstwienie i uszkodzenia strukturalne. Proces naprawy obejmuje identyfikację uszkodzeń, usunięcie uszkodzonej powierzchni, przygotowanie łatki, nałożenie kleju i utwardzenie. Nowe technologie naprawcze koncentrują się na termoplastycznych i dynamicznych kompozytach opartych na wiązaniach kowalencyjnych, umożliwiając spawanie i metody wspomagane rozpuszczalnikami. Te innowacje poprawiają jakość i szybkość napraw oraz zapewniają lepszą wydajność niż tradycyjne metody klejenia. Mishnaevsky⁸⁾ podkreślił konieczność specjalistycznych szkoleń i odpowiedniego sprzętu w celu skutecznego wdrożenia tych nowych technologii. Ogólnie rzecz biorąc, integracja zaawansowanych materiałów i innowacyjnych technik naprawy ma kluczowe znaczenie dla zrównoważonego rozwoju i wydajności przyszłego funkcjonowania turbin wiatrowych⁸⁾.

Jeden z bardzo obiecujących nowych materiałów został opracowany przez naukowców z Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnej Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych⁹⁾. Opracowali oni nową żywicę o nazwie PECAN (*polyester covalently adaptable network*), wytwarzaną z materiałów biopochodnych, przeznaczoną do produkcji łopatek turbin wiatrowych, która wykazuje znaczne zalety w zakresie

availability of wind turbines. In addition, the transportation and assembly challenges associated with larger turbines are being addressed by manufacturing blades in segments. For off-shore wind farms, there is a trend towards larger turbines located further from shore and in deep water. This shift requires new floating foundation technologies and optimized construction techniques for off-shore substructures. In addition, the use of 66 kV cables will replace the current 33 kV cables for power transmission, further increasing efficiency⁷⁾.

In addition, repowering of wind turbines is necessary to increase energy production. This involves replacing ageing wind turbines with newer, more efficient models. With many on-shore wind farms in Europe approaching the end of their 25-year lifespan, repowering offers a significant opportunity to double capacity and triple power output. This is particularly effective as old turbines are often located in areas with optimal wind conditions. Notable projects such as Windplan Groen in the Netherlands illustrate this trend. However, less than 10% of decommissioned turbines are currently repowered due to complex regulations and lengthy permitting processes. Simplifying these procedures is necessary to facilitate greater repowering efforts⁷⁾.

With the increasing use of recyclable materials such as recycloamine[®] and thermoplastics in wind turbine blades, effective repair methods are also essential to extend their life. Repairs to wind turbine blades typically fall into 2 categories: post-manufacturing, which ensures quality prior to installation, and in-field repairs, which address damage during operation. Common problems include blade erosion, delamination and structural failure. The repair process includes damage identification, removal of affected areas, patch preparation, adhesive application and curing. Emerging repair technologies focus on thermoplastic and dynamic covalent bond based composites, enabling fusion welding and solvent-assisted methods. These innovations improve the quality and speed of repairs and promise better performance than traditional adhesive methods. However, Mishnaevsky⁸⁾ emphasized the need for specialized training and equipment to implement these new technologies effectively. Overall, the integration of advanced materials and innovative repair techniques is critical to the sustainability and efficiency of future wind turbine operations⁸⁾.

*One of the very promising new materials has been developed by researchers at the US Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory⁹⁾. They have developed a novel biomass-derived resin called PECAN (*polyester covalently adaptable network*) for wind blades that offers significant sustainability and recycling benefits. PECAN performs comparably to conventional thermoset resins and outperforms certain thermoplastics in terms of recyclability. A 9-m prototype blade has been successfully manufactured using*

zrównoważonego rozwoju i recyklingu. PECAN działa porównywalnie do konwencjonalnych żywic termoutwardzalnych i przewyższa niektóre tworzywa termoplastyczne pod względem możliwości recyklingu. Z powodzeniem wyprodukowano 9-metrową prototypową łopatę z tego materiału, wykazując jego możliwości produkcyjne i zastosowanie w aplikacjach na dużą skalę. Ta żywica może być poddawana recyklingowi chemicznemu, umożliwiając odzyskiwanie komponentów i ich ponowne wielokrotne wykorzystywanie. Proces degradacji chemicznej może całkowicie rozłożyć materiał prototypowej łopaty w ciągu 6 h, wykazując potencjał przyszłego recyklingu łopat turbin wiatrowych⁹⁾. Przegląd nowych materiałów na łopaty turbin wiatrowych przedstawiono w tabeli 2.

