

Dr hab. inż. Agnieszka Surowiak, prof. Uczelni

Kraków, 27.12.2025r.

Katedra Inżynierii Środowiska

Wydział inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Rafała Barona**

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

### **1. Podstawa formalna wykonania recenzji pracy**

Przedmiotem recenzji jest praca pt. „Analiza śladu węglowego produkcji magnezów neodymowych do generatorów turbin wiatrowych z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego”, której Autorem jest mgr inż. Rafał Baron. Promotorem pracy jest Prof. dr hab. inż. Marcin Lutyński, a opiekunem pomocniczym Dr inż. Piotr Matusiak. Praca została zrealizowana w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Podstawą formalno-prawną wykonania recenzji jest pismo nr RIE-BD.512.47.2025 z dnia 31.10.2025r. skierowane przez Przewodniczącego Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej Prof. dr hab. Krzysztofa Labusa, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka nr 227/2025 z dnia 23 października 2025r.

### **2. Ogólna charakterystyka recenzowanej pracy: ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych**

Recenzowana praca została przygotowana w ramach Szkoły Doktorów Politechniki Śląskiej jako doktorat wdrożeniowy i liczy 171 stron. Składa się z streszczenia w języku polskim i angielskim, wstępu, celu, tezy i zakresu pracy, części literaturowej, części badawczej, wniosków, a także spisu cytowanej literatury, spisu wybranych oznaczeń i skrótów, spisu tabel, spisu rysunków i załącznika pt.: Obliczenia śladu węglowego.

We wstępie Autor opisał przedmiot pracy i uzasadnienie podjętego problemu dotyczącego analizy śladu węglowego w cyklu życia generatorów turbin wiatrowych wyposażonych w magnesy neodymowe, z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego. Kolejno Doktorant definiuje cel pracy, stawia pytania problemowe oraz definiuje tezę pracy.

W części literaturowej Autor omawia zagadnienia energetyki wiatrowej w Polsce, z wypunktowaniem zalet i wad, budowę i zasadę działania turbiny wiatrowej, metody recyklingu z zwróceniem uwagi na problemy związane z odzyskiem surowców strategicznych z turbin wiatrowych. W dalszej części omówiono metody wytwarzania magnesów neodymowych NdFeB oraz metody ich recyklingu w aspekcie odzysku pierwiastków ziem rzadkich (REE). Autor stwierdza, że zastosowanie metod pirometalurgicznych w recyklingu magnesów jest bardziej korzystne z punktu widzenia ochrony środowiska. W rozdziale 3 opisane są metody wyznaczania śladu węglowego oraz zestawione obowiązujące regulacje prawne dotyczące wytycznych i ograniczeń wynikających z strategii zrównoważonego rozwoju w kontekście Europejskiego Zielonego Ładu w analizowanym obszarze. Część badawcza rozpoczyna się od charakterystyki cyklu życia generatora z opracowaniem schematu blokowego na potrzeby niniejszej pracy w oparciu o dostępne dane literaturowe oraz informacje pozyskane z przedsiębiorstwa KOMEL. W rozdziale 5 Autor opisuje metodykę demontażu turbin wiatrowych z wskazaniem wytycznych i procedur etapów demontażu. Dokładnie omówione są metody cięcia turbin w rozdziale 5.1. zatytułowanym „Cięcie i separacja”, lecz metod separacji Doktorant nie omówił. Problemy demontażu generatora turbiny wiatrowej, w oparciu o badania i analizy własne, zostały przedstawione w rozdziale 6. Określono udziały procentowe poszczególnych grup materiałów wchodzących w skład generatora zawierających pierwiastki krytyczne, które sumarycznie wynoszą 9,84%. Autor stwierdza, że otrzymane wyniki udziałów pierwiastków krytycznych oraz analiza ryzyka utraty dostaw, wskaźnika recyklingu i stopnia zastępowalności, skłaniają do stwierdzenia, że mają one istotne znaczenie dla różnych sektorów gospodarki. W rozdziale 7 Autor opisał metodykę wyznaczania wartości śladu węglowego pod kątem wytwarzania magnesów neodymowych do turbiny generatora. Rozważania prowadził dwuwariantowo: w pierwszym przypadku dla produkcji magnesów neodymowych z pierwotnie wydobytych surowców oraz w drugim przypadku, kiedy magnesy neodymowe będą produkowane w oparciu o surowce pochodzące z recyklingu magnesów neodymowych. Rozdział 8 poświęcony jest opracowaniu scenariuszy życia generatora, które posłużyły do obliczenia wartości śladu węglowego wraz z opracowanym schematem cyklu życia i charakterystyką danych. Został zaprojektowany scenariusz dostawy magnesów neodymowych z portu w ChRL do portu w Polsce, a następnie do firmy KOMTEL. W ramach analizy wrażliwości zbadano wielowariantowo wpływ różnych środków transportu magnesów neodymowych na całkowity ślad węglowy. Kolejno Doktorant przedstawia własną koncepcję demontażu generatora, recyklingu generatora po demontażu w stacji demontażu z uwzględnieniem różnych scenariuszy końca życia generatora w tym: unieszkodliwienie wszystkich elementów, częściowy recykling, ponowne użycie zdemontowanych magnesów neodymowych, recykling magnesów oraz kompleksowy recykling wszystkich podzespołów generatora. Autor szczegółowo opisał te problemy w rozdziale 9 z podaniem schematu dla wybranego

