

prof. dr hab. inż. Jakub Kupecki

Kopenhaga, 11 września 2024 r.

Instytut Energetyki – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Mory 8, 01-330 Warszawa
jakub.kupecki@ien.com.pl

Recenzja rozprawy 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 CO₂

Zaciskający się gorset regulacyjny wymusza na wszystkich branżach coraz bardziej rygorystyczne wymogi w zakresie redukcji poziomu emisji. Ich spełnienie możliwe jest wtedy i tylko wtedy, gdy ciągi technologiczne, w tym procesy energetyczne oraz przemysłowe, poddane zostaną rzetelnej ocenie, z wykorzystaniem narzędzi opartych na ustandaryzowanej metodologii. Takie narzędzia reprezentuje klasa kodów obliczeniowych *life cycle assessment* (LCA), które są rozpowszechnione i z powodzeniem stosowane od wielu lat jako narzędzie porównawcze w ocenie poziomu emisji atrybuowanych do produktów i procesów różnego typu. Takim produktem jest również energia elektryczna, która może być oceniana w wielu kryteriach oraz cement.

Zmiany, które obserwujemy na przestrzeni ostatnich lat wymusiły na przedsiębiorstwach rozbudowane raportowanie pozaekonomiczne, zaś kolejne lata będą wymuszały jeszcze większą dokładność przedstawiania, w ramach raportowania ESG, całości oddziaływania podmiotów na środowisko. To oznacza, iż przedmiotem oceny środowiskowej nie będzie jedynie proces technologiczny ale wszystkie działania towarzyszące związane z pozyskaniem i przygotowaniem substratów jak również koszty energetyczne i środowiskowe zakończenia cyklu życia produktu. Należy zatem oczekiwać, iż w niedalekiej przyszłości podstawowe decyzje konsumenckie będą w równym stopniu oparte na czynnikach ekonomicznych jak i na kwestii emisyjności nabywanych dóbr. Praca mgr inż. Pauliny Popielak wpisuje się w aktualne trendy w obszarze nauk inżynierskich, obejmujące kompleksową ocenę pełnego cyklu życia *od kołyski do grobu* (ang. *from the cradle to the grave*). Tematyka podejmowana w pracy jest zatem bardzo aktualna i dotyczy ważnego aspektu jakim jest pełna ocena śladu węglowego wybranych technologii energetycznych, które również, wraz ze wzrostem świadomości społecznej, są przedmiotem krytyki gdy nie są należycie niskoemisyjne. Te same kryteria stosuje się w przemyśle energochłonnym i wysokoemisyjnym, a taki jest właśnie reprezentowany przez branżę cementową.

Na przestrzeni ostatnich trzech dekad rozwinięte zostały narzędzia i modele ekonomiczne, modele termodynamiczne, egzergetyczne, techniczno-ekonomiczne oraz ich kombinacje. Metody LCA pozwalają jednak rozważać różne systemy i procesy bez wnikania w szczegółową specyfikę i fizykę zachodzących zjawisk, na rzecz prowadzenia szczegółowej oceny wymaganych na wejściu do procesu strumieni substratów i energii, uwzględniając ich źródło pochodzenia oraz emisyjność i energochłonność ich pozyskania, przygotowania i dostarczenia. Oznacza to, że poziom precyzji wyników analiz LCA będzie w znacznej mierze zależał od prawidłowości danych wsadowych, będących specyfikacją wszystkich strumieni wejściowych do poddawanego ocenie obiektu lub technologii (ang. *inventory*).

Doktorantka podjęła się przeprowadzenia badań, które mają podwójny wymiar i znacznie. Z jednej strony badania, w aspekcie naukowym, dotyczą metodyki oceny wybranych wariantów wychwytu i utylizacji dwutlenku węgla a z drugiej, w ujęciu praktycznym, pozwalają na rynkowe określenie potencjału technologii w wybranych układach ciągu technologicznego. Efektem wymiernym pracy jest wyznaczenie mierzalnych wartości, tj. parametrów charakterystycznych w kryteriach emisyjności dla wybranych konfiguracji instalacji energetycznych – trzech studiów przypadku, których analiza porównawcza objęła ocenę:

