

Gliwice, 10.09.2024

Prof. dr hab. inż. Anna Skorek-Osikowska  
Politechnika Śląska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice  
e-mail: [anna.skorek@polsl.pl](mailto:anna.skorek@polsl.pl)

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Pauliny Popielak pt.

*Application of LCA analysis for evaluation of carbon capture and utilization supply chain -  
Zastosowanie analizy LCA do oceny łańcucha wychwytu i utylizacji CO<sub>2</sub>*

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie zlecenia dr hab. inż. Iwony Zawiei, prof. P.Cz., Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka w Politechnice Częstochowskiej. Promotorem pracy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Izabela Majchrzak Kucęba, promotorem pomocniczym dr inż. Dariusz Wawrzyńczak.

### 1. UZASADNIENIE TEMATYKI ROZPRAWY

Jednym z kluczowych elementów Porozumienia Paryskiego z 2015 r. kształtującego globalne ramy polityki klimatycznej jest dążenie do neutralności klimatycznej. Unia Europejska (UE) zamierza osiągnąć zerową emisję netto do 2050 r., w czym w dużym stopniu pomagają cele programu Europejskiego Zielonego Ładu. Stężenie CO<sub>2</sub>, najbardziej dominującego gazu cieplarnianego (GHG), osiągnęło 419 ppm w powietrzu w 2023 r. w porównaniu do 180-210 ppm w okresie przedindustrialnym. Rozwiązaniem uzupełniającym działania prowadzące do eliminacji emisji CO<sub>2</sub> jest jego wychwytywanie, a następnie transport i wykorzystanie w gospodarce lub stałe składowanie geologiczne. Wychwytywanie, wykorzystanie i składowanie dwutlenku węgla (CCUS) jest cennym i niezbędnym uzupełnieniem innych rozwiązań niskoemisyjnych, które pozwalają pogodzić wykorzystanie paliw kopalnych i występowanie nieuniknionych emisji procesowych z założeniem neutralnej dla klimatu gospodarki. W obliczu stosunkowo słabej presji ze strony polityki klimatycznej w ostatnich latach, technologie CCUS cieszą się mniejszym zainteresowaniem niż inne opcje redukcji emisji. Jednak wraz ze wzrostem kosztów emisji CO<sub>2</sub> i wyczerpywaniem się potencjału alternatywnych rozwiązań, ich znaczenie dla efektywnej transformacji gospodarki w kierunku neutralności klimatycznej wzrośnie. Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA) przewiduje, że wychwytywanie i składowanie CO<sub>2</sub> przyczyni się do około 14% średniej globalnej redukcji emisji CO<sub>2</sub> do 2050 r. i podkreśla potrzebę podejmowania decyzji inwestycyjnych w nadchodzącej dekadzie, aby zapewnić czas na odpowiednią skalę i dostępność technologii. Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC) wskazuje, że w skali globalnej w 2100 r. powinno zostać wychwycone i zsekwestrowane od 348 do 1218 Gt CO<sub>2</sub>. Komisja Europejska (KE) wskazuje również na znaczącą rolę CCUS w odniesieniu do

branż, w których przejście na OZE jest technologicznie niemożliwe lub nieopłacalne. KE podkreśla również, że alternatywą dla składowania CO<sub>2</sub> może być jego ponowne wykorzystanie do produkcji paliw i materiałów syntetycznych. Technologie CCU mogą być szeroko stosowane w gospodarce, a jednocześnie są zgodne z polityką wodorową i założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym. Konieczne jest zatem zrozumienie, opracowanie i wdrożenie działań zapewniających odpowiedni potencjał w obszarze technologii CCUS. Niniejsza praca wpisuje się w ten trend.

Analiza cyklu życia (LCA) stanowi niezwykle wartościowe narzędzie do oceny środowiskowej technologii CCUS. Dzięki niej możliwe jest kompleksowe zbadanie wpływu całego łańcucha technologicznego, od wychwytywania CO<sub>2</sub> po jego składowanie lub wykorzystanie, na środowisko. W szczególności analiza LCA pozwala na identyfikację potencjalnych punktów krytycznych oraz ocenę konkurencyjności różnych technologii CCUS pod kątem ich wpływu na środowisko.

