*dr inż. Filip Broniewicz*[1)*)]
ORCID 0000-0003-4506-5521
*mgr inż. Karolina Dec*[2)]
ORCID 0000-0002-5237-654X
*dr hab. inż. Mirosław Broniewicz, prof. PB*[1)]
ORCID 0000-0001-8267-6095

# Analysis of the potential for reusing end-of-life wind turbine blades as acoustic barriers

## *Analiza możliwości wykorzystania łopat turbin wiatrowych w ekranach akustycznych*

*DOI: 10.15199/33.2025.07.16*

**Abstract**: Uncertain legal solutions make it more difficult to solve the major issue of managing wind turbine blades after their service life. Existing recycling methods are either energy-intensive or do not produce valuable recyclates. Making acoustic screen panels out of composite material derived from blades could be an alternative. An study of the potential applications of this solution is included in the article. The primary component of a road acoustic screen, an acoustic panel prototype, was examined for this purpose. The panel's strength analysis using the Finite Element Method demonstrated that it had adequate stiffness and strength. The prototype's experimental tests validated the numerical analysis' findings. Under load, the highest deflection was 29 mm, which was 58% of the allowable value. Furthermore, examination of the composite panel following load removal revealed that the panel's structure remained unaltered, free of composite material cracks and delaminations. Acoustic tests of the panel will be the next step in the investigation of the potential use of blade components as screens. Their successful outcome will make it possible to start working on this solution's broader introduction.

**Keywords**: circular economy; reuse; wind turbines blades; legal solutions

**Streszczenie**: Zagospodarowanie łopat turbin wiatrowych po ich okresie użytkowania stanowi ważny problem, w rozwiązaniu którego nie pomagają przepisy prawne. Dostępne metody recyklingu są energochłonne lub nie pozwalają na uzyskanie wartościowych recyklatów. Alternatywą może być wykorzystanie materiału kompozytowego z łopat turbin wiatrowych do paneli ekranów akustycznych. W tym celu przeanalizowano prototyp panelu akustycznego, będącego głównym elementem drogowego ekranu akustycznego. Wykorzystanie metody elementów skończonych do analizy wytrzymałości panelu pokazało, że charakteryzuje się on wystarczającą sztywnością oraz nośnością. Badania doświadczalne prototypu potwierdziły wyniki analizy numerycznej. Maksymalna wartość ugięcia pod obciążeniem normowym wyniosła 29 mm, co stanowi 58% wartości dopuszczalnej. Ponadto, oględziny panelu kompozytowego po usunięciu obciążenia wykazały, że struktura panelu nie została zmieniona, nie stwierdzono pęknięć i rozwarstwień materiału kompozytowego. Kolejnym etapem analizy możliwości wykorzystania elementów pochodzących z łopat turbin wiatrowych jako ekranów będą badania akustyczne panelu. Ich pozytywny wynik pozwoli na rozpoczęcie prac nad wprowadzeniem tego rozwiązania technicznego na szerszą skalę.
**Słowa kluczowe**: gospodarka o obiegu zamkniętym; ponowne wykorzystanie; łopaty turbin wiatrowych; przepisy prawne

The issue of recycling of wind turbine blades is gaining attention nowadays. It is estimated, that since the year 2000, the total power of wind turbines in Europe increased from 12 to 285 GW, of which 248 GW are onshore turbines. [1]. According to WindEurope data, there will be 14,000 turbines decommissioned until 2025, which corresponds to about 50,000 tonnes of composite waste. This amount is assumed to triple until year 2040.

The GFRP material, a composite of resin and fiberglass, exhibits a high strength-to-weight ratio and weather resistance. Consequently, the material is utilized in the fabrication of wind turbine blades. However, processing the blades after their useful life presents significant challenges. Many different methods of recycling are used, the most common are thermal recycling methods, such as pyrolysis, microwave pyrolysis and fluidised

Problem recyklingu zużytych łopat turbin wiatrowych zyskuje w ostatnich latach na znaczeniu. Szacuje się, że od początku obecnego wieku całkowita moc turbin wiatrowych w Europie zwiększyła się z 12 do 285 GW, z czego 248 GW przypada na turbiny znajdujące się na lądzie, a 37 GW na turbiny offshore [1]. Zgodnie z danymi WindEurope, organizacji zajmującej się badaniem i promowaniem energii wiatrowej w Europie, do 2025 r. zostanie wycofanych z eksploatacji ok. 14 tys. turbin, co odpowiada ok. 50 tys. ton odpadów kompozytowych, a do 2040 r. ilość ta zwiększy się dziesięciokrotnie.