this material, demonstrating its manufacturability and use in large-scale applications. The resin can be chemically recycled, allowing components to be recovered and reused indefinitely. The chemical degradation process can completely decompose the prototype blade within 6 h, demonstrating the potential for future recycling of wind turbine blades⁹⁾. An overview of new materials for wind turbine blades is presented in Table 2.

The recycling methods mentioned are based on the common classification of recycling methods¹⁰⁻¹⁵⁾ (Table 3).

Among the techniques, Pender et al.¹⁴⁾ highlighted mechanical recycling as the most effective short-term

Table 2. Summary of materials, brands, repair technologies and recycling methods of wind turbine blades⁹⁾

Tabela 2. Zestawienie materiałów, marek, technologii naprawy i metod recyklingu łopat turbin wiatrowych⁹⁾

Material type/ Rodzaj materiału	Brand name/company/ Nazwa marki/firma	Description/Opis	Recycling methods/Metody recyklingu	Repair methods/Metody naprawy
Thermoset composites/ Kompozyty termoutwardzalne	various/różne	traditional blades made from epoxy or polyester with glass/carbon fibers/tradycyjne łopaty wykonane z żywicy epoksydowej lub poliestru z włóknami szklanymi/węglowymi	landfilling, incineration, mechanical recycling, solvolysis/skladowanie na wysypisku, spalanie, recykling mechaniczny, solwoliza	adhesive bonding, plug/patch/scarf repair/klejenie, naprawa zatyczek/opaski
	Recyclamine® composites especially Briozen/Aditya Birla Group/ Recyclamine®, w szczególności Briozen/Aditya Birla Group	epoxy-based composites that can be converted back to a thermoplastic state/kompozyty na bazie żywic epoksydowych, które można przekształcić z powrotem w stan termoplastyczny	low-energy solvolysis at specific temperatures and pH/niskoenergetyczna solwoliza przy określonych temperaturach i pH	Briozen recyclable adhesive system; similar to conventional repair methods/system klejów firmy Briozen nadający się do recyklingu; podobny do konwencjonalnych metod naprawy
	EzCiclo/Swancor	recyclable thermosetting epoxy with CleaVER technology for easy recycling/nadająca się do recyklingu termoutwardzalna żywica epoksydowa z technologią CleaVER dla łatwego recyklingu	immersion in CleaVER solution followed by heating/zanurzenie w roztworze CleaVER, a następnie podgrzanie	information not available/informacje niedostępne
	3R/CIDETEC	dynamic epoxy systems with reversible bonds for reprocessing/dynamiczne systemy epoksydowe z odwracalnymi wiązaniami do ponownego przetwarzania	dissolution using thiols; two-step mechanical recycling/rozpuszczanie przy użyciu tioli; dwuetapowy recykling mechaniczny	adhesive bonding and welding/klejenie i spawanie
Thermoplastic-composites/ Kompozyty termoplastyczne	Elium®/Arkema	liquid thermoplastic resin for recyclable blades/plynna żywica termoplastyczna do łopat nadających się do recyklingu	mechanical and chemical recycling (crushing, heating)/recykling mechaniczny i chemiczny (kruszenie, podgrzewanie)	fusion welding, adhesive joining/spawanie, łączenie za pomocą kleju
	HealTech™/CompPair Technologies	healable prepreg composite material/regenerujący materiał kompozytowy, prepreg	no information available/brak dostępnych informacji	local heating/lokalne podgrzewanie
Vitrimers/ Witrimery	Vitrimax Mallinda	reversible crosslinked networks allowing reprocessing and self-healing/odwracalne sieci wiązań pozwalające na ponowne przetwarzanie i samoregenerację	dissolution in solvents like diethylenetriamine (DETA)/rozpuszczanie w rozpuszczalnikach, takich jak dietylenotriamina (DETA)	hot pressing for delamination repair/prasowanie na gorąco do naprawy rozwarstwień
Polyurethane composites/ Kompozyty poliuretanowe	polyurethane infusion resin/Covestro/ poliuretanowa żywica infuzyjna/Covestro	developed for quick manufacturing; not primarily recyclable/ opracowana z myślą o szybkiej produkcji; zasadniczo nie nadaje się do recyklingu	chemical recycling, glycolysis, and biological degradation/ recykling chemiczny, glikoliza i degradacja biologiczna	adhesive bonding/klejenie
Wood-based composites/ Kompozyty drewnopochodne	bamboo-based composites/kompozyty na bazie bambusa firmy Lianyang Zhongfu Lianzhong Composite Group Co.	include natural fibers and wood; focus on sustainability/ obejmują naturalne włókna i drewno; nacisk na zrównoważony rozwój	reuse in new products or energy recovery/ponowne wykorzystanie w nowych produktach lub odzysk energii	adhesive bonding with various adhesives/klejenie przy użyciu różnych klejów

