

PRZEGLĄD APLIKACJI ZUŻYTYCH ŁOPAT TURBIN WIATROWYCH NA POTRZEBY BUDOWNICTWA INFRASTRUKTURALNEGO

Jakub ZEMBRZUSKI*, Mikołaj MIŚKIEWICZ*, Agnieszka SABIK*,
Łukasz PYRZOWSKI*, Jacek CHRÓŚCIELEWSKI*, Krzysztof WILDE*

*) Politechnika Gdańska

Streszczenie

Artykuł zawiera przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat recyklingu i możliwości ponownego użycia łopat wirników turbin wiatrowych w budownictwie infrastrukturalnym. W związku z intensywnym rozwojem energetyki wiatrowej problematyka ta staje się coraz bardziej istotna. Prognozy i statystyki wskazują, że najbliższe lata będą wymagały opracowania metod utylizacji narastającej ilości odpadów z wycofanych z użytku łopat turbin wiatrowych jeszcze bardziej niż kiedykolwiek. Autorzy zwracają uwagę na trudności związane z recyklingiem tych odpadów, ale jednocześnie podkreślają znaczny potencjał zużytych elementów do zastosowań konstrukcyjnych. Wynika on z atrakcyjnych właściwości zastosowanych do budowy łopat kompozytowych, jak również ze znacznych rozpiętości, jakie łopaty wirników turbin wiatrowych osiągają. W opracowaniu zaprezentowano przykłady istniejących obiektów, w konstrukcji których istotną rolę odgrywają łopaty turbin wiatrowych, oraz śmiałe koncepcje, pokazujące szerokie możliwości zastosowania zdemontowanych łopat, także w budownictwie, a w szczególności w branży mostowej. Wnioski płynące z przedstawionego w artykule przeglądu dostępnej literatury, wskazują, że temat poszukiwania efektywnego rozwiązania problemu recyklingu łopat turbin wiatrowych jest nadal aktualny, a kreatywne i nowatorskie propozycje projektantów stale poszerzają horyzonty w postrzeganiu elementów z recyklingu w zastosowaniu w konstrukcjach inżynierskich.

Słowa kluczowe: recykling, łopata turbiny wiatrowej, FRP, most, kładka dla pieszych, budownictwo infrastrukturalne, gospodarka o obiegu zamkniętym.

1. WPROWADZNI

W ostatnich latach coraz większy nacisk kładziony jest na problem ochrony środowiska, przez co terminy takie jak np. zrównoważony rozwój (ang. sustainable development), gospodarka o obiegu zamkniętym (ang. circular economy) czy ograniczanie śladu węglowego (ang. carbon footprint) są coraz częściej stosowane w odniesieniu do praktycznie wszystkich dziedzin ludzkiej

działalności. Zrównoważony rozwój to społeczno-ekonomiczny rozwój współczesnych społeczeństw niezmnijający możliwości zaspokajania potrzeb przyszłym pokoleniom. Gospodarka o obiegu zamkniętym (cyrkularna) to koncepcja zmierzająca do racjonalnego wykorzystania zasobów oraz ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko, poprzez tworzenie zamkniętej pętli procesów, w której powstające odpady traktowane są jako surowce w kolejnych etapach produkcyjnych. Ślad węglowy natomiast, to całkowita emisja gazów cieplarnianych wydzielona podczas pełnego cyklu życia produktu. Z powyższego wynika, że zarówno „gospodarka cyrkularna” jak i „ślad węglowy” są terminami węższymi i zaliczają się niejako do szeroko rozumianego „zrównoważonego rozwoju”.

Według badań przeprowadzonych przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu w 2010 roku, sektorem gospodarki, który najbardziej przyczynił się do emisji CO₂ były energetyka i ciepłownictwo. W świetle koncepcji zmniejszania śladu węglowego jest to zatem sektor wymagający gruntownej przebudowy. Z tego powodu coraz większe znaczenie zdobywają odnawialne źródła energii (OZE), produkujące tzw. „zieloną energię”.

