

dr hab. inż. Izabela Majchrzak-Kucęba, prof. P.Cz
Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii
Politechnika Częstochowska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Sylwii Berdowskiej

pt.: „Wpływ membranowo - kriogenicznej technologii separacji tlenu z powietrza i instalacji CCS na efektywność supernadkrytycznego bloku węglowego z kotłem pyłowym”.

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji jest pismo Prodziekana ds. Organizacji i Rozwoju Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki RIE-BD/4/332/2014/2015 z dnia 09.06.2015 roku.

2. Przedmiot i zawartość rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Sylwii Berdowskiej pt. „Wpływ membranowo - kriogenicznej technologii separacji tlenu z powietrza i instalacji CCS na efektywność supernadkrytycznego bloku węglowego z kotłem pyłowym” wykonana na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej.

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz, a promotorem pomocniczym dr inż. Anna Skorek –Osikowska.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-modelowy i liczy wraz z bibliografią, spisem rysunków i spisem tabel 142 strony. Praca składa się z 13 rozdziałów uwzględniając wstęp i uwagi końcowe. Rozprawa zawiera 66 rysunków, 18 tabel oraz 106 pozycji bibliograficznych.

Wstęp jako rozdział 1 rozprawy pełni funkcję wprowadzenia do tematyki podjętej w pracy. W rozdziale 2 *Cel i zakres pracy*, Doktorantka przedstawiła główny cel pracy czyli określenie możliwości wykorzystania hybrydowego membranowo – kriogenicznego separatora tlenu, w bloku węglowym z kotłem pyłowym opalanym węglem kamiennym, pracującym w technologii oxy-spalania z instalacją wychwytu i sprężania CO₂. Rozdział 3 pracy *Podstawy prawne regulujące emisję CO₂ w Polsce i w Unii Europejskiej* zawiera przegląd aktualnych danych odnośnie instrumentów prawnych dotyczących ograniczania emisji CO₂ zarówno w Polsce jak i w Unii Europejskiej. W rozdziale 4 *Metody zmniejszania emisji CO₂ w blokach węglowych* Doktorantka dokonała przeglądu literaturowego technologii wychwytu CO₂ z uwzględnieniem wychwytu przed procesem spalania, po procesie spalania oraz spalania w atmosferze tlenowej. Opisane zostały także metody separacji CO₂ ze spalin. W rozdziale 5 Doktorantka scharakteryzowała metody separacji tlenu z powietrza, aby w kolejnych: 6 i 7 rozdziale pracy skupić się odpowiednio na membranowej i kriogenicznej technologii separacji tlenu. Rozdziały te zawierają także wyniki badań własnych Doktorantki odnośnie modelowania procesu separacji O₂ z powietrza z zastosowaniem membran oraz pojedynczej i podwójnej kolumny rektyfikacyjnej. Rozdział 8 pracy zawiera analizę

integracji modułu membranowego z kriogenicznym separatorem tlenu. Kolejne dwa rozdziały pracy: 9 i 10 zawierają charakterystykę supernadkrytycznego bloku węglowego typu oxy oraz jego analizę termodynamiczną. Ostatnie dwa rozdziały pracy zawierające wyniki badań własnych Doktorantki to rozdział 11 opisujący wyniki analizy integracji instalacji tlenowni oraz instalacji sprężania i separacji CO₂ z blokiem energetycznym oraz rozdział 12 zawierający wyniki analizy efektywności ekonomicznej bloku energetycznego z tlenownią membranowo - kriogeniczną. Ostatni 13 rozdział pracy zawiera Uwagi końcowe: ogólne i szczegółowe.

Podsumowując, przyjęty układ rozprawy oceniam jako logiczny i czytelny. Strona edytorska pracy nie budzi zastrzeżeń. Strona graficzna rozprawy jest bardzo staranna a rysunki i wykresy dopracowane. Dobór pozycji bibliograficznych jest odpowiedni, choć brakuje w nim publikacji Doktorantki.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1 Ocena doboru tematu i postawionego celu

