

Katowice, 26 grudnia 2025 r.

Prof. dr hab. inż. Adam Smoliński
Główny Instytut Górnictwa - PIB
Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice
asmolinski@gig.eu

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Rafała Barona

**pt. „Analiza śladu węglowego produkcji magnesów
neodymowych do generatorów turbin wiatrowych
z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego”**

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, Prof. dr hab. inż. Krzysztofa Labusa z dnia 30 października 2025 roku. Promotorem rozprawy jest Prof. dr hab. inż. Marcin Lutyński a promotorem pomocniczym dr inż. Piotr Matusiak.

1. Tematyka rozprawy doktorskiej i trafność jej wyboru

Globalne ocieplenie oraz nasilające się negatywne skutki zmian klimatu stanowią jedno z najpoważniejszych wyzwań współczesnego świata. Odpowiedzią Unii Europejskiej na te zagrożenia było wdrożenie Europejskiego Zielonego Ładu, który wyznacza strategiczny cel

osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 55% do roku 2030 w porównaniu z poziomem z 1990 roku. Realizacja tych ambitnych założeń wymaga głębokiej transformacji sektora surowcowego i energetycznego Unii Europejskiej. Sektor energetyczny pozostaje jednym z głównych źródeł emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, gdyż nadal w znacznym stopniu opiera się na paliwach kopalnych. Dodatkowym czynnikiem przyspieszającym proces odchodzenia od paliw kopalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii była agresja Rosji na Ukrainę, która uwidoczniła skalę zależności energetycznej Unii Europejskiej. Znalazło to odzwierciedlenie w dokumencie REPowerEU, przyjętym przez Komisję Europejską, którego celem jest przyspieszenie rozwoju odnawialnych źródeł energii, poprawa efektywności energetycznej oraz zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego poprzez ograniczenie importu surowców energetycznych, w szczególności z kierunków wschodnich.

Przyjęty przez Komisję Europejską Clean Industrial Deal podkreśla konieczność dekarbonizacji przemysłu przy jednoczesnym zachowaniu konkurencyjności gospodarki europejskiej, wskazując na kluczową rolę technologii niskoemisyjnych, gospodarki o obiegu zamkniętym oraz efektywnego wykorzystania surowców. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają odnawialne źródła energii, w tym energetyka wiatrowa, której dynamiczny rozwój powinien być oceniany nie tylko przez pryzmat produkcji energii niskoemisyjnej, lecz również w ujęciu całego cyklu życia turbin wiatrowych. Takie podejście stanowi istotny warunek dalszej integracji odnawialnych źródeł energii w skali krajowej i europejskiej.

W roku 2024 w Polsce udział odnawialnych źródeł energii w miksie energetycznym osiągnął rekordowy poziom 29,3%, z czego 14,7% stanowiła energetyka wiatrowa. Żywotność turbin wiatrowych szacuje się na około 20-25 lat, co w perspektywie najbliższych dekad rodzi istotne wyzwania związane z ich demontażem, utylizacją oraz odzyskiem surowców. W światowej literaturze przedmiotu można znaleźć liczne opracowania naukowe podejmujące problematykę recyklingu turbin wiatrowych oraz odzysku surowców ze zużytych instalacji.

W świetle powyższego należy zauważyć, że podjęte przez Doktoranta prace nad wyznaczeniem śladu węglowego w cyklu życia turbiny wiatrowej są w pełni aktualne i odpowiadają na istotne wyzwania współczesnej transformacji energetycznej, w szczególności w obszarze rozwoju energetyki wiatrowej oraz realizacji zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Ukierunkowanie badań na analizę śladu węglowego w całym cyklu życia generatorów turbin wiatrowych wypełnia lukę badawczą, gdyż zagadnienie to jest rzadko

podejmowane w sposób kompleksowy, z uwzględnieniem etapu demontażu oraz recyklingu kluczowych komponentów. Szczególna uwaga poświęcona magnesom neodymowym NdFeB oraz odzyskowi surowców krytycznych i strategicznych ma istotne znaczenie zarówno od strony naukowej jak i aplikacyjnej, w kontekście bezpieczeństwa surowcowego oraz ograniczania zależności od dostaw surowców pierwotnych.