Zgodnie z dyrektywą 2009/29/WE państwa członkowskie UE zobowiązane były do zapewnienia określonego udziału energii z OZE w końcowym zużyciu energii brutto we Wspólnocie w 2020 roku. Dla Polski cel ten wynosił 15% i pomimo wyraźnego wzrostu generacji energii z OZE nie został osiągnięty. W 2020 roku w Polsce ze źródeł odnawialnych produkowanych było około 14% całkowitej energii brutto, z czego aż 63,7% stanowiła energetyka wiatrowa [1]. Liczba powstałych siłowni wiatrowych ciągle rośnie, ale z uwagi na fakt, że w Polsce energetyka wiatrowa jest stosunkowo „młoda” technologią, recykling zużytych łopat wiatrowych nie jest jeszcze istotnym problemem. Sytuacja kształtuje się zupełnie inaczej w krajach, które dużo wcześniej zaczęły inwestować w ten typ odnawialnych źródeł energii, ponieważ po 20-25 latach [2] łopata turbiny wiatrowej zgodnie z założeniami projektowymi musi zostać wycofana z eksploatacji. Tam, ilość odpadów związanych z energetyką wiatrową stała się realnym problemem, a w związku z przewidywanym w najbliższych latach rozwojem tej branży, sytuacja w nieodległej przyszłości stanie się jeszcze trudniejsza. Szacuje się, że do roku 2050 globalne zasoby energii wiatrowej osiągną blisko 100 gigawatów rocznie, czego skutkiem będzie wycofanie z użytku w sumie 43 milionów ton łopat turbin wiatrowych, a po roku 2050 wycofywane z użytku będą około 2 miliony ton tego typu materiału rocznie. Największy udział w produkcji tych odpadów będą miały Chiny (40%), następnie Europa (25%), USA (16%) oraz reszta świata (19%) [3]. Powyższe stacystyki wskazują, że aby energia elektryczna produkowana w wyniku działania elektrowni wiatrowych była rzeczywiście przyjazna środowisku i zgodna z podstawowymi założeniami gospodarki cyrkularnej, należy zadbać nie tylko o bezemisyjność produkcji, ale



także o strategię zarządzania wycofanymi z użytku (ang. EOL – end-of-life) komponentami infrastruktury związanej z energetyką wiatrową.

2. ŁOPATY WIRNIKÓW TURBIN WIATROWYCH

Łopaty wirników turbin wiatrowych są podstawowym, a zarazem najważniejszym elementem całej turbiny wiatrowej. W dużej mierze to od ich budowy zależy efektywność produkcji energii elektrycznej. Odgrywają one kluczową rolę w pracy całej elektrowni, nie tylko od strony konstrukcyjnej, ale również ekonomicznej.

2.1. Funkcja łopaty turbiny wiatrowej

Podstawową funkcją łopaty jest przejęcie siły wiatru i wprowadzenie w ruch rotora (wirnika) elektrowni, który przy pomocy przekładni połączonej z wałem napędza generator prądotwórczy. Aby efektywnie wykorzystać siłę wiatru, elektrownia wyposażona jest w systemy pomiarowe odpowiedzialne za zbieranie informacji o kierunku i prędkości wiatru, na podstawie których zarówno cała gondola (element, wewnątrz którego znajdują się przekładnia, wał i generator) jak i łopaty ustawiane są pod kątem zapewniającym optymalne warunki pracy całej turbiny.

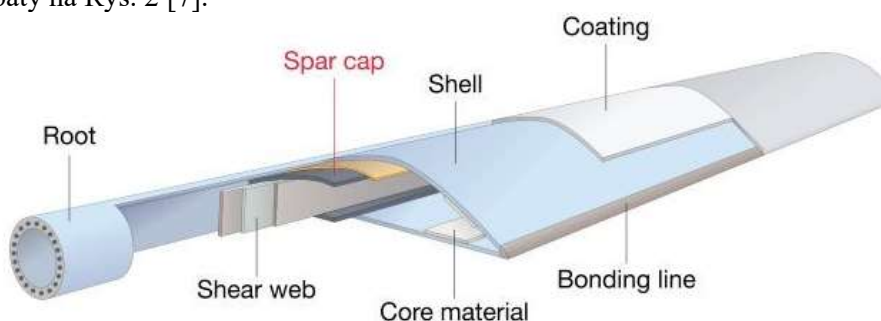
2.2. Materiał i budowa

Do najważniejszych wymagań stawianych konstrukcji łopaty należą: optymalne wykorzystanie siły wiatru, niski ciężar własny, duża sztywność, niski poziom emisji hałasu oraz wysoka odporność na degradacyjne działanie czynników atmosferycznych.