Materiał GFRP, będący kompozytem żywicy i włókien szklanych, cechuje się dużą wytrzymałością przy niewielkim ciężarze i jest odporny na warunki atmosferyczne. W związku z tym stosuje się go do produkcji łopat turbin wiatrowych. Problematyczne jest jednak przetwarzanie łopat po okresie ich użytkowania. Recykling materiałów kompozytowych GFRP wciąż stanowi duży problem. Wykorzystywane są różne metody odzyskiwania materiału, najpowszechniejsze z nich to recykling

[1)] Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
[2)] Politechnika Białostocka, Szkoła Doktorska
[*)] Correspondence address: filip.broniewicz@pb.edu.pl

bed. The chemical recycling methods, such as low temperature solvolysis are less well known, but they allow to recover high quality glass fibres and textiles that retain their mechanical properties. They are however harmful to the environment and costly, involving high consumption of energy [2, 3]. The disposition of wind turbine blades in storage is troublesome due to the legal considerations.

## Formal and Legal Conditions for Waste Management from Wind Power Plants

A wind turbine consists of a foundation, tower (pole), nacelle and rotor blades. The foundations are made of concrete and steel, which is also used for the tower, while nacelle components are made of steel, copper, and silica. It is estimated that 85% of the turbine's mass (steel, aluminium) is subject to standard recycling processes [4, 5].

According to the Waste Directive 2008/98/EC [6], which is the key EU legal act concerning waste management, decommissioned wind turbine blades are classified as plastic waste from demolition and construction activities under code 17 02 03. Until 2020, it was required to achieve 70% (by weight) of their recycling or reuse level. Blades with a high epoxy resin content (30%) are treated as "hazardous waste" under code 17 06 03*, and due to the risk of toxic substance emissions during decomposition, they cannot be landfilled. The legislation also introduces a ban on landfilling all recyclable waste, which forces the development of processing methods. Under the directive, turbine manufacturers are obligated to finance, organize logistics, transport, and process used components. The directive also regulates transboundary waste movement, introducing a notification procedure for the export of, for example, used composite elements. Wind turbine blades containing more than 10% epoxy resin (organic substances) require special storage conditions (including chambers with degassing systems and methane emission monitoring for 30 years).

In 2022, WindEurope, representing the wind energy sector, presented key recommendations for changes in EU regulations, including a ban on the landfilling of composite waste from 2025. Four European countries, including Germany, have already adapted their laws to these recommendations and banned the landfilling of wind turbines. The organization also calls for the introduction of dedicated waste codes in the EU for composite materials (currently, composite waste is assigned eight different waste codes, making waste stream tracking impossible) and the establishment of composite recycling targets at 50% by 2030 and 70% by 2035.

The Regulation of the Polish Minister of Climate of January 2, 2020, on the waste catalogue [7] implements the European Waste Catalogue (EWC) into the Polish legal system and classifies decommissioned wind turbine blades as plastic waste (code 17 06 04/code 17 06 04* for composite plastics with resins) or glass fibre waste (code 17 09 04*). Entities generating and managing waste are obliged to keep records of waste mass according to the catalogue specified in the regulation. Pursuant to the amended EU Waste Directive, from 2025,

termiczny, który obejmuje pirolizę, pirolizę mikrofalową oraz procesy recyklingu w złożu fluidalnym. Metody recyklingu chemicznego, np. solwoliza w niskiej temperaturze, lub sub- i nadkrytyczna są mniej znane, ale umożliwiają odzyskanie bardzo dobrej jakości włókien i tkanin szklanych przy zachowaniu ich właściwości mechanicznych. Są jednak szkodliwe dla środowiska i kosztowne, co wiąże się z dużym zużyciem energii [2, 3]. Łopaty turbin wiatrowych to odpady kłopotliwe w składowaniu, co wynika z uwarunkowań prawnych.

## Uwarunkowania formalnoprawne zarządzania odpadami z elektrowni wiatrowych

Turbina wiatrowa składa się z fundamentu, wieży (słupa), gondoli oraz łopat wirnika. Fundamenty są z betonu i stali, z której wykonany jest też trzon, natomiast elementy gondoli ze stali, miedzi i krzemionki. Szacuje się, że 85% masy turbiny (stal, aluminium) podlega standardowemu recyklingowi [4, 5].