Wszystkie te metody recyklingu opierają się na wspólnej klasyfikacji metod recyklingu¹⁰⁻¹⁵⁾ (tabela 3).

Pender i współpracownicy¹⁴⁾ podkreślili, że recykling mechaniczny jest najskuteczniejszym rozwiązaniem krótkoterminowym ze względu na niskie zapotrzebowanie na energię i minimalną emisję gazów cieplarnianych. Ta technika jest wystarczająca, aby zminimalizować potencjalne globalne ocieplenie ze względu na ograniczoną zawartość włókien węglowych w obecnie poddawanych recyklingowi łopatach turbin wiatrowych¹⁴⁾. Niestety, oprócz składowania na wysypiskach, ta technika powoduje również degradację łopat turbin wiatrowych do mikroplastiku, który stanowi poważne zagrożenie dla przyrody i ekosystemów. Mikrocząstki plastiku mogą absorbować szkodliwe chemikalia i metale ciężkie, prowadząc do ich bioakumulacji w łańcuchu pokarmowym. Ich obecność w środowisku może zakłócać życie morskie i lądowe oraz potencjalnie wpływać na zdrowie ludzi w wyniku spożycia skażonej żywności

solution due to its low energy requirements and minimal greenhouse gas emissions. This technique is sufficient to minimize the global warming potential due to the limited presence of carbon fibers in currently recycled wind turbine blades¹⁴⁾. Unfortunately, in addition to landfill, this technique also results in the degradation of wind turbine blades into microplastics, which pose a significant risk to wildlife and ecosystems. The microplastics can absorb harmful chemicals and heavy metals, leading to bioaccumulation in the food chain. Their presence in the environment can disrupt marine and terrestrial life and potentially affect human health through consumption of contaminated food and water. Other methods should therefore be preferred for future recycling strategies¹⁵⁾. Co-processing, particularly in cement kilns, is also recognized for its dual benefit of material recovery and energy efficiency. In contrast, thermal processes such