Reasumując, uważam, że zaproponowany przez Doktoranta temat oraz zakres pracy doktorskiej bez wątpienia dotyczą ważnych i aktualnych wyzwań transformacji energetycznej oraz rosnącego znaczenia oceny oddziaływania środowiskowego technologii odnawialnych źródeł energii, w szczególności w kontekście śladu węglowego i zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Podjęta problematyka analizy cyklu życia generatorów turbin wiatrowych z magnesami neodymowymi odpowiada aktualnym potrzebom nauki i przemysłu, a także istotnym wyzwaniom związanym z dostępnością surowców krytycznych oraz koniecznością ich efektywnego recyklingu. Trafność wyboru tematu potwierdza również jego zgodność z polityką klimatyczną Unii Europejskiej oraz krajowymi strategiami rozwoju odnawialnych źródeł energii. Tym samym należy stwierdzić, że wybór tematyki pracy doktorskiej jest w pełni uzasadniony.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska zawiera 171 stron, 9 rozdziałów, 72 rysunki, 23 tabele i 147 pozycji bibliograficznych, w większości w języku angielskim, obejmujących najważniejsze pozycje literatury przedmiotu z ostatnich lat. Do pracy dołączono załącznik nr 1 przedstawiający szczegółowe obliczenia śladu węglowego.

Rozprawę doktorską podzielono na dwie części: część obejmującą przegląd stanu wiedzy (rozdziały 1-3) oraz część dotyczącą badań własnych Doktoranta (rozdziały 4-9). Ostatnią część rozprawy stanowią wnioski z badań będących przedmiotem pracy doktorskiej.

Pracę doktorską doktorant rozpoczyna od przedstawienia krótkiego, jednostronicowego wstępu, w którym wskazuje tło naukowe i gospodarcze rozprawy doktorskiej, znaczenie transformacji energetycznej, rozwoju energetyki wiatrowej oraz konieczność ograniczania śladu węglowego zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym. Określa, że przedmiotem badań będzie analiza śladu węglowego w cyklu życia generatorów turbin wiatrowych wyposażonych w magnesy neodymowe z uwzględnieniem zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Czytelnik dowiadyuje się ponadto, że jest to doktorat wdrożeniowy,

i że założone w pracy wytyczne dotyczące ograniczenia śladu węglowego wynikające z opracowanych metod recyklingu oraz odzysku surowców krytycznych zostaną wdrożone w zakładzie BG Instytutu Techniki Górniczej KOMAG. W dalszej części pracy doktorant szczegółowo (po raz kolejny) definiuje cel naukowy oraz użyteczny pracy oraz przedstawia tezę oraz zakres pracy doktorskiej.

Część dotyczącą przeglądu stanu wiedzy doktorant rozpoczyna od szczegółowego omówienia rozwoju energetyki wiatrowej. Przedstawia ewolucję wykorzystania energii wiatru, zarówno w ujęciu globalnym, jak i krajowym, ze szczególnym uwzględnieniem okresu dynamicznego rozwoju sektora w ostatnich dekadach. Doktorant przedstawia ponadto podstawowe zasady działania turbin wiatrowych oraz ich główne elementy konstrukcyjne, wskazując na różnice pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami technologicznymi. Charakteryzuje podział turbin wiatrowych ze względu na moc, lokalizację oraz zastosowanie, w tym wymienia mikroinstalacje wiatrowe.

W rozdziale tym doktorant poświęca sporo uwagi aktualnemu stanowi rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce, uwzględniając zarówno jej udział w krajowym miksie energetycznym, jak i znaczenie dla realizacji celów polityki klimatycznej. Zwraca uwagę na bariery rozwoju lądowej energetyki wiatrowej, w tym uwarunkowania prawne i społeczne, oraz na zmiany legislacyjne mające na celu ich ograniczenie. Omawia zalety i wady energetyki wiatrowej, odnosząc się zarówno do aspektów środowiskowych, jak i ekonomicznych. Szczególną uwagę poświęca problemowi zużycia surowców oraz emisji związanych z produkcją turbin wiatrowych. Na str. 15 doktorant słusznie wskazuje, że „produkcja generatora” jak i „całej turbiny wiatrowej wiąże się ze zużyciem surowców o znaczeniu strategicznym oraz krytycznym”. Wymienia jakie surowce są potrzebne, natomiast przemilcza kwestie wymaganych ilości tychże surowców, co jest istotne w kontekście określenia ilości wiatraków niezbędnych do osiągnięcia celów neutralności klimatycznej zapisanych w Zielonym Ładzie. To wymaga dodatkowego komentarza podczas publicznej obrony.