1. Elektrowni zlokalizowanej w Polsce w wariantach z i bez CCS.
2. Elektrowni i cementowni z CCUS.
3. Elektrowni opartej na obiegu gazowym w wariantach z i bez CCS, zlokalizowanych w Polsce i we Włoszech.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Pauliny Popielak napisana jest w języku angielski i jest tekstem, który, zważywszy na jego jakość, czyta się bardzo dobrze. Kandydatka wykazała się bardzo dobrą umiejętnością redakcji tekstów naukowych w języku angielski. Praca obejmuje łącznie 143 strony, przy czym tekst właściwy pracy (z pominięciem stron tytułowych, streszczenia, spisu treści, wykazu skrótów, bibliografii, publikacji składających się na cykl i oświadczeń autorów) zawiera się w 100 stronach. Doktorantka wyłączyła z numeracji stron sekcje, które zawierają publikacje składające się na cykl. To pozwoliło uniknięcia sztucznego zawyżenia liczby stron rozprawy. Praca podzielona została na 9 rozdziałów. Autorka dokonała analizy literatury, przywołując w pracy liczne pozycje, niestety w układzie alfabetycznym i bez numeracji. W tym zestawieniu znalazła się jedna praca, w której Doktorantka jest pierwszym autorem oraz dwie prace, których jest współautorką. Prace te zawarte są w tekście rozprawy.

Ze względu na konstrukcję tekstu rozprawy, w tym zamieszczenie publikacji, recenzent uznaje omówienie każdego z rozdziałów za zbędne. Nie mniej jednak, podczas szczegółowej analizy tekstu dostrzeżone zostały mankamenty, które zostały omówione poniżej w rozbiciu na uwagi krytyczne do części merytorycznej oraz uwagi redakcyjne.

Uwagi krytyczne

1. Praca rozpoczyna od streszczenie w dwóch językach, po czym zamieszczona została, bez jakiegokolwiek wstępu, pierwsza z publikacji. Rozprawa zatem nie zawiera wprowadzenia.
2. Brak jest klarownego i precyzyjnego zdefiniowania wkładu autorskiego Kandydatki w prace, które zawarte zostały w rozprawie. Z niewielką pomocą przychodzi CRediT.
3. W pracy stosowane są skróty, które przy ich pierwszym pojawieniu się w tekście nie zostały rozwinięte. Przykładem jest EOR (str. 25).
4. Sekcja dotycząca wytwarzania eteru dimetylowego (DME) (str. 26-28) zawiera powtórzenia i zapis tych samych równań ale w innym kontekście. Stosowany jest niekonsekwentny zapis formuły DME: CH_3OCH_3 oraz $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$. Nieprawidłowe współczynniki stechiometryczne w równaniach (9) i (11) recenzent pozostawia bez komentarza.
5. W bilansie bloku przedstawionym w Tabeli 3 suma strumieni masowych paliwa oraz powietrza pierwotnego i wtórnego wynosi 1638 kg/h zaś strumień spalin wynosi 1645,2 kg/h. Popioły pozostają w zestawieniu pominięte.
6. W Tabeli 7.3 (będącej częścią opublikowanej wcześniej pracy) jako jednostkę energii wskazano kW nie zaś kWh. W tej samej tabeli zawarty jest parametr 'Heat energy' wyrażony w MJ/h.
7. Schematy przedstawione na Rys. 7.7 – 7.1 należałoby zastąpić (lub uzupełnić) schematami procesowymi lub schematami koncepcyjnymi, które będą znacznie bardziej klarowne dla czytelnika nie zaznajomionego ze środowiskiem Aspen Plus, w którym powstały przedstawione schematy.
8. W sekcji 2.1 należałoby podkreślić że narzędzia LCA pozwalają przede wszystkim określić rzeczywisty ślad węglowy. Nie jest jasne co w kontekście rozprawy oznacza określenie „environmental hotspots”.
9. Google Scholar nie powinno stanowić punktu odniesienia w pracach naukowych (vide Fig. 6, str. 43). Głównymi bazami winny być WoS lub Scopus.
10. Definiując stan wiedzy i luki (vide Fig. 7) należałoby wskazać datę odniesienia. Można domniemywać, iż Kandydatka odnosi się do stanu wiedzy z roku 2022. Dodatkowo, należy zaznaczyć, iż przeprowadzonych zostało wiele analiz LCA dot. krajowego systemu elektroenergetycznego i/lub technologii przemysłowych obecnych na polskim

rynku, jednakże w większości nie zostały one opublikowane (to wyjaśnienie relatywnie krótkiej listy referencji w Tabeli 7).

11. Pierwszy punkt wskazujący na innowacyjność badań jest oczywisty. Narzędzia LCA z *definicji* dostarczają holistycznej wiedzy na temat wpływu technologii na środowisko i służą wspieraniu decyzji politycznych dot. wyboru ścieżki dekarbonizacji.