Wybór tematyki rozprawy doktorskiej poświęconej zastosowaniu analizy LCA do oceny łańcucha wychwytu i utylizacji CO<sub>2</sub> jest niezwykle aktualny w kontekście zarówno globalnych, jak i krajowych wyzwań związanych ze zmianą klimatu. Rosnąca świadomość konieczności ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz ambitne cele klimatyczne przyjęte na szczeblu unijnym, w tym dążenie do neutralności klimatycznej do 2050 roku, czynią technologie CCUS jednym z kluczowych elementów transformacji energetycznej.

## 2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Rozprawa jest napisana w języku angielskim, składa się z 9 rozdziałów oraz załącznika, zawierającego dodatkowy artykuł, który nie wchodzi w zakres tematyczny pracy doktorskiej. Praca zawiera również, zamieszczone przed zasadniczą częścią rozprawy, streszczenie (w języku polskim i angielskim), a także, umieszczone na końcu pracy, wykaz oznaczeń, spis rysunków oraz tabel, aneks oraz bibliografię.

Struktura pracy jest niestandardowa. Składa się z czterech pełnotekstowych publikacji, w tym trzech opublikowanych, które są przeplatane fragmentami i rozdziałami zawierającymi dodatkowe informacje i analizy. W pracy doktorskiej wykorzystano następujące publikacje:

1. Popielak P., Majchrzak-Kucęba I., Wawrzyńczak D., 2024. Climate change mitigation with CCUS – A case study with benchmarking for selected countries in adapting the European Union's Green Deal. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 132, 104057.
2. Popielak P., Majchrzak-Kucęba I., Wawrzyńczak D. The environmental impacts of circulating fluidized bed unit in coal-fired power plant with DR-VPSA carbon capture and CO<sub>2</sub>-ECBM storage technology in Poland – Praca nieopublikowana.
3. Falco MD., Natrella G., Popielak P., Cpacelli M., 2022. Methodologies for CCU technologies environmental analysis. In: *The Carbon Chain in Carbon Dioxide Industrial Utilization Technologies*. CRC press.
4. Facchino M., Popielak P., Panowski M., Wawrzyńczak D., Majchrzak-Kucęba I., De Falco M., 2022. The environmental impacts of carbon capture utilization and storage

on the electricity sector: A Life Cycle Assessment comparison between Italy and Poland. *Energies* 15, 6809.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do pracy i jest podzielony na dwa podrozdziały. Pierwszą część stanowi przedruk artykułu, którego pierwszą autorką jest Doktorantka (1), stanowiący przeglądowe opracowanie dotyczące polityki środowiskowej oraz kluczowych projektów CCUS wybranych państw członkowskich Unii Europejskiej (+Wielka Brytania). W artykule przeprowadzono również analizę porównawczą, klasyfikując kraje dla wybranych pięciu kategorii: całkowite emisje netto z transportem międzynarodowym, procentowy udział sektora energetycznego, procentowy udział paliw kopalnych, procentowy udział paliw kopalnych w produkcji energii elektrycznej brutto (GEP) oraz liczba projektów CCUS. Przeprowadzono również szczegółowy przegląd dla czterech wybranych państw członkowskich, w tym Polski, ze szczególnym uwzględnieniem krajowej polityki energetycznej w kierunku celów zerowej emisji netto oraz roli CCUS w krajowej polityce środowiskowej. Podjęto również próbę analizy w jaki sposób Europejski Zielony Ład wpłynął na krajowe polityki energetyczne wybranych państw członkowskich i jaką rolę odgrywa technologia CCUS w krajowych wysiłkach na rzecz neutralności klimatycznej. Artykuł ma charakter przeglądowy, i opiera się przede wszystkim na danych z 2019 r. (pomimo publikacji w 2024). Druga część rozdziału pierwszego dotyczy przeglądu technologii separacji, wychwytu, transportu, magazynowania i wykorzystania dwutlenku węgla. Rozdział ten zawiera bardzo ogólne, w mniemaniu recenzentki może nawet zbyt ogólne, informacje na temat wybranych technologii. Brakuje również pewnego podsumowania tego rozdziału, który uzasadniłby jego umieszczenie w pracy (czy też np. wskazania luki badawczej).

