



DZIEŃ MECHANIKA 2026



Konkurs na Najlepszą Pracę Dyplomową na Wydziale Mechanicznym UMG

Streszczenia prac konkursowych

Analiza możliwości recyklingu łopat turbin wiatrowych w morskiej energetyce wiatrowej

Dynamiczny rozwój morskiej energetyki wiatrowej stanowi fundament współczesnej transformacji energetycznej, ukierunkowanej na dekarbonizację i osiągnięcie neutralności klimatycznej. Mimo jednoznacznie pozytywnego wpływu na bilans emisji dwutlenku węgla w fazie operacyjnej, technologia ta generuje bezprecedensowe wyzwania w fazie wycofywania infrastruktury z eksploatacji. Szacuje się, że zainstalowanie każdego megawata nowej mocy wiatrowej wymaga zużycia około dziesięciu ton wysoce zaawansowanych materiałów kompozytowych. O ile elementy wieży, gondoli czy okablowania, wykonane ze stali, betonu i miedzi, podlegają dojrzałym procesom recyklingu, o tyle łopaty wirnika stanowią jedno z najbardziej kłopotliwych wyzwań inżynierii środowiska.

Celem pracy było przeprowadzenie analizy technologii recyklingu łopat turbin wiatrowych w morskiej energetyce wiatrowej oraz identyfikacja kluczowych wyzwań związanych z ich wdrożeniem. Zapoznanie się z metodami utylizacji i ponownego wykorzystania materiałów kompozytowych, ocena ich efektywności pod względem technologicznym, ekologicznym i ekonomicznym. Wskazanie barier oraz potencjalnych rozwiązań w zakresie zrównoważonego zarządzania zużytymi łopatom turbin wiatrowych.

W części teoretycznej przeanalizowano szczegółowo budowę anatomiczną łopat morskich turbin wiatrowych. Wskazano na rolę poszczególnych komponentów, takich jak powłoki aerodynamiczne formowane z wieloosiowych tkanin szklanych, pasy dźwigara stanowiące główny kręgosłup nośny wykonany z jednokierunkowych laminatów szklanych lub węglowych, środniki ścinane łączące pasy dźwigara oraz przekładkowe materiały rdzeniowe z drewna balsy lub syntetycznych pianek strukturalnych. Produkcja oparta na procesach infuzji próżniowej ciekłej żywicy epoksydowej tworzy nieodwracalną, trójwymiarową sieć silnych wiązań kowalencyjnych, co sprawia, że czysta separacja mechaniczna poszczególnych surowców staje się fizycznie niemożliwa. W pracy zidentyfikowano również główne przyczyny wycofywania łopat z użytku. Należą do nich naturalna degradacja zmęczeniowa ujawniająca się po kilkunastu latach w postaci delaminacji spoin klejowych, uszkodzenia wywołane uderzeniami piorunów oraz erozją krawędzi natarcia przy dużych prędkościach obrotowych

łopat, a także zjawisko repoweringu, polegające na świadomym demontażu w pełni sprawnych turbin w celu instalacji maszyn nowszej generacji o wyższej sprawności.

W dalszej części pracy dokonano szczegółowej analizy pięciu głównych technologii zagospodarowania odpadów kompozytowych. Pierwszą poddaną ocenie metodą było współspalanie w piecach cementowych. W procesie tym organiczna matryca polimerowa ulega całkowitemu spaleniu jako paliwo alternatywne w temperaturze dochodzącej do 2000°C, natomiast włókno szklane wtapia się w strukturę klinkieru cementowego jako zamiennik dla krzemionki i gliny. Metoda ta oferuje pełny odzysk materiałowo-energetyczny na poziomie dojrzałości technologicznej TRL 9, stanowiąc natychmiastowy bufor dla odpadowego włókna szklanego, jednak z punktu widzenia cyrkularności jest formą downcyclingu, niszczącą pierwotną strukturę włókien nośnych.