Uwagi redakcyjne

W zakresie końcowej redakcji pracy, Autorka nie ustrzegła się drobnych błędów redakcyjnych, które zostały wymienione poniżej:

1. Zapis or1 kWh (str. 40)
2. Fair transition → Just transition (str. 49)
3. Emission into environment → to environment (str. 50)
4. polish fossil-fuels → Polish fossil-fuels
5. Zapis liczb w Tabelach 7.1, 7.2 i 7.3 nie odpowiada standardom inżynierskim, przykładowo „112257.9”, „432000” oraz „1056720.79”, podczas gdy w Tabeli 7.4 Doktorantka posłużyła się zapisem „1.14970 x 10⁻²”

Przedstawione powyżej uwagi mają małe znaczenie i nie umniejszają jakości naukowej pracy i jej walorom poznawczym. Recenzent z uznaniem ocenia jakość pracy w zakresie jej formatowania i redakcji tekstu, który jest napisany w sposób wręcz zachęcający do lektury. Składnia, interpunkcja i konstrukcja tekstu jest wyróżniająca.

W zakresie doprecyzowania informacji przedstawionych w rozprawie, nasuwają się następujące pytania, wymagające udzielenia odpowiedzi.

Pytanie 1. Na ile specyfika obiektów referencyjnych zlokalizowanych w Polsce lub we Włoszech wprowadza istotnie inne założenia niż analogiczne obiekty w innych krajach? Czy przedstawione wyniki stanowią analizę reprezentatywnej próby, czy dla elektrowni lub cementowni zlokalizowanych w innych krajach należy wykonać całą analizę LCA od nowa?

Pytanie 2. Proszę o doprecyzowanie wsadu Autorki w metodologię i wykonywanie analiz LCA w szczególności z uwzględnieniem przygotowania danych wsadowych, omówienia brakujących danych i/lub danych które musiały zostać przygotowane na podstawie eksperckiej obróbki istniejących danych zastępczych.

Pytanie 3. W bilansie bloku przedstawionym w Tabeli 3 suma strumieni masowych paliwa oraz powietrza pierwotnego i wtórnego wynosi 1638 kg/h zaś strumień spalin wynosi 1645,2 kg/h.

Proszę o wyjaśnienie tej rozbieżności w bilansie, również w kontekście uwzględnienia popiołów w bilansie masowym bloku.

Pytanie 4. Czy komponenty technologiczne (kierunek dostaw technologii) dla cementowni i elektrowni ma istotne znaczenie (wagę) podczas analizy LCA tych obiektów? Czy zmiana regionu pochodzenia technologii pomiędzy różnymi geograficznie kierunkami dostaw i zapewnienia usług inżynierskich ma wg Doktorantki istotne znaczenie w definiowaniu ścieżek dekarbonizacji?

Powyższe pytania mają charakter prośby o doprecyzowanie informacji i przedstawienie dodatkowych założeń, których być może zabrakło w tekście rozprawy ale które stanowiły element warsztatu naukowego a które Doktorantka brała pod uwagę w toku prowadzonych prac badawczych.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując powyższy wywód, stwierdzam, iż przedstawiona do recenzji praca magister inżynier Pauliny Popielak **jest pozycją naukową**. Poza walorami naukowymi, rozprawa wraz z przedstawioną w niej metodologią **może mieć szczególnie znacznie praktyczne dla obszaru nauk inżynieryjno-technicznego w zakresie wyboru rozwiązań technologicznych na drodze do dekarbonizacji konkretnych gałęzi gospodarki**. Prace analityczne przeprowadzone zostały z uwzględnieniem zidentyfikowanych luk w wiedzy na temat oceny technologii zaś założenia i metodologia zostały oparte na kompleksowej analizie literatury. W pracy zawarte zostały liczne dane, które zostały omówione i poddane krytycznej ocenie. To dowodzi zdolności analizowania informacji źródłowych i logicznego wnioskowania. W przypadku analiz LCA, te kompetencje są kluczowe dla właściwego definiowania założeń i warunków brzegowych, zaś krytyczna analiza wyników stanowi podstawę formułowania rekomendacji. **Prace te przeprowadzone zostały w oparciu o metody naukowe i zostały skutecznie zastosowane do oceny technologii obecnych na krajowym rynku.**

W związku z powyższym, stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr. inż. Pauliny Popielak pt: *Application of LCA analysis for evaluation of carbon capture and utilization supply chain* **spełnia ustawowe wymagania** i wnioskuję o dopuszczenie Doktorantki do kolejnych etapów przewodu doktorskiego oraz publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

prof. dr hab. inż. Jakub Kupecki