Table 3. Classification of recycling methods

Tabela 3. Klasyfikacja metod recyklingu

Recycling metod/ Metoda recyklingu	Description/Opis	Current technology readiness level/Poziom gotowości technologicznej (TRL)	References/Literatura
Mechanical recycling/ Recykling mechaniczny	<i>utilizes shredders to reduce composite material into smaller pieces for reuse as fillers or co-processing in cement production/wykorzystuje rozdrabniacze do rozdrabniania materiału kompozytowego na mniejsze kawałki w celu ponownego wykorzystania jako wypełniaczy lub współprzetwarzania w produkcji cementu</i>	9	10
Co-processing/ Współprzetwarzanie	<i>involves using wind turbine blade material in cement production, providing energy and material recovery/obejmuje wykorzystanie materiału z łopat turbin wiatrowych w produkcji cementu, zapewniając odzysk energii i materiałów.</i>	8-9	10
Pyrolysis/ Pioliza	<i>breaks down organic materials in an oxygen-free environment, producing gases and oils, while preserving inorganic materials/rozkłada materiały organiczne w środowisku pozbawionym tlenu, wytwarzając gazy i oleje, jednocześnie zachowując materiały nieorganiczne</i>	7	10, 11
Microwave pyrolysis/ Pioliza mikrofalowa	<i>similar to pyrolysis but uses microwave energy for more uniform heating, which reduces thermal degradation/ podobna do pirolizy, ale wykorzystuje energię mikrofalową do bardziej równomiernego ogrzewania, co zmniejsza degradację termiczną</i>	4	10, 12
Solvolytic/ Solwoliza	<i>uses solvents to depolymerize thermoset polymers, allowing recovery of fibers and resin monomers/wykorzystuje rozpuszczalniki w celu depolimeryzacji polimerów termoutwardzalnych, umożliwiając odzysk włókien i monomerów żywicy</i>	4-5	10
High-voltage pulse fragmentation (HVPF)/Fragmentacja impulsowa pod wysokim napięciem (HVPF)	<i>involves applying high-voltage pulses to composite materials, which causes fragmentation and separation of the components without the need for conventional mechanical processes/polega na zastosowaniu impulsów wysokiego napięcia do materiałów kompozytowych, co powoduje fragmentację i oddzielenie komponentów bez konieczności stosowania konwencjonalnych procesów mechanicznych</i>	5	10
Plasma technology/ Technologia plazmowa	<i>mechanically shredded turbine blades are transformed into micrometric fibers using plasma technology, involving heat treatment of the material at high temperatures (around 2300°C) with effective break down of the composite structure without releasing hazardous gases/mechanicznie rozdrobnione łopaty turbin są przekształcane w mikrometryczne włókna za pomocą technologii plazmowej, obejmującej obróbkę cieplną materiału w wysokich temperaturach (ok. 2300°C) z efektywnym rozkładem struktury kompozytowej bez uwalniania niebezpiecznych gazów</i>	4	13

i wody. Dlatego też w przyszłych strategiach recyklingu preferowane powinny być inne metody¹⁵⁾. Współprzetwarzanie, w szczególności w piecach cementowych, jest również uznawane za podwójną zaletę: odzysku materiałów i efektywności energetycznej. Z kolei procesy termiczne, takie jak piroliza, i solwoliza stoją w obliczu wyzwań związanych z wysokim zużyciem energii i emisją gazów cieplarnianych z produktów ubocznych spalania, ale staną się ważniejsze dla odzyskiwania włókien węglowych¹⁴⁾.

Obecnie większość przetworzonych odpadów z łopat turbin wiatrowych jest wykorzystywana do produkcji cementu. Ten proces ma szereg zalet. Dodanie szkła z recyklingu do cementu może poprawić właściwości mechaniczne betonu, takie jak wytrzymałość na ściskanie i trwałość. Włókna szklane mogą poprawić wytrzymałość na zginanie, zmniejszając potrzebę dodatkowego wzmocnienia stałą, a tym samym zmniejszając zużycie energii w sektorze budowlanym. Ponadto zastosowanie szkła z recyklingu może zmniejszyć wydobycie zasobów naturalnych, takich jak piasek i żwir, a szkło jest z natury odporne na korozję chemiczną, co poprawia odporność konstrukcji na warunki atmosferyczne i atak chemiczny¹⁶⁾. Ogólną zaletą jest zmniejszenie śladu węglowego, ponieważ wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu w produkcji cementu może znacznie zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych związanych z tradycyjną produkcją cementu, przyczyniając się do osiągnięcia celów neutralności klimatycznej do 2050 r. Jednak obecnie prowadzone badania nie rozwiązały jeszcze jednego z głównych problemów związanych z wykorzystaniem szkła. Jest to potencjalna reakcja alkaliów z krzemionką, która może prowadzić do pęknięcia betonu. Badania sugerują jednak, że odpowiednie mielenie szkła może zmniejszyć to ryzyko poprzez zahamowanie reakcji¹⁶⁾.