Kluczową kwestią poruszaną w tej części pracy doktorskiej są kwestie związane z żywotnością turbin wiatrowych oraz rosnącą skalą wycofywania ich z eksploatacji. Doktorant podkreśla tu znaczenie recyklingu turbin wiatrowych jako istotnego wyzwania dla zrównoważonego rozwoju sektora energetyki wiatrowej. Na str. 19 doktorant stwierdza, że „proces wycofywania z eksploatacji turbiny różni się ze względu na różnice wynikające z rozmiaru konstrukcji oraz innych czynników”. Proszę o komentarz - jakich czynników? Podobne pytanie dotyczy turbin

wiatrowych. Doktorant stwierdza, że „poszczególne instalacje różnią się ze względu na zastosowanego producenta, wybór technologii i inne parametry”. Jakie parametry?

W dalszej części przeglądu stanu wiedzy (rozdział 2) doktorant skupia się na zagadnieniach związanych z produkcją i recyklingiem magnezów neodymowych NdFeB, stanowiących kluczowy element generatorów turbin wiatrowych. Przedstawia podstawowe technologie wytwarzania magnezów neodymowych oraz wskazuje na ich wysoką energochłonność i znaczący wpływ na środowisko. Doktorant wskazuje, że kluczowym problemem jest tu dostępność pierwiastków ziem rzadkich oraz niewielki (1%) wskaźnik ich recyklingu. Szczególną uwagę poświęca technologiom recyklingu magnezów neodymowych, jako istotnemu elementowi gospodarki o obiegu zamkniętym. Wykazuje, że odzysk surowców z magnezów NdFeB pozwoli na istotną redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz ograniczenie zużycia surowców pierwotnych. Na Rys.9 przedstawia schematyczne etapy recyklingu magnezów NdFeB, które szczegółowo opisuje w pracy. Dużo miejsca w opisie poświęca odzyskowi pierwiastków ziem rzadkich z magnezów z zastosowaniem procesów hydrometalurgicznych, pirometalurgicznych/wysokotemperaturowych lub elektrochemicznych. Doktorant stwierdza ponadto (na str. 31), że „w dłuższej perspektywie czasowej recykling może dostarczyć około 1/3 zapotrzebowania na REE dla technologii czystej energii”. To wymaga jednak komentarza w kontekście wpływu wspomnianych powyżej procesów na środowisko i obniżenie śladu węglowego.

W ostatniej części przeglądu stanu wiedzy (rozdział 3) Doktorant skupia się na omówieniu metod i standardów stosowanych do wyznaczania śladu węglowego produktów i procesów. Przedstawia podstawowe regulacje i normy prawne związane z raportowaniem emisji gazów cieplarnianych, ze szczególnym uwzględnieniem ich zastosowania w analizach środowiskowych. Wyjaśnienia wymaga jednak enigmatyczne stwierdzenie na str. 34, że „ocena wpływu magnezów na środowisko pozwoli na zminimalizowanie wysokiej wartości śladu węglowego poprzez podjęcie odpowiednich kroków w przyszłości”.

Na koniec przedstawionego opisu stanu wiedzy zabrakło krótkiego, syntetycznego podsumowania części teoretycznej pracy, uzasadniającego cel prowadzenia podjętych badań i stanowiącego nawiązanie do kolejnej części rozprawy, przedstawiającej metodykę i część badawczą.

W ramach opisu badań własnych doktorant przedstawił opracowaną ocenę cyklu życia generatora, metodykę demontażu turbin wiatrowych oraz generatora turbiny, a następnie

obliczenia śladu węglowego dla przyjętego scenariusza cyklu życia generatora turbiny wiatrowej.