Drugim poddanym analizie rozwiązaniem był recykling mechaniczny, polegający na fizycznym kruszeniu laminatu w młynach udarowych i rozdrobnieniu do postaci granulatu, pyłu oraz krótkich włókien. Wykazano, że kluczową zaletą tej metody jest skrajnie niskie zapotrzebowanie na energię procesową, wynoszące od 0,17 do 1,93 MJ/kg przetworzonego kompozytu, co stanowi zaledwie ułamek energii potrzebnej do produkcji nowego włókna szklanego. Badania właściwości mikroskopowych pokazały, że powierzchniowa chropowatość odzyskanego granulatu wzrasta do 136,6 μm , co poprawia zakotwiczenie w nowych lepiszczach. Przeanalizowano innowacyjne zastosowania granulatu, wskazując na możliwość jego dodawania do filamentów PLA w druku 3D, co podnosi sztywność kompozytu o 74%. Z kolei w technologii druku 3D betonu wykazano występowanie efektu kierunkowego w dyszy, co pozwoliło podnieść wytrzymałość mieszanki na ściskanie o blisko 30%.

Trzecią grupę analizowanych metod stanowiły technologie termiczne i chemiczne, ukierunkowane na bezstratny odzysk czystych włókien zbrojeniowych. Przeanalizowano klasyczną pirolizę oraz pirolizę mikrofalową, polegające na degradacji cieplnej matrycy w atmosferze beztlenowej w temperaturach od 400°C do 600°C. Wykazano, że o ile piroliza pozwala odzyskać włókna węglowe z zachowaniem do 95% ich pierwotnej wytrzymałości na rozciąganie, o tyle włókna szklane ulegają degradacji cieplnej, tracąc od 50% do 80% parametrów nośnych. Z kolei zaawansowany recykling chemiczny - realizowany metodą solwolizy w warunkach podkrytycznych i nadkrytycznych oraz skraplania utleniającego w obecności nadtlenu wodoru przy temperaturze 350°C i ciśnieniu 40 barów - pozwala na stuprocentowy rozkład żywicy epoksydowej do ciekłych prekursorów chemicznych, takich jak kwas octowy, kwas benzoesowy oraz fenol. Solwoliza osiąga najwyższy wskaźnik

cyrkularności produktu oraz najniższy ślad węglowy w ujęciu oceny cyklu życia, redukując wpływ na globalne ocieplenie o 29% do 60% w porównaniu z pirolizą.

W pracy przeanalizowano również koncepcję bezpośredniej zmiany przeznaczenia kompozytów, stanowiącą najbardziej cyrkularny kierunek w perspektywie krótkoterminowej. Dzięki ominięciu energochłonnych procesów destrukcji materiałowej, zmiana przeznaczenia pozwala wykorzystać pierwotną wytrzymałość laminatów w architekturze miejskiej oraz w inżynierii lądowej. Przytoczono i szczegółowo przeanalizowano wyniki badań nad budową drogowych ekranów akustycznych z wyciętych sekcji łopat. Omówiono także innowacje materiałowe zmierzające do zapobiegania powstawaniu odpadów w przyszłości, w tym odwracalne żywice termoplastyczne typu Elium, usieciowane witrimery z dynamicznymi wiązaniami kowalencyjnymi, mikrokapsułkowe systemy samonaprawiające oraz biokompozyty.

W części dotyczącej wyzwań logistyczno-ekonomicznych przeanalizowano proces demontażu morskich farm wiatrowych. Wskazano, że operacje na otwartym morzu z udziałem ciężkich statków dźwigowych i jednostek jack-up generują astronomiczne koszty czarterowe, a sama logistyka i fracht odpowiadają za 30% do 40% całkowitych wydatków fazy End-of-Life. Aby rozwiązać ten problem, w pracy przeanalizowano innowacyjną strategię wczesnej segmentacji łopat na morzu. Wykazano, że zastosowanie pił linowych z nasypem diamentowym, chłodzonych wodą pracującą w obiegu zamkniętym, pozwala na precyzyjne cięcie struktury na pokładach barek serwisowych bez ryzyka uwalniania pyłu kompozytowego do wód Bałtyku. Pocięcie stumetrowych monolitów na mniejsze moduły drastycznie zwiększa gęstość ładunku na statku, a po dopłynięciu do portu umożliwia bezpośredni transport kołowy standardowymi ciężarówkami, eliminując potrzebę organizowania skomplikowanego lądowego transportu ponadgabarytowego.