Rozdział 2 przedstawia wstępne informacje na temat wykorzystania metody LCA do oceny technologii CCUS. Choć zawiera odniesienia do dalszych części pracy, jego ogólny charakter oraz ograniczony czasowo przegląd literatury (do 2019 r.) nie pozwalają na pełne zrozumienie aktualnego stanu wiedzy w tej dziedzinie. Brakuje również wyraźnych wniosków płynących z przeprowadzonego rozeznania. Szczególnie istotnym aspektem, który wymagałby głębszej analizy, jest zastosowanie LCA w przemyśle cementowym. Pomimo istotnego znaczenia tego zagadnienia dla pracy, zostało ono jedynie marginalnie wspomniane.

Rozdział trzeci, zatytułowany *Literature summary*, jest bardzo krótkim rozdziałem (dwustronicowym), którego obecność nie do końca jest jasna dla recenzentki. Wbrew tytułowi nie zawiera przeglądu literatury, a jedynie dość chaotyczne wprowadzenie do technologii CCU oraz transportu dwutlenku węgla za pomocą rurociągów, a także liczne nawiązania do wcześniejszych rozdziałów. Pojawiają się tu natomiast postawione przez autorkę pytania, które uzasadniają zasadność podjętej tematyki.

Rozdział czwarty stanowi krótkie przedstawienie celu oraz zakresu pracy. W pierwszej części wskazane są luki badawcze, które uzasadniają cel podjętych badań, przedstawiona jest też struktura dalszej części pracy. W kolejnym podrozdziale, zatytułowanym *Innovations* podjęto próbę wskazania innowacyjnych elementów przedstawionych prac. Jednak nie wszystkie wskazane punkty mają w istocie taką naturę. Następnie sformułowano podstawowe tezy pracy oraz jej główne cele.



Rozdział piąty poświęcony jest szczegółowemu opisowi metodologii badań. Prezentuje on zastosowaną metodę analizy cyklu życia (LCA), ze szczególnym uwzględnieniem kategorii wpływu istotnych dla oceny łańcucha wartości technologii CCUS. Ponadto, rozdział zawiera szczegółowy opis wybranych przypadków, które zostały rozpatrzone w analizach. Dla każdego przypadku określono cel i zakres przeprowadzonych analiz, oraz granice systemów uwzględnionych w analizie środowiskowej, co umożliwiło przeprowadzenie oceny układów w dalszej części rozprawy.

Rozdział szósty przedstawia wyniki analizy środowiskowej układu CCS zaimplementowanego do elektrowni węglowej z kotłem fluidalnym. Rozdział ten stanowi w istocie artykuł przygotowany do publikacji, choć nieopublikowany. Taka forma, choć stanowi sama w sobie zamkniętą całość powoduje, że w tekście pojawiają się liczne powtórzenia w stosunku do wcześniejszych rozdziałów. W kontekście oceny merytorycznej nasuwa się pytanie, dlaczego wybrano układ z kotłem fluidalnym, skoro, jak Autorka sama podkreśla, nie jest to rozwiązanie typowe - być może większy potencjał aplikacyjny miałyby analizy układów z kotłem pyłowym. Niezależnie od wyboru wskazane byłoby jego uzasadnienie. Ponadto, podobnie jak wcześniej, punktem odniesienia jest tu rok 2019, co z jednej strony oczywiście zapewnia konsekwentność w odniesieniu do reszty pracy, jednak sprawia, że niektóre dane są bardzo nieaktualne (np. dotyczące udziału poszczególnych źródeł w wytwarzaniu energii, Tabela 1). Autorka wprowadza granice systemu, przyjmując rozwiązanie gate-to-gate, co ma uzasadnienie, jednak właściwe byłoby zawrzeć bardziej szczegółową dyskusję na temat zalet i ograniczeń takiego podejścia. Nie jest też do końca jasne, skąd wzięto dane techniczne do analiz (model czy dane z rzeczywistego obiektu). Szkoda, że nie pokazano takich wielkości jak energochłonność procesu wychwytu czy sprawność bloku, a przytoczono jedynie pewien literaturowy zakres spadku sprawności występujący przy implementacji CCS. Doktorantka przedstawia wyniki analiz dla czterech słusznie wybranych kategorii wpływu (nie ogranicza się do jednej dotyczącej emisji CO<sub>2</sub>). Jednak rozczarowuje nieco brak dyskusji na temat otrzymanych wyników (np. wpływ wyboru innej technologii wychwytu, zwiększenia wartości wskaźnika odzysku, zmniejszenia energochłonności procesu separacji, itp.), oraz przedstawione wnioski końcowe, które mają bardzo ogólny charakter, niepowiązany z wynikami przeprowadzonych w rozdziale analiz.