Zgodnie z Dyrektywą Odpadową 2008/98/WE [6], stanowiącą kluczowy akt prawny UE dotyczący gospodarki odpadami, wycofane z eksploatacji łopaty turbin wiatrowych klasyfikowane są jako odpady z tworzyw sztucznych pochodzące z rozbiórek i budów o kodzie 17 02 03, a do 2020 r. wymagane było osiągnięcie 70% (wagowo) poziomu ich recyklingu lub ponownego użycia. Łopaty turbin o dużej zawartości żywicy epoksydowej (30%) traktowane są jako „odpady niebezpieczne" o kodzie 17 06 03* i w związku z ryzykiem emisji substancji toksycznych podczas rozkładu nie mogą być składowane. Akt prawny wprowadza jednocześnie zakaz składowania odpadów nadających się do recyklingu, co zmusza do opracowania metod ich przetwarzania. W ramach zapisów dyrektywy producenci turbin zostali zobligowani do finansowania, logistyki, transportu oraz przetwarzania zużytych elementów. Dyrektywa reguluje też transgraniczne przemieszczanie odpadów, wprowadzając procedurę zgłoszeniową eksportu np. zużytych elementów kompozytowych. Łopaty turbin wiatrowych zawierające ponad 10% żywicy epoksydowej (substancji organicznych) wymagają specjalnych warunków składowania (m.in. komór z systemem odgazowania i monitorowania emisji metanu przez 30 lat).

W 2022 r. organizacja WindEurope reprezentująca branżę energetyki wiatrowej przedstawiła kluczowe rekomendacje dotyczące zmian w regulacjach UE, m.in. zakaz składowania odpadów kompozytowych od 2025 r. Cztery kraje europejskie, w tym Niemcy, dostosowały już prawo do tych zaleceń i zakazały składowania turbin wiatrowych. Organizacja postuluje również wprowadzenie dedykowanych kodów odpadów w UE w przypadku materiałów kompozytowych (obecnie odpadom kompozytowym przypisywane jest 8 różnych kodów odpadów, co uniemożliwia śledzenie strumieni odpadów) i ustanowienie celów dotyczących recyklingu kompozytów na poziomie 50% do 2030 r. i 70% do 2035 r.

Rozporządzenie Ministra Klimatu z 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów [7] wdraża Europejski Katalog Odpadów (EWC) do polskiego systemu prawnego i kwalifikuje wycofane z eksploatacji łopaty turbin wiatrowych jako odpady z tworzywa sztucznego (kod 17 06 04/kod 17 06 04* tworzywa kompozy-

the landfilling of composite waste containing more than 10% resin in ordinary landfills is also prohibited. Currently, in Poland, only three waste landfills meet the conditions for such storage, but they do not accept this type of waste. In practice, there is therefore no possibility of legally landfilling wind turbine blades in Poland.

The introduction of this regulation significantly increases production costs (requiring the securing of recycling costs amounting to 5% of the turbine's value) and the disposal of wind turbine waste and generates other technological barriers related to their processing. There are still no regulations in Poland governing the recycling of wind turbine blades or separate waste codes for wind turbine composites. It is estimated that composite blades constitute about 15% of the turbine's mass, while their disposal cost accounts for 90% of the total cost of wind turbine disposal [8, 9].

Given the current legal situation, alternative solutions for managing used wind turbine blades are being sought. One of them is reusing blades to produce acoustic barriers. This would allow the composite material's lifespan to be extended up to twofold, significantly reducing its carbon and environmental footprint.

## Structure of composite road noise barrier panel

Two types of GFRP laminate are used to make the wind turbine blade, from which the acoustic screen panel's elements are cut. The load-bearing core is made from solid laminate, consisting only of reinforced laminas. The other fragments are sandwich laminate, in which the thin reinforced layers are separated by a lightweight core layer, in this case balsa wood. This type of structure allows to significantly lower the weight of the blade with only a minor loss in stiffness. Moreover, balsa wood exhibits sound-proofing abilities, which enables the use of sandwich laminates as a road noise barrier panel material. [10÷12]. The properties of the laminates are shown in Table 1.

The road noise barrier was made of IPE 160 steel columns and a composite acoustic panel. The panel measured 4000x4000 mm. According to EN 1794 standard requirements, an intermediate column was inserted at a distance of 1000 mm from the edge of the panel. The acoustic panel consists of the peripheral frame made of C-shaped aluminium profiles and an infill of GFRP sandwich composite elements in the form of strips cut from the turbine blades. The strips' dimensions are 300×3000 mm, they are joined with VHB type tapes. The shape of the panel corresponds to the shape of the typical acoustic barrier panel, which allows it to replace the existing panels when their useful life ends. The examined panel is shown in Photo1.

## European standards' requirements

European standards stipulate that an acoustic screen must be designed as an independent load-bearing structure. The requirements concern the structural properties of the panels, their stiff-