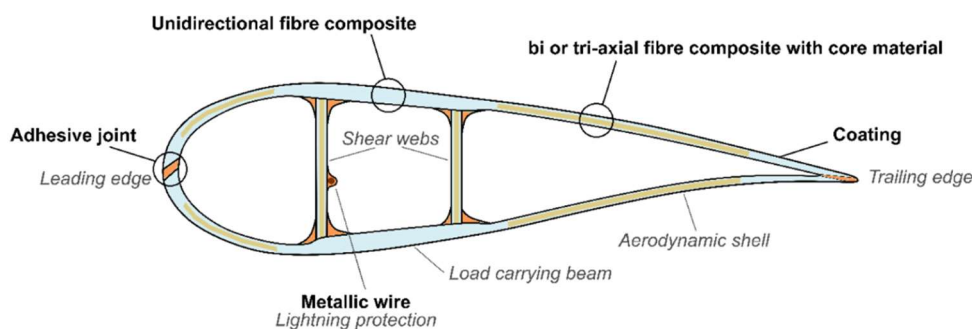
W spełnieniu tych wymagań kluczowe znaczenie ma dobór materiału konstrukcyjnego łopaty. Współcześnie łopaty turbin wiatrowych wykonywane są praktycznie w całości z kompozytu zbrojonego tkaninami, najczęściej z włókna szklanego (GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymer), a także, chociaż rzadziej, wykorzystywane do tego celu bywają również włókna węglowe (CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer). Zawartość włókien w laminacie stanowi zwykle około 60% jego całej objętości [4]. Kompozyt to materiał nieposiadający prostej i jednoznacznej definicji, jednak w dużym uproszczeniu, można scharakteryzować go jako materiał złożony co najmniej z dwóch różnych materiałów (faz), o różnych właściwościach, po połączeniu których materiał wypadkowy ma zwykle lepsze cechy niż suma cech materiałów składowych przed połączeniem. Główną zaletą kompozytów konstrukcyjnych jest fakt, że charakteryzują się znacząco wytrzymałością oraz sztywnością, przy jednoczesnym



niskim ciężarze własnym [5]. Dzięki użyciu tego typu materiału łopaty mogą osiągać znaczne rozpiętości, wynoszące nawet 60-80 m [4], przenosić zmienne w czasie obciążenia o różnej wartości, wywoływane przez wiatr i siłę grawitacji, zachowując jednocześnie niewielką masę, a także mogą być kształtowane w sposób umożliwiający osiąganie korzystnych (zmiennych po długości elementu) kształtów przekroju z punktu widzenia aerodynamiki. Budowa przykładowej łopaty turbiny wiatrowej została zaprezentowana na Rys.1 [6], natomiast przekrój łopaty na Rys. 2 [7].



Rys.1. Budowa przykładowej łopaty turbiny wiatrowej [6]



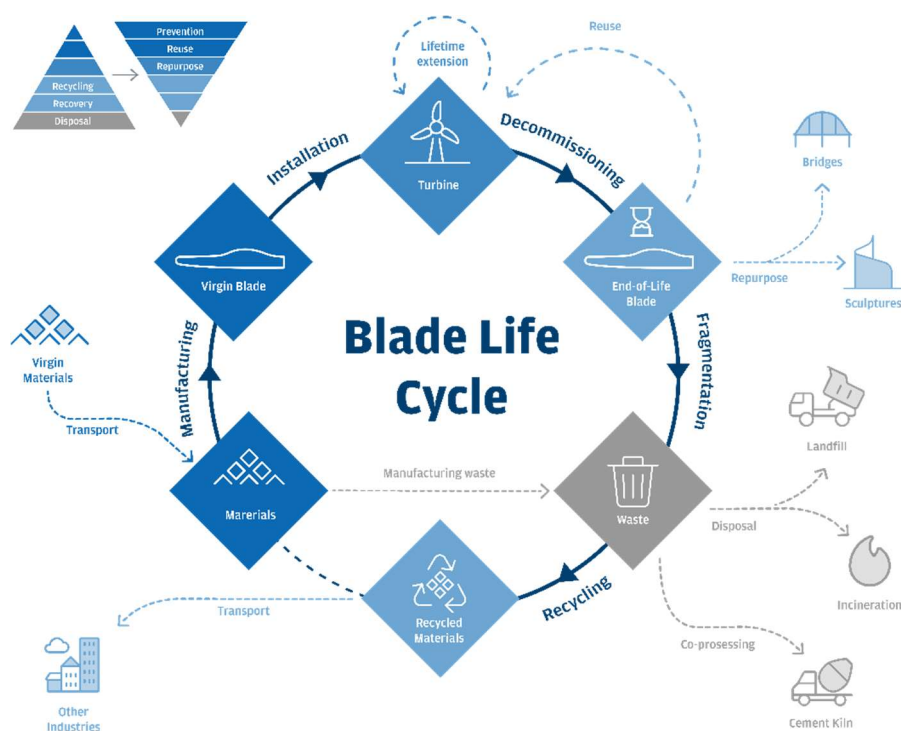
Rys. 2. Typowy przekrój poprzeczny łopaty turbiny wiatrowej [7]