Rozdział siódmy ma na celu przedstawienie porównania, z punktu widzenia analizy LCA, wprowadzenia układu CCU (produkcja DME) do układu elektrowni węglowej oraz cementowni. W obu przypadkach wykorzystywany jest dwutlenek węgla zawarty w spalinach. Rozdział ten stanowi przedruk rozdziału w monografii zatytułowanej „The Carbon Chain in Carbon Dioxide Industrial Utilization Technologies” i sam nosi tytuł „Methodologies for CCUS technologies environmental analysis” (publikacja (3)). Podobnie jak wcześniej, ze względu na wybrany sposób przedstawienia wyników w pracy doktorskiej, pewne fragmenty stanowią powtórzenia i nie są istotne z punktu widzenia pracy doktorskiej. W rozdziale przedstawiono szczegóły modeli termodynamicznych, które wykorzystano do przeprowadzenia analiz środowiskowych. Szkoda, że na schematach nie przedstawiono wyników, które przyjęto do dalszych analiz, co zwiększyłoby czytelność tekstu. Niejasne są odniesienia do niektórych tabel i rysunków (np. tabel 1.4, 3.4, 5.1, 6.4, czy rys 1.2), których brak w tym rozdziale. Nie zawarto tu również jasnych wniosków, które stanowiłyby podsumowanie przeprowadzonych prac i ułatwiły porównanie z innymi przypadkami.

Rozdział ósmy to przedruk artykułu opublikowanego w czasopiśmie *Energies* (publikacja (4)) podsumowujący prace dotyczące porównania wybranych układów CCUS zaimplementowanych do elektrowni gazowych dla dwóch różnych lokalizacji – Polski i Włoch. Doktorantka nie jest pierwszą ani korespondencyjną autorką tego artykułu, jej wkładem była jednak, jak wskazano, analiza cyklu życia dla wybranego studium przypadku oraz przygotowanie oryginalnej wersji roboczej. Warto jednak byłoby wyjaśnić szczegółowy zakres przeprowadzonych przez doktorantkę prac. W rozdziale dość szczegółowo przedstawiono analizowane układy i opisano metodologię prowadzonych analiz LCA. W kontekście oceny termodynamicznej nie do końca jest jednak jasne, czy przyjęto jednakowe sprawności pracy układów dla dwóch lokalizacji (przykładowo, sprawność turbiny gazowej istotnie zależy od parametrów otoczenia, które prawdopodobnie są różne we Włoszech i w Polsce). Do analiz przyjęto dane z roku 2020 (dotyczące mixu energetycznego), a zatem pojawia się pewna niekonsekwencja w stosunku do wcześniejszych analiz – brakuje komentarza wyjaśniającego. W rozdziale przedstawiono wyniki dla wybranych pięciu kategorii wpływu, dla układów z i bez instalacji CCS oraz dla trzech kategorii wpływu w przypadku instalacji CCUS. Wyniki podkreślają istotne znaczenie analizy LCA dla uzyskania pełnej informacji na temat wpływu na środowisko, gdyż tylko w jednej z kategorii zastosowanie instalacji CC(U)S powoduje spadek wartości, podczas gdy w innych obserwowany jest istotny wzrost.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono najważniejsze wnioski z przeprowadzonych prac. W mniemaniu Recenzentki nieco brakuje choć ogólnego zarysowania kierunku przyszłych działań w obszarze przedstawionej w pracy problematyki, co lepiej potwierdziłoby zasadność wykonanych prac.

### **3. PODSTAWOWE OSIĄGNIĘCIA BADAWCZE**

Analizując całość rozprawy, za podstawowe merytoryczne osiągnięcia badawcze pracy i elementy nowości należy uznać:

1. Kompleksową ocenę wybranych układów, w tym bloków energetycznych różnego typu oraz cementowni, pod kątem środowiskowym.
2. Szczegółową analizę LCA dla innowacyjnych metod wykorzystania CO<sub>2</sub> do produkcji paliw syntetycznych (DME i metanol) oraz wytwarzania materiałów konstrukcyjnych (beton).
3. Opracowanie metodologii wykorzystania metody LCA do porównania dwóch różnych układów (elektrownia i cementownia) wykorzystujących proces utylizacji CO<sub>2</sub>.
4. Ocenę wpływu lokalizacji na wskaźniki środowiskowe elektrowni zasilanych gazem ziemnym.