wariantu, wyliczeniem śladu węglowego na każdym etapie stosowanych operacji. Otrzymane efekty recyklingu poszczególnych elementów generatora przydomowej turbiny wiatrowej w postaci wyliczonego śladu węglowego zostały porównane z wartościami w przypadku produkcji tych elementów z surowca pierwotnego w sposób analityczny i graficzny. Wnioski stanowią końcowy element pracy, obejmując odpowiedzi na postawione pytania problemowe oraz dyskusję dotyczącą przyjętej tezy badawczej. Istotnym walorem pracy jest fakt, że Doktorant dokonuje weryfikacji celu pracy, sformułowanej tezy, zakresu badań oraz pytań problemowych, co świadczy o spójności metodologicznej i poprawności struktury opracowania.

**Układ rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie. Praca charakteryzuje się logiczną, spójną i czytelną strukturą, a kolejność oraz zawartość poszczególnych rozdziałów są przejrzyste i właściwie podporządkowane realizacji założonych celów badawczych.**

### **3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej**

Spis literatury liczy 147 pozycji, na który składają się artykuły naukowe, monografie, książki i inne opracowania oraz branżowe serwisy internetowe, bazy danych, portale tematyczne. Przy czym publikacje naukowe stanowią około 61% całości cytowanej literatury, co świadczy o właściwym odniesieniu pracy w dorobku naukowym dyscypliny. Pozostałe źródła, obejmujące branżowe serwisy internetowe, zostały włączone do spisu ze względu na ich aktualność oraz fakt, że dostarczają niezbędnych danych technicznych, obliczeniowych i wartości liczbowych, które nie są publikowane w tradycyjnych czasopismach naukowych. Doktorant jest współautorem trzech publikacji oraz autorem jednej publikacji samodzielnej ujętej w wykazie dorobku. Stanowi to wartościowy wkład w działalność naukową Doktoranta, szczególnie dla doktoratów wdrożeniowych. Pozycje: 74, 79 i 80 nie powinny znajdować się w spisie literatury. **Oceniam, że liczba i dobór literatury są adekwatne do zakresu pracy.**

### **4. Ocena istotności oraz celu pracy**

Praca badawcza wykonana przez mgr inż. Rafała Barona, której rezultaty zostały przedstawione w recenzowanej rozprawie, została zrealizowana w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” realizowanej na Politechnice Śląskiej w Gliwicach.

Podjęty w pracy problem analizy i wyliczania wartości śladu węglowego produkcji oraz recyklingu magnesów neodymowych do generatorów turbin wiatrowych należy uznać za istotny i aktualny. Zagadnienie to ma duże znaczenie w kontekście transformacji energetycznej oraz dążeń do ograniczania emisji gazów cieplarnianych. Analiza śladu węglowego w ujęciu całego cyklu życia turbiny wiatrowej przedstawiona w rozprawie doktorskiej, pozwala na obiektywną ocenę jej wpływu na

środowisko oraz identyfikację etapów generujących największe obciążenie emisyjne. Ponadto uwzględnienie procesu recyklingu, w tym badań własnych, zwiększa wartość merytoryczną pracy, wpisując ją w nurt badań nad gospodarką o obiegu zamkniętym i zrównoważonym rozwojem. Tym samym stwierdzam, że temat pracy jest trafnie dobrany i odpowiada na aktualne potrzeby badawcze oraz praktyczne sektora energetycznego.