2.3. Cykl życia łopaty turbiny wiatrowej

Standardowy cykl życia łopaty turbiny wiatrowej zaprezentowano na Rys. 3 [8]. Do jego najważniejszych etapów należą produkcja (ang. manufacturing), instalacja (ang. installation), eksploatacja, wycofanie z eksploatacji (ang. decommissioning), rozdrobnienie (ang. fragmentation) i recykling. Schemat



narysowany linią ciągłą jest w pełni zgodny z założeniami gospodarki cyrkularnej. Współcześnie jednak przemysł nie dysponuje technologią, która umożliwiłaby stosowanie takiego podejścia, dlatego konieczne jest korzystanie z alternatywnego postępowania, np. ponownego użycia łopaty czy zmiany jej przeznaczenia (zaznaczone przerywanymi liniami, odchodzącymi od głównego okręgu). Ostatnia z tych możliwości jest szczególnie interesująca z punktu widzenia branży budowlanej.



Rys. 3. Cykl życia łopaty turbiny wiatrowej i podstawowe strategie EOL [8]

3. PROBLEMY, WYZWANIA, POTENCJAŁ I PERSPEKTYWY

Największą zaletą łopaty turbiny wiatrowej w okresie jej eksploatacji - niezwykle wytrzymały, lekki i trwały materiał - staje się jednocześnie największą wadą tego elementu w kontekście jego recyklingu. Komponenty, z których laminaty FRP, wykorzystywane do produkcji łopat, zostały wykonane są praktycznie niemożliwe do odzyskania, a więc całe łopaty nie mogą zostać poddane pełnemu recyklingowi, zgodnemu z założeniami gospodarki cyrkularnej.

Nie oznacza to jednak, że nie istnieją sposoby na odzyskanie choć części materiałów, które można by było użyć następnie do produkcji nowych. Powstało

wiele prac, w których autorzy analizują możliwości zastosowania odzyskanego materiału pod kątem jakości, kosztów, skali, na jaką dane rozwiązanie może być stosowane czy energochłonności [2, 4, 7, 9, 10]. Źródła te wskazują kilka obecnie rozwiniętych strategii. Rodzaje działań podzielić można na 6 głównych grup, z uwagi na stopień efektywności danego rozwiązania:

- zapobieganie (ang. prevention) – polega na zmianie projektu nowo wytwarzanych łopat tak, aby umożliwić ich łatwy, ogólnodostępny i możliwie tani recykling, lub znacznie wydłużyć „żywność” łopat,
- ponowne użycie (ang. reuse) – łopaty sprzedawane na rynku wtórnym (w całości lub w częściach) i używane ponownie w turbinach elektrowni wiatrowych,
- **ponowne użycie ze zmianą przeznaczenia (ang. repurpose)** – łopaty używane są do zupełnie innego celu, niż pierwotnie np. wytwarzane są z nich meble, wiaty, zadaszenia, a nawet dźwigary konstrukcji mostowych,
- recykling (ang. recycling) – rozkład materiału kompozytowego do materiałów składowych, tj. osnowa (żywica) oraz zbrojenie (włókna),
- odzyskiwanie (ang. recovery) – rozdrabnianie i spalanie materiału z wykorzystaniem powstałego ciepła,
- usuwanie (ang. disposal) – spalanie bez wykorzystania powstałego ciepła lub składowanie na wysypiskach.

Strategie przedstawione powyżej zostały uporządkowane w kolejności od najbardziej do najmniej efektywnej, zgodnie z ilustracją (piramidy w lewym górnym rogu), przedstawioną na Rys. 3.

Współcześnie niestety najczęściej stosowaną z wyż. wym. strategii jest składowanie. Łopaty turbin wiatrowych są cięte na mniejsze elementy i transportowane do miejsca składowania, gdzie często są zakopywane. Kolejną wykorzystywaną na szerszą skalę strategią jest odzyskiwanie. Polega ono najczęściej na spalaniu rozdrobnionych wcześniej mechanicznie łopat w piecach cementowych, gdzie osnowa laminatu jest spalana zamiast węgla, przez co zredukowany jest ślad węglowy, natomiast szkło ze zbrojenia (tkanin z włókna szklanego) wykorzystywane jest jako źródło krzemionki w produkcji cementu.