### **4. PODSTAWOWE UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE**

Oprócz niewątpliwie bardzo ciekawych i wartościowych z poznawczego punktu widzenia elementów recenzowana praca zawiera również sporo elementów dyskusyjnych, z których najistotniejsze wypunktowano poniżej:

1. Przyjęty sposób zredagowania pracy zmniejsza jej czytelność, w pewnych miejscach brakuje ciągłości, w tym elementów wprowadzenia, dyskusji, a w szczególności powiązania poszczególnych części pracy. Ponadto wprowadza niejasności w postaci powtarzających się numerów rysunków, tabel, czy rozdziałów.
2. Doktorantka jest pierwszą autorką tylko jednego z trzech opublikowanych artykułów (jest również pierwszą autorką w artykule, który na ten moment nie został jeszcze opublikowany), które stanowią trzon pracy. Dodatkowo artykuły te są wieloautorskie. Pojawia się zatem pytanie o faktyczny udział Doktorantki w pracach nad artykułami, który został jedynie lakonicznie wspomniany i nie pozwala na precyzyjną ocenę zakresu przeprowadzonych prac.
3. Tytuł pierwszego rozdziału („*Global energy and environment*”) jest zbyt ogólny i nie do końca odzwierciedla jego treść.
4. Rozdział 1.1 powinien być poprzedzony ogólnym wprowadzeniem do tematyki i wyjaśnieniem przyjętej formuły pracy. Brakuje wyjaśnienia w jaki sposób artykuł wpisuje się w tematykę doktoratu, czyli analizy LCA. Artykuły naukowe z założenia tworzą jedną całość, od wprowadzenia po dyskusję i wnioski z prowadzonych badań, wprowadzenie ich do treści rozprawy doktorskiej zaburza nieco logiczny układ pracy, dlatego wymaga wyjaśnienia.
5. Artykuł w rozdziale 1.1 został przygotowany na podstawie danych z 2019 roku, a zatem stosunkowo nieaktualnych, zwłaszcza w kontekście sektora energetycznego w krajach EU. Warto byłoby w pracy przynajmniej zawrzeć komentarz odnośnie zmian, które zaszły od 2019 r. Zawarte w artykule wnioski (punkt 4, *Conclusions*) są bardzo ogólne, a wniosek, który mógłby uzasadniać uwzględnienie artykułu w pracy doktorskiej, tj. „Thus, by using economic and environmental analysis tool, e.g. such as Life Cycle Assessment (LCA) it is possible to assist the decision-making process in identifying an optimal solution for captured CO<sub>2</sub>” nie jest wnioskiem wyciągniętym na podstawie prac przeprowadzonych w artykule, a jedynie generalnym stwierdzeniem.
6. W rozdziale 1.2.1.4 pojawiają się równania reakcji – wiele z nich zostało błędnie zapisanych – (1), (6), (9), (11).
7. Niektóre z rysunków opracowanych przez Autorkę wydają się zbyt uproszczone jak na pracę doktorską (np. Figure 1, str. 19; Figure 4, str. 39) – nie jest jasne, co mają reprezentować przedstawione schematy, a opisy są zbyt ogólne i/lub niepełne.
8. W rozdziale 1 brakuje wniosków, które wskazałyby lukę badawczą i prowadziłyby do sformułowania tezy badawczej.
9. W rozdziale 2 pojawia się stwierdzenie „It (-LCA-) is indeed an outstanding tool for examining the environmental impact...”. Warto podkreślić, że LCA nie jest narzędziem, a raczej metodą naukową. Analizy LCA można prowadzić z wykorzystaniem różnych narzędzi (np. programów typu SimaPro). Ponadto w rozdziale tym pojawia się sporo niejasnych sformułowań, np. „There are some studies combined LCA with CCS” (nie jest jasne co to oznacza); “Furthermore, as mentioned above in Chapter 2.3, there are several strong arguments showing that life cycle analyses...” (Doktorantka nie pokazuje wcześniej żadnych silnych argumentów, a jedynie przedstawia przegląd literatury).