Poddane recyklingowi mechanicznemu łopaty turbin wiatrowych mogą być również ponownie wykorzystane w produkcji podnosków w przemyśle obuwniczym. W metodzie opisanej przez Caramelo i współprac.¹⁷⁾ cząstki odpadów z obróbki mechanicznej są dodawane do matrycy epoksydowej w celu poprawy właściwości mechanicznych kompozytów. Dodanie 1% masy tych cząstek spowodowało poprawę wytrzymałości na rozciąganie (o 5,5%) i sztywność (o 8%). Dalsze testy wykazały, że laminaty wykonane z dodatkami miały o 18,6% większą wytrzymałość na rozciąganie i o 7,5% większą sztywność w porównaniu z próbkami kontrolnymi. Podnoski produkowane w tym procesie spełniają europejskie normy bezpieczeństwa, wykazując ochronę przed uderzeniami o małej prędkości i przed ściskaniem¹⁷⁾.

Ponadto Derkowski i współprac.¹⁸⁾ zbadali potencjał integracji włókien polimerowych pochodzących z rozdrobnionych łopat turbin wiatrowych w produkcji płyt włókowych poprzez połączenie 40% włókien polimerowych z 60% włókien z drewna sosnowego. W procesie produkcji wykorzystano dwa rodzaje żywicy: fenolowo-formaldehydową (PF) i melaminowo-mocznikowo-formaldehydową (MUF). Wyprodukowane płyty wykazywały imponujące właściwości mechaniczne, z wytrzymałością na zginanie przekraczającą 20 N/mm²

as pyrolysis and solvolysis face challenges with high energy consumption and greenhouse gas emissions from combustion by-products, but will become more important for carbon fiber recovery¹⁴⁾.

Today, most recycled wind turbine blade waste is used in cement production. This process has several benefits. Adding recycled glass to cement can improve the mechanical properties of concrete, such as compressive strength and durability. Glass fibers can improve flexural strength, reducing the need for additional steel reinforcement, thereby reducing energy consumption in the construction sector. In addition, the incorporation of recycled glass can reduce the extraction of natural resources such as sand and gravel, and glass is inherently resistant to chemical corrosion, improving the durability of structures against atmospheric conditions and chemical attack¹⁶⁾. The overall benefit is a reduction in carbon footprint, as the use of recycled materials in cement production can significantly reduce the greenhouse gas emissions associated with traditional cement production, contributing to climate neutrality goals by 2050. However, current research has yet to address one of the main concerns with the use of glass. It is the potential for alkali-silica reaction, which can lead to cracking in concrete. However, research suggests that proper grinding of glass can mitigate this risk by inhibiting the reaction¹⁶⁾.

Mechanically recycled wind turbine blades can also be reused in toe caps for the footwear industry. In the method described by Caramelo et al.¹⁷⁾, mechanical machining waste particles are added to an epoxy matrix to improve the mechanical properties of composites. The addition of 1% by mass of these particles resulted in improvements in tensile strength (5.5%) and stiffness (8%). Further testing showed that laminates made with the additives had an 18.6% increase in tensile strength and a 7.5% increase in stiffness compared to control samples. The toe caps produced from this process met European safety standards, demonstrating protection against low-velocity impact and compression¹⁷⁾.

In addition, Derkowski et al.¹⁸⁾ studied the potential of integrating polymer chips derived from shredded wind turbine blades into particleboard production by combining 40% polymer chips with 60% pine wood chips. Two types of resin were used in the production process: phenol-formaldehyde (PF) and melamine-urea-formaldehyde (MUF) ones. The boards produced exhibited impressive mechanical properties, with flexural strengths in excess of 20 N/mm² and elastic moduli approaching 4000 N/mm², benefiting particularly from the MUF resin. The uniformity and dimensional characteristics of the polymer chips were critical, as more uniformly sized chips gave better results in terms of board integrity and strength. The research showed that the introduction of polymer chips also reduced thickness swelling and water

i modułami sprężystości zbliżającymi się do 4000 N/mm², co wynikało w szczególności z zastosowania żywicy MUF. Jednorodność i charakterystyka wymiarowa włókien polimerowych miały kluczowe znaczenie, ponieważ wióry o bardziej jednolitym rozmiarze dawały lepsze wyniki pod względem integralności i wytrzymałości płyty. Badania wykazały, że wprowadzenie włókien polimerowych zmniejszyło również zmiany grubości w wyniku pęcznienia i absorpcję wody, przy wartościach w granicach 22–26% w przypadku pęcznienia, co wskazuje na lepszą odporność na wilgoć w porównaniu z konwencjonalnymi panelami drewnopochodnymi¹⁸).