Istnieje wiele metod pozwalających na odzyskanie części „wbudowanego” materiału, jednak wiele z nich umożliwia otrzymanie jedynie surowca o bardzo niskiej jakości lub wymaga zwyczajnie zbyt dużych nakładów energetycznych czy finansowych. Do najpopularniejszych z nich należą rozdrabnianie (mechaniczne), piroliza oraz solwoliza.

Materiał otrzymany w wyniku rozdrobnienia stanowią krótkie, poszarpane włókna o losowej orientacji oraz rozdrobniona osnowa. Surowiec otrzymany w wyniku tego procesu nie nadaje się do użycia jako zbrojenie nowego kompozytu (laminatu), jednak można zastosować go np. jako wypełniacz, pozwalający na ograniczenie zużycia kruszywa w betonie czy osnowy w nowym kompozycie.

Parametry wyrobu z takim dodatkiem bywają jednak najczęściej niższe niż parametry wyrobu bez niego.

Piroliza to proces rozkładu przeprowadzany w wysokiej temperaturze (450-700°C) bez dostępu tlenu. Prowadzi on do rozkładu matrycy kompozytu na gazy węglowodorowe, oleje, smołę i zwęglenia, natomiast włókna szklane nie ulegają rozkładowi. Jest to jednak proces energochłonny, a otrzymane w jego wyniku włókna są znacznie słabsze niż pierwotnie oraz pokryte sadzą, która znacznie ogranicza przyczepność [4].

Solwoliza to proces chemiczny, w którym rozpuszczalnik w wyniku działania wysokiej temperatury i dużego ciśnienia rozpuszcza osnowę kompozytu. Należy jednak wspomnieć, że podobnie jak w przypadku poprzedniej metody, wytrzymałość odzyskanych włókien jest znacznie niższa niż pierwotna, a same włókna również są zanieczyszczone i nie mogą być użyte do produkcji nowych łopat.

Wszystkie z wyżej wymienionych procesów noszą miano „downcyclingu”. Pojęcie to oznacza, że właściwości produktów odzyskanych są niższe niż właściwości tych samych produktów przed przeprowadzeniem procesu. Z powodu spadku parametrów włókien po recyklingu, nie mogą one zostać użyte w taki sam sposób jak włókna nowe, a więc działanie to nie wpisuje się w założenia związane z gospodarką cyrkularną. Tym niemniej, produkty uzyskane wskutek downcyclingu mogą zostać udoskonalone, przeznaczone do innych zastosowań, np. w produkcji nowych materiałów, szeroko stosowanych w budownictwie infrastrukturalnym. W ten sposób możliwe jest ograniczenie zużycia konwencjonalnych materiałów budowlanych, nierzadko droższych i o ograniczonej dostępności.

Nie wszystkie łopaty turbin wiatrowych są jednak wycofywane z eksploatacji z powodu usterki uniemożliwiającej dalszą bezawaryjną pracę. Część z nich zostaje wycofana w wyniku modernizacji elektrowni i po prostu wymieniona na „nowszy model” (ang. repowering), zapewniający wyższą efektywność. Takie łopaty mogą z powodzeniem zastąpić całkowicie zużyte łopaty i pozostać w eksploatacji (ang. reuse) przez kolejne lata.

Strategia polegająca na ponownym użyciu łopaty turbiny wiatrowej, jednak ze zmianą jej przeznaczenia (repurpose) nie pozwoli osiągnąć takiego poziomu efektywności jak ponowne użycie w elektrowni wiatrowej (reuse), ale jest znacznie bardziej korzystna niż składowanie, rozdrabnianie czy spalanie całego lub części kompozytu, a to właśnie te ostatnie praktyki są dzisiaj stosowane najczęściej. W efekcie, postępowanie zwane „reuse” przyczynia się do ograniczenia odpadów składowanych czy spalanych, a więc niewątpliwie ma pozytywny skutek w kontekście celów zrównoważonego rozwoju.

Do tej pory powstało wiele opracowań przedstawiających propozycje nadania „drugiego życia” wycofanym z eksploatacji łopatom turbin wiatrowych [2, 7, 10, 11, 12, 13, 14]. Projektanci i naukowcy dzielą się śmiałymi koncepcjami,



powstały katalogi konstrukcji [15, 17] lub ich elementów, wykonanych ze zużytych łopat turbin wiatrowych. Poza wyobraźnią projektanta istnieje jednak wiele ograniczeń, stanowiących trudność w realizacji tego typu projektów, najważniejsze z nich to: konieczność oceny stanu technicznego wycofanej z użytku łopaty [18], różnorodność geometrii fragmentów, w zależności od producenta i technologii, problematyczny transport łopat o dużych rozpiętościach oraz trudności związane z modelowaniem numerycznym [19, 20, 21].