10. Zdaniem recenzentki baza Google scholar (np. Figure 6, str 43) nie jest najlepszą bazą do wyszukiwania informacji naukowych, gdyż zawiera także opracowania, które w żaden sposób nie podlegają rzetelnej recenzji. Bardziej właściwe jest wykorzystanie do tego celu np. bazy Science Direct czy Scopus.
11. Rozdział 3, zatytułowany *Literature summary*, jest rozdziałem bardzo krótkim (dwustronicowym), którego obecność nie do końca jest jasna dla recenzentki. Wbrew tytułowi nie zawiera przeglądu literatury, a jedynie dość chaotyczne wprowadzenie do technologii CCU, ale także do transportu dwutlenku węgla za pomocą rurociągów oraz liczne nawiązania do wcześniejszych rozdziałów. Tytuł z pewnością jest zbyt ogólny i nieadekwatny do treści.
12. W rozdziale 3 Doktorantka stwierdza „In comparison to CCS, the CCU is a step forward in carbon capture technology”. Jest to dość kontrowersyjne stwierdzenie, zwłaszcza w świetle badań doktorantki (CCU w analizie LCA nie wypada lepiej, niż CCS).
13. W rozdziale 4.2, zatytułowanym *Innovations*, Doktorantka podjęła próbę wskazania innowacyjnych elementów przedstawionych prac. Jednak nie wszystkie wskazane punkty mają w istocie taką naturę. Przykładowo, pierwszy z podpunktów jest właściwie tylko stwierdzeniem czy hipotezą („Holistic LCA analysis (...) can significantly contribute to a better understanding of their environmental impacts, support decisions aimed at reducing CO<sub>2</sub> emissions and decarbonizing the energy sector and cement industry”). Wskazane byłoby bardziej szczegółowe określenie nowatorskich cech pracy.
14. Rozdział 6 jest w istocie artykułem przygotowanym do publikacji (publikacja (2)), jednak nieopublikowanym. Nasuwa się pytanie dlaczego artykuł ten nie został opublikowany, a w związku z tym dlaczego przyjęto taką formę rozdziału 6, w którym pojawiają się niepotrzebne elementy, jak streszczenie, powtórzenia we wprowadzeniu i metodologii analiz (w stosunku do wcześniejszych rozdziałów), itp., które można było wyeliminować. Ponadto, we wprowadzeniu pojawia się rysunek z informacjami na temat Polityki Energetycznej Polski do 2040 (PEP2040) (Figure 1 str. 74), zastanawia, w kontekście tematyki pracy, dlaczego nie ma tam nic o CC(U)S? Nie jest również jasne, skąd wzięto dane techniczne do analiz przedstawionych w tym rozdziale (strumienie, ich parametry, itp.) – czy z modelu (a jeśli tak, kto był jego autorem) czy z danych pomiarowych na rzeczywistym obiekcie. W Tabeli 1 (str. 87) pojawia się wielkość *Recovery*, która prawdopodobnie dotyczy odzysku CO<sub>2</sub>, jednak nie jest to wyjaśnione, nie jest również jasne, w jaki sposób zostało wyznaczone. Dodatkowo zastanawiająca jest niska wartość tego wskaźnika (50,1%) oznaczająca, że połowa CO<sub>2</sub> ze spalin trafia do atmosfery.
15. Czy przyjęcie końcowego ciśnienia CO<sub>2</sub> (outlet pressure, Tabela 5 str. 89) równego 8 bar nie jest zbyt niskie, zakładając straty ciśnienia w rurociągu na jego całkowitej długości? Czy założono, że na trasie będą dodatkowe stacje sprężarkowe?
16. Biorąc pod uwagę ograniczoną dyskusję i ogólnikowość wniosków zawartych w rozdziale 6, nasuwa się pytanie o potencjalne sposoby zwiększenia efektywności wdrożenia instalacji CCS w kontekście wpływu na środowisko.