**Na podstawie przyjętego celu pracy oraz określonego zakresu badań i postawionej tezy pracy uważam, że podjęty temat rozprawy doktorskiej ma charakter aktualny, a jego znaczenie będzie coraz większe. Odnosi się do istotnego problemu badawczego, oferując jednocześnie praktyczne podejście do jego rozwiązania w postaci proponowanego wdrożenia.**

#### **5. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych**

W rozprawie doktorskiej Autor zastosował metody badawcze adekwatne do realizacji założonego celu pracy oraz sformułowanych zadań badawczych. Podstawę badań stanowiła analiza i ocena literatury przedmiotu, umożliwiając właściwe osadzenie podejmowanej problematyki w aktualnym stanie wiedzy.

W części badawczej wykorzystano metodę oceny cyklu życia (LCA) oraz analizę śladu węglowego, które stanowią powszechnie akceptowane i uznane narzędzia oceny oddziaływań środowiskowych. Metody te zostały zastosowane w odniesieniu do produkcji oraz recyklingu magnesów neodymowych NdFeB wykorzystywanych w generatorach turbin wiatrowych. Ponadto badania prowadzono na stanowisku badawczym w laboratorium ITG KOMAG polegające na zaimplementowaniu procesów mechanicznych i termicznych do procesów demontażu generatora. W rezultacie otrzymano elementy składowe generatora: elementy stalowe, elementy aluminiowe, magnesy trwałe NdFeB, pokrywy generatora z tworzywa sztucznego, wypełnienie rowków stojana, uzwojenie miedziane stojana, elementy gumowe generatora, papier z rowków stojana, pozostałe elementy: kleje i żywice oraz mieszaninę drobnych materiałów powstałych w wyniku demontażu.

Zastosowane podejście umożliwiło porównawczą analizę wariantów scenariuszy redukcji śladu węglowego dla materiałów odzyskanych z recyklingu w porównaniu do materiałów wyprodukowanych z surowca pierwotnego oraz identyfikację kluczowych etapów procesów generujących największe obciążenia środowiskowe. Autor wykazał się praktycznym podejściem do inżynierskiego problemu, znakomitą znajomością stosowanych narzędzi analitycznych oraz umiejętnością poprawnej interpretacji uzyskanych wyników. **Dobór zastosowanych metod badawczych oceniam pozytywnie, jako właściwy i uzasadniony z punktu widzenia celu rozprawy, a ich realizacja została przeprowadzona prawidłowo, z zachowaniem zasad dokładności, rzetelności i poprawności metodologicznej prac naukowych.**

## **6. Ocena rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań**

Rozdziały rozprawy doktorskiej poświęcone omówieniu wyników badań zostały opracowane w sposób rzetelny i spójny. Autor w sposób czytelny prezentuje uzyskane rezultaty, dokonując ich logicznej interpretacji w odniesieniu do przyjętych założeń badawczych oraz aktualnego stanu wiedzy. Prezentowane wyniki badań i obliczenia dotyczące wartości śladu węglowego na każdym etapie recyklingu zostały właściwie uporządkowane i zaprezentowane z wykorzystaniem tabel oraz rysunków, co ułatwia ich analizę i porównanie. Autor umiejętnie identyfikuje kluczowe zależności oraz różnice pomiędzy analizowanymi wariantami produkcji i recyklingu magnesów neodymowych, wskazując kolejno etapy procesów technologicznych, założenia do obliczeń i wyniki obliczeń oraz dyskusję i porównanie pomiędzy scenariuszami charakteryzującymi się największym oddziaływaniem środowiskowym tj. wartościami śladu węglowego. Ponadto, potrafi krytycznie odnieść się do otrzymanych wyników jak np. dyskusja związana z ponownym użyciem zdemontowanych magnesów w kontekście obniżenia wartości śladu węglowego ale tylko dla generatorów, które uległy przedwczesnej awarii (str. 136 rozprawy).