towe z żywicami) lub z włókna szklanego (kod 17 09 04*). Podmioty wytwarzające i gospodarujące odpadami są zobligowane do prowadzenia rejestru masy odpadów wg katalogu odpadów zawartego w rozporządzeniu. Zgodnie z zapisami nowelizacji Dyrektywy Odpadowej UE, od 2025 r. wprowadzono również zakaz składowania na zwykłych składowiskach odpadów kompozytowych o zawartości żywicy powyżej 10%. Obecnie w Polsce tylko trzy składowiska odpadów spełniają warunki do ich składowania, ale nie przyjmują tego typu odpadów. W praktyce nie ma więc możliwości legalnego składowania łopat turbin wiatrowych w Polsce. Wprowadzenie tego zarządzenia znacznie zwiększa koszty produkcji (wymaganie zabezpieczenia pokrycia kosztów recyklingu w kwocie 5% wartości turbiny) i utylizacji odpadów z turbin wiatrowych oraz generuje inne bariery technologiczne dotyczące ich przetwarzania. W dalszym ciągu w Polsce nie ma przepisów regulujących recykling łopat turbin wiatrowych oraz osobnych kodów odpadów w przypadku kompozytów z turbin wiatrowych. Szacuje się, że łopaty kompozytowe stanowią ok. 15% masy turbiny, natomiast ich koszt utylizacji to 90% całkowitego kosztu utylizacji turbiny wiatrowej [8, 9].

Ze względu na istniejący stan prawny, poszukuje się rozwiązań zagospodarowania zużytych łopat turbin wiatrowych, które są alternatywne do ich składowania. Jednym z nich jest ponowne wykorzystanie łopat do wytwarzania paneli ekranów akustycznych. Pozwoliłoby to na przedłużenie życia materiału kompozytowego nawet dwukrotnie, co znacznie obniżyłoby jego ślad węglowy i środowiskowy.

## Konstrukcja kompozytowego ekranu drogowego

Łopata turbiny wiatrowej, z której wycinane są elementy tworzące panel ekranu akustycznego, złożona jest z dwóch typów laminatu GFRP. Fragmenty części nośnej są z laminatu litego, składającego się tylko z matrycy polimerowej zbrojonej włóknem szklanym, a pozostałe fragmenty z laminatu typu sandwich, w którym dwie cieńsze warstwy kompozytowe są przedzielone lekką warstwą rdzeniową, w badanym przypadku balsą. Taka konstrukcja pozwala na zmniejszenie ciężaru łopaty, przy niewielkiej utracie sztywności. Balsa wykazuje właściwości dźwiękochłonne, co umożliwia wykorzystanie laminatu typu sandwich jako panelu akustycznego w ekranie drogowym [10÷12]. Właściwości poszczególnych laminatów przedstawiono w tabeli 1.

Ekran drogowy zbudowany został ze słupów stalowych IPE 160 oraz kompozytowego panelu akustycznego o wymiarach 4000×4000 mm. Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1794 wbudowano słupek pośredni w odległości 1000 mm od krawędzi panelu. W skład panelu akustycznego wchodzi rama obwodowa z profili aluminiowych typu C oraz wypełnienie z elementów kompozytowych GFRP w postaci pasów wyciętych z łopat turbin wiatrowych. Pasy mają wymiary 300×3000 mm oraz 300×1000 mm i są ze sobą połączone taśmami typu VHB. Kształt panelu akustycznego odpowiada kształtowi konwencjonalnego ekranu akustycznego, co pozwala na zastąpienie nim istniejącego panelu ekranu akustycznego, gdy kończy się jego okres użytkowania. Na fotografii 1 przedstawiono badany panel akustyczny.

**Table 1. Mechanical properties of the laminates included in the turbin blade**
*Tabela 1. Właściwości mechaniczne laminatów wchodzących w skład łopaty*

| Properties/Właściwości | Laminate C/ Laminat typu C | Laminate D (sandwich)/ Laminat typu D (sandwich) | |
|---|---|---|---|
| | | outer layers/ warstwy zewnętrzne | core (balsa)/ rdzeń (balsa) |
| | Characteristic values/wartości charakterystyczne | | |
| Thickness – t [mm]/ Grubość – t [mm] | 29,6 | 3,0 | 24,0 |
| Young's modulus in the Z direction – $E_z$ [GPa]/ Moduł Younga w kierunku Z – $E_z$ [GPa] | 24,8 | 5,9 | (0,61–6,6) |
| Young's modulus in the Y direction – $E_y$ [GPa]/ Moduł Younga w kierunku Y – $E_y$ [GPa] | 6,4 | 6,5 | (0,013–0,098) |
| Kirchhoff's module $G_{yz}$ [GPa]/ Moduł Kirchhoffa – $G_{yz}$ [GPa] | 2,7 | 3,1 | (0,04–0,36) |
| Own weight/ Ciężar własny – $\rho$ [kg/m$^3$] | 1976 | 1976 | 163 |
| Compressive strength in the Z direction – $Z_{Ck}$ [MPa]/ Nośność na ściskanie w kierunku Z – $Z_{Ck}$ [MPa] | 344,2 | 217,7 | – |
| Compressive strength in the Y direction – $Y_{Ck}$ [MPa]/ Nośność na ściskanie w kierunku Y – $Y_{Ck}$ [MPa] | 145,8 | 159,7 | – |
| Tensile strength in the Z direction – $Z_{Tk}$ [MPa]/ Nośność na rozciąganie w kierunku Z – $Z_{Tk}$ [MPa] | 405,8 | 88,5 | – |
| Tensile strength in the Y direction – $Y_{Tk}$ [MPa]/ Nośność na rozciąganie w kierunku Y – $Y_{Tk}$ [MPa] | 52,8 | 119,5 | – |
| Shear strength – $S_{yz}$ [MPa]/ Nośność na ścinanie – $S_{yz}$ [MPa] | 26,4 | 44,2 | (1,3–3,1) |