Pod względem konstrukcyjnym bardzo atrakcyjna jest geometria przekroju łopaty. Na Rys. 2, przedstawiającym jeden z typowych przekrojów, zauważyć można analogię do klasycznego przekroju skrzynkowego, składającego się z dwóch pasów: górnego i dolnego (ang. spar cap) oraz dwóch środników (ang. shear webs). Pozostała część przekroju stanowi głównie „okładzinę” zapewniającą korzystny kształt aerodynamiczny. Dodając do tego duże rozpiętości łopaty oraz zastosowanie materiału konstrukcyjnego o niezwykle wysokiej wytrzymałości, przy jednoczesnym zachowaniu stosunkowo niewielkiej masy, trudno zakwestionować olbrzymi potencjał nośny tych struktur.

4. PRZYKŁADY PONOWNEGO UŻYCIA

Zastosowania wycofanych z eksploatacji łopat turbin wiatrowych, zarówno te w fazie koncepcji, jak i te już realizowane, są bardzo zróżnicowane. Ze zużytych elementów wiatraków wykonywane są meble, obiekty małej architektury, zadaszenia budynków, a nawet dźwigary kładek dla pieszych o różnych rozpiętościach i układach statycznych.

Zrzeszająca 5 jednostek naukowych z Irlandii, Irlandii Północnej i USA grupa Re-Wind Network opracowała w 2021 roku katalog, przedstawiający różnorodne koncepcje zastosowań zużytych łopat wiatrowych. Wybrane z nich zaprezentowano na Rys. 4.



Rys. 4. Wybrane koncepcje opracowane przez grupę Re-Wind Network [15, 16]

Grupa Re-Wind Network nie ograniczyła się jedynie do teorii i tak w 2022 w pobliżu miejscowości Midleton w hrabstwie Cork w Irlandii powstała kładka dla pieszych o rozpiętości 5 m i szerokości 3 m, której dźwigary główne stanowiły łopaty turbin wiatrowych, wykonane w 1994 roku. Konstrukcję zaprezentowano na Rys. 5 [22].



Rys. 5. Kładka dla pieszych wykonana na podstawie koncepcji Re-Wind Network [22]

Mówiąc o kładkach dla pieszych wykonanych z zużytych łopat turbin wiatrowych nie sposób nie wspomnieć o przykładzie z kraju. Firma ANMET we współpracy z Katedrą Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej wykonała w 2022 roku kładkę dla pieszych o rozpiętości teoretycznej 16,4 m i szerokości całkowitej 4,25 m w miejscowości Szprotawa [23]. Dźwigar główny kładki stanowią dwie łopaty turbiny wiatrowej połączone w środku rozpiętości przy pomocy połączenia kołnierzewego (Rys. 6.) [23].



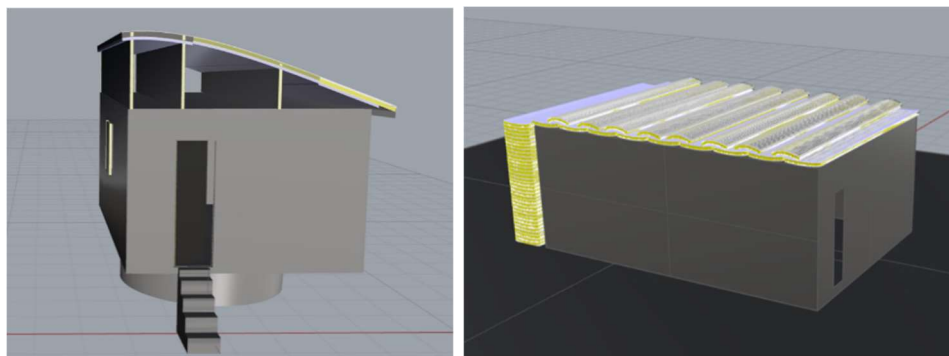
Rys. 6. Kładka dla pieszych wykonana przez firmę ANMET w Szprotawie [23]

Warto również wspomnieć o nieco odmiennym od poprzednich zastosowaniu łopat turbin wiatrowych w budownictwie, zaproponowanym przez GP REBLADE, która oprócz mebli, obiektów małej architektury oraz kładek dla pieszych, oferuje bloki geotechniczne wykonane z łopat [17] (Rys. 7).