Opis badań własnych doktorant rozpoczyna od określenia celu i zakresu analizy LCA (rozdział 4). Opracowany cykl życia generatora, a konkretnie wartość śladu węglowego, jest porównany z cyklem życia, w którym wykorzystane zostaną magnesy NdFeB z recyklingu (pomijając tym samym szkodliwe procesy związane z wydobyciem oraz część procesów produkcyjnych).

W rozdziale 5 doktorant przedstawia opracowaną metodykę demontażu turbin wiatrowych, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów technicznych, organizacyjnych i środowiskowych tego procesu. Przedstawia szczegółowo kolejne etapy demontażu, obejmujące m.in. cięcie, separację poszczególnych elementów oraz przygotowanie komponentów do dalszego transportu i przetwarzania. Omawia stosowane techniki demontażu w kontekście bezpieczeństwa prac, efektywności operacyjnej oraz minimalizacji oddziaływania na środowisko oraz zwraca uwagę na znaczenie właściwej segregacji materiałów już na etapie demontażu, co ma istotny wpływ na efektywność późniejszych procesów recyklingu. Doktorant podkreśla ponadto, że odpowiednio zaplanowany i przeprowadzony demontaż stanowi kluczowy element całego cyklu życia turbiny wiatrowej oraz warunek skutecznego wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Dodatkowego komentarza wymaga jednak stwierdzenie, że właściciel turbin wiatrowych ponosi „ogólną” odpowiedzialność za likwidację oraz demontaż urządzenia. Ponadto omawiając kwestie związane z demontażem w podrozdziale 5.1 doktorant stwierdza, że elementy łopat mają tendencję „do emitowania włókien podczas transportu”. To wymaga dodatkowego komentarza podczas publicznej obrony.

W rozdziale 6 doktorant przedstawia szczegółowy opis procesu demontażu generatora turbiny wiatrowej oraz badań strukturalnych wybranych jego elementów. W szczególności przedstawia wyniki analizy materiałowej generatora, obejmującej identyfikację głównych grup materiałowych oraz określenie ich udziału masowego. Ponadto omawia występowanie surowców krytycznych i strategicznych w generatorze oraz ocenia ryzyko ich dostępności i możliwość zastępowania.

Rozdział 7 doktorant poświęca szczegółowemu opisowi metodologii wyznaczania śladu węglowego generatora turbiny wiatrowej. Przedstawia przyjęte założenia obliczeniowe, granice systemu oraz źródła danych wykorzystanych w analizie, zgodnie z zasadami oceny cyklu życia. Stanowi to metodyczną podstawę do dalszych obliczeń i analiz śladu węglowego

zaprezentowanych w kolejnych rozdziałach. Wątpliwości budzi jednak stwierdzenie doktoranta na str.65, że „metodologia wyznaczania wartości śladu węglowego może się różnić w zależności od produktu, kraju czy dostępności danych”. Otóż Komisja Europejska wprowadziła wspólne metody pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów/przedsiębiorstw po to by móc uzyskiwać spójne, wiarygodne i odtwarzalne badania śladów środowiskowych produktów czy przedsiębiorstw. Proszę o komentarz w tej kwestii podczas publicznej obrony.

W dalszej części pracy doktorskiej (rozdział 8) doktorant przedstawia szczegółowe wyniki obliczeń wartości śladu węglowego generatora turbiny wiatrowej na poszczególnych etapach jego cyklu życia, począwszy od pozyskania surowców, poprzez produkcję i transport, aż po etap eksploatacji. Dokonuje analizy udziału poszczególnych procesów i materiałów w całkowitej emisji gazów cieplarnianych, wskazując kluczowe źródła emisji. Uzupełnieniem rozdziału jest analiza wrażliwości, pozwalająca ocenić wpływ wybranych założeń i scenariuszy transportowych na końcową wartość śladu węglowego. Kontynuacją tych analiz jest przedstawienie analizy różnych scenariuszy recyklingu generatora turbiny wiatrowej oraz ocena ich wpływu na redukcję śladu węglowego (rozdział 9). Doktorant przedstawia i porównuje warianty recyklingu poszczególnych grup materiałowych, ze szczególnym uwzględnieniem magnesów neodymowych oraz odzysku surowców krytycznych i strategicznych. Wykazuje, że kompleksowy recykling generatora, realizowany zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym, pozwala na istotne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia urządzenia. Omawiając w podrozdziale 9.2.3 recykling tworzyw sztucznych doktorant wskazuje ogólnie, że w Polsce proces ten jest organizowany i zarządzany przez „różne instytucje” mające na celu zwiększenie stopnia odzysku oraz ponownego wykorzystania plastików. To stwierdzenie wymaga jednak doprecyzowania.