ness, load-bearing capacity, and acoustic performance. According to the standards, no permanent deformations of the screen components caused by applied loads are permitted, and the material from which the acoustic panel is made must not exhibit cracks or delaminations. The permissible values of elastic deformations for acoustic panels made of composite materials, due to wind loads or gusts from passing vehicles, are presented in Table 2.

## Numerical analysis

A numerical analysis was conducted using the Finite Element Method (FEM). Based on measurements of an existing wind turbine blade, a three-dimensional model was created to represent a fifteen-meter section of the blade, measured from the turbine rotor axis. This section was divided into three-meter segments, from which strips forming the acoustic panel were cut. Figure 1 shows the three-dimensional model of the blade, consisting of five three-meter segments.

The segments were cut into elements forming the panel, each with a width of 300 mm and lengths of 1000 mm and 3000 mm. The strips had sufficiently small curvature to allow their placement within the peripheral frame of the panel. Consequently, segments located closer to the rotor axis were excluded. Figure 2 presents a schematic division of the blade segment into strips that will form the acoustic screen panel.

## Wymagania norm europejskich dotyczące ekranów drogowych

Normy europejskie zakładają, że ekran akustyczny jest projektowany jako samodzielna konstrukcja nośna. Wymagania dotyczą właściwości konstrukcyjnych paneli, ich sztywności, nośności i właściwości akustycznych. Zgodnie z normami nie mogą występować trwałe odkształcenia elementów składowych ekranu, spowodowane działającymi na nie obciążeniami, a materiał, z którego wykonany jest panel akustycznych, nie może mieć pęknięć i rozwarstwień. Dopuszczalne wartości odkształceń sprężystych paneli akustycznych wykonywanych z materiałów kompozytowych ze względu na obciążenie wiatrem lub podmuchami od przejeżdżających pojazdów przedstawiono w tabeli 2.

## Badania numeryczne

Przeprowadzono badanie numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Na podstawie pomiarów istniejącej łopaty turbiny wiatrowej utworzono trójwymiarowy model, który odzwierciedla piętnastometrowy fragment łopaty, licząc od osi wirnika turbiny. Fragment ten podzielono na trzymetrowe segmenty, z których wycięto pasy tworzące panel akustyczny. Na rysunku 1 przedstawiono trójwymiarowy model łopaty, składający się z pięciu trzymetrowych segmentów. Segmenty pocięto na elementy tworzące panel o szerokości

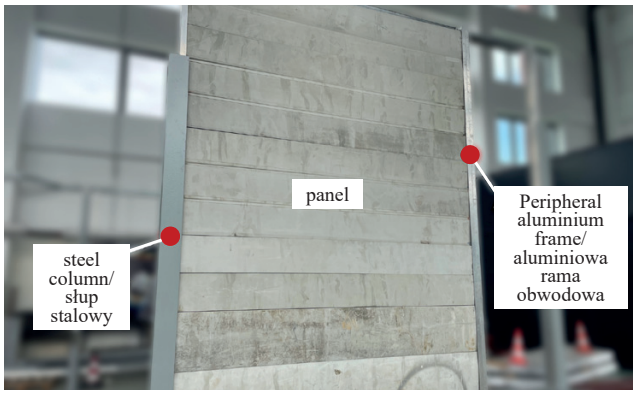


**Photo 1. Prototype of an acoustic screen made of used wind turbine blades**
*Fot. 1. Prototyp ekranu akustycznego wykonanego z pożytkowych łopat turbin wiatrowych*

**Table 2. Requirements for deformation of structural and acoustic screen elements**
*Tabela 2. Wymagania dotyczące odkształceń elementów konstrukcyjnych i akustycznych ekranu*

| Elastic deformation/ Odkształcenia sprężyste | | Non-reversible deformation/ Odkształcenia trwałe | |
|---|---|---|---|
| element | | | |
| Structural/ konstrukcyjny | Acoustic/ akustyczny | Structural/ konstrukcyjny | Acoustic/ akustyczny |
| $d_{h.max} = \frac{L_S}{150}$ | 50 mm | $d_{h.max} = \frac{L_S}{150}$ | $d_{h.max} = \left\{ \frac{L_A}{150} \; \frac{h}{500} \right\}$ |