Rys. 7. Bloki geotechniczne wykonane ze zużytych łopat turbin wiatrowych [17]

Kolejna koncepcja wykorzystania zużytych łopat turbin wiatrowych została opisana w [13] i zakłada użycie ich do budowy elementów konstrukcji domów, takich jak zadaszenia, podbudowy czy drzwi. Opisany w pracy przegląd 628 budynków, zlokalizowanych w przybrzeżnym regionie półwyspu Jukatan w Meksyku, wchodzących w skład formalnych i nieformalnych osiedli, wykazał, że z powodu zmian klimatycznych, wiążących się ze wzrostem wilgotności, stan techniczny konstrukcji ocenić można jako zły. Budynki te wznoszone były najczęściej z pustych bloków betonowych bez użycia jakiejkolwiek ochrony antykorozyjnej, co w połączeniu z niesprzyjającymi warunkami atmosferycznymi, skutkuje sukcesywnym pogarszaniem się ich stanu. Opracowanie przedstawia metodę efektywnego podzielenia łopaty, w taki sposób, aby każdy jej fragment został wykorzystany do produkcji nowych, tanich, odpornych na wysoką wilgotność i ogólnodostępnych elementów konstrukcji budynków. Realizacja takiej koncepcji mogłaby rozwiązać problem słabego stanu technicznego budynków w tym rejonie i znacznie poprawić jakość życia mieszkańców osiedli. Przykłady koncepcji przewidujących użycie łopat turbin wiatrowych do konstrukcji zadaszeń zostały zaprezentowane na Rys. 8.



Rys. 8. Przykłady zadaszeń wykonanych z zużytych łopat turbin wiatrowych [13]

5. PODSUMOWANIE

Analiza dostępnej literatury, przedstawiona w niniejszym referacie, dowodzi, że pomimo opracowania metod postępowania z wycofanymi z użytku łopatami turbin wiatrowych, do tej pory nie wynaleziono, ekonomicznie opłacalnej, efektywnej i możliwej do stosowania na szeroką skalę metody recyklingu tych elementów. Najbardziej atrakcyjną z punktu widzenia budownictwa strategią postępowania z wycofanymi z użytku łopatami jest ponowne wykorzystanie ze zmianą przeznaczenia (ang. reuse), a także wykorzystanie recyklowanych włókien kompozytu, lub rozdrobnionego kompozytu w celu ograniczenia wykorzystania materiału droższego lub trudno dostępnego w nowych materiałach budowlanych. Z uwagi na korzystne parametry geometryczne oraz wytrzymałościowe, łopaty turbin wiatrowych nawet po wycofaniu z eksploatacji nadal charakteryzuje duży potencjał, który można stosunkowo łatwo, efektywnie i bez przeprowadzania energochłonnych procesów wykorzystać w budownictwie infrastrukturalnym, np. jako elementy nośne konstrukcji. Wymaga to jednak oceny stanu technicznego, detekcji uszkodzeń, określenia rzeczywistych parametrów materiałowych oraz odpowiedniego wymodelowania elementu przy użyciu MES.

Omawiany problem jest nadal aktualny i konieczne jest opracowanie nowej metody efektywnego wykorzystywania zużytych łopat turbin wiatrowych na szerszą skalę. Dlatego też zespół z Politechniki Gdańskiej pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Magdaleny Ruckiej podjął się zadania opracowania metod utylizacji zużytych łopat turbin wiatrowych w ramach projektu „Gospodarka o obiegu zamkniętym dla łopat turbin wiatrowych: opracowanie systemu zarządzania materiałami wielokompozytowymi do ponownego ich wykorzystania strukturalnego i architektonicznego”. Realizację projektu rozpoczęto 1 października 2022 roku i składa się on z 3 części:

- **Część A(architecture)**, czyli wykorzystanie fragmentów łopatek jako elementy małej architektury,
- **Część B(uilding)**, czyli wykorzystanie fragmentów łopatek jako nośne elementy konstrukcyjne w zastosowaniach budowlanych i infrastrukturalnych,
- **Część C(concrete)**, czyli wykorzystanie zmieszanych łopatek jako wypełniaczy/kruszywa do betonu.