Inne potencjalne zastosowanie rozdrobnionych łopatek turbin wiatrowych jest badane przez Uniwersytet Maine, USA. Poddane recyklingowi łopaty turbin wiatrowych są wykorzystywane jako surowiec do druku 3D. Projekt, prowadzony przez Centrum Zaawansowanych Struktur i Kompozytów, ma na celu opracowanie zrównoważonego podejścia do wykorzystania rozdrobnionego materiału łopatek jako opłacalnego wzmocnienia i wypełniacza w produkcji dodatków na dużą skalę. Dzięki zastąpieniu krótkich włókien węglowych rozdrobnionym materiałem łopaty wiatrowej osiągnięty zostanie 100-proc. mechaniczny recykling materiału kompozytowego¹⁹).

Pomimo obecnie istniejących technologii dla stosunkowo niewielkich ilości odpadów poddawanych recyklingowi, brakuje standardów recyklingu i ponownego wykorzystania odpadów z łopatek turbin wiatrowych, co opisali Delaney i współpracownicy²⁰ (tabela 4).

Obecnie turbiny wiatrowe w Europie są zwykle demontowane przed końcem okresu eksploatacji ze względu na surowe przepisy, koszty napraw i względy bezpieczeństwa. W związku z tym, aby uniknąć odpadów łopatek turbin wiatrowych, istnieją rozwiązania dla rynku produktów do zastosowań wtórnych, stymulowane rosnącą świadomością ekologiczną i potrzebą zrównoważonej gospodarki odpadami²¹). Ponieważ tysiące turbin wiatrowych osiąga już koniec okresu eksploatacji (np. w Szwecji), to, jak podają Andersen i współpracownicy²¹), wyzwania związane z utylizacją lub recyklingiem łopatek turbin stają się

absorption, with values ranging from 22% to 26% for swelling, indicating improved moisture resistance compared to conventional wood-based panels¹⁸).

Another potential use for shredded wind turbine blades is being explored by the University of Maine. The recycled wind turbine blades are being used as feedstock for 3D printing. The project, led by the Advanced Structures and Composites Center, aims to develop a sustainable approach to using shredded blade material as a cost-effective reinforcement and filler in large-scale additive manufacturing. By replacing short carbon fibers with shredded wind blade material, 100% mechanical recycling of the composite material will be achieved¹⁹).

Despite the currently existing technologies for today's relatively small quantities of recycled waste different standards for recycling and reuse of wind turbine blade waste are missing as described by Delaney et al.²⁰ (Table 4).

Currently, another challenge is that wind turbines in Europe are usually dismantled before the end of their life due to high regulations, repair costs and safety reasons. Therefore, to avoid the waste of wind turbine blades, there are existing approaches for second-hand markets, driven by increasing environmental awareness and the need for sustainable waste management²¹). As thousands of wind turbines reach the end of their operational life, particularly in countries such as Sweden, as reported by Andersen et al.²¹), the challenge of disposing of or recycling turbine blades becomes critical, as shown. The market is gaining traction as various stakeholders explore options for the reuse and refurbishment of decommissioned turbine blades. This includes selling them for secondary uses such as construction materials, art installations or even recreational uses such as skate parks. The cost-effectiveness of used blades compared to new ones makes this market attractive,

Table 4. Standards that need to be established for end-of-life management of wind turbine blades²⁰

Tabela 4. Standardy, które należy ustanowić w zakresie zarządzania wycofywanymi z eksploatacji łopatkami turbin wiatrowych²⁰