17. W analizowanych przypadkach Autorka wprowadza granice systemów, przyjmując rozwiązanie gate-to-gate, co ma uzasadnienie, jednak właściwe byłoby zawrzeć bardziej szczegółową dyskusję na temat zalet i ograniczeń takiego podejścia.
18. W dwóch z trzech wykorzystanych w pracy opublikowanych artykułach Doktorantka nie jest pierwszą autorką, a w pracy nie jest wyjaśnione, poza ogólnymi stwierdzeniami, jaki w istocie był wkład w przygotowanie tych publikacji. Dla oceny pracy istotne byłoby wskazanie tych elementów, które zostały wykonane przez Doktorantkę oraz podkreślenie nowatorskich rozwiązań w tym zakresie.
19. W rozdziale ósmym, w mniemaniu recenzentki, brakuje jasnego wskazania różnic wynikających z wyboru dwóch lokalizacji (Polski i Włoch). Wydaje się, że przyjęto wyłącznie różnicę w miksie energetycznym. Ponadto, do analiz przyjęto dane z roku 2020 (dotyczące mixu energetycznego), a zatem pojawia się pewna niekonsekwencja w stosunku do wcześniejszych analiz – dlaczego przyjęto taki punkt odniesienia?
20. Dla wybranych 5 kategorii wpływu w analizie LCA w rozdziale 8, wprowadzenie instalacji CC(U)S powoduje drastyczny wzrost wartości w przypadku 4 z nich. Pojawia się pytanie o zasadność takiego rozwiązania – w opinii recenzentki dyskusja tych wyników byłaby niezwykle istotna z punktu widzenia użyteczności instalacji CCUS, gdyż można dojść do wniosku, że czynią więcej szkody niż pożytku.
21. W pracy brakuje dyskusji o wpływie przyjmowanych założeń na wyniki, o ograniczeniach modeli oraz analiz, a także o kierunku dalszych prac, które byłyby wskazane dla lepszego zrozumienia tematyki analiz LCA w ocenie łańcucha CC(U)S. Brakuje jednoznacznego stwierdzenia, czy założone tezy badawcze znajdują potwierdzenie w zrealizowanych badaniach.

## 5. INNE UWAGI

Praca została wydana w formie monografii. Praca jest estetyczna, napisana jest językiem technicznym. Błędy i niedociągnięcia natury merytorycznej, stanowiące podstawę do dyskusji podczas obrony doktoratu, wskazano w punkcie 4 niniejszej recenzji. Praca, od strony graficznej jest wykonana estetycznie, zawiera jednak pewne usterki redakcyjne, błędy językowe i nieścisłości gramatycznych, wśród których wskazać można:

1. Figure 2, str. 20 – dobrze by było umieścić rozwinięcia skrótów (PTSA, PSA, etc.). Przedstawione metody nie stanowią wszystkich, dlatego warto by było w podpisie umieścić słowo „wybrane” (*selected*).
2. W tekście znajduje się sporo błędów językowych, na które warto zwrócić uwagę przy ewentualnych dalszych publikacjach.
3. Wydaje się, że w tytule czwartego rozdziału nie powinno być przecinków po słowie thesis oraz goals (*Thesis, goals, and scope of dissertation*). Być może warto byłoby przemyśleć tytuł rozdziału.
4. W tekście pojawiają się odniesienia do tabel czy rysunków, których w pracy nie ma. Przykładowo, w rozdziale 7 na str. 135 pojawia się odniesienie do tabeli 1.2 w Rozdziale 1 – nie ma takiej tabeli. Podobnie, na str. 139 znajdują się odniesienia do rysunków 1.3 i 1.4, czy też na stronie 142 do Tabel 1.4, 3.4, 5.1 i 6.4.

*Kara*



## 6. WNIOSEK KOŃCOWY

Opiniowana praca doktorska Pani mgr inż. Pauliny Popielak stanowi interesujący i wartościowy wkład w zastosowanie analizy LCA do oceny łańcucha wychwytu i utylizacji dwutlenku węgla. Pomimo licznych wskazanych przez recenzentkę usterek, plan pracy został zrealizowany, a postawiona teza została zweryfikowana i potwierdzona wynikami przeprowadzonych badań.

Stwierdzam zatem, że cel pracy został osiągnięty, a Autorka wykazała się umiejętnością samodzielnego formułowania problemów naukowych i ich rozwiązywania. Uważam, że przedstawiona praca doktorska mgr inż. Pauliny Popielak pt. *Zastosowanie analizy LCA do oceny łańcucha wychwytu i utylizacji CO<sub>2</sub>* odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki, a także w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W związku z powyższym stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Anna Jurek-Osiewicz