Oznaczenia:
$L_S$ – the length of the structural element/długość elementu [mm];
$L_A$ – the largest length of the acoustic element/długość element akustycznego [mm];
$h$ – total height of the acoustic element/całkowita wysokość elementu akustycznego [mm]

From the obtained elements, a model of the acoustic panel was assembled and subjected to a FEM strength analysis. The material properties of the type D laminate, including balsa wood, were assigned to the elements using the Ansys Composite PrePost (ACP) module within the ANSYS software. The model was discretized with a FE mesh, with an approximate edge length of 5 centimetres. To replicate the boundary conditions corresponding to the mounting method of the acoustic screen panel, translational degrees of freedom were constrained for the nodes located along the shorter edges of the strips. The stresses obtained from the FE analysis were used to assess the load-bearing capacity of the panel according to the composite material failure criteria specified in [13]. The assessment was successful: the maximum composite utilization reached 82%, calculated for the outer laminate layer failure under tension.

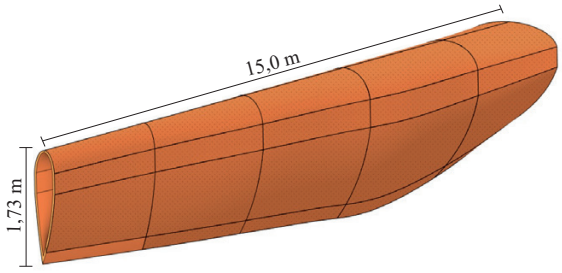


**Fig. 1. Three-dimensional FEM model of a wind turbine blade**
*Rys. 1. Trójwymiarowy model MES łopaty turbiny wiatrowej*

## Experimental analysis

Experimental tests of the acoustic panel were conducted at full scale on a dedicated test stand. The panel elements were cut from used wind turbine blades, following the specifications established during the development of the computational model. The cut elements were joined together on both sides using tape along their longer edges, and the assembled panel was then placed within a peripheral aluminium frame to provide structural support. The constructed panel was subjected to load tests designed to verify compliance with the relevant standards and norms. The panel was positioned horizontally on the test stand and supported in a hinged manner along two

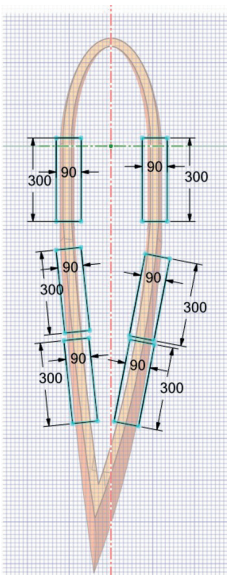


**Fig. 2. Scheme of dividing the blade segment into strips**
*Rys. 2. Schemat podziału segmentu łopaty na pasy*

300 mm i długości 1000 mm i 3000 mm. Pasy miały na tyle małą krzywiznę, aby można było je umieścić w ramie obwodowej panelu. W związku z tym segmenty znajdujące się bliżej osi wirnika odrzucono. Na rysunku 2 przedstawiono schemat podziału segmentu łopaty na pasy, które będą tworzyły panel akustyczny ekranu.

Z uzyskanych elementów złożono model panelu akustycznego, który został poddany analizie wytrzymałościowej MES. Właściwości materiałowe laminatu typu D, w tym drewna balsa, przyporządkowano elementom przy wykorzystaniu modułu Ansys Composite PrePost (ACP) zawartego w oprogramowaniu ANSYS. Model zdyskretyzowano siatką elementów skończonych o przybliżonej długości krawędzi 5 cm. W celu odtworzenia warunków brzegowych odpowiadających sposobowi zamocowania panelu ekranu akustycznego, odebrano translacyjne stopnie swobody węzłów znajdujących się wzdłuż krótszych krawędzi pasów. Naprężenia uzyskane z analizy MES posłużyły do oceny nośności panelu zgodnie z kryteriami zniszczenia materiału kompozytowego, określonymi w [13]. Ocena przebiegła pomyślnie, największe wytężenie kompozytu wynosiło 82% i zostało obliczone w przypadku kryterium uszkodzenia warstwy zewnętrznej laminatu przy rozciąganiu.