Standard area/Obszar standaryzacji	Proposed standards/Proponowane standardy
Definition of end-of-life/Definicja zakończenia okresu eksploatacji	clear definitions of what constitutes the end-of-life for wind turbine blades/jasne definicje tego, co stanowi koniec okresu eksploatacji łopatek turbin wiatrowych
Data collection/Zbieranie danych	standardized data gathering on decommissioned blades, including quantities and fates/standardowe gromadzenie danych na temat wycofanych z eksploatacji łopatek, w tym ich liczby i dalszego losu
Recycling protocols/Protokoły recyklingu	guidelines for recycling methods, ensuring compatibility and efficiency of processes/wytyczne dotyczące metod recyklingu, zapewniające kompatybilność i wydajność procesów
Material passports/Paszporty materiałów	development of material passports to document the composition of blades for recycling/opracowanie paszportów materiałów w celu udokumentowania składu łopatek przeznaczonych do recyklingu
Regulatory framework/Ramy regulacyjne	policies to discourage landfill disposal and promote sustainable practices/polityki zniechęcające do składowania odpadów na wysypiskach i promujące zrównoważone praktyki
Life cycle assessment/Ocena okresu eksploatacji	standards for assessing the environmental impact of EOL options/standardy oceny wpływu na środowisko opcji wycofania z eksploatacji
Market incentives/Zachęty rynkowe	economic incentives for recycling and reusing materials from decommissioned blades/zachęty ekonomiczne do recyklingu i ponownego wykorzystania materiałów z łopatek wycofanych z eksploatacji

krytyczne. Rynek zyskuje na popularności, ponieważ różne zainteresowane strony badają możliwości ponownego wykorzystania i renowacji łopat turbin wycofanych z eksploatacji. Obejmuje to ich sprzedaż do zastosowań wtórnych, takich jak materiały budowlane, instalacje artystyczne, a nawet zastosowania rekreacyjne (np. skateparki). Opłacalność wykorzystania używanych łopat w porównaniu z nowymi materiałami sprawia, że rynek ten jest atrakcyjny, szczególnie dla mniejszych projektów lub firm, które chcą zminimalizować koszty.

Andersen i współpracownicy²¹⁾ opisują 3 podstawowe scenariusze: ponowne wykorzystanie w kraju, sprzedaż za granicę, zastosowania mieszane, które ilustrują potencjalne możliwości dla rynku produktów używanych. W pierwszym scenariuszu znaczny odsetek wycofanych łopat jest sprzedawany do użytku lokalnego, co wydłuża ich żywotność o kilka lat. Takie podejście nie tylko opóźnia wytwarzanie odpadów, ale także tworzy lokalne miejsca pracy przy renowacji i odsprzedaży. W przypadku sprzedaży za granicę wycofane łopaty są eksportowane do krajów o mniej rygorystycznych przepisach dotyczących użytkowania turbin. Mogłoby to znacznie zmniejszyć ilość odpadów w kraju eksportującym, choć może budzić obawy etyczne dotyczące standardów środowiskowych w kraju importującym. W scenariuszu obejmującym zastosowania mieszane połączenie sprzedaży krajowej i zagranicznej, gdzie niektóre rozmiary lub typy łopat są ponownie wykorzystywane lub odnawiane z przeznaczeniem na różne rynki, może być również skuteczne. Ta elastyczność pozwala na większy zasięg i wykorzystanie dostępnych materiałów.

especially for smaller projects or companies looking to minimize costs. Andersen et al.²¹⁾ describe 3 primary scenarios (domestic reuse, international sales, mixed applications) that illustrate potential avenues for the secondhand market.

In the first scenario (domestic reuse), a significant percentage of retired blades are sold for local use, extending their life by several years. This approach not only delays the generation of waste, but also creates local jobs in refurbishment and resale. In the second scenario (international sales), the retired blades are exported to countries with less stringent regulations on the use of turbines. This could significantly reduce the perceived waste in the exporting country, although it may raise ethical concerns about environmental standards in the importing country. In the third scenario (mixed applications), a combination of domestic and international sales takes place, where certain sizes or types of blades are reused or refurbished for different markets, can also be effective. This flexibility allows for greater reach and utilization of available materials.