W podrozdziale 9.7 doktorant omawia kwestie skali i ich przełożenia na obliczanie wpływu środowiskowego. Słusznie zauważa, że ekstrapolacja do skali przemysłowej oparta na prostym liniowym skalowaniu proporcjonalności śladu węglowego do masy może być przyczyną błędów i w związku z tym wyniki należy traktować jako oszacowanie rzędu wielkości a nie dokładne wartości. Tu nasuwa się pytanie jakie inne czynniki, np. technologiczne, mogą powodować odchylenia od liniowej zależności śladu węglowego przy przejściu z analizy pojedynczego generatora do skali przemysłowej i w jaki sposób mogłyby one zostać uwzględnione w dalszych badaniach?

Część dotyczącą badań własnych kończy rozdział, w którym doktorant zwięźle przedstawia wnioski z przeprowadzonych badań. Najważniejszym z nich jest stwierdzenie, że zastosowanie recyklingu generatorów turbin wiatrowych, w szczególności magnesów neodymowych, w ujęciu całego cyklu życia pozwala na istotną redukcję wartości śladu węglowego w porównaniu z wariantem opartym na wykorzystaniu surowców pierwotnych, potwierdzając zasadność wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze energetyki wiatrowej.

Czytając rozprawę doktorską zauważono niedociągnięcia o charakterze redakcyjnym. Wybrane z nich przedstawiono poniżej:

1. Nie uniknięto potknięć o charakterze edycyjnym i gramatycznym (np. na str.18 jest „usuwanie fundamentu – proces obejmuję ...” powinno być „usuwanie fundamentu – proces obejmuje ...”; na str. 18 jest „...po demontażu instalacji zostaje...” powinno być „... po demontażu instalacji zostaje...”; na str. 19 jest „Poszczególne instalację różnią się...” powinno być „Poszczególne instalacje różnią się...”; na str. 28 jest „W efekcie projektu opracowano pilotażową linie ...” powinno być „W efekcie projektu opracowano pilotażową linię ...”; na str. 34 jest „...wpływu magnesów na środowisku pozwoli...” powinno być „...wpływu magnesów na środowisko pozwoli...”; na str.37 jest „...na ekwiwalent dwutlenku węgla (CO_2e)” powinno być „...na ekwiwalent ditlenku węgla ($\text{CO}_{2\text{eq}}$)”; na str.41 jest „...z cyklem życia w którym...” powinno być „...z cyklem życia, w którym...”; na str. 42 jest „od kołyski aż po grub” powinno być „od kołyski aż po grób”; na str. 108 jest „...z następujących etapów :” powinno być „z następujących etapów:”; , etc
2. Jednostki SI powinny być stosowane w całej pracy (np. tony powinny być zapisywane w Mg; etc).
3. W całym tekście powinna być stosowana nomenklatura IUPAC (np. ditlenek węgla).

Wniosek końcowy

Jednoznacznie stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Barona stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorant, na podstawie przeprowadzonych badań, opracował autorską metodykę wyznaczania śladu węglowego w cyklu życia generatorów turbin wiatrowych z magnesami neodymowymi, uwzględniającą zasady gospodarki o obiegu

zamkniętym oraz scenariusze recyklingu surowców krytycznych i strategicznych, co potwierdza zarówno wartość naukową, jak i aplikacyjny charakter pracy.

Doktorant wykazał się dobrą umiejętnością formułowania problemów naukowych, prowadzenia badań naukowych oraz dokonywania analiz wyników. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Rafała Barona pt. *„Analiza śladu węglowego produkcji magnezów neodymowych do generatorów turbin wiatrowych z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego”* w pełni odpowiada warunkom określonym w ustawie z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnoszę o dopuszczenie jej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej do jej publicznej obrony.

26/12/25

Podpisał Adam Smoliński