## Badania doświadczalne

Badania doświadczalne panelu akustycznego przeprowadzono w skali naturalnej na stendzie badawczym. Elementy wycięto z pożytkowych łopat turbin wiatrowych zgodnie z założeniami przyjętymi przy tworzeniu modelu komputerowego. Następnie połączono je ze sobą obustronnie taśmą wzdłuż dłuższych boków i umieszczono w ob-

edges, replicating the actual working conditions of the panel as it would be mounted in the load-bearing posts of a road acoustic screen. This testing approach ensured that the experimental conditions closely mirrored real-world operational scenarios, providing reliable data on the panel's performance under load. A uniformly distributed load of 1200 N/m², in accordance with standard requirements, was then applied to the panel. Deflection was measured at three locations within the central zone of the panel. The test stand setup is shown in Photo 2, and the maximum deflection readings are presented in Table 3. During inspection, no cracks or delaminations of the laminate were observed. After the load was removed, the panel returned to its original shape without any permanent deformation. Based on the test results and observations, it can be concluded that the prototype panel met the requirements for load-bearing capacity and stiffness.

wodowej ramie aluminiowej. Tak utworzony panel poddano testom obciążeniowym w celu sprawdzenia norm przedmiotowych. Element umieszczono poziomo na stanowisku badawczym i podparto przegubowo wzdłuż dwóch boków, odwzorowując rzeczywiste warunki pracy panelu w słupach nośnych ekranu drogowego. Następnie przyłożono do niego obciążenie równomiernie rozłożone o wartości 1200 N/m², co odpowiada wymaganiom normowym. Ugięcie panelu mierzono w trzech miejscach w strefie środkowej panelu. Widok stanowiska badawczego pokazano na fotografii 2, a maksymalne odczyty ugięcia panelu w tabeli 3. Podczas oględzin panelu nie zauważono żadnych pęknięć ani rozwarstwień laminatu. Po usunięciu obciążenia panel powrócił do swojego początkowego kształtu nie doznając trwałych odkształceń. Z wyników badań oraz obserwacji można wnioskować, że prototypowy panel spełnił wymagania dotyczące nośności i sztywności.

**Photo 2. View of the research stand**
*Fot. 2. Widok stanowiska badawczego*

**Table 3. Measured deflection value**
*Tabela 3. Pomierzone wartości ugięcia*

| Deflection type/Rodzaj ugięcia | Value/Wartość | |
|---|---|---|
| | Measured/ zmierzona [mm] | Permissible/ dopuszczalna [mm] |
| Immediate/Natychmiastowe | 25 | 50 |
| After two weeks/ Długotrwałe – po dwóch tygodniach | 26 | 50 |
| After two months/ Długotrwałe – po dwóch miesiącach | 29 | 50 |

## Conclusions

The issue of managing wind turbine blades is expected to become increasingly significant, as a large number of turbines have been commissioned in recent years. The available recycling methods are energy-intensive or do not allow for the production of valuable recyclates. Current legal regulations prohibit the landfilling of hazardous waste, such as composite wind turbine blades, which necessitates the development of recycling methods, including advancements in composite processing technologies. An alternative solution may involve using composite material from blades to manufacture acoustic screen panels. Due to the characteristic sandwich structure of the laminate, this material serves as an effective panel infill, as it demonstrates favourable mechanical and acoustic properties.

Analysis of the three-dimensional model of the wind turbine blade enabled the selection of sections suitable for forming a rectangular composite panel. These sections were required to have appropriate geometry, with curvature not exceeding acceptable limits. The application of the finite element method for the strength analysis of the panel demonstrated that it possesses sufficient stiffness and strength to function effectively as an acoustic panel in road noise barriers. The possibility of panel failure under loading has been assessed by examining the failure criteria of sandwich type laminates.

Strength tests of the acoustic panel prototype demonstrated that it possesses sufficient load-bearing capacity and stiffness.

## Wnioski

Problem zagospodarowania łopat turbin wiatrowych będzie coraz większy, ponieważ bardzo dużo turbin oddano do użytkowania w ostatnich latach. Dostępne metody recyklingu są energochłonne albo nie pozwalają na wytwarzanie wartościowych recyklatów. Obowiązujące akty prawne wprowadzają zakaz składowania odpadów niebezpiecznych, jakimi są kompozytowe łopaty turbin wiatrowych, co zmusza do opracowania metod ich recyklingu m.in. przez rozwój technologii przetwarzania kompozytów. Alternatywą może być wykorzystanie materiału kompozytowego z łopat do tworzenia paneli ekranów akustycznych. Ze względu na charakterystyczną budowę laminatu typu sandwich, materiał ten stanowi dobre wypełnienie paneli, ponieważ wykazuje pozytywne właściwości mechaniczne i akustyczne.

Analiza trójwymiarowego modelu łopaty turbiny wiatrowej pozwoliła wybrać fragmenty, które mogą tworzyć prostokątny panel kompozytowy. Powinny one mieć odpowiednią geometrię, a ich krzywizna nie może być zbyt duża. Zastosowanie metody elementów skończonych do analizy wytrzymałościowej panelu pokazało, że charakteryzuje się on wystarczającą sztywnością oraz wytrzymałością, aby pełnić funkcję panelu akustycznego w ekranach drogowych. Zweryfikowano możliwość uszkodzenia panelu pod obciążeniem przez zbadanie kryteriów zniszczenia laminatów typu sandwich.