Received/Otrzymano: 24-11-2024

Reviewed/Zrecenzowano: 26-11-2024

Accepted/Zaakceptowano: 30-12-2024

Published/Opublikowano: 24-01-2025

REFERENCES/LITERATURA

- [1] 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.
- [2] G. Nehls, *CompositesWorld*, Jan 4, 2024; <https://www.compositesworld.com/news/accoina-energia-el-ganso-develop-shoes-made-with-recycled-wind-blade-materials>.
- [3] G. Nehls, *CompositesWorld*, Apr 3, 2024; https://www.compositesworld.com/news/hengshen-carbon-fiber-contributes-to-143-meter-long-mingyang-wind-blade?utm_source=Omeda&utm_medium=email&utm_campaign=CW+Today+4%2F5%2F2024.
- [4] Lutz Labs, *Heise Online*, Jun 16, 2024; https://www.heise.de/news/Bericht-Siemens-baut-Windturbine-mit-21-Megawatt-9765185.html?wt_mc=nl.red.ho.ho-nl-daily.2024-06-17.ansprache.ansprache.
- [5] S. Schiller, *rbb24*, Apr 9, 2024; <https://www.rbb24.de/wirtschaft/beitrag/2024/04/brandenburg-schikpau-300-meter-windrad-soll-kommen-windmessmast-test-energie.html>.
- [6] A. Błędzki, M. Urbaniak, A. Adamcio, M. Sobczyk, S. Demski, A. Boczkowska, H. Seidlitz, M. Köhler, *Przem. Chem.* 2024, **103**, 234, doi: 10.15199/62.2024.2.3.
- [7] M. Bošnjakovic, M. Katinic, R. Santa, D. Maric, *Appl. Sci.* 2022, **12**, 8653, doi: 10.3390/app12178653.
- [8] L. Mishnaevsky Jr., *Energies* 2023, **16**, 7694, doi: 10.3390/en16237694.
- [9] G. Nehls, *CompositesWorld*, Aug 26, 2024; <https://www.compositesworld.com/news/nrel-develops-biomass-derived-resin-pecan-for-wind-blades>.
- [10] E.B. Paulsen, P. Enevoldsen, *Energies* 2021, **14**, 4247, doi: 10.3390/en14144247.
- [11] C. Du, G. Jin, L. Zhang, B. Tong, B. Wang, G. Zhang, Y. Cheng, *Polymers* 2022, **14**, 5408, doi: 10.3390/polym14245408.
- [12] S. Sorte, N. Martins, M.S.A. Oliveira, G.L. Vela, C. Relvas, *Energies* 2023, **16**, 7624, doi: 10.3390/en16227624.
- [13] Z. Kavaliauskas, R. Keželis, V. Grigaitiene, L. Marcinauskas, M. Milieška, V. Valincius, R. Uscila, V. Snapkauskienė, D. Gimžauskaite, A. Baltušnikas, *Materials* 2023, **16**, 3089, doi: 10.3390/ma16083089.
- [14] K. Pender, F. Romoli, J. Fuller, *Energies* 2024, **17**, 3008, doi: 10.3390/en17123008.
- [15] S.T. Tayebi, M. Sambucci, M. Valente, *Sustainability* 2024, **16**, 4517, doi: 10.3390/su16114517.
- [16] S. Bulinska, A. Sujak, M. Pyzalski, *Sustainability* 2024, **16**, 5150, doi: 10.3390/su16125150.
- [17] A.R. Caramelo, P. Santos, T.M. Lima, *Designs* 2024, **8**, 32, doi: 10.3390/designs8020032.
- [18] A. Derkowski, D. Dziurka, R. Antonowicz, M. Chuda-Kowalska, R. Mirski, *Polymers* 2024, **16**, 1210, doi:10.3390/polym16091210.
- [19] G. Nehls, *CompositesWorld*, Jan 4, 2024; <https://www.compositesworld.com/news/umaine-researchers-aim-to-recycle-wind-turbine-blades-as-3d-printing-material>.
- [20] E.L. Delaney, P.G. Leahy, J.M. McKinley, T.R. Gentry, A.J. Nagle, J. Elberling, L.C. Bank, *Sustainability* 2023, **15**, 12557, doi: 10.3390/su151612557.
- [21] N. Andersen, O. Eriksson, K. Hillman, M. Wallhagen, *Energies* 2016, **9**, 999, doi: 10.3390/en9120999.