Reasumując, część rozprawy doktorskiej dotycząca omówienia wyników badań została przygotowana na wysokim poziomie merytorycznym i stanowi istotny element realizacji celów badawczych pracy.

## **7. Ocena wartości naukowej i aplikacyjnej pracy**

Praca dotyczy opracowania metodyki wyznaczania śladu węglowego dla pełnego cyklu życia generatora turbiny wiatrowej oraz wskazania sposobów jego redukcji poprzez zastosowanie procesów recyklingu. Doktorant w części badawczej przeanalizował domowy generator synchroniczny PMzg132-8B stosowany w małych przydomowych turbinach wiatrowych. Na jego przykładzie opracował metodykę demontażu, przeprowadził szczegółową analizę materiałową z wyodrębnieniem dziewięciu grup materiałowych oraz poddał analizie te materiały wykorzystując dostępną technikę spektroskopii FTIR oraz ICP-MS. Zastosowanie technik analityczno-pomiarowych pozwoliło określić udziały surowców krytycznych i strategicznych, w tym pierwiastków metali ziem rzadkich w magnesach neodymowych NdFeB. Według obliczeń Autora, procesy recyklingu przyczyniły się w istotny sposób do redukcji śladu węglowego o ok. 43% dla pełnego cyklu życia generatora. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, iż Doktorant przeprowadził dla analizowanych materiałów ocenę ryzyka związanego z ich dostępnością, określił wskaźniki recyklingu oraz zidentyfikował możliwości ich zastępowania materiałami alternatywnymi. W mojej opinii uzyskane wyniki mają istotną wartość zarówno aplikacyjną, jak i naukową, gdyż dostarczają podstaw do racjonalnego zarządzania zasobami surowcowymi, wspierają rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym oraz mogą stanowić użyteczne

narzędzie w procesach decyzyjnych dotyczących projektowania, produkcji i recyklingu turbin wiatrowych. Autor stwierdza we wstępie pracy, że wyniki badań będą wdrożone w zakładzie BG ITG KOMAG, co jest zgodne z przesłankami doktoratu wdrożeniowego. Przedstawione w pracy zintegrowane podejście polegające na połączeniu analizy środowiskowej z praktykami recyklingu może wspierać transformację energetyczną w sposób zrównoważony i efektywny.

**W związku z powyższym, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Barona prezentuje uporządkowaną wiedzę teoretyczną z zakresu omawianej problematyki, dotyczącej analizy śladu węglowego w wybranym przypadku, tj. produkcji oraz recyklingu magnesów neodymowych stosowanych w generatorach turbin wiatrowych, a także wnosi istotny wkład poznawczy w ramach dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.**

**Do oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:**

- opracowanie kompleksowej metodologii wyznaczania wartości śladu węglowego dla pełnego cyklu życia generatora z uwzględnieniem etapów: pozyskania surowców, produkcji, transportu, eksploatacji i końca życia produktu,
- opracowanie całościowej metody demontażu generatora,
- określenie struktury materiałowej komponentów generatora oraz analizę ilościową składników w tym szczegółowa analizę jakościową magnesów neodymowych,
- analizę oceny ryzyka utraty dostaw surowców strategicznych, wskaźnika recyklingu i zastępowalności do produkcji magnesów neodymowych,
- wykonanie szczegółowych obliczeń wartości śladu węglowego cyklu życia generatora w oparciu o bazy danych Ecoinvent 3.3 oraz GaBi wykorzystaniem oprogramowania SimaPro, danych literaturowych i informacji pozyskanych z przedsiębiorstwa KOMEL,
- analizę różnych scenariuszy recyklingu poszczególnych grup materiałowych wchodzących w skład generatora,
- transformację wyników oceny środowiskowej małoskalowej, przydomowej turbiny wiatrowej na skalę przemysłową.

## **8. Uwagi krytyczne**

Rozprawę doktorską oceniam pozytywnie, mam jednak kilka uwag/pytań do prezentowanych treści.

### **8.1. Uwagi merytoryczne**

- w części „IV. Wnioski” na str. 156 Autor pisze: „Dla mieszaniny miedzi i tworzywa sztucznego opracowano autorską metodologię recyklingu opartą na separacji elektrostatycznej.” Proszę doprecyzować, na czym polegała zastosowana przez Pana autorska metoda separacji, ponieważ techniki separacji elektrostatycznej są powszechnie znane, dobrze opisane w literaturze i wykorzystywane do separacji materiałów przewodzących od nieprzewodzących. Proszę wyjaśnić w jaki sposób zachodziła elektryzacja ziaren w wykorzystywanym separatorze,

- we wstępie pracy jest napisane, że wyniki badań będą wdrożone w zakładzie BG ITG KOMAG. Proszę określić jaki jest poziom gotowości wdrożeniowej otrzymanych badań zgodnie z obowiązującą skalą?

#### 8.2. Uwagi edytorskie:

W trakcie czytania rozprawy zauważyłam sporo błędów literowych, głównie w odmianie wyrazów tzw. błędy fleksyjne. Nie będę ich tutaj przytaczać, praca jest dość obszerna, mogę przekazać Doktorantowi w rozmowie bezpośredniej, jest ich zbyt dużo aby wszystkie wypisać w tym miejscu. Nie wnoszą one nic do merytorycznej oceny pracy. Sugeruję zwracać pilną uwagę podczas przygotowywania publikacji naukowych na poprawną strukturę językową.

#### 9. Ocena końcowa

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Barona stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**. Doktorant podejmując zadanie badawcze wykazał się umiejętnością definiowania problemów badawczych, prowadzenia badań oraz wykonywania analiz otrzymanych wyników. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, stanowi samodzielne rozwiązanie problemu, a Doktorant wykazał się dobrym poziomem wiedzy teoretycznej oraz umiejętnościami inżynierskimi i analitycznymi w dyscyplinie naukowej. Mgr inż. Rafał Baron dowiódł tym samym, że spełnia wymagania do otrzymania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Rafała Barona pt. „Analiza śladu węglowego produkcji magnesów neodymowych do generatorów turbin wiatrowych z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego” w pełni spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

### **Uzasadnianie propozycji wyróżnienia rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Barona**

Biorąc pod uwagę aktualność podjętej tematyki, wysoki poziom merytoryczny rozprawy, poprawność zastosowanej metodyki badawczej, a także uzyskane wyniki badań wnoszące istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Barona.

Pan mgr inż. Rafał Baron przedstawił w swojej rozprawie doktorskiej kompleksowe podejście do ważnego problemu jakim jest recykling generatorów turbin wiatrowych i wpływ na środowisko. Opracowany przez Doktoranta sposób postępowania z zużytymi turbinami w kontekście odzysku magnesów neodymowych i obliczenie wartości śladu węglowego na etapie „od narodzin aż po grób” jest zagadnieniem żmudnym, wymagającym dokładności, precyzji i staranności obliczeń na każdym etapie.

Doktorant wykazał, że posiada bardzo dobrą umiejętność wyszukiwania, selekcjonowania i opracowywania danych pozyskiwanych z zasobów internetowych, co widać na przykładzie gromadzenia danych dotyczących np. pozyskania surowców, produkcji i transporcie magnesów neodymowych z CHRL do Polski. Możliwości transportu na terenie kraju rozważał wielowariantowo (transport drogowy samochodem dostawczym, ciężarowym, kolejowy, żegluga śródlądowa, samolot) poszukując najlepszego sposobu dostarczenia magnesów do miejsca docelowego przy wygenerowaniu najniższej wartości śladu węglowego. To tylko jeden z dowodów na dogłębne i wielowątkowe przeanalizowanie zagadnienia. Część badawcza rozprawy została opracowana w sposób systematyczny i logiczny, umożliwiając czytelnikowi stopniowe zapoznanie się z kolejnymi aspektami analizowanej problematyki. Przyjęty sposób prezentacji wyników i ich interpretacji świadczy o dojrzałości naukowej Autora oraz o posiadaniu przez niego kompetencji właściwych samodzielnemu naukowcowi.

Doktorant osiągnął cele badawcze i jednocześnie cele środowiskowe. Uzyskane wyniki mają istotne znaczenie, gdyż stanowią wartościowy wkład w rozwój badań nad gospodarką o obiegu zamkniętym.

Podpisała Agnieszka Surowiak