Badania wytrzymałościowe prototypu panelu akustycznego wykazały, że charakteryzuje się on wystarczającą nośnością i sztywnością. Maksymalne ugięcie pod obciążeniem wynio-

The maximum deflection under load was 29 mm, which accounted for 58% of the permissible value. Furthermore, after the load was removed, no structural defects such as cracks or delaminations were observed in the panel.

The next stage in analysing the potential use of wind turbine blade elements as acoustic screens will involve acoustic testing of the panel. The sound absorption level of the composite material and the sound reflection level of the screen structure will be evaluated. A positive outcome from these tests will enable the commencement of work on the large-scale implementation of this solution in production.

sło 29 mm, co stanowiło 58% wartości dopuszczalnej. Ponadto po usunięciu obciążenia nie zauważono wad struktury panelu, typu pęknięcia czy rozwarstwienia.

Kolejnym etapem analizy możliwości wykorzystania elementów z łopat turbin wiatrowych jako ekranów będą badania akustyczne panelu. Oceniony zostanie poziom pochłaniania dźwięku przez materiał kompozytowy oraz poziom odbijania dźwięku przez konstrukcję ekranu. Pozytywny wynik badań pozwoli na rozpoczęcie prac nad masowym wprowadzeniem tego rozwiązania do produkcji.

*The research was funded by a special grant from the Minister of Education and Science, agreement number MEiN/2022/DPI/2577, as part of the VIA CARPATIA Polytechnic Network named after the President of the Republic of Poland, Lech Kaczyński.*

*Praca finansowana ze specjalnego grantu Ministra Edukacji i Nauki, numer umowy MEiN/2022/DPI/2577 w ramach politechnicznej sieci VIA CARPATIA im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego.*

*Received: 10.02.2025*
*Revised: 25.03.2025*
*Published: 23.07.2025*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 10.02.2025 r.*
*Otrzymano poprawiony po recenzjach: 25.03.2025 r.*
*Opublikowano: 23.07.2025 r.*

## Literature

**[1]** Schmid M, Nieves Gonzalez R, Dierckx A, Wegman T. Accelerating Wind Turbine Blade Circularity, WindEurope, maj 2020.

**[2]** Spini F, Bettini P. End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies. Composites Part B: Engineering, t. 275, s. 111290, 2024, doi: 10.1016/j.compositesb.2024.111290

**[3]** Leahy PG. „End-of-life Options for Composite Material Wind Turbine Blades: Recover, Repurpose or Reuse? ", zaprezentowano na 14th SWEDES Conference, Dubrovnik, Chorwacja 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.16039.37287.

**[4]** Sobaszek Ł, Piasecka I, Flizikowski J, Tomporowski A, Sokolovskij E, Bałdowska-Witos P. Environmentally Oriented Analysis of Benefits and Expenditures in the Life Cycle of a Wind Power Plant. Materials, t. 16, nr 2, s. 538, sty. 2023, doi: 10.3390/ma16020538

**[5]** Haapala KR, Prempreeda P. Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. International Journal of Sustainable Manufacturing, t. 3, nr 2, s. 170, 2014, doi: 10.1504/IJSM.2014.062496

**[6]** Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy – EUR-Lex.

**[7]** Rozporządzenie Ministra Klimatu Rzeczypospolitej Polskiej z 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów.

**[8]** Heng H, Meng F, McKechnie J. Wind turbine blade wastes and the environmental impacts in Canada. Waste Management, t. 133, s. 59–70, wrz. 2021, DOI: 10.1016/j.wasman.2021.07.032

**[9]** Liu P, Barlow CY. Wind turbine blade waste in 2050. Waste Management, t. 62, s. 229–240, 2017, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.007.

**[10]** Sargianis JJ, Kim HI, Andres E, Suhr J. Sound and vibration damping characteristics in natural material based sandwich composites. Composite Structures, t. 96, s. 538–544, luty 2013, DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.09.006

**[11]** Jang ES, Kang CW. Sound absorption characteristics of three species (binuang, balsa and paulownia) of low density hardwood. Holzforschung, t. 75, nr 12, s. 1115–1124, grudz. 2021, DOI: 10.1515/hf-2021–0049

**[12]** Zhang J, Shen Y, Jiang B, Li Y. Sound Absorption Characterization of Natural Materials and Sandwich Structure Composites. Aerospace, t. 5, nr 3, s. 75, lip. 2018, doi: 10.3390/aerospace5030075

**[13]** Ascione L i in. DESIGN OF FIBRE-POLYMER COMPOSITE STRUCTURES (CEN/TS 19101): OVERVIEW, COMMENTARY AND WORKED EXAMPLES", cze. 2023, doi: 10.5281/ZENODO.8066345