PIŚMIENNICTWO

1. Fodrowska K.: *Elektrownie wiatrowe w Polsce*, www.enerad.pl, 2021
2. Khalid M. Y., Arif Z. U., Hossain M., Umer R.: *Recycling of wind turbine blades through modern recycling technologies: A road to zero waste*, Renewable Energy Focus, Elsevier, Vol. 44, 2023, 373–389
3. Barlow C.Y., Liu P.: *Wind turbine waste in 2050*, Waste Management, 62, 2017, 229-240
4. Fonte R., Xydis G.: *Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials*, Journal of Environmental Management, 287, 2021
5. Pyrzowski Ł., Sobczyk B.: *Local and global response of sandwich beams made of GFRP facings and PET foam core in three point bending test*, Composite Structures, 241, 2020
6. *New Generation of Wind Blades*, www.dow.com
7. Beauson J.; *End-of-life of wind turbine blades – Value chain, recycling and composite materials*, DTU Wind and Energy Systems, 2022
8. *Break It Down: This Big Wind Industry Player Is Seeking To Make Future Turbine Blades 100% Recyclable*, www.ge.com, 2021
9. Jani H. K., Singh Kachhwaha S., Nagababu G., Das A.: *A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials*, Materials Today: Proceedings, 62(P13), 2022, 7124–7130
10. Beauson J., Laurent A., Rudolph D. P., Pagh Jensen J.: *The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier Ltd (Vol. 155), 2022
11. Joustra J., Flipsen B., Balkenende R.: *Structural reuse of high end composite products: A design case study on wind turbine blades*, Resources, Conservation and Recycling, 167, 2021
12. Kullberg J., Nygren D.: *Reuse of decommissioned wind turbine blades in pedestrian bridges*, Department of Architecture and Civil Engineering, Chalmers University of Technology, 2020
13. Bank L. C., Arias F. R., Yazdanbakhsh A., Gentry T. R., Al-Haddad T., Chen J. F., Morrow R.: *Concepts for reusing composite materials from decommissioned wind turbine blades in affordable housing*, Recycling, 3(1), 2018



14. Siwowski T., Rajchel M., Kulpa M., Adamcio A.: *Zastosowanie zużytych łopat wiatrowych w budownictwie infrastrukturalnym*, Materiały Budowlane nr 598, 2021
15. *Re-Wind Design Catalog Fall*, The Re-Wind Network, 2021
16. Dobberstein J.: *Retired Wind Turbine Blades May Stand Tall Again as Utility Pole*, www.utilityproducts.com, 2022
17. *Wind Blade New Life*, GP Reblade, www.gp-renewable.energy
18. Doliński Ł.: *Zastosowanie transformaty falkowej do detekcji uszkodzeń w kompozytowych łopatach turbin wiatrowych*, Politechnika Gdańska, 2023
19. Boudounit, H., Tarfaoui, M., Saifaoui, D.: *Modal analysis for optimal design of offshore wind turbine blades*, *Materials Today: Proceedings*, 30, 2019, 998–1004
20. Raman V., Drissi-Habti M., Guillaumat L., Khadhour A.: *Numerical simulation analysis as a tool to identify areas of weakness in a turbine wind-blade and solutions for their reinforcement*, *Composites Part B: Engineering*, 103, 2016, 23-39
21. Nanami N., Ochoa O. O.: *Computational Assessment of a Modular Composite Wind Turbine Blade Joint*, *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy* (Vol. 5), 2016
22. Quirke J.: *Old wind turbine blades repurposed as Irish bridge*, www.globalconstructionreview.com, 2022
23. Siwowski T., Rajchel M., Kulpa M., Adamcio A.: *Pierwszy na świecie obiekt mostowy wykonany z recyklowanych łopat turbin wiatrowych*, *Mosty*, 2022, 44-48.

REVIEW OF APPLICATIONS OF USED WIND TURBINE BLADES FOR INFRASTRUCTURE CONSTRUCTION

Summary

The paper presents the current state of knowledge on the recycling and reuse of decommissioned wind turbine blades for infrastructural construction and civil engineering. The subject has recently become very important and challenging. The forecasts and statistics show that due to the intensive wind energy development, the coming years will be more demanding than ever in dealing with the increasing amount of waste consisting of disassembled wind turbine blades. The authors highlight the difficulties associated with recycling this particular type of waste, but at the same time emphasize the significant potential of the end-of-life component due to the use of an extremely strong as well as lightweight material for its construction and the significant spans that wind turbine rotor blades can reach. The paper presents examples of existing structures in which wind turbine blades play an important role and bold concepts that demonstrate how wide the range of applications for these composite blades can be. The conclusions from the review of the literature, briefly presented in this article, indicate that the challenge of finding an effective solution to the problem of recycling wind turbine blades is still relevant.