Ambitne cele unijnej polityki klimatycznej, w tym redukcja emisji CO₂ o 40%, świadczą o dużym zaangażowaniu UE w budowę gospodarki niskoemisyjnej i stanowią jednocześnie duże wyzwanie dla Polski, z uwagi na skalę wykorzystywania węgla w naszym kraju. Z uwagi na europejskie zobowiązania do przechodzenia na technologie niskoemisyjne, rozwój technologii czystego węgla musi następować równolegle z rozwojem technologii podnoszenia wydajności i ograniczania emisji CO₂ między innymi poprzez rozwój technologii CCS (ang. carbon capture and storage). Aby móc wdrażać politykę klimatyczną w sposób efektywny ekonomicznie potrzebne są prace nie tylko w kierunku rozwoju samej technologii wychwytywania i magazynowania CO₂ ale także ocena kosztów jej realizacji oraz jej wpływ na poziom cen energii. Choć koszty wdrażania europejskiej polityki klimatycznej w Polsce szacuje się na bardzo wysokie, pamiętać należy, iż są one także szansą na unowocześnienie struktury polskiej gospodarki. Postęp technologiczny w energetyce nie będzie możliwy między innymi bez rozwoju i wdrażania czystych technologii węglowych.

Jedną z takich technologii jest spalanie w atmosferze tlenowej (ang. oxy-fuel combustion). Dla rozwoju tej technologii potrzebne są obok badań doświadczalnych w dużej skali, które dostarczają danych procesowych i wytycznych projektowych dla układów tlenowego spalania węgla, badania modelowe wpływu zarówno jednostki separacji tlenu z powietrza (ang. ASU –Air Separation Unit) jak i jednostki oczyszczania i sprężania CO₂ (ang. CPU CO₂ purification unit) na efektywność bloków węglowych. Niezbędne są zatem pogłębione studia techniczno-ekonomiczne odnośnie optymalizacji procesów w tych dwóch jednostkach oraz ich integracji z elektrownią. Wspomniane działania dostarczyć mogą danych potrzebnych do zmniejszenia ryzyka technologicznego wprowadzenia tej technologii a tym samym pozwolić będą mogły na podjęcie decyzji o dalszych krokach odnośnie technologii spalania w atmosferze tlenowej.

Na obecnym etapie rozwoju technologicznego spalania tlenowego pod kątem ograniczenia emisji CO₂ do zastosowań w sektorze energetycznym i przy posiadaniu doświadczeń pracy takich instalacji w warunkach rzeczywistych potrzebne są prace w kierunku obniżenia energochłonności tych instalacji.

Niezbędne są zatem takie prace i badania modelowe jak te zaproponowane przez Doktorantkę w niniejszej rozprawie. Rozprawie, która porusza istotne zagadnienia modelowania wpływu procesu membranowo - kriogenicznego wytwarzania tlenu i instalacji separacji i sprężania CO₂ na efektywność pracy bloku węglowego.

Mając powyższe na uwadze należy stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się niewątpliwie w istotny nurt badań a temat i zakres pracy został trafnie wybrany.

Doktorantka postawiła sobie w rozdziale 2 *Cel i zakres pracy* ambitny, główny cel do rozwiązania - *określenie możliwości wykorzystania hybrydowego membranowo - kriogenicznego separatora tlenu, w bloku węglowym z kotłem pyłowym opalanym węglem kamiennym, pracującym w technologii oxy-spalania z instalacją wychwytu i sprężania CO₂* - na drodze rozważań teoretycznych i badań modelowych. Zarówno cel główny jak i cele szczegółowe pracy osadzone są dobrze w aktualnej problematyce naukowej odnośnie metod separacji tlenu z powietrza i samej technologii spalania tlenowego a także w praktyce zastosowań tych metod w skali rzeczywistej –blokach energetycznych.

Należy podkreślić także konsekwentne dążenie Doktorantki do zrealizowania postawionych celów, co niewątpliwie świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu tematyki i solidnym przygotowaniu do prowadzenia rozważań i analiz teoretycznych oraz eksperymentów modelowych. Potwierdza to także bardzo dobrą znajomość przez doktorantkę narzędzi zastosowanych w pracy do eksperymentów symulacyjnych i obliczeń tj. programu Aspen Plus, GateCycleTM.

Podsumowując, podjęty przez doktorantkę temat rozprawy oraz sformułowane cele są zasadne i ważne z naukowego i praktycznego punktu.

3.2 Ocena wartości naukowej

Po analizie rozprawy za najważniejsze osiągnięcia naukowe Doktorantki uznać można:

- Analizę czystości i stopnia odzysku O₂ w procesie jego separacji z powietrza przy użyciu membran o różnych współczynnikach przenikalności dla O₂ i N₂ wraz z oceną energochłonności procesu.
- Opracowanie modelu i wyznaczenie energochłonności procesu separacji O₂ z powietrza przy pomocy pojedynczej i podwójnej kolumny destylacyjnej wraz z propozycją sposobów jej obniżenia.
- Wyznaczenie minimalnej energochłonności tlenowni membranowo - kriogenicznej oraz zaproponowanie sposobów jej obniżenia min. poprzez zastosowanie dwusekcyjnej pompy próżniowej, obniżenie temperatury chłodzenia między sekcjami urządzeń w układzie tlenowni czy zwiększenie współczynnika selektywności membrany.
- Opracowanie modelu kotła zintegrowanego z tlenownią membranowo - kriogeniczną oraz układem separacji i sprężania CO₂, wykorzystanego w badaniach symulacyjnych.
- Przeprowadzenie badań symulacyjnych integracji jednostek produkcji tlenu i separacji CO₂ z obiegiem referencyjnym bloku energetycznego wraz z oszacowaniem wpływu wprowadzenia instalacji tlenowej i instalacji separacji i sprężania CO₂ na sprawność bloku energetycznego. Przeprowadzenie obliczeń wskaźnika potrzeb własnych poszczególnych układów wchodzących w skład bloku węglowego tj. tlenowni oraz instalacji separacji i sprężania CO₂ oraz ocena ubytku sprawności wytwarzania energii elektrycznej/sprawności bloku.
- Zaproponowanie poprawy sprawności wytwarzania energii elektrycznej poprzez integrację instalacji tlenowni hybrydowej oraz instalacji separacji i sprężania CO₂ z obiegiem parowym bloku energetycznego i tym samym wykorzystując ciepło odpadowe z tych układów do podgrzania kondensatu. Opracowane przez doktorantkę rozwiązanie uznać można za innowacyjny element pracy.
- Opisanie sposobu wyznaczenia granicznej ceny sprzedaży energii elektrycznej dla układu bloku referencyjnego oraz dla bloku pracującego w technologii spalania w atmosferze tlenowej.

Zdecydowanie podkreślić należy obszerną analizę ekonomiczną wykonaną przez Doktorantkę dla zaproponowanego przez nią układu energetycznego obejmującą min. wyznaczenie granicznej ceny sprzedaży energii elektrycznej dla układu bloku referencyjnego

oraz bloku pracującego w technologii spalania w atmosferze tlenowej oraz analizę wrażliwości (na cenę paliwa, koszt uprawnień do emisji CO₂ czy dyspozycyjność bloku). Dokonana analiza jest niezmiernie istotna z punktu widzenia oceny potencjału tej technologii w świetle wymagań międzynarodowych. Docenić należy także intensywne poszukiwania Doktorantki odnośnie obniżenia energochłonności separacji O₂ z powietrza w membranowo-kriogenicznej jednostce ASU.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Mimo dużych walorów poznawczych i praktycznych pracy podczas jej lektury pojawiają się pewne pytania wymagające wyjaśnienia i szerszej dyskusji:

- 1) W obszernym przeglądzie literatury brakuje informacji odnośnie badań modelowych procesu kriogenicznej i membranowej separacji O₂ z powietrza, instalacji separacji i sprężania CO₂ czy też ich wpływu na charakterystyki termodynamiczne i ekonomiczne bloków energetycznych. Czy takie badania były prowadzone? Jakiego stosowano w tym celu narzędzia? Informacje te mogłyby być pomocne w dalszej części pracy do porównania wyników jakie zostały uzyskane w pracy przez Doktorantkę z pracami innych Autorów. W przeglądzie stanu wiedzy nie ma też informacji nt. instalacji separacji i sprężania CO₂ (CPU) proponowanych w przypadku spalania tlenowego. Na jakiej podstawie Doktorantka wybrała zaproponowane w pracy rozwiązania technologiczne w instalacji CPU i czym się kierowała?.
- 2) Z korzyścią dla pracy byłoby zawarcie w niej krytycznego podsumowania przeglądu literatury, który uzasadniałby podjęcie tematu przez Doktorantkę.
- 3) W pracy wskazany byłby choć krótki opis narzędzi zastosowanych przez Doktorantkę do eksperymentów symulacyjnych i obliczeń. Korzystne byłoby także odniesienie się do innych stosowanych narzędzi umożliwiających projektowanie, symulację, optymalizację i analizę układów zintegrowanych?
- 4) Dlaczego przy modelowaniu procesu separacji O₂ na module membranowym (Str. 40) w składzie powietrza nie uwzględniono Argonu a przy modelowaniu procesu separacji O₂ na podwójnej kolumnie kriogenicznej (Str. 61) uwzględniono Argon (0,009)?.
- 5) W przypadku integracji modułu membranowego z kriogenicznym rozpatrzono energochłonność. Jak kształtuje się czystość uzyskanego tlenu i stopień jego odzysku w module membranowo - kriogenicznym w stosunku do technologii membranowej czy kriogenicznej?.

Poniżej przedstawione zostały drobne uwagi, które mogą być przydatne podczas publikowania uzyskanych wyników:

- 1) pewne nieścisłości w wykazie ważniejszych oznaczeń i wykazie ważniejszych indeksów np. ASU jest „instalacja tlenowni”, powinno być (ang. Air Separation Unit), CCS jest – „instalacja sekwestracji i sprężania CO₂”, powinno być (ang. Carbon Capture and Storage)
- 2) główny cel pracy (str.13) proponuję zamiast „określenie możliwości wykorzystania hybrydowego separatora tlenu membranowo – kriogenicznego (...)” użyć „określenie możliwości wykorzystania hybrydowego, membranowo – kriogenicznego, separatora tlenu (...)”
- 3) Proponuję:
 - wybrać pomiędzy wieloma stosowanymi określeniami: „separacja tlenu z powietrza” czy „separacja powietrza” „separacja tlenu” „produkcja tlenu”,
 - Zgodnie z oficjalną nomenklaturą chemiczną stosować „ditlenek węgla” zamiast „dwutlenek węgla”.
 - Stosować „stężenie CO₂” a nie „koncentracja CO₂”

- 4) W przypadku porównania z danymi literaturowymi dobrze byłoby podać konkretne wartości a nie pozycję literaturową np. „W analizowanym przypadku układu z tlenownią hybrydową utrata sprawności wynosi 9,1 punktu procentowego jest więc niższa niż w przypadku zastosowania ASU kriogenicznego [lit].
- 5) W omawianym przez Doktorantkę przypadku separacji i sprężania CO₂ ze spalania tlenowego korzystniejsze byłoby używanie określenia „jednostka oczyszczania i sprężania CO₂ (CPU- carbon dioxide purification unit) niż „jednostka CCS”.

5. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Sylwii Berdowskiej rozwiązuje postawione oryginalnie zadanie naukowe dotyczące oceny wpływu membranowo-kriogenicznej technologii separacji tlenu z powietrza i instalacji CCS na efektywność supernadkrytycznego bloku węglowego z kotłem pyłowym. Doktorantka dzięki zastosowaniu technik symulacji komputerowej dane takie pozyskała. Doktorantka opracowała model kotła zintegrowanego z tlenownią membranowo - kriogeniczną oraz układem separacji i sprężania CO₂, a następnie przeprowadziła badania symulacyjne integracji jednostek produkcji tlenu i separacji CO₂ z obiegiem referencyjnym bloku energetycznego wraz z oszacowaniem wpływu wprowadzenia instalacji tlenowej i instalacji separacji i sprężania CO₂ na sprawność bloku energetycznego.

Stwierdzam, że cele postawione w rozprawie zostały osiągnięte. Doktorantka wykazała się nie tylko odpowiednią znajomością wiedzy w zakresie objętym tematem ale, także umiejętnościami planowania, programowania i prowadzenia eksperymentów naukowych. Doktorantka przeprowadziła liczne badania symulacyjne uzyskując oryginalne rezultaty. Opracowując wyniki Doktorantka udowodniła także, że potrafi prawidłowo je analizować, wnioskować i co istotne widzi kierunki dalszych prac. Świadczy to o odpowiednim przygotowaniu i predyspozycjach do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych. Pewnym mankamentem pracy jest to, iż brakuje w niej krytycznego podejścia doktorantki zarówno do danych literaturowych jak i do otrzymanych w wyniku przeprowadzonych badań rezultatów.

Uwagi krytyczne, które wymienione zostały w punkcie 4 recenzji nie obniżają jej pozytywnej wartości merytorycznej i pozytywnej ogólnej oceny dysertacji. Uwagi mają charakter dyskusyjny i być może wykorzystane zostaną przez Doktorantkę w dalszej pracy naukowej.

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska jest oryginalna i stanowi wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie: energetyka. Ma również znaczenie praktyczne.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych. Wobec powyższego, stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Sylwii Berdowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Przejdź-Łuba