W kolejnej części pracy oszacowano, że pierwsza faza rozwoju polskiego sektora morskiej energetyki wiatrowej o mocy ok. 5,9 GW, przy przyjęciu wskaźnika materiałowego wynoszącego 11,5 tony kompozytu na 1 MW dla turbin klasy 14–15 MW, wygeneruje potężną falę 67 850 ton odpadów kompozytowych, których szczyt wycofania z eksploatacji przypadnie na lata 2051–2055. W oparciu o przeprowadzoną analizę SWOT polskich portów w Gdańsku i Świnoujściu oraz krajowego zaplecza cementowego opracowano macierz wyboru technologii i sformułowano model gospodarki o obiegu zamkniętym dla polskich farm na Bałtyku:

Etap pierwszy zakłada przeprowadzenie wczesnej segmentacji łopat na morzu na pokładach statków SOV lub barek przy użyciu pił diamentowych pracujących w obiegu zamkniętym;

Etap drugi to utworzenie dedykowanych Portowych Zakładów Recyklingu w terminalach w Gdańsku i Świnoujściu, wyposażonych w automatyczne linie sortownicze prowadzące demontaż metali oraz precyzyjne oddzielanie pasów dźwigara z włókna węglowego od powłok z włókna szklanego;

Etap trzeci opiera się na kaskadowym zagospodarowaniu surowców, kierującym niezniszczone sekcje z włóknem szklanym na zmianę przeznaczenia (np. na drogowe ekrany akustyczne), frakcję z włóknami węglowymi do reaktorów pirolitycznych lub solwolitycznych w celu odzysku cennych dla przemysłu włókien, a pozostałe drobne frakcje do współspalania w cementowniach lub kruszenie mechaniczne i wykorzystanie jako wypełniaczy w branży budowlanej;

Etap czwarty stanowi zamknięcie pętli poprzez egzekwowanie rozszerzonej odpowiedzialności producentów łopat turbin wiatrowych oraz obligatoryjne projektowanie turbin w oparciu o Eco design z udziałem odwracalnych żywic termoplastycznych.

Podsumowanie

Przeprowadzone w pracy analizy jednoznacznie dowodzą, że najbardziej optymalną i uzasadnioną ekonomicznie strategią dla polskiego sektora morskiej energetyki wiatrowej jest wdrożenie hybrydowego modelu gospodarki o obiegu zamkniętym. Wczesna segmentacja łopat na morzu przy użyciu pił diamentowych oraz zlokalizowanie zakładów recyklingu bezpośrednio w terminalach portowych pozwalają na całkowite wyeliminowanie bariery lądowego transportu ponadgabarytowego i znaczne obniżenie kosztów frachtu. Zmiana przeznaczenia okazuje się najbardziej cyrkularnym kierunkiem w perspektywie krótkoterminowej, dostarczającym materiałów o wysokiej nośności i sztywności. Z kolei współspalanie w piecach cementowych zapewnia natychmiastowy, stabilny bufor dla odpadów z włókna szklanego, omijając zakazy składowania. Zaawansowane technologie termiczne i chemiczne znajdują pełne uzasadnienie ekonomiczne w odniesieniu do odzysku drogich w produkcji włókien węglowych. Trwałe i kompleksowe rozwiązanie problemu odpadów kompozytowych wymaga jednak wprowadzenia twardych mechanizmów prawnych rozszerzonej odpowiedzialności producenta oraz systemowego przejścia przemysłu wiatrowego na stosowanie odwracalnych żywic termoplastycznych w kolejnych generacjach morskich turbin wiatrowych.