

Kraków 28.12.2025 r.

Dr hab. inż. Magdalena Wdowin, prof. IGSMiE PAN
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN
Wybickiego 7A
32-261 Kraków

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Barona

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

Podstawą formalną do opracowania recenzji rozprawy doktorskiej jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej Pana Prof. dr hab. Krzysztofa Labusa z dnia 31.10.2025 nr RIE-BD.512.47.2025.

Przedłożona recenzja rozprawy doktorskiej ma odpowiedzieć na pytanie i uzasadnić czy i w jakim stopniu recenzowana rozprawa odpowiada zapisom określonym w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 r., 1571 t.j.).

W związku z czym w recenzji dokonano oceny, czy zawartość merytoryczna rozprawy doktorskiej prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, odpowiednią ogólną i szczegółową wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka”, a także czy wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (jej oryginalności, sformułowania i uzasadnienia problemu badawczego oraz poprawności przyjętych tez).

Ocena celowości podjętej tematyki

Podjęta w rozprawie tematyka jest bardzo aktualna, uzasadniona naukowo oraz istotna z punktu widzenia gospodarki cyrkularnej oraz bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Produkcja magnezów neodymowych (NdFeB), powszechnie stosowanych w nowoczesnych turbinach wiatrowych, wiąże się z istotnymi problemami środowiskowymi, które coraz częściej stają się przedmiotem debaty w kontekście zrównoważonej transformacji energetycznej. Z jednej strony energetyka wiatrowa jest jednym z kluczowych filarów dekarbonizacji gospodarki i ograniczania emisji gazów cieplarnianych, z drugiej natomiast – jej dynamiczny rozwój powoduje rosnące zapotrzebowanie na surowce krytyczne, w tym metale ziem rzadkich, takie jak neodym, prazeodym czy dysproz. Dodatkowo magnesy neodymowe charakteryzują się wysoką energochłonnością produkcji pierwotnej oraz mają istotny udział w całkowitym śladzie węglowym generatorów synchronicznych.

W tym kontekście kluczowe staje się określanie śladu węglowego magnezów neodymowych w całym cyklu życia produktu (LCA), od wydobycia surowców, przez produkcję, transport, eksploatację w turbinie wiatrowej, aż po etap końca życia produktu. Rzetelne dane dotyczące emisji CO₂ pozwalają nie tylko na bardziej świadome decyzje projektowe i inwestycyjne, lecz także na porównywanie różnych technologii oraz identyfikację etapów o największym wpływie na środowisko. Bez precyzyjnego określenia śladu węglowego trudno mówić o realnie „zielonej” transformacji energetycznej.

Równocześnie niezwykle istotny jest rozwój idei gospodarki o obiegu zamkniętym w odniesieniu do magnesów neodymowych. Recykling metali ziem rzadkich oraz pozostałych komponentów ze zużytych turbin wiatrowych stanowi jedno z kluczowych wyzwań technologicznych i organizacyjnych. Rozwijanie efektywnych metod odzysku neodymu i innych pierwiastków, a także projektowanie turbin i magnesów z myślą o ich przyszłym demontażu i ponownym wykorzystaniu, może znacząco ograniczyć presję na środowisko, zmniejszyć zapotrzebowanie na pierwotne wydobycie oraz obniżyć całkowity ślad węglowy technologii wiatrowych.

Autor trafnie identyfikuje lukę badawczą polegającą na konieczności uwzględniania pełnego cyklu życia generatorów turbin wiatrowych oraz analizie wpływu recyklingu magnesów neodymowych na redukcję śladu węglowego, przy jednoczesnym zachowaniu zasad gospodarki obiegu zamkniętego (GOZ) w analizach LCA urządzeń OZE.

Na szczególne podkreślenie zasługuje wdrożeniowy charakter pracy, potwierdzony implementacją wyników w ITG KOMAG. Praca nie ogranicza się do rozważań teoretycznych, lecz dostarcza konkretnych narzędzi decyzyjnych i metodycznych, możliwych do wykorzystania w praktyce przemysłowej.

Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że wybór tematu jest w pełni zasadny, a jego realizacja odpowiada aktualnym potrzebom nauki, przemysłu oraz polityki środowiskowej UE. Natomiast zaprezentowane w pracy wyniki analiz i badań stanowią istotny wkład w dyscyplinę inżynieria środowiska górnictwo i energetyka w obszarze problemów gospodarki odpadami z OZE oraz związanym w tym śladem węglowym.

Ocena rozprawy i jej treść

Przedstawione w pracy doktorskiej treści naukowe są zgodne z tytułem i obejmują spójne, logicznie uporządkowane i merytorycznie poprawne opracowanie naukowe, poświęcone aktualnemu i istotnemu problemowi badawczemu z zakresu inżynierii środowiska, energetyki oraz gospodarki surowcami. W pracy dokonano przeglądu literaturowego oraz w części badawczej opracowano metodologię demontażu przydomowego generatora synchronicznego, przeprowadzono szczegółową analizę materiałową oraz analizę chemiczną określając zawartość REE. Dla całego cyklu życia obliczono wartość śladu węglowego. Autor przeanalizował również scenariusze recyklingu poszczególnych grup materiałowych w tym autorską metodę separacji elektrostatycznej mieszaniny miedzi i tworzywa porównując emisje z procesów z recyklingu z produkcją surowców pierwotnych.

Praca doktorska liczy 171 stron i podzielona została na cztery części – I poprzedzona streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz krótkim wstępem, omawiająca Cel, tezę i zakres pracy; II stanowi przegląd literaturowy liczący 12 stron; III zawierająca obszerne opisy badawcze liczące 123 strony; IV stanowiąca wnioski. Praca ponadto zawiera spis literatury, wykaz wybranych oznaczeń i skrótów, spis tabel i rysunków oraz załączniki dotyczące obliczeń śladu węglowego.

Układ manuskryptu jest klasyczny, zwarty i poprawny, chociaż nieco odbiegający od standardowych prac doktorskich (w części badawczej brak wyraźnego oddzielenie części metodologicznego od badawczej), co zapewne wynika z tematyki rozprawy. Pracę rozpoczyna jednostronicowy wstęp pozwalający zrozumieć czytelnikowi przyjęty w pracy tok myślenia oraz wdrożyć się w omawianą tematykę. W część I Autor przedstawia cel naukowy i utylitarny pracy

oraz przedstawia pytania problemowe, na które w toku pracy próbował odpowiedzieć. Następnie Kandydat prezentuje tezy oraz krótko charakteryzuje zakres pracy.

Kolejna część (II) podzielona została na 3 rozdziały teoretyczne 1 – dotyczący energetyki wiatrowej w Polsce, 2 – omawiający produkcję i recykling magnesów neodymowych, 3 – charakteryzujący metody wyznaczania śladu węglowego. Rozdział 1 przedstawia podstawy funkcjonowania energetyki wiatrowej, jej rozwój oraz znaczenie w krajowym i światowym systemie energetycznym. Autor w tym rozdziale omówił główne typy turbin wiatrowych, ich zasadę działania oraz uwarunkowania techniczne i środowiskowe związane z ich eksploatacją. W rozdziale 2 Kandydat scharakteryzował konstrukcję i zasady działania generatorów stosowanych w turbinach wiatrowych, ze szczególnym uwzględnieniem generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi. Przedstawił też właściwości, zastosowanie oraz znaczenie magnesów neodymowych, w tym ich rolę jako surowców krytycznych i strategicznych. Rozdział 3 poświęcony został metodyce oceny cyklu życia (LCA) oraz zasadom wyznaczania śladu węglowego, wraz z omówieniem obowiązujących norm i standardów. W tym rozdziale Autor przedstawił również założenia gospodarki o obiegu zamkniętym i możliwości ich implementacji w analizach środowiskowych technologii odnawialnych źródeł energii.

Część badawcza (III) podzielona została na kolejnych 6 rozdziałów. Rozdział 4 poświęcony został przedstawieniu metodyki oceny cyklu życia (LCA) analizowanego generatora turbiny wiatrowej. Autor definiuje tu cel i zakres analizy, określa granice systemu, dane wejściowe i wyjściowe oraz przyjęte założenia obliczeniowe. Zaprezentowany został także sposób interpretacji wyników, stanowiący podstawę dalszych analiz śladu węglowego poszczególnych etapów cyklu życia generatora. W rozdziale 5 Kandydat opisał opracowaną metodykę demontażu elementów turbiny wiatrowej, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów technicznych, logistycznych i środowiskowych. Przedstawił etapy cięcia, separacji, załadunku oraz transportu zdemontowanych elementów, wskazując ich znaczenie dla dalszych procesów recyklingu i obliczeń śladu węglowego. Rozdział 6 zawiera szczegółowy opis procesu demontażu analizowanego generatora synchronicznego, wraz z charakterystyką jego elementów składowych. Autor przedstawia wyniki badań strukturalnych, analizę rozkładu masowego uzyskanych materiałów oraz identyfikację surowców strategicznych i krytycznych, stanowiących podstawę do oceny ryzyka utraty dostaw oraz potencjału recyklingowego. W rozdziale 7 Doktorant zaprezentował przyjętą metodologię obliczania śladu węglowego w cyklu życia generatora, opartą na obowiązujących standardach i protokole GHG. Omówił również zastosowane wskaźniki emisyjne, źródła danych oraz narzędzia obliczeniowe, tworząc spójne ramy metodyczne dla analiz prowadzonych w kolejnych rozdziałach. Rozdział 8 przedstawia wyniki obliczeń śladu węglowego dla poszczególnych etapów cyklu życia generatora, od pozyskania surowców po fazę demontażu. W rozdziale tym Autor zaprezentował łączną wartość śladu węglowego, udział poszczególnych procesów w emisjach oraz wyniki analizy wrażliwości, w szczególności dotyczącej scenariuszy transportu magnesów neodymowych. W rozdziale 9 Kandydat dokonał analizy różnych scenariuszy zagospodarowania zdemontowanych elementów generatora, obejmujących składowanie, częściowy i kompleksowy recykling materiałów. Szczególną uwagę poświęcił recyklingowi magnesów neodymowych oraz odzyskowi pierwiastków ziem rzadkich, wskazując uzyskane redukcje śladu węglowego oraz możliwości przełożenia wyników analiz z instalacji przydomowych na skalę przemysłową.

Pracę kończy część IV stanowiąca wyciągnięte na podstawie przeprowadzonych badań i analiz.

Ocena szczegółowa

W swoim cyklu badań Autor zaproponował tezę badawczą:

„Zastosowanie recyklingu magnesów neodymowych oraz zasad gospodarki obiegu zamkniętego w produkcji generatorów do turbiny wiatrowej zmniejszy emisję śladu węglowego w stosunku do produkcji generatorów wykorzystujących surowce pierwotne. Zastosowanie procesu recyklingu wiąże się z nowym źródłem gazów cieplarnianych, które musi zostać uwzględnione w aspekcie wyznaczania śladu węglowego w ciągu określonego cyklu życia generatora.”

Teza ta w mojej opinii mogłaby zostać podzielona na dwie. Niemniej jednak przyjęta w pracy teza została właściwie i poprawnie sformułowana, ponieważ spełnia kluczowe kryteria naukowe, takie jak jasność, konkretność i weryfikowalność. Jest spójna zarówno pod względem merytorycznym, jak i metodologicznym.

W pracy Autor ponadto sformułował następujące cele:

- Cel naukowy – **wyznaczenie śladu węglowego w cyklu życia generatora turbiny wiatrowej z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego.**
- Cel utylitarny – **opracowanie oraz wdrożenie metodyki demontażu i recyklingu generatora o relatywnie niskim śladzie węglowym, pochodzącego z przydomowej turbiny wiatrowej wraz z odzyskiem surowców strategicznych oraz krytycznych.**

Po wnikliwej analizie dysertacji z pewnością mogę stwierdzić, iż cele pracy zostały zrealizowane jak i postawiona w pracy teza dowiedziona.

W pracy Autor również odpowiedział na następujące pytania problemowe:

- **Czy zastosowanie technologii recyklingu generatora turbiny wiatrowej z magnesami trwałymi znacząco obniży ślad węglowy, w stosunku do produkcji generatorów wykorzystujących surowce pierwotne?**
- **Czy zastosowanie technologii recyklingu generatora z magnesami trwałymi spowoduje dodatkową emisję gazów cieplarnianych do atmosfery?**
- **Czy opracowaną metodykę wyznaczania śladu węglowego na wytypowanym generatorze można przełożyć na inne typy generatorów?**

Rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Barona stanowi merytorycznie dojrzałe i poprawnie opracowane studium badawcze mające charakter utylitarny dotyczące analizy śladu węglowego generatorów turbin wiatrowych z magnesami neodymowymi, z uwzględnieniem zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Autor wykazał się umiejętnością właściwego sformułowania problemu badawczego, doboru adekwatnych metod badawczych oraz logicznego prowadzenia badań naukowych.

Na szczególną uwagę zasługuje umiejętne zastosowanie metodyki oceny cyklu życia (LCA) oraz poprawne wykorzystanie specjalistycznych narzędzi obliczeniowych i baz danych. Przeprowadzona analiza materiałowa generatora, identyfikacja surowców krytycznych oraz ocena ich znaczenia środowiskowego i strategicznego zostały wykonane rzetelnie i stanowią solidną podstawę do dalszych obliczeń śladu węglowego. Uzyskane wyniki są spójne, czytelnie zaprezentowane i logicznie zinterpretowane.

Istotnym walorami pracy są: uwzględnienie różnych scenariuszy recyklingu, w tym recyklingu magnesów neodymowych oraz ilościowa ocena uzyskanych redukcji śladu węglowego.

Wskazuje to na praktyczny charakter rozprawy i jej potencjał aplikacyjny. Autor wykazał się również samodzielnością badawczą, proponując autorskie rozwiązania w zakresie demontażu i separacji wybranych strumieni materiałowych.

Pewne zastrzeżenia może budzić zakres przeglądu literaturowego, który – pomimo poprawnego ujęcia kluczowych zagadnień – mógłby zostać rozszerzony o szerszy zbiór publikacji pochodzących z wiodących czasopism naukowych z obszaru oceny cyklu życia, gospodarki obiegu zamkniętego oraz recyklingu pierwiastków ziem rzadkich. Szersze odniesienie do najnowszych prac publikowanych w renomowanych periodykach pozwoliłoby na pełniejsze osadzenie prowadzonych badań w aktualnym nurcie badań światowych. Jednocześnie należy zaznaczyć, że problematyka szczegółowych analiz śladu węglowego generatorów turbin wiatrowych z magnesami neodymowymi oraz ich recyklingu jest w literaturze naukowej podejmowana stosunkowo rzadko, co mogło w istotnym stopniu ograniczyć dostępność bezpośrednio porównywalnych źródeł.

Wszystkie wymienione powyżej elementy rozprawy doktorskiej Autora stanowią o istotnej wartości merytorycznej. Dużym atutem jest związek prowadzonych badań analitycznych i badawczych z potrzebami środowiskowymi i ich wydźwięk aplikacyjny.

Największą wartością pracy doktorskiej Kandydata jest kompleksowe i praktycznie użyteczne podejście do analizy śladu węglowego generatorów turbin wiatrowych z magnesami neodymowymi, połączone z uwzględnieniem zasad gospodarki cyrkularnej. Autor nie ogranicza się do teoretycznych rozważań, lecz opracowuje metodykę demontażu, identyfikacji surowców krytycznych oraz recyklingu poszczególnych grup materiałowych, a wyniki swoich badań implementuje w warunkach przemysłowych. Połączenie ilościowej oceny śladu węglowego, analizy recyklingu magnesów NdFeB oraz praktycznych wytycznych wdrożeniowych stanowi wyraźny wkład oryginalny, który może być wykorzystany zarówno w badaniach naukowych, jak i w przemyśle energetycznym, przyczyniając się do redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz racjonalnego gospodarowania surowcami strategicznymi.

Uwagi krytyczne

Praca napisana jest bardzo czytelnie jednak w trakcie recenzowania rozprawy nasuwają się pewne uwagi, które w przyszłości mogłyby być rozważone przez Autora podczas przygotowania manuskryptu do druku:

- Jak już we wcześniejszej części rozprawy było zasugerowane w mojej opinii postawioną przez Autora tezę można by było podzielić na dwie tezy.
- Podobnie jak wcześniej wspomniano część literaturowa mogłaby być bardziej rozbudowana.
- Analiza śladu węglowego oparta została jedynie na jednym, konkretnym generatorze przydomowym (PMzg132-8B). Pomimo, że Autor deklaruje możliwość transferu metodyki na inne typy generatorów, brakuje pogłębionej dyskusji porównawczej, pokazującej różnice w śladzie węglowym między generatorami małej i dużej mocy oraz między rozwiązaniami synchronicznymi a asynchronicznymi.
- Uogólnienie wyników na skalę przemysłową (rozdz. 9.7) ma charakter raczej szacunkowy i mogłoby zostać wzmocnione dodatkowymi studiami przypadków w dalszym etapie prac po uzyskaniu stopnia doktora.

- Zaprezentowana autorska metoda separacji mieszaniny miedzi i tworzyw jest interesująca i oryginalna, jednak jej opis mógłby zostać bardziej sformalizowany (schemat procesu, parametry robocze itp.). Brakuje porównania efektywności z metodami alternatywnymi.
 - Uzupełnieniem przeprowadzonej analizy wrażliwości mogłoby być rozważenie dodatkowego scenariusza transportowego, uwzględniającego zastosowanie pojazdu nowszej generacji w przypadku wymiany floty transportowej przez przedsiębiorcę. Choć można przypuszczać, że wpływ takiej zmiany na całkowity ślad węglowy generatora byłby ograniczony, wykonanie porównawczej analizy scenariuszowej zwiększyłoby kompletność i transparentność modelu LCA.
 - W część II pracy warto by było rozważyć uzupełnienie treści o pogłębioną dyskusję wyników a w szczególności wyraźniejszego wskazania wkładu własnego Autora oraz nowatorskich aspektów pracy.
 - Pewne wątpliwości budzi również sposób zaprezentowania wątku wdrożeniowego rozprawy. Autor wskazuje na wdrożenie wyników pracy w ITG KOMAG, jednak informacja ta została jedynie zasygnalizowana w streszczeniu, bez szerszego rozwinięcia w zasadniczej części pracy. Z punktu widzenia oceny aplikacyjnego charakteru rozprawy zasadne byłoby przedstawienie zakresu wdrożenia, formy wykorzystania opracowanej metodyki lub uzyskanych wyników oraz ich praktycznego znaczenia dla działalności jednostki wdrażającej. Uzupełnienie tego wątku zwiększyłoby transparentność pracy oraz pozwoliłoby na pełniejszą ocenę jej walorów wdrożeniowych.
 - Uzupełnieniem przeprowadzonych analiz środowiskowych mogłoby być w przyszłości wykonanie analizy ekonomicznej, pozwalającej ocenić opłacalność rozwiązań charakteryzujących się najniższym śladem węglowym. Połączenie oceny środowiskowej z analizą kosztów w cyklu życia umożliwiłoby wielokryterialną ocenę rozpatrywanych wariantów oraz lepsze oszacowanie ich realnego potencjału wdrożeniowego.
 - W pracy w rozdziale 6.1 przedstawiono widmo FTIR tylko dla jednej próbki (nr 1) dlaczego nie zamieszczono widm pozostałych próbek celem porównania?
- Również w tak starannie przygotowanej pracy pojawiły się błędy edytorskie, które nie wpływają w żaden sposób na ocenę pracy, które zestawiałam poniżej:
- Proponuję używać jednostek SI w związku z czym nie należy używać ton „t” tylko „Mg”.
 - Warto w przygotowaniu manuskryptu do druku poprawić jakość wielu rysunków ponieważ są one mało czytelne np. rys. 3, rys. 4, rys. 6
 - Autor stosuje niejednolity sposób podawania wyjaśnień w języku angielskim – w części przypadków w nawiasach zamieszczana jest jedynie nazwa angielska, natomiast w innych poprzedzona jest ona skrótem „ang.”. Zastosowany zapis wymaga ujednolicenia na etapie przygotowania manuskryptu do druku.
 - Str. 8 drugi akapit, w zdaniu „Ze względu systematyczne...” powinno być „Ze względu na systematyczne...”,
- ostatni akapit Autor użył skrótu „.....BG Instytutu Techniki Górniczej KOMAG...” warto za pierwszym razem jednak rozwinąć skrót „BG”.
- Str. 16 ostatni akapit pierwsze zdanie „Turbiny wiatrowe....dla człowiek oraz środowiska” powinno być „Turbiny wiatrowe...dla człowieka oraz środowiska”.

- Str. 19 w zdaniu „Zrealizowane badania, (Jensen i inni).” należy usunąć spację przed zamknięciem nawiasu.
 - Str. 20 w zdaniu „Odzyskane włókno...” należy usunąć podwójną spację po wyrazie włókno.
 - Str. 22 w zdaniu „Tworzywa sztuczne (polietylen (PE)....” brak zamknięcia nawiasu.
 - Str. 27 „Recykling jest szczególnie.....a działalność górnicza podlega ostrym debatom publicznym..” wyraz „ostrym” należy skorygować na „ostrym”.
 - Str. 34 w zdaniu „ Ocena wpływu magnesów na środowisku..” wyraz „środowisku” należy skorygować na „środowisko”.
 - Str. 35 należy usunąć podwójną pauzę w punktorze „PN-EN ISO 14064 – 1:2019...”
 - Str. 37 w zdaniu „Wartość ta wyrażana jest w postaci ekwiwalentu ditlenku węgla...” należy usunąć podwójną spację po wyrazie „ditlenku”.
 - Str. 39 w zdaniu „Od 2021 roku dodatkowo muszą obliczać oraz raportować emisji...” wyraz „emisji” należy skorygować na „emisje”.
 - Str. 41 w zdaniu „Opracowany cykl życie...” wyraz „życie” należy skorygować na „życia”.
 - Str. 42 w ostatnim zdaniu sformułowanie „jaką podstawą” należy skorygować na „jako podstawa”.
 - Str. 51 w zdaniu „Firmy te dysponują..” należy usunąć podwójną spację po wyrazie „te”.
 - Str. 65 w zdaniu „Działania mających na celu...” wyraz „mających należy skorygować na „mające”.
 - Str. 74 w zdaniu „Emisje gazów cieplarnianych generujące ślad węglowy związane są z przede...” należy usunąć „z”.
 - Str. 75 w zdaniu „Założono że stacja demontażu....” należy postawić przecinek przed „że”
w punktorze „Elementy aluminiowe (Aluminium , cast alloy) należy usunąć spację po „Aluminium” to samo w przypadku punktora Miedź (Copper, at regional storage) należy usunąć spację po otwarciu nawiasu.
 - Str. 81 należy postawić kropkę na końcu zdania „W obliczeniach założono, że na założonym dystansie.....”.
 - Str. 82 brak zamknięcia nawiasu w sformułowaniu „(wykorzystywany przez jednego z pracowników.....”.
 - Str. 98 W zdaniu „W obliczeniach założono pełne wykorzystanie.....przy dostępnym załadunku...” wyraz „dostępny należy skorygować na „dostępnym”.
 - Str. 104 w zdaniu „Na podstawie analizy literaturowej[95-97]” należy dać spację po wyrazie „literaturowej”.
 - Str. 108 w zdaniu „Analogonie jak dla elementów...” należy poprawić wyraz „Analogonie” na „Analogicznie”.
- W punktorze „usuwanie zanieczyszczeń- 0,1 kg CO₂ eq” należy dać spację po wyrazie „zanieczyszczeń”.

- Str. 109 w zdaniu „Zakłada się że produkcja...” należy dać przecinek przed „że”.
- Str. 112 w zdaniu „Tworzywa sztuczne....zakładu „Duława Termoplastic”” należy usunąć spację po „Thermoplastic”
- Str. 113 W zdaniu „Zakłada się że produkcja...” należy dać przecinek przed „że”.
- Str. 116, 120 i 139 w zdaniu „Analogonie jak dla poprzednich elementów...” należy poprawić wyraz „Analogonie” na „Analogicznie”.

W zdaniu „Procesy te składają się z następujących etapów :” należy usunąć spację po wyrazie „etapów”

- Str. 121 w zdaniu „Zakłada się że produkcja...” należy dać przecinek przed „że”.
- Str. 124 w zdaniu „Na podstawie własnych badań....(pozyskanych w wycofanego...” należy przyimek „w” poprawić na „z”.
- Str. 126, 130 i 134 aby była spójność należy usunąć kropkę po tytule „ Transport magnesów neodymowych do przedsiębiorstwa KOMEL”
- Str. 142 w zdaniu „Transport w tym scenariuszu....(założenie że te skupy zgodzą się na odbiór tego typu materiału).” należy dać przecinek przed „że” podobnie w zadaniu „Założono że kleje...”.
- Str. 143 w zdaniu „Zakłada się że produkcja kleju...” również należy dać przecinek przed „że”.
- Str. 155 w zdaniu „Na podstawie szczegółowej analizie materiałowej oraz opracowanej metodzie demontażu...” należy „analizę” zamienić na „analizy” oraz „metodzie” na „metody”.

Pomimo występowania drobnych uchybień stylistycznych, literówek i powtórzeń treści, praca jest napisana poprawnym językiem naukowym i zachowuje wysoką czytelność przekazu.

Reasumując, rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Barona charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym, poprawnością metodologiczną oraz istotnym znaczeniem aplikacyjnym. Wskazane uwagi krytyczne nie podważają wartości naukowej pracy i mają charakter uzupełniający, potwierdzając, że rozprawa spełnia wymagania stawiane dysertacjom doktorskim.

Oryginalność i główne walory rozprawy

Nowatorstwo rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Barona przejawia się zarówno w ujęciu problemu badawczego, jak i w zastosowanych rozwiązaniach metodycznych oraz praktycznych.

Oryginalny charakter pracy polega na kompleksowej analizie śladu węglowego generatora turbiny wiatrowej z magnesami neodymowymi w całym cyklu życia, z jednoznacznym uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego. W dostępnej literaturze zagadnienia LCA technologii wiatrowych najczęściej koncentrują się na fazie eksploatacji lub całych turbinach, natomiast Autor w sposób pogłębiony i ilościowy analizuje pojedynczy, kluczowy komponent – generator synchroniczny z magnesami trwałymi –co pozwala na szczegółową identyfikację źródeł emisji gazów cieplarnianych oraz rzeczywistego znaczenia surowców krytycznych w bilansie środowiskowym urządzenia.

Istotnym elementem nowatorskim jest włączenie do analiz scenariuszy recyklingu magnesów neodymowych (NdFeB), obejmujących odzysk pierwiastków ziem rzadkich oraz ich ponowne wykorzystanie w procesach produkcyjnych. Autor nie ogranicza się do wskazania korzyści środowiskowych recyklingu, lecz dokonuje ilościowej oceny redukcji emisji gazów

cieplarnianych, co pozwala na porównanie produkcji pierwotnej i wtórnej w sposób mierzalny i obiektywny.

Nowatorski charakter pracy przejawia się również w opracowaniu i praktycznym zastosowaniu autorskiej metodyki demontażu generatora oraz separacji wybranych strumieni materiałowych, w tym elektrostatycznej separacji mieszaniny miedzi i tworzyw sztucznych. Rozwiązania te zostały zweryfikowane w warunkach przemysłowych, co wyróżnia rozprawę na tle prac o charakterze wyłącznie modelowym.

Dodatkowym elementem nowości jest połączenie analiz środowiskowych z problematyką surowców krytycznych i bezpieczeństwa dostaw, co pozwala spojrzeć na zagadnienie generatorów turbin wiatrowych nie tylko przez pryzmat emisji CO₂, lecz także dostępności strategicznych materiałów w długiej perspektywie.

Do głównych walorów pracy należy zaliczyć poprawność i konsekwencję metodologiczną, przejawiającą się w prawidłowym zastosowaniu metodyki LCA oraz protokołu GHG, a także umiejętne wykorzystanie specjalistycznych narzędzi obliczeniowych i baz danych. Istotnym atutem jest również uwzględnienie scenariuszy recyklingu magnezów neodymowych (NdFeB), wraz z ilościową oceną uzyskanych redukcji śladu węglowego, co wykracza poza standardowe analizy spotykane w literaturze przedmiotu.

Wysoko należy ocenić praktyczny i wdrożeniowy charakter rozprawy, potwierdzony opracowaniem autorskiej metodyki demontażu generatora oraz separacji wybranych strumieni materiałowych, a także implementacją wyników badań w warunkach przemysłowych. Połączenie analiz środowiskowych z zagadnieniami recyklingu surowców krytycznych i bezpieczeństwa dostaw stanowi dodatkowy walor pracy, podkreślający jej aktualność i znaczenie aplikacyjne.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej, biorąc pod uwagę przedstawione wcześniej uwagi (w przewadze rekomendacje i błędy edytorskie) oceniam przedstawioną przez Pana mgr. inż. Rafała Barona rozprawę pt. „Analiza śladu węglowego produkcji magnezów neodymowych do generatorów wiatrowych z uwzględnieniem zasad gospodarki obiegu zamkniętego” pozytywnie. Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, dowodzi także jego umiejętności samodzielnego planowania i prowadzenia wnikliwych badań naukowych i analiz. Stwierdzam ponadto, że recenzowana praca w pełni spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie zapisami określonymi w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 r., 1571 t.j.).

Wobec powyższych faktów wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z wyrazami szacunku

Dr hab. inż. Magdalena Wdowin prof